

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE FÍSICA
CURSO DE LICENCIATURA EM FÍSICA

AMANDA CLAUDIA MALAGI DA SILVA

EQUAÇÕES DE MAXWELL NO ENSINO MÉDIO: UMA PROPOSTA DE
MATERIAL DIDÁTICO TEMÁTICO

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2021

AMANDA CLAUDIA MALAGI DA SILVA

**EQUAÇÕES DE MAXWELL NO ENSINO MÉDIO: UMA PROPOSTA DE
MATERIAL DIDÁTICO TEMÁTICO**

Maxwell's equations in high school: a proposal for a thematic didactic material

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso Superior de Licenciatura em Física do Departamento Acadêmico de Física – DAFIS – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para a obtenção de título de Licenciada em Física.

Orientador: Prof. Dr. Jorge Alberto Lenz

Coorientador: Prof. Dr. Marcos Antônio Florczak

CURITIBA

2021



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

AMANDA CLAUDIA MALAGI DA SILVA

**EQUAÇÕES DE MAXWELL NO ENSINO MÉDIO: UMA PROPOSTA DE
MATERIAL DIDÁTICO TEMÁTICO**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Licenciada em Física da Universidade Tecnológica
Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 10/dezembro/2021

Jorge Alberto Lenz
Doutor
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Luciana Rocha Hirsch
Doutora
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Álvaro Emílio Leite
Doutor
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

CURITIBA

2021

AGRADECIMENTOS

Aos professores Dr. Jorge Lenz e Dr. Marcos Florczak, pela orientação neste trabalho e pelos ensinamentos ao longo de todo o curso.

Aos meus pais e irmão, por todo o apoio e cuidados.

Aos colegas que tive a oportunidade de conhecer ao longo do curso e, em especial, ao Gyovanne, pela mais bela amizade e por toda a ajuda neste trabalho.

Aos professores que fizeram parte da minha formação e, em especial, à professora Dra. Luciana Hirsch, quem suscitou-me o desejo por seguir carreira acadêmica e por quem tenho enorme admiração.

Aos professores que gentilmente aceitaram avaliar este trabalho: Dra. Luciana Hirsch e Dr. Álvaro Leite.

RESUMO

O eletromagnetismo clássico estuda a unificação entre os fenômenos elétricos, magnéticos e ópticos, e é fundamentalmente baseado nas quatro equações de Maxwell. Dada a importância destas equações para a teoria eletromagnética, este trabalho apresenta uma proposta de material didático para a sua abordagem no ensino de eletromagnetismo, em nível médio, a partir de algumas demonstrações experimentais. Para isso, analisa, de maneira qualitativa, a abordagem das equações fundamentais do eletromagnetismo em alguns livros didáticos do ensino médio, aprovados pelo Programa Nacional do Livro Didático (PNLD). Debate sobre a importância das atividades experimentais no ensino de física. Discorre sobre a teoria de transposição didática de Chevallard, sobre materiais e sequências didáticas. Conclui que as equações do eletromagnetismo são pouco discutidas nos livros didáticos de física do ensino médio, e que as atividades experimentais são essenciais para compreensão dos fenômenos eletromagnéticos e das equações que os descrevem, tal como proposto no material didático desenvolvido.

Palavras-chave: eletromagnetismo; material didático; demonstrações experimentais.

ABSTRACT

Classical electromagnetism studies the unification among electric, magnetic and optical phenomena, and it is fundamentally based on the four Maxwell's equations. Given the importance of these equations for the electromagnetic theory, this work presents a proposal of didactic material for its approach to the teaching of electromagnetism at high school level, based on experimental demonstrations. For this, analyses, in a qualitative way, the approach of the fundamental equations of electromagnetism in some high school textbooks, approved by the PNLD. Discusses about the importance of experimental activities to the physics teaching. Discusses about Chevallard's theory of didactic transposition, didactic materials and didactic sequences. Concludes that the electromagnetism equations are little discussed in the high school physics textbooks and that experimental activities are essential for the comprehension of electromagnetic phenomena and the equations that describe them, as proposed in the developed didactic material.

Keywords: electromagnetism; didactic material; experimental activities.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	8
1.1	Objetivo	10
1.1.1	Objetivo geral	10
1.1.2	Objetivos específicos	10
2	REFERENCIAL TEÓRICO	11
2.1	Equações de Maxwell	11
2.1.1	Lei de Gauss para eletricidade	12
2.1.2	Lei de Gauss para o magnetismo	14
2.1.3	Lei de Faraday-Lenz	15
2.1.4	Lei de Ampère-Maxwell	17
2.2	Transposição didática em ciências	19
2.3	Experimentação no ensino de física	21
2.4	Eletromagnetismo no ensino de ciências	23
2.5	Materiais didáticos	25
3	METODOLOGIA.....	27
3.1	Seleção e análise dos livros didáticos	28
3.1.1	Lei de Gauss para eletricidade	31
3.1.2	Lei de Gauss para o magnetismo	31
3.1.3	Lei de Faraday-Lenz	31
3.1.4	Lei de Ampère-Maxwell	32
3.2	Elaboração do material didático	33
4	MATERIAL DIDÁTICO.....	35
4.1	Lei de Gauss para a eletricidade	35
4.2	Lei de Gauss para o magnetismo.....	39
4.3	Lei de Faraday-Lenz	45
4.4	Lei de Ampère-Maxwell.....	47
5	CONCLUSÕES.....	50
	REFERÊNCIAS	51

1 INTRODUÇÃO

A teoria eletromagnética se dedica ao estudo dos fenômenos elétricos, magnéticos e ópticos. Esta teoria é constituída por cinco leis fundamentais: lei de Gauss para a eletrostática, lei de Gauss para o magnetismo, lei de Faraday-Lenz e lei de Ampère-Maxwell, matematicamente descritas pelas quatro equações de Maxwell; e a lei de força de Lorentz (FEYNMAN, 2008; GRIFFITHS, 2011).

Ainda que as equações de Maxwell – em conjunto com a lei de força de Lorentz – forneçam todo o conteúdo teórico do eletromagnetismo clássico (FEYNMAN, 2008; GRIFFITHS, 2011), dificilmente se encontra menções destas equações em livros didáticos de física do ensino médio (PENA e FILHO, 2009). É certo que as equações de Maxwell, em sua forma integral ou diferencial, vão muito além daquilo que é ensinado em nível básico, o que inviabiliza sua inserção tal como ocorre em nível superior. No entanto, simplificações matemáticas, como as propostas por Pena e Filho (2009), e o uso de estratégias de ensino – atividades experimentais, principalmente – podem contribuir para a abordagem daquilo que é tido como a base da teoria eletromagnética.

A atividade experimental possui um papel fundamental nas metodologias de ensino de física (ALVES FILHO, 2000), tanto do ponto de vista didático como do ponto de vista epistemológico, uma vez que a física é também uma ciência experimental – o eletromagnetismo, em especial, possui origem, fundamentalmente, em bases empíricas. Nesse sentido, o laboratório didático se apresenta como uma ferramenta metodológica, em potencial, para a proposição de um ensino que apresente aos estudantes a unificação, contida na teoria eletromagnética, dos fenômenos elétricos, magnéticos e ópticos.

Lima (2019) apresenta uma proposta de experimentos simples e de baixo custo para a abordagem das equações de Maxwell no ensino médio, dada sua importância na teoria eletromagnética. Os cinco experimentos qualitativos propostos pelo autor incluem: “gaiola de Faraday”, em que se observa a blindagem eletrostática; “ausência de cargas magnéticas”, que explora a inseparabilidade dos polos magnéticos; “Experiência de Hans Oersted”, em que se investiga a geração de campo magnético a partir de corrente elétrica; “Geradores elétricos”, em que se observa a conversão de energia mecânica em energia elétrica, por meio do princípio de indução eletromagnética; e “Blindagem eletromagnética”, em que se observa a blindagem de ondas eletromagnéticas.

Já Rocha e Catarino (2019), desenvolvem um kit experimental que engloba sete experimentos, a partir dos quais propõem, entre outros assuntos, o estudo da lei de Faraday-Lenz.

Rosa (2017), desenvolve experimentos para cada uma das quatro equações de Maxwell, em que se destacam: visualização de linhas de campo elétrico e magnético, geradas pelas suas respectivas fontes – experiências relacionadas às leis de Gauss para a eletricidade e magnetismo; experiência de Hans Oersted – relacionada à lei de Ampère; e medições de corrente elétrica gerada devido à variação de campo magnético – relacionadas à lei de Faraday-Lenz.

No contexto do ensino do eletromagnetismo em nível médio, as experiências, que podem ser apenas observacionais, referentes à lei de Faraday-Lenz – geração de campo elétrico a partir de variações, no espaço e tempo, de campo magnético – e à lei de Ampère – visualizada através do experimento de Oersted – são cruciais para a compreensão da relação entre os fenômenos elétricos e magnéticos, o que é fundamental para a teoria eletromagnética. Ademais, a importância do estudo do eletromagnetismo em nível médio está também vinculada ao fato de que a compreensão de suas leis fundamentais é essencial para a introdução de temas da física moderna como, por exemplo, o estudo acerca da interação entre luz e matéria, e das partículas elementares.

Isto posto, o presente trabalho propõe-se a desenvolver um material didático para a abordagem qualitativa das quatro equações de Maxwell, a partir de demonstrações experimentais. A exposição desta construção é apresentada na forma de capítulos. No capítulo 2, apresentamos a fundamentação teórica necessária para o desenvolvimento deste trabalho: fazemos uma introdução às equações de Maxwell para o eletromagnetismo, apresentando-as em suas formas integral e diferencial e discutindo acerca de seus significados físicos; abordamos a teoria de transposição didática, proposta por Chevallard; a importância de atividades experimentais no ensino de física; a proposta de ensino do eletromagnetismo segundo a Base Nacional Comum Curricular (BNCC); e por fim, a concepção de materiais didáticos.

No capítulo 3, apresentamos a análise de quatro livros didáticos de física do ensino médio (volume 3), aprovados pelo PNL D de 2018, ao longo da qual investigamos as abordagens, qualitativa e quantitativa, das equações de Maxwell.

Por fim, propomos, no capítulo 4, um material didático temático sobre as quatro equações de Maxwell composto, essencialmente, de demonstrações experimentais.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Apresentar uma proposta de material didático temático para a abordagem das quatro equações de Maxwell, em nível de ensino médio, através de algumas demonstrações experimentais das leis fundamentais do eletromagnetismo.

1.1.2 Objetivos específicos

- Realizar uma pesquisa bibliográfica em livros, artigos, dissertações e teses, sobre a abordagem das equações de Maxwell em nível médio;
- Analisar a abordagem das equações de Maxwell em livros didáticos de física, aprovados pelo Programa Nacional do Livro Didático (PNLD) de 2018;
- Propor um material didático temático sobre as equações de Maxwell, que tenha como base demonstrações experimentais das leis do eletromagnetismo.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Equações de Maxwell

Os fenômenos elétricos são conhecidos desde a Grécia Antiga, assim como os magnéticos. No entanto, mesmo sendo conhecidos há centenas de anos, avanços científicos significativos a respeito da eletricidade só ocorreram a partir do século XVIII, quando Coulomb determinou, experimentalmente, a lei de força entre cargas elétricas – culminando na lei fundamental da eletrostática (HURAY, 2011).

Até o século XIX, os fenômenos elétricos e magnéticos eram investigados como dois campos distintos da física. A descoberta de que haveria uma relação entre estes fenômenos ocorreu em 1820, quando o físico Hans Christian Oersted realizou um experimento em que observou que fios que conduziam corrente elétrica eram capazes de interagir com bússolas. A partir desta descoberta, o físico André-Marie Ampère conduziu experimentos em que estudou a força, atrativa e repulsiva, entre ímãs e condutores de corrente elétrica. Ao mesmo tempo, os físicos Jean-Baptiste Biot e Félix Savart, estabeleceram a lei de força entre fios condutores de correntes elétricas estacionárias (HURAY, 2011).

Além destes, os experimentos conduzidos por Michael Faraday e Heinrich Lenz levaram à descoberta de que a variação espacial e temporal de campo magnético produz corrente elétrica em fios condutores ou, de modo geral, campo elétrico no espaço. (HURAY, 2011).

A unificação destes conhecimentos experimentais, a partir de um tratamento teórico, ocorreu em 1864, quando o físico James Clerk Maxwell propôs o trabalho intitulado *A Dynamical Theory of the Eletromagnetic Field*, no qual apresentou um conjunto de equações que descreviam todos os fenômenos eletromagnéticos (HURAY, 2011). As hoje conhecidas como equações de Maxwell, em conjunto com a lei de força de Lorentz, fundamentam o eletromagnetismo clássico (GRIFFITHS, 2011).

As quatro equações de Maxwell – duas para campos estáticos e duas que relacionam os campos elétricos e magnéticos variáveis no tempo – exploram o divergente e o rotacional destes campos que, em conjunto com condições de contornos adequadas, os determinam univocamente (GRIFFITHS, 2011). Cada uma das equações de Maxwell recebe um nome especial: lei de Gauss, lei de Gauss para o magnetismo, lei de Faraday-Lenz e lei de Ampère-Maxwell.

2.1.1 Lei de Gauss para eletricidade

O problema fundamental da eletrostática pode ser resumido à determinação de um campo eletrostático, dada uma distribuição de cargas elétricas, e à força que atua sobre uma carga de prova disposta neste campo. Em princípio, esta questão é resolvida com a lei de Coulomb: obtida experimentalmente, esta lei estabelece que a força exercida por uma carga elétrica q , em repouso, sobre outra carga elétrica (carga de prova) Q , é proporcional ao produto das duas cargas elétricas e inversamente proporcional ao quadrado da distância r que as separa.

$$\vec{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qQ}{r^2} \hat{r} \quad (2.1)$$

onde ϵ_0 é a constante de permissividade do vácuo.

Na presença de uma distribuição de cargas elétricas, a força elétrica resultante que atua sobre uma carga de prova obedece ao princípio da superposição. Assim, a força elétrica resultante é dada pela soma das forças que cada uma das cargas elétricas q_n exerce sobre a carga de prova Q (GRIFFITHS, 2011).

$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots \quad (2.2)$$

$$\vec{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{q_1 Q}{r_1^2} \hat{r}_1 + \frac{q_2 Q}{r_2^2} \hat{r}_2 + \dots \right) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{q_1}{r_1^2} \hat{r}_1 + \frac{q_2}{r_2^2} \hat{r}_2 + \dots \right) \quad (2.3)$$

$$\vec{F} = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{q_1}{r_1^2} \hat{r}_1 + \frac{q_2}{r_2^2} \hat{r}_2 + \dots \right) \quad (2.4)$$

em que o termo em parênteses pode ser escrito como uma somatória em n . Este termo é denominado campo elétrico $\vec{E}(\vec{r})$: a entidade física responsável pela interação entre as cargas elétricas e que assume um papel essencial na teoria eletromagnética.

$$\vec{E}(\vec{r}) \equiv \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{r_i^2} \hat{r}_i \quad (2.5)$$

Quando a distribuição de cargas elétricas deixa de ser discreta e passa a ser contínua, o somatório, na equação (2.5), torna-se uma integral (GRIFFITHS, 2011).

$$\vec{E}(\vec{r}) \equiv \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{\hat{r}}{r^2} dq \quad (2.6)$$

onde dq é um elemento de carga elétrica infinitesimal.

O caso mais geral da equação (2.6), fornece o campo elétrico gerado por uma distribuição de cargas em um volume, cuja densidade volumétrica de cargas elétricas $\rho(\vec{r}')$ é dada por (GRIFFITHS, 2011):

$$\rho(\vec{r}') = \frac{dq}{d\tau'} \quad (2.7)$$

onde $d\tau'$ é um elemento infinitesimal de volume, onde as cargas elétricas estão distribuídas.

Assim, a equação (2.6) pode ser escrita da forma:

$$\vec{E}(\vec{r}) \equiv \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{\rho(\vec{r}')}{r^2} \hat{r} d\tau' \quad (2.8)$$

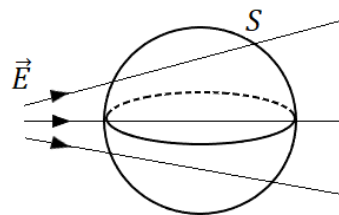
É comum referir-se à própria equação (2.8) como a lei de Coulomb, visto que se trata do caso mais geral de distribuição de cargas elétricas.

Para certas distribuições de cargas, no entanto, a determinação de campos elétricos via equação (2.8) (lei de Coulomb) pode se tornar bastante difícil. Por esse motivo, sofisticadas matemáticas que facilitam esta tarefa são necessárias.

A lei de Gauss permite que o campo elétrico seja mais facilmente determinado quando as distribuições de cargas elétricas possuem determinadas simetrias, como a esférica e a cilíndrica. Ademais, a lei de Gauss não é apenas uma ferramenta matemática, mas também carrega o significado físico de que cargas elétricas são as fontes dos campos eletrostáticos (GRIFFITHS, 2011).

A primeira lei do eletromagnetismo, lei de Gauss, pode, então, ser introduzida da seguinte maneira: suponha-se uma região do espaço em que haja um campo elétrico \vec{E} ; constrói-se, nesta região, um volume cujo contorno é dado por uma superfície fechada S .

Figura 1 - Fluxo de campo elétrico sobre uma superfície fechada



Fonte: Autoria própria (2021)

As linhas de campo elétrico atravessam o volume de modo que é possível definir o fluxo do campo elétrico, Φ_E , sobre a superfície fechada:

$$\Phi_E = \oiint \vec{E} \cdot d\mathbf{a} \quad (2.9)$$

onde $d\mathbf{a}$ é o vetor elemento de área infinitesimal externo à superfície.

Segundo à lei de Gauss, o fluxo total de campo elétrico, em uma superfície fechada – ou Gaussiana – é proporcional à carga elétrica encerrada:

$$\oiint \vec{E} \cdot d\mathbf{a} = \frac{q_{enc}}{\epsilon_0} \quad (2.10)$$

onde q_{enc} é a carga elétrica total envolvida pela superfície Gaussiana e ϵ_0 é a constante de permissividade do vácuo.

A equação (2.10) é conhecida como a lei de Gauss – primeira equação de Maxwell – na forma integral (GRIFFITHS, 2011).

Quando as cargas elétricas estão distribuídas em todo o volume, uma densidade volumétrica de cargas ρ é definida. Assim, a carga elétrica total é dada pela integral da densidade de cargas, no volume.

$$\oiint \vec{E} \cdot d\mathbf{a} = \frac{1}{\epsilon_0} \iiint \rho \, d\tau' \quad (2.11)$$

Aplicando o teorema de Gauss à equação (2.11), a lei passa a ser escrita da forma diferencial (GRIFFITHS, 2011):

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (2.12)$$

A lei de Gauss, equações (2.10) e (2.12), essencialmente, descreve que carga positivas são as fontes, enquanto cargas negativas são sumidouros do campo eletrostático.

2.1.2 Lei de Gauss para o magnetismo

De maneira análoga à lei de Gauss para a eletricidade, suponha-se uma região do espaço em que haja, desta vez, um campo magnético \vec{B} . Constrói-se, então, um volume cujo contorno é dado por uma superfície S , que engloba uma fonte de campo magnético – um ímã, por exemplo.

Da mesma forma, as linhas de campo magnético atravessam o volume, de modo que é possível definir o fluxo de campo magnético sobre a superfície:

$$\Phi_B = \oiint \vec{B} \cdot d\mathbf{a} \quad (2.13)$$

A comparação com a eletrostática induz à ideia de que o fluxo total do campo magnético, sobre a superfície, seja proporcional à quantidade de carga magnética encerrada. No

entanto, até onde se sabe, não existem cargas magnéticas, de modo que o fluxo de campo magnético sobre a superfície é igual à zero:

$$\oiint \vec{B} \cdot d\mathbf{a} = 0 \quad (2.14)$$

A equação (2.14) é conhecida como lei de Gauss para o magnetismo – segunda equação de Maxwell – em sua forma integral (GRIFFITHS, 2011).

A lei de Gauss para o magnetismo também pode ser escrita na forma diferencial (GRIFFITHS, 2011):

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.15)$$

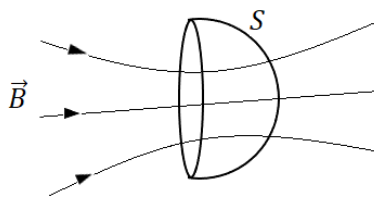
Apesar de não ser usual resolver a equação (2.15), a lei de Gauss para o magnetismo descreve um fenômeno fundamental: a inexistência, até onde se sabe, de monopolos (ou cargas) magnéticos (GRIFFITHS, 2011).

2.1.3 Lei de Faraday-Lenz

Experimentos realizados por Michael Faraday, em 1831, mostraram que, a partir de variações de campo magnético seria possível produzir correntes elétricas em materiais condutores (HURAY, 2011).

Matematicamente, a lei de Faraday pode ser descrita da seguinte forma: suponha-se uma superfície aberta S em uma região do espaço em que haja um campo magnético \vec{B} .

Figura 2 - Fluxo de campo magnético sobre uma superfície aberta



Fonte: Autoria própria (2021)

As linhas de campo magnético atravessam a superfície, de modo que é possível definir o fluxo de campo magnético sobre a superfície aberta:

$$\Phi_B = \iint \vec{B} \cdot d\mathbf{a} \quad (2.16)$$

onde $d\mathbf{a}$ é um elemento infinitesimal de área externo à superfície.

Segundo à lei de Faraday, a variação de fluxo magnético, sobre a superfície, induz uma força eletromotriz que, por definição, é dada pela integral da força elétrica por unidade de carga – campo elétrico – em um caminho fechado.

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = \frac{d\Phi_B}{dt} \quad (2.17)$$

O campo elétrico induzido pela variação de fluxo magnético é diferente do campo eletrostático, gerado por cargas elétricas. Este último é um campo conservativo, ao contrário do campo elétrico induzido.

De modo geral, a variação de fluxo do campo magnético pode ocorrer variando-se o campo magnético, a área da superfície aberta, ou ainda, o ângulo formado entre o vetor normal à superfície e o vetor campo magnético. Assumindo que a superfície se mantenha fixa no tempo, a derivada temporal passa a atuar apenas no campo magnético, de modo que a lei de Faraday pode ser escrita da forma:

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = \iint \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\mathbf{a} \quad (2.18)$$

Contudo, a equação (2.18) ainda não está completa pois o campo elétrico induzido pela variação de campo magnético, não assume um sentido qualquer. A lei de Lenz estabelece que o sentido do campo elétrico induzido é tal que se opõe à variação do fluxo de campo magnético. Dessa forma, a lei de Lenz acrescenta um sinal negativo à lei de Faraday, que passa a ser escrita da forma:

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \iint \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\mathbf{a} \quad (2.19)$$

A equação (2.19) é conhecida como lei de Faraday-Lenz – terceira equação de Maxwell – em sua forma integral (GRIFFITHS, 2011).

Através da aplicação do teorema de Stokes à equação (2.19), a terceira lei do eletromagnetismo passa a ser escrita na forma diferencial (GRIFFITHS, 2011):

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.20)$$

A lei de Faraday-Lenz também é apresentada em alguns livros didáticos do ensino médio em termos da força eletromotriz, da forma (GUIMARÃES *et al.*, 2016):

$$\varepsilon = - \frac{\Delta \Phi_B}{\Delta t} \quad (2.21)$$

onde ε é a força eletromotriz induzida e $\Delta\Phi_B$ é a variação de fluxo do campo magnético em um intervalo de tempo Δt .

Em eletrostática, as únicas fontes de campo elétrico conhecidas eram as cargas elétricas. Essencialmente, a lei de Faraday-Lenz apresenta uma nova fonte de campos elétricos: variações de campo magnético. A partir da introdução desta nova fonte, a lei de Faraday-Lenz também estabelece uma relação entre os fenômenos elétricos e magnéticos (GRIFFITHS, 2011).

2.1.4 Lei de Ampère-Maxwell

A lei de Ampère-Maxwell, quarta equação de Maxwell, estabelece que campos magnéticos são produzidos por campos elétricos variáveis do tempo – ou correntes elétricas variáveis no tempo.

No caso em que as fontes de campo magnético são restritas às correntes elétricas estacionárias (magnetostática), o problema fundamental pode ser resumido à determinação do campo magnetostático, dada uma distribuição deste tipo de corrente elétrica. Em princípio, a lei de Biot-Savart, análoga à lei de Coulomb da eletrostática, é suficiente para resolver esta questão.

O caso mais geral da lei de Biot-Savart, fornece o campo magnético gerado por uma distribuição volumétrica de correntes estacionárias.

$$\vec{B}(\vec{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{\vec{J}(\vec{r}') \times \hat{r}}{r^2} d\tau' \quad (2.22)$$

onde $\vec{J}(\vec{r}')$ é a densidade volumétrica de correntes; r é o módulo do vetor \vec{r} , que liga um elemento de volume, onde a corrente elétrica é distribuída, ao ponto de interesse; $d\tau'$ é um elemento de volume e μ_0 é a constante de permeabilidade do espaço livre.

Para distribuições de correntes elétricas com determinadas simetrias, no entanto, a lei de Ampère facilita a determinação dos campos magnéticos e pode ser utilizada no lugar da lei de Biot-Savart. Contudo, assim como a lei de Gauss em eletrostática, a lei de Ampère não é apenas uma ferramenta matemática (GRIFFITHS, 2011).

A lei de Ampère, que surge a partir de observações experimentais de que correntes elétricas produzem campo magnético, estabelece que a integral do campo magnético \vec{B} , em um circuito fechado, é proporcional à corrente elétrica que atravessa a área cujo contorno é dado por aquele circuito.

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 i_{enc} \quad (2.23)$$

onde $d\vec{l}$ é um elemento de comprimento infinitesimal, paralelo ao circuito, μ_0 é a constante de permeabilidade do vácuo e i_{enc} é a corrente elétrica que atravessa a superfície contornada pelo circuito.

A lei de Ampère, equação (2.23), assim como a lei de Biot-Savart, é válida para casos em que a corrente elétrica é estacionária. No entanto, quando se vai além da magnetostática, há uma incompatibilidade entre a lei de Ampère e a equação de continuidade – conservação da carga elétrica (MACHADO, 2002).

A solução encontrada por Maxwell, para esta incoerência, foi acrescentar um termo à lei de Ampère, para que a conservação da carga elétrica não fosse violada. O termo adicionado à lei de Ampère implica que variações de campo elétrico também são fontes de campo magnético, relacionando, assim como a lei de Faraday-Lenz, os fenômenos elétricos e magnéticos. Em termos experimentais, a correção realizada por Maxwell é de difícil observação – até por isso, não havia sido detectada nos experimentos realizados por Ampère e Faraday – assim, diferente das outras leis do eletromagnetismo, foi acrescentada à teoria antes de ser observada experimentalmente. Além disso, há uma questão de simetria envolvida: pela lei de Faraday, um campo magnético variável no tempo induz um campo elétrico, e pela correção de Maxwell, um campo elétrico variável no tempo induz um campo magnético (GRIFFITHS, 2011).

Sendo assim, a lei de Ampère com a correção de Maxwell, em sua forma integral, é escrita como:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 i_{enc} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} \quad (2.24)$$

Ou, na forma diferencial:

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (2.25)$$

As equações (2.24) e (2.25) são conhecidas como lei de Ampère-Maxwell, ou quarta equação de Maxwell, nas formas integral e diferencial, respectivamente. Em termos de seu significado físico, a quarta equação do eletromagnetismo expressa quais são as fontes de campo magnético: correntes elétricas estacionárias e variações de campo elétrico (GRIFFITHS, 2011).

De acordo com o teorema de Helmholtz, um campo vetorial é univocamente determinado a partir de sua divergência e de seu rotacional, além de condições de contorno

adequadas. Assim, para que os campos elétricos e magnéticos sejam completamente definidos, as quatro equações de Maxwell, em sua forma diferencial, exploram suas divergências e os seus rotacionais, em conjunto com a condição de contorno de que esses campos se tornem nulos a distâncias que tendem ao infinito de suas fontes. A lei de Gauss para o magnetismo determina a divergência do campo magnético, enquanto a lei de Ampère-Maxwell determina seu rotacional; da mesma forma, a lei de Gauss para a eletricidade determina a divergência do campo elétrico, ao passo que a lei de Faraday-Lenz explora seu rotacional (GRIFFITHS, 2011).

Além disso, a partir da determinação dos campos elétricos e magnéticos, é possível determinar a força eletromagnética que atua sobre uma partícula carregada que se move na presença destes campos, por meio da equação da lei de força de Lorentz:

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (2.26)$$

onde q é a carga elétrica da partícula e \vec{v} é a velocidade com que a partícula se movimenta na região onde encontram-se os campos elétrico \vec{E} e magnético \vec{B} .

Assim, as quatro equações de Maxwell unificam os fenômenos elétricos e magnéticos, descrevendo a geração de campos elétricos a partir de variações, temporal e espacial, de campos magnéticos e vice-versa, enquanto a lei de força de Lorentz fornece a força que atua sobre uma carga elétrica na presença dos campos elétrico e magnético. O conjunto destas cinco leis fundamentam todo o eletromagnetismo clássico.

Ao explorar as quatro equações de Maxwell para campos que oscilam no vácuo, obtém-se uma equação de onda, na qual a velocidade de propagação é definida em função das constantes μ_0 e ϵ_0 . Este valor coincide com a velocidade de propagação da luz no espaço livre, sugerindo que a luz é um caso particular de onda eletromagnética – o que foi comprovado experimentalmente por Hertz – e que promove uma unificação entre eletromagnetismo e óptica.

O conjunto das quatro leis fundamentais do eletromagnetismo, descritas matematicamente pelas equações de Maxwell, formam uma estrutura de conhecimento extremamente sofisticada. O desafio que se apresenta é tornar a essência de tal conhecimento acessível aos alunos do ensino básico.

2.2 Transposição didática em ciências

A transposição didática proposta por Chevallard pode ser entendida como o conjunto de transformações que um saber, designado como conteúdo de ensino, sofre até se tornar efetivamente objeto de ensino. A transposição é caracterizada por duas transformações: a primeira, do objeto de conhecimento à objeto a ser ensinado (do saber sábio para o saber a

ensinar); e a segunda, de objeto a ser ensinado à objeto de ensino (do saber a ensinar para o saber ensinado). Ao ser transposto, o objeto de ensino torna-se um saber novo, guardando poucas semelhanças com saber de origem (CHEVALLARD, 1991).

As relações ternárias, segundo Chevallard (2013), são constituídas por sujeitos que detém determinado conhecimento, sujeitos que não o detém e o próprio conhecimento. No contexto destas relações, o objetivo estabelecido pode ser o ensino ou a utilização do conhecimento em questão. Quando se trata de uma relação didática, entre conhecimento, professor e aluno, há o que o Chevallard estabelece como intenção didática, em que o propósito é ensinar, e não usar o conhecimento ali envolvido.

Uma sociedade, como um todo, deve ser capaz de reconhecer os saberes ensináveis, ainda que grande parte deles sejam concebidos para serem utilizados e não ensinados (CHEVALLARD, 2013). A seleção dos conteúdos a serem transpostos depende de diversos fatores que envolvem, por exemplo, políticas educacionais e anseios sociais, de forma que nem todos os saberes sábios são transpostos em objetos de ensino (PIETROCOLA, 2008).

Brockington e Pietrocola (2016), apoiados na teoria de transposição didática proposta por Chevallard, apresentam algumas características importantes para que um saber sábio, transposto em objeto de ensino, mantenha-se no sistema educacional. A primeira delas implica que um saber deve ser “consensual”, ou seja, não deve haver dúvidas de que o saber sábio, transposto em objeto de ensino, possua confiabilidade perante a comunidade científica. A segunda característica estabelece que o saber sábio deve possuir relevância social, “atualidade moral”, e atualidade científica, “atualidade biológica”. Outra característica importante, denominada “operacionalidade”, implica que o saber sábio, ao sofrer transposição didática, deve ser capaz de produzir exercícios e atividades passivas de avaliação. As duas últimas características são a “criatividade didática” e a “terapêutica”, que estabelecem que um saber deve possuir identidade didática e que deve ser efetivo dentro do processo de ensino, respectivamente.

Na teoria de transposição didática em ciências proposta por Astolfi, com base na teoria de Chevallard, há um conjunto de cinco regras que norteiam o processo de transposição didática de um objeto de conhecimento em um objeto de ensino. São elas: modernizar o saber escolar; atualizar o saber a ensinar; articular saber “velho” com saber “novo”; transformar um saber em exercícios e problemas; tornar um conceito mais compreensível (ASTOLFI, 1997 apud ALVES FILHO, 2000).

A primeira regra – modernizar o saber escolar – está relacionada à dinâmica constante da produção de conhecimento científico, no sentido de que é importante que o sistema de

ensino, como um todo, mantenha-se atualizado conforme a produção acadêmica, de modo que tais conhecimentos, bem como suas aplicações na sociedade, sejam visíveis no ensino (ALVES FILHO, 2000).

A segunda regra – atualizar o saber a ensinar – diz respeito à substituição de saberes obsoletos por saberes atualizados. Esta regra também é posta frente à constante produção de novos saberes, no sentido de que alguns conhecimentos, com o passar dos anos, tornam-se ultrapassados ou perdem a necessidade do ensino formal, por já estarem enraizadas culturalmente (ALVES FILHO, 2000).

A terceira regra – articular saber “velho” com saber “novo” – está relacionada ao fato de que um saber “novo”, quando acrescentado à esfera do saber a ensinar, deve estar em consonância com os saberes “velhos” mantidos, de modo que o “novo” seja validado pelo “velho” (ALVES FILHO, 2000).

A quarta regra refere-se à capacidade, apresentada por um saber, de produzir exercícios e problemas, sendo que aqueles capazes de gerar maiores quantidades de atividades didáticas são, geralmente, mais valorizados. Por fim, a última regra – tornar um conceito mais compreensível – está relacionada ao fato de que a transposição didática, do saber sábio ao saber a ensinar, promove uma adaptação desse saber a diferentes níveis de ensino, de modo que a compreensão dos conceitos a ele relacionados se torne possível (ALVES FILHO, 2000).

No caso específico do eletromagnetismo, é possível perceber que alguns conceitos relacionados à eletricidade, magnetismo e óptica, fazem parte do cotidiano dos alunos, mas que não se incorporam ao saber científico da sala de aula. A estratégia didática de introduzir estes fenômenos, aparentemente desconexos, e incorporá-los a uma estrutura conceitual que concebemos como eletromagnetismo, passa pela observação destes fenômenos em um laboratório, ou mesmo na sala de aula através de instrumentos simples, e o seu posterior desenvolvimento na linguagem científica.

2.3 Experimentação no ensino de física

A experiência realizada com o propósito de observar fenômeno, sem maiores preocupações com a investigação quantitativa acerca do que é observado, ou seja, aquela realizada com o objetivo de se obter uma simples representação, é denominada experiência primeira, característica do pensamento pré-científico. Durante o século XVIII, os estudos acerca dos efeitos da eletricidade, por exemplo, ocorreram, em suma, sob um enfoque empirista, de acordo com o qual o conhecimento científico é construído a partir de observações sistemáticas dos fenômenos. As experiências realizadas detinham caráter muito mais ligado a espetáculos

do que à problematização do que era observado, o que atrasou o desenvolvimento do conhecimento científico. A então denominada lei de Coulomb, que fundamenta a eletrostática, foi formulada apenas no fim do século XVIII (BACHELARD, 1996).

Praia *et al.* (2002), através de uma comparação entre o empirista e o investigador, apresenta uma crítica ao primeiro, na qual salienta que o papel da experimentação é reduzido ao da manipulação de variáveis, sem que haja uma hipótese que oriente a experiência e justifique o enfoque a certos elementos, assim como é conduzido pelo investigador.

Na transposição da experimentação para o ensino, deve-se atentar para que o enfoque não se dê na mera produção das imagens de um fenômeno em detrimento da problematização. Ao destacar as imagens, a experiência corre o risco de ser vista sob uma perspectiva de atividade geradora de um falso interesse, daí o cuidado em extrair o abstrato do concreto, de modo que haja a racionalização do que é apresentado (BACHELARD, 1996). Dessa forma, a experiência e a teoria não são separadas, mas complementares, no sentido de que a teoria é adaptada à realidade através da experiência (ARRUDA e LABURÚ, 1998).

É certo que há, entre professores-pesquisadores em ensino de física, a aceitação acerca da implementação de atividades experimentais no processo de ensino-aprendizagem. No entanto, o papel atribuído a tais atividades ainda não está bem estabelecido no contexto do ensino e, portanto, é motivo de discussões. O senso comum de que o conhecimento científico é fortemente atrelado a uma perspectiva unicamente empirista, em que há grande valorização das medidas experimentais em detrimento de uma elaboração reflexiva do fenômeno observado, contribuiu para uma transposição didática equivocada do laboratório. O “método experimental” foi transposto de saber sábio a saber a ensinar. Nessa perspectiva, a atividade experimental é inserida como um objeto de ensino, e não como metodologia através da qual se aborda os conteúdos de física (ALVES FILHO, 2000).

No Brasil, as atividades experimentais ganharam destaque devido à incorporação de projetos de ensino nas escolas durante as décadas de 60 e 70 (BARRA e LORENZ, 1986), em particular. Até o fim da década de 60, por exemplo, as práticas de experimentação no ensino de ciências ocorreram sob forte influência da perspectiva positivista. A manipulação de variáveis, organização lógica e análise de dados coletados eram competências trabalhadas nas experiências dentro desta perspectiva, em que a prática experimental era tida como legitimadora do conhecimento científico. Desde então, tais atividades têm sido incorporadas ao ensino sob diferentes concepções de ciência e abordagens teóricas de aprendizagem distintas (HIGA e OLIVEIRA, 2012; GIORDAN, 1999).

Alves Filho (2000) apresenta uma síntese de diferentes abordagens assumidas pelo

laboratório didático no ensino de física ao longo das décadas. Em algumas delas, as experiências são realizadas com o objetivo de coleta e análise de dados, orientadas por um roteiro construído pelo próprio professor, como no caso do laboratório tradicional e laboratório biblioteca. Em outro exemplo de abordagem, como no caso do laboratório divergente, a atividade experimental é desenvolvida pelo próprio aluno como uma espécie de proposta de projeto acerca daquilo que se deseja estudar. Um último exemplo de laboratório didático aplicado ao ensino de física em nível médio, apresentado pelo autor, é o laboratório de demonstrações, cujo objetivo é ilustrar os conhecimentos teóricos já trabalhados por meio de demonstrações experimentais realizadas pelo professor.

2.4 Eletromagnetismo no ensino de ciências

A discussão sobre o ensino de ciências é permeada por questões relativas às próprias razões do porquê ensinar e aprender ciências. As justificativas para o ensino desta área estão atreladas à definição, bem estabelecida, do objeto de estudo das ciências e a problematização do senso comum acerca de conceitos científicos, na qual se apoia a necessidade de um ensino formal. Outra justificativa, porém, que necessita de discussões mais profundas, está relacionada à importância de se aprender ciências. Em relação à esta, discute-se sobre a necessidade de uma formação científica, no sentido de que os cidadãos se tornem sujeitos ativos em discussões de caráter científico em âmbito social, ambiental, tecnológico, entre outros (CACHAPUZ *et al.*, 2004).

O ensino das Ciências Naturais, segundo o proposto pela Base Nacional Comum Curricular (BNCC), deve ter em vista o comprometimento com o desenvolvimento do conhecimento científico de modo que este seja integrado à sociedade no sentido de promover discussões acerca de seu papel em questões sociais, culturais, ambientais e tecnológicas, o que condiz com a discussão levantada por Cachapuz *et al.* (2004) (BRASIL, 2017).

De acordo com a BNCC, os conhecimentos relacionados às Ciências Naturais devem ser desenvolvidos segundo quatro eixos estruturantes: contextualização do papel da ciência na sociedade; contextualização histórica, no sentido de comparar explicações científicas ao longo de diferentes períodos, promovendo discussões acerca do processo de evolução do conhecimento científico; desenvolvimento de práticas científicas, a fim de aproximar os estudantes de processos característicos das metodologias científicas, tais como análise de problemas e elaboração de hipóteses; compreensão da linguagem específica de cada área das Ciências da Natureza, no sentido de que termos específicos e unidades de medida, por exemplo, sejam utilizados de maneira correta (BRASIL, 2017).

Em relação à contextualização do ensino de ciências, um dos eixos estruturantes propostos pela BNCC, Cachapuz *et al.* (2004) apresentam uma discussão interessante em que defendem que esta abordagem deve ser o ponto de partida do ensino de ciências e que, a partir dela, é possível elevar o grau de profundidade dos saberes de uma maneira em que se torna possível estudá-los qualitativa e quantitativamente.

O estudo das Ciências da Natureza, conforme proposto pela BNCC, é então conduzido conforme o desenvolvimento de competências específicas e habilidades. A primeira competência específica é apresentada sob o enfoque da unidade temática Matéria e Energia, em que se propõe o desenvolvimento de discussões acerca dos fenômenos naturais e processos tecnológicos relacionados ao tema. Nesta competência, algumas das habilidades a serem desenvolvidas, relacionadas ao eletromagnetismo, referem-se, por exemplo, ao desenvolvimento da capacidade de realizar previsões acerca do funcionamento de motores e geradores elétricos, bobinas, transformadores e pilhas. Nas demais competências, desenvolvidas sob o enfoque da unidade temática Vida, Terra e Cosmos, as habilidades a serem desenvolvidas, por exemplo, estão relacionadas à interpretação e previsão de resultados obtidos em atividades experimentais e interpretação de textos de divulgação científica (BRASIL, 2017).

Todavia, Mozena e Ostermann (2016) apresentam uma crítica ao tratamento direcionado à disciplina de física ainda durante a apresentação das primeiras versões da BNCC. Segundo as autoras, apesar do discurso acerca do desenvolvimento de competências e habilidades, o ensino ali proposto ainda é baseado em listas de conteúdos tradicionais elencados sob forte influência dos exames nacionais, como o Enem (Exame Nacional do Ensino Médio) e testes de ingresso ao ensino superior.

Há uma grande quantidade de trabalhos, na área de pesquisa em ensino de física, que apresentam propostas para o ensino do eletromagnetismo no ensino médio, sob diferentes abordagens e metodologias. Algumas destas propostas, por exemplo, incluem o desenvolvimento de atividades e demonstrações experimentais, atividades investigativas, ou ainda, tomam como base aspectos da história e filosofia da ciência. Apesar de partirem de diferentes abordagens, é comum encontrar nestas propostas, argumentos semelhantes que as justificam: necessidade de contextualização dos conceitos do eletromagnetismo aos aspectos sociais e tecnológicos e a importância do desenvolvimento do pensamento científico.

Nascimento *et al.* (2019), por exemplo, ao desenvolverem uma sequência didática para o ensino de eletromagnetismo, propõem que os conceitos de campo magnético, campo magnético gerado por corrente elétrica, indução eletromagnética, ondas eletromagnéticas, meios de comunicação, bem como os estudos acerca de eletroímãs e motores elétricos, sejam

desenvolvidos a partir de atividades experimentais, vídeos e simulações computacionais. Numa linha muito parecida, Rocha e Catarino (2019) propõem um kit experimental em conjunto com uma sequência didática, em que são desenvolvidos sete experimentos: campo magnético de um ímã; atração e repulsão dos polos de um ímã; geração de campo magnético a partir de corrente elétrica (Oersted); regra de Ampère; força magnética em um condutor e comprovação da lei de Faraday e lei de Lenz.

Magalhães *et al.* (2002) apresentam uma proposta de ensino para a abordagem dos conceitos de campos elétrico e magnético, utilizando-se de aspectos da história da física, caracterizados pelos autores como um organizador prévio dentro da teoria de aprendizagem significativa de Ausubel. Os autores propõem a discussão dos principais eventos históricos, relacionados com a fundamentação dos conceitos de campos elétrico e magnético. Além disso, o conceito de linhas de campo é trabalhado a partir de uma atividade experimental com limalha de ferro e ímãs, enquanto o conceito de indução eletromagnética é apresentado a partir de discussões acerca de figuras que representam o fenômeno.

Oliveira e Nascimento (2013) apresentam uma proposta de sequência didática para o ensino de eletromagnetismo, através de quatro atividades investigativas: demonstração investigativa, laboratório aberto, questões abertas e problemas abertos. Os assuntos trabalhados dentro da proposta de sequência didática envolvem magnetismo, interação por meio de campos, força magnética, interações magnéticas a nível molecular e lei de Faraday-Lenz. De acordo com os autores, as atividades de caráter investigativo, propostas para a abordagem desses assuntos, contribuem para o desenvolvimento cognitivo dos alunos, bem como o desenvolvimento do pensamento crítico.

2.5 Materiais didáticos

Os materiais didáticos podem ser definidos “amplamente como produtos pedagógicos utilizados na educação e, especificamente, como o material instrucional que se elabora com finalidade didática” (BANDEIRA, 2009, p. 14). Esses materiais podem ser vinculados à diferentes suportes que possibilitam sua materialização, seja ele impresso, audiovisual ou vinculado à outras tecnologias. Um material didático desenvolvido de modo que trata, em geral, de um tema específico é denominado material didático temático (BANDEIRA, 2009).

A implementação do material didático, por meio de diferentes mídias, tem como objetivo contribuir para que um maior grau de aprendizagem seja atingido. Nesse sentido, um material didático, seja ele temático, ou não, impresso ou audiovisual, deve ser elaborado para atender as expectativas do professor, em sala de aula, bem como as necessidades dos alunos em

seus estudos fora do ambiente escolar. O uso do material didático, por parte dos estudantes, permite a definição de ritmos de estudos diferentes, no sentido de que permite que aluno retome, acelere ou retarde o estudo de determinadas partes do material, de modo que o processo de aprendizagem passa a ocorrer de maneira não-linear (BANDEIRA, 2009).

Os materiais didáticos, como o proposto, podem também auxiliar na elaboração de sequências didáticas: “conjunto de atividades ordenadas, estruturadas e articuladas para a realização de certos objetivos educacionais, que têm um princípio e um fim conhecido tanto pelos professores como pelos alunos” (ZABALA, 1998, p.18). As sequências didáticas são construídas como propostas pedagógicas, cujas características, como atividades e o modo como são articuladas, determinam as especificidades de cada proposta (ZABALA, 1998).

Segundo Zabala, uma proposta de sequência didática pode partir de um modelo tradicional no qual é possível acrescentar atividades e modificar o modo como são articuladas a fim de que a unidade didática se torne mais completa. Um modelo de sequência didática tradicional é composto por quatro etapas: comunicação da lição, estudo individual sobre o livro didático, repetição do conteúdo aprendido e avaliação (ZABALA, 1998).

De acordo com Zabala (1998) as atividades sugeridas ao longo de uma sequência, ou unidade, didática devem ser propostas de maneira que sejam significativas e úteis para o processo de aprendizagem dos estudantes, além de serem compatíveis com seu nível de desenvolvimento. Além disso, as atividades propostas em uma sequência didática devem ser motivadores em relação aos novos conteúdos que serão introduzidos ao longo da unidade didática, e devem, também, estimular o autoconhecimento nos estudantes, de forma que estes sejam capazes de refletir sobre seu processo de aprendizagem. Ainda, as sequências didáticas devem ser construídas de forma que permita que os estudantes aprendam a aprender, de modo a tornarem-se cada vez mais autônomos no processo de ensino e aprendizagem.

3 METODOLOGIA

A pesquisa foi desenvolvida segundo uma abordagem qualitativa, uma vez que foram realizadas investigações descritivas acerca do objeto de pesquisa – uma das características desta abordagem (BOGDAN e BIKLEN, 1994). Em relação aos objetivos, a pesquisa foi caracterizada como exploratória, cuja finalidade é “proporcionar maior familiaridade com o problema, com vistas a torná-lo mais explícito ou a construir hipóteses” (GIL, 2002, p. 41). Dentro da pesquisa exploratória, o procedimento adotado foi a pesquisa bibliográfica que, de acordo com Cervo, Bervian e Silva (2007), é realizada por meio da busca de informações teóricas em livros, artigos, dissertações e teses, com o objetivo de adquirir conhecimento sobre o objeto de pesquisa.

Acerca das etapas que constituem a pesquisa bibliográfica, de acordo com Cervo, Bervian e Silva (2007), o primeiro passo se trata da localização e seleção dos documentos que serão analisados, em que o pesquisador realiza o reconhecimento das obras, atentando para elementos como sumário e bibliografia, com o objetivo de identificar exemplares importantes para a pesquisa. A próxima etapa da pesquisa bibliográfica constitui-se da leitura crítica dos documentos selecionados, através da qual se realiza a coleta de informações relevantes para o desenvolvimento do trabalho. A análise de conteúdo, proposta por Bardin (1977), e que foi seguida nesta pesquisa, pode ser dividida em três etapas: pré-análise, exploração do material e tratamento de resultados.

Os documentos bibliográficos selecionados para análise durante o desenvolvimento metodológico foram quatro livros didáticos de física (volume 3) do ensino médio, aprovados pelo Programa Nacional do Livro Didático (PNLD) em 2018: Esses documentos são caracterizados, em relação à sua natureza, como documentos secundários, pois fazem parte do grupo de fontes de informação digitais ou impressas como, por exemplo, livros e jornais (CERVO, BERVIAN e da SILVA, 2007).

Em relação aos documentos selecionados – livros didáticos de física – foram analisados apenas os capítulos referentes ao eletromagnetismo nos quais foram identificados os temas mais relevantes para a pesquisa em questão: lei de Gauss (eletricidade), lei de Gauss (magnetismo), lei de Faraday-Lenz e lei de Maxwell-Ampère.

A partir da análise destes resultados, desenvolveu-se um material didático temático composto, essencialmente, de demonstrações experimentais simples referentes às quatro leis fundamentais do eletromagnetismo clássico.

3.1 Seleção e análise dos livros didáticos

De acordo com o guia do PNLD (Programa Nacional do Livro Didático) de 2018, as obras destinadas ao ensino médio, aprovadas pelo programa, seguem uma série de critérios que são específicos à cada uma das áreas de ensino (BRASIL, 2017)

Em relação ao livro didático de física, observa-se se a obra utiliza a linguagem científica como meio para a aprendizagem de conceitos físicos; introduz discussões em uma perspectiva CTSA (Ciência, Tecnologia, Sociedade e Ambiente); apresenta exercícios e problemas, bem como arranjos de experimentos didáticos; apresenta a dedução, quando possível, das equações matemáticas que descrevem fenômenos físicos, entre outros critérios (BRASIL, 2017).

Os conhecimentos presentes nos livros didáticos de física seguem as instruções apresentadas no edital PNLD, segundo o qual a física, como componente curricular, pode ser dividida, de modo geral, entre os conhecimentos consolidados até o século XIX, sob a denominação de Física Clássica, e aqueles sob a denominação de Física Moderna, desenvolvidos a partir da Teoria da Relatividade Restrita e primórdios da Mecânica Quântica, entre o fim do século XIX e o início do século XX. A então denominada Física Clássica pode ser, para fins didáticos, separada em três grandes teorizações: Mecânica, Eletromagnetismo e Termodinâmica (FNDE, 2015).

Ainda, de acordo com o Edital PNLD, deve haver, nos livros didáticos, a priorização de elementos conceituais que sintetizem as teorizações das físicas Clássica e Moderna, o que inclui a abordagem de conceitos, leis e modelos ou teorias. Além disso, a física, como componente curricular, deve ser apresentada como um conjunto de conhecimentos socialmente relevantes, quando visto sob o ponto de vista de crianças, jovens e adolescentes no âmbito escolar (FNDE, 2015).

Entre os 12 livros didáticos de física do ensino médio, volume três, aprovados pelo PNLD de 2018, quatro obras foram selecionadas: Física Contexto & Aplicações, dos autores Antônio Máximo, Beatriz Alvarenga e Carla Guimarães; Física, de Gualter José Biscuola, Newton Villas Boas e Ricardo Helou Doca; Física para o Ensino Médio, de Yamamoto Kazuhito e Luiz Felipe Fuke; e Física, dos autores Osvaldo Guimarães, José Roberto Piqueira e Wilson Carron. Estas obras foram selecionadas devido ao fácil acesso nas mídias digitais.

Por abreviação, serão adotadas siglas como LD_n, onde n vai de 1 até 4, para nomear os livros didáticos analisados na pesquisa bibliográfica, de acordo com o quadro 1.

Quadro 1 - Livros didáticos analisados

Código	Livro	Autores
LD1	Física Contexto & Aplicações	Máximo, Alvarenga e Guimarães
LD2	Física	Guimarães, Piqueira e Carron
LD3	Física	Gualter, Newton e Helou
LD4	Física para Ensino Médio	Kazuhito e Fuke

Fonte: Autoria própria (2021)

No LD1, Física: Contexto & Aplicações, o eletromagnetismo é apresentado em três unidades: “Campo e potencial elétrico”; “Circuitos elétricos de corrente contínua”; e “Eletromagnetismo”. Na primeira unidade, os autores introduzem o conceito de carga elétrica; apresentam a lei de Coulomb e a partir desta lei introduzem o conceito de campo elétrico; por fim, abordam o potencial eletrostático. Já na segunda unidade, os autores discutem sobre o conceito de corrente elétrica, apresentando também circuitos elétricos simples e a lei de Ohm, e encerram a unidade abordando a força eletromotriz. Por fim, na terceira unidade, os autores apresentam uma discussão acerca dos ímãs naturais, a existência dos polos magnéticos e sua inseparabilidade; apresentam a experiência de Oersted, em que introduzem a relação entre eletricidade e magnetismo; introduzem o conceito de campo e força magnética; apresentam as leis de Faraday e Lenz; e por fim, comentam sobre as ondas eletromagnéticas.

No LD2, dos autores Guimarães, Piqueira e Carron, o eletromagnetismo também é abordado em três unidades: “Fenômenos elétricos em condutores”; “Ações elétricas a distância”, e “Fenômenos eletromagnéticos e a sociedade moderna”. Na primeira unidade, bastante semelhante à unidade 2 do LD1, os autores abordam o conceito de energia e corrente elétrica; circuitos em residências e geradores elétricos, onde introduzem a lei de Kirchhoff. Na segunda unidade da obra, os autores compreendem o conceito de campo elétrico, introduzindo também a lei de Coulomb; apresentam o campo magnético gerado por ímãs naturais e correntes elétricas; e introduzem a força magnética. Na última unidade, os autores apresentam as leis de Faraday e Lenz e as ondas eletromagnéticas, assim como no LD1.

No LD3, o eletromagnetismo também é dividido em três unidades. A primeira delas, intitulada como “Eletrostática”, é composta por três capítulos, que abordam os temas carga elétrica, campo e potencial elétricos. A segunda unidade, “Eletrodinâmica”, é dividida em quatro capítulos: Corrente elétrica e resistores; Associação de resistores e medidas elétricas; Circuitos elétricos; e Capacitores. Por fim, a última unidade do LD3, intitulada “Eletromagnetismo” também é composta por quatro capítulos: Campo magnético e sua

influência em cargas elétricas; A origem do campo magnéticos; Força magnética em correntes elétricas; e Indução eletromagnética.

No LD4, o eletromagnetismo é apresentado, assim como nos demais livros didáticos analisados, em três unidades: “Eletrostática”, “Eletrodinâmica” e “Eletromagnetismo”. A primeira unidade é dividida em sete capítulos: Eletrização; Força elétrica; Campo elétrico; Potencial elétrico; Trabalho da força elétrica; Condutores em equilíbrio eletrostático; e Capacitor. Na segunda unidade do livro didático, os autores apresentam os capítulos: Corrente elétrica; Resistores elétricos; Aparelhos de medição elétrica; Geradores e receptores elétricos; e Leis de Kirchoff. A última unidade do livro, dedicada ao eletromagnetismo, aborda os temas campo e força magnética, indução eletromagnética e corrente alternada.

Em relação às atividades experimentais, o LD1 apresenta, sempre ao final de seus capítulos, um quadro intitulado “Pratique física”, em que são propostas atividades experimentais relacionadas ao tema estudado. De fato, são atividades simples, como no caso do experimento sobre blindagem eletrostática, proposto ao fim do capítulo sobre campos elétricos. No entanto, em algumas das experiências, é necessário haja a presença de um(a) tutor(a) ou a de um(a) auxiliar de laboratório para que se faça o uso adequado de alguns equipamentos, como no caso do experimento proposto acerca do tema indução eletromagnética, em que se utiliza um microamperímetro.

De modo semelhante, o LD2 apresenta, ao longo de suas seções, quadros intitulados “Experimento”, em que são propostas atividades experimentais. Algumas destas atividades podem ser realizadas com materiais simples, como no caso da experiência que explora a atração e repulsão eletrostática.

O LD3 também apresenta propostas de atividades experimentais em quadros intitulados “Faça você mesmo”, enquanto o LD4 propõe este tipo de atividade em “Atividade prática”.

De modo geral, os livros analisados apresentam um grande enfoque nos dispositivos – principalmente elétricos – e em suas associações com dispositivos tecnológicos, tais como resistores, capacitores e geradores de energia. As equações que fundamentam o eletromagnetismo são, normalmente, definidas sem que se proponha uma discussão, ou abordagem experimental, para que seja possível estabelecer uma relação entre estas equações e os fenômenos físicos. Nesse sentido, não se estimula a ideia de que as equações são uma linguagem apropriada, e necessária, para descrever os fenômenos que observamos e medimos.

3.1.1 Lei de Gauss para eletricidade

No LD1, a lei de Gauss não é abordada quantitativamente – e nem poderia, uma vez que exige um ferramental matemático que vai além do que é visto em nível médio – e também não é diretamente discutida qualitativamente. No entanto, na primeira unidade do livro didático, durante as seções 1.5 e 2.1, denominadas “Carga elétrica” e “Campo elétrico” respectivamente, os autores apresentam as cargas elétricas como as fontes do campo eletrostático, o que pode ser considerado com uma abordagem qualitativa e indireta da lei de Gauss.

No LD2, os autores comentam sobre o campo elétrico como uma entidade física associada a corpos eletrizados, ao longo do capítulo “Campo elétrico”, o que também pode ser considerado como uma discussão indireta acerca da lei de Gauss. No entanto, não há a abordagem direta desta lei.

Os autores dos LD3 e LD4, descrevem o campo elétrico como uma grandeza presente em pontos do espaço que estão sob a influência de cargas elétricas. Novamente, a ideia de que cargas elétricas são as fontes de campo eletrostático é apresentada. Todavia, a lei de Gauss também não é abordada diretamente nestas obras.

3.1.2 Lei de Gauss para o magnetismo

No LD1, a lei de Gauss para magnetismo não é abordada diretamente. Entretanto, os autores discutem sobre a inseparabilidade dos polos magnéticos, o que pode ser considerado como uma discussão qualitativa desta lei. Um ponto interessante, é que os autores citam a previsão teórica, realizada por Paul Dirac, acerca da existência dos monopolos magnéticos, e comentam que há grupos de cientistas que procuram sua comprovação experimental.

Os autores dos demais livros didáticos analisados, LD2, LD3 e LD4, também apresentam discussões acerca da inseparabilidade dos polos magnéticos, porém sem fazer referência à lei de Gauss do magnetismo.

3.1.3 Lei de Faraday-Lenz

No LD1, os autores iniciam a abordagem da lei de Faraday-Lenz introduzindo o conceito de fluxo magnético e força eletromotriz (f.e.m.). Em seguida, apresentam a lei de Faraday, de maneira resumida, como: “Sempre que houver uma variação no fluxo magnético através de um circuito, aparecerá, nesse circuito, uma f.e.m. induzida. O valor dessa f.e.m. é dado por:

$$\varepsilon = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} \quad (3.1)$$

em que $\Delta\varphi$ é a variação do fluxo observada no intervalo de tempo Δt .” (LUZ *et al.*, 2016).

Para introduzir a lei de Lenz, os autores do LD1 descrevem a demonstração experimental em que a variação do fluxo do campo magnético, em um circuito fechado, gera uma corrente induzida cujo sentido é dado pela lei de Lenz. Assim, apresentam esta lei como: “A corrente induzida em um circuito aparece sempre com um sentido tal que o campo magnético que ela cria tende a contrariar a variação do fluxo magnético que a originou.” (LUZ *et al.*, 2016).

Em outra seção do LD1, “Ondas Eletromagnéticas”, os autores retomam a situação em que o fluxo de campo magnético é variado, associando, à esta variação, a geração de um campo elétrico induzido. No entanto, os autores descrevem este fenômeno sem fazer referência à lei de Faraday-Lenz.

De modo semelhante, os autores do LD2 apresentam breves discussões acerca dos conceitos de fluxo de campo magnético e força eletromotriz para então apresentar as leis de Faraday e de Lenz. Uma diferença, em relação ao LD1, é que os autores apresentam a expressão matemática referente à lei de Faraday-Lenz (incluindo o sinal negativo) e não somente à lei de Faraday, como no LD1.

Os autores do LD3 apresentam a terceira lei do eletromagnetismo, como lei de Faraday-Neumann, após discorrerem acerca dos conceitos de indução eletromagnética, fluxo de campo magnético e, brevemente, acerca da força eletromotriz. Após discutirem qualitativamente sobre a lei de Lenz, os autores apresentam a equação matemática que descreve a lei de Faraday-Lenz.

No LD4, os autores introduzem a lei de Faraday apresentando a descrição de um experimento em que o fluxo de campo magnético é variado em um circuito fechado, onde observa-se a geração de uma corrente elétrica induzida. A partir desta discussão qualitativa, os autores apresentam a equação matemática que descreve a lei de Faraday. Em seguida, abordam a lei de Lenz descrevendo-a como a lei que “(...) ajuda a determinar o sentido da corrente elétrica induzida, complementando a lei de Faraday (...)” (YAMAMOTO e FUKU, 2016).

3.1.4 Lei de Ampère-Maxwell

Os autores do LD1 não abordam a lei de Ampère de maneira direta, porém, através da descrição da experiência de Oersted, discorrem acerca do fato de que correntes estacionárias são fontes de campo magnético, o que pode ser considerado como uma abordagem indireta e

qualitativa da lei de Ampère. Além disso, na seção intitulada “Ondas Eletromagnéticas”, os autores introduzem, de maneira indireta, a contribuição de Maxwell à lei de Ampère, em que explicam que campos elétricos variáveis no tempo também geram campos magnéticos.

Bastante similar ao LD1, os autores do LD2 também introduzem a lei de Ampère, de forma indireta e qualitativa, a partir de uma discussão acerca do experimento de Oersted. Entretanto, os autores não comentam sobre campos magnéticos gerados a partir de variações de campos elétricos no tempo – contribuição de Maxwell.

No LD3 e LD4, os autores também partem da discussão da experiência de Oersted para abordar a lei de Ampère de maneira indireta, em que descrevem que correntes elétricas são fontes de campo magnético. Em particular, os autores do LD4 comentam, nas seções destinadas à abordagem da lei de Biot-Savart, sobre a lei de Ampère (YAMAMOTO e FUKU, 2016, p. 183):

No caso particular de condutores retilíneos e longos, como os fios que usamos rotineiramente, a corrente elétrica de intensidade i gera um campo magnético cujas linhas de força são circunferências concêntricas, situadas em planos perpendiculares ao fio. Em cada circunferência (de raio $R = d$, que é a distância do fio até um ponto P da circunferência), a intensidade do vetor indução magnética B é determinada pela Lei de Ampère:

$$B = \frac{\mu \cdot i}{2\pi \cdot d}$$

No entanto, assim como no LD2, os autores dos LD3 e LD4 não comentam sobre a contribuição de Maxwell à lei de Ampère.

3.2 Elaboração do material didático

O material didático temático, parte fundamental do presente trabalho de conclusão de curso, foi elaborado de modo a abordar as quatro equações de Maxwell de maneira qualitativa a partir de demonstrações experimentais. Este material é direcionado à alunos e professores do ensino médio, como material complementar ao longo do estudo do eletromagnetismo.

Levando em conta as observações realizadas através da análise das abordagens das leis fundamentais do eletromagnetismo nos livros didáticos de física, o material didático proposto (capítulo 5) apresenta algumas demonstrações experimentais como estratégias para o desenvolvimento dos conceitos fundamentais que compõem a teoria eletromagnética. Não que estes conceitos possam ser originados apenas por meio de experiências, mas que possam justificar seus resultados a partir da observação e transposição para uma linguagem formal. Assim, o material didático desenvolvido propõe a transição de um saber que não oferece

grandes reflexões acerca dos fenômenos eletromagnéticos, para um saber científico em que a compreensão dos fenômenos fundamentais é priorizada, e não sua manipulação em problemas complexos.

O material didático foi desenvolvido de modo que, para cada uma das quatro equações de Maxwell, são propostos experimentos demonstrativos, bem como a apresentação de conceitos fundamentais, e discussão acerca dos experimentos propostos. As atividades experimentais apresentadas ao longo do material didático são, de modo geral, simples, a fim de que possam ser desenvolvidas pelos professores no laboratório de física ou em sala de aula.

Devido à grande variedade de fontes de divulgação, não se sabe bem ao certo o(s) autor(es) das atividades experimentais propostas. No entanto, pode-se citar, como fontes, sites e canais do Youtube, dedicados à divulgação científica, tais como: Física Universitária (UNIVESP), Feira de Ciências e Manual do Mundo. Embora as atividades experimentais apresentadas já tenham sido amplamente divulgadas, a intenção deste trabalho foi a de relacioná-los, de maneira qualitativa, às equações de Maxwell.

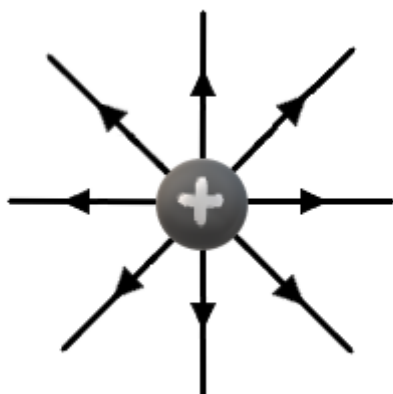
4 MATERIAL DIDÁTICO

4.1 Lei de Gauss para a eletricidade

A lei de Gauss para a eletricidade carrega o significado físico de que cargas elétricas, positivas e negativas, são, respectivamente, fontes e sumidouros de campos eletrostáticos. Segunda esta lei, o fluxo¹ de campo elétrico através de uma superfície fechada é proporcional à quantidade de carga elétrica envolvida pela superfície.

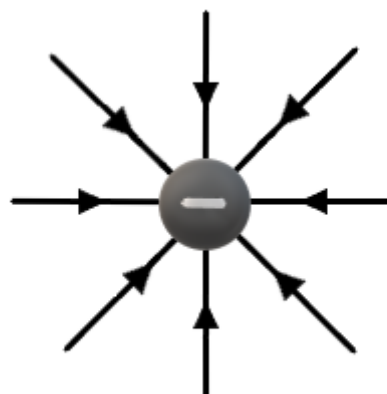
Os campos elétricos, gerados pelas cargas elétricas pontuais, possuem simetria esférica, com linhas de campo que apontam na direção radial.

Figura 3 - Campo eletrostático gerado por uma carga elétrica positiva



Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 4 - Campo eletrostático gerado por uma carga elétrica negativa



Fonte: Autoria própria (2021)

Quanto maior for a densidade de linhas de campo em uma região do espaço, maior é a intensidade do campo eletrostático naquela região. É possível observar, que a densidade de linhas de campo em uma região próxima de uma carga elétrica é maior do que em uma região mais distante, pois as linhas de campo tendem a se afastar umas das outras devido à simetria radial. Portanto, o campo eletrostático é mais intenso próximo a uma carga elétrica – fonte ou sumidouro – e decresce, com o quadrado da distância, até se tornar nulo em regiões cuja distância da carga tende ao infinito.

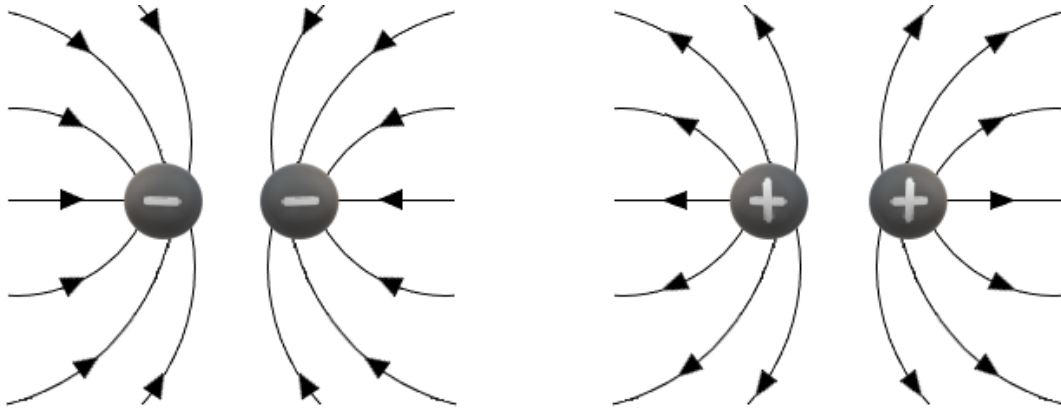
O campo eletrostático é a entidade física responsável por mediar a interação entre cargas elétricas. Assim, mesmo quando não estão em contato, as cargas podem interagir via

¹ Definido como o produto entre a média das componentes normais do vetor campo elétrico, que furam a superfície, e a área da superfície (FEYNMAN, 2008).

campo, repelindo-se ou atraindo-se, de modo que a força trocada é proporcional ao campo eletrostático.

Experimentalmente, observa-se que a força trocada entre duas cargas elétricas de mesmo sinal é repulsiva. As linhas de campo geradas pelas cargas tendem, então, a se repelir.

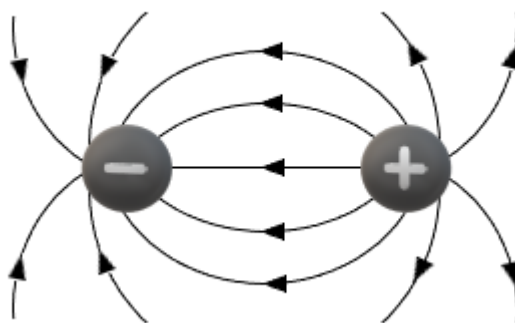
Figura 5 - Linhas de campo de duas cargas elétricas de mesmo sinal



Fonte: Autoria própria (2021)

Já a força eletrostática trocada por duas cargas de sinais opostos – um próton e um elétron – é atrativa. Portanto, as linhas de campo eletrostático tendem a se atrair.

Figura 6 - Linhas de campo de duas cargas elétricas de sinais opostos



Fonte: Autoria própria (2021)

Materiais eletrizados positivamente – com falta de elétrons – ou negativamente – com excesso de elétrons – também interagem entre si, através do campo eletrostático. Nesse caso, o campo elétrico resultante é gerado por uma grande quantidade de cargas elétricas e, em geral, não possui simetria radial: cada carga elétrica pontual contribui com um campo eletrostático

radial, de modo que a distribuição dessas cargas, ao longo do material, gera um campo resultante, cujo formato das linhas depende da geometria da distribuição.

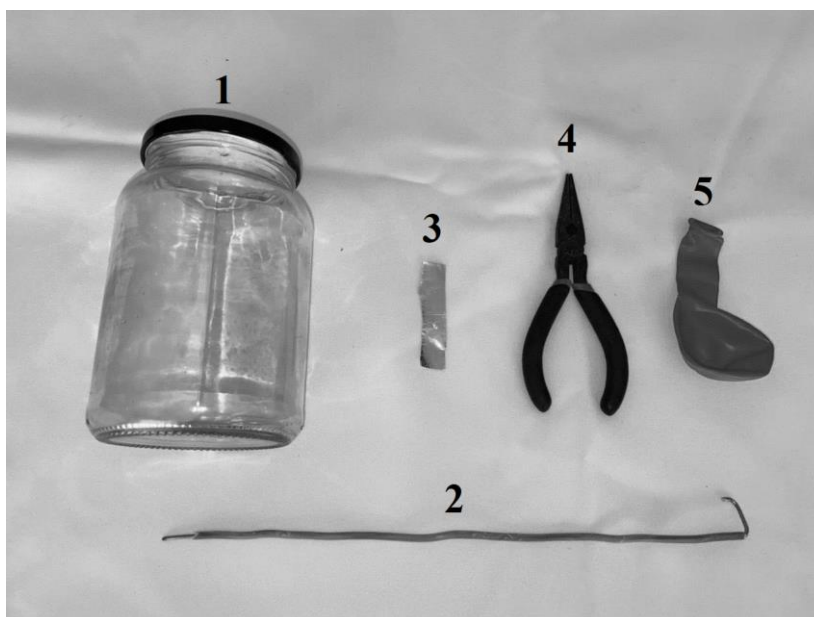
Os materiais eletrizados fornecem uma maneira simples de observar a ação da força eletrostática. Existem três processos distintos por meio dos quais um material pode se tornar eletrizado: atrito, contato e indução. Esses processos de eletrização e, fundamentalmente, a ação da força elétrica, podem ser investigados por meio da construção de um eletroscópio caseiro.

Eletroscópio caseiro: estudo dos processos de eletrização

Materiais:

- 1- Pote de vidro com tampa;
- 2- 20 centímetros de fio de cobre sólido encapado;
- 3- Papel alumínio;
- 4- Alicate de corte;
- 5- Bexiga de borracha.

Figura 7 - Materiais necessários para a construção do eletroscópio caseiro



Fonte: Autoria própria (2021)

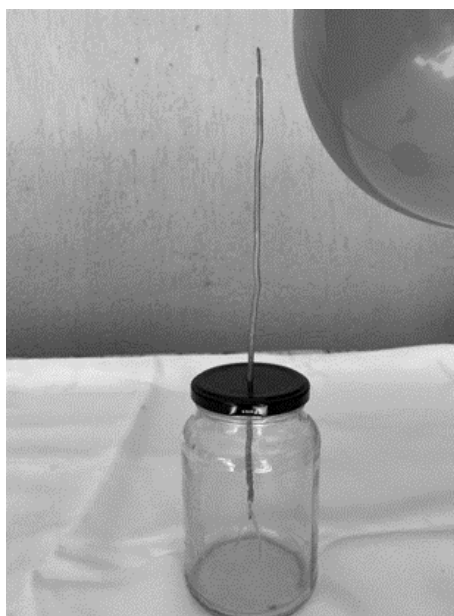
Montagem experimental:

- 1- Faça um furo no centro da tampa do pote com um prego para que o fio de cobre encapado possa transpassar de forma bem justa;
- 2- Desencape aproximadamente 2 cm do fio de cobre, em uma das extremidades, e 1,5 cm na outra;

- 3- Transpasse o fio pela tampa do vidro, de modo que a extremidade com 1,5 cm de fio desencapado fique no interior do pote, quando a tampa for colocada;
- 4- Faça uma espécie de “gancho” na extremidade do fio que ficará no interior do pote de vidro: dobre a região desencapada em 90°, para que fique na posição horizontal no interior do pote, e dobre, novamente, apenas 5 mm desta ponta em 90°, de modo que esta parte fique na posição vertical no interior do pote.
- 5- Corte uma tira de papel alumínio de 1 cm x 4 cm. Dobre-a em formato de V e a deposite sobre a extremidade do fio de cobre, em formato de “gancho”, no interior de pote;
- 6- Se necessário, cole o fio de cobre na parte superior da tampa com cola quente de modo que ele não deslize;
- 7- Tampe o pote de vidro.

Ao fim da montagem, o eletroscópio deverá ficar como o da Figura 8:

Figura 8 - Eletroscópio caseiro



Fonte: Autoria própria (2021)

Procedimento experimental:

- 1- Infle a bexiga com ar e a atrite no cabelo. Em seguida, a aproxime da extremidade externa do fio de cobre, mas sem tocá-lo. Observe o que acontece
- 2- Encoste a bexiga na ponta do fio. Observe o que acontece.
- 3- Encoste o dedo na extremidade do fio. Observe o que acontece.

Análise do experimento:

Ao atritarmos a bexiga no cabelo, ocorre o processo de eletrização por atrito, em que a bexiga se torna eletricamente carregada. Como a bexiga é um corpo isolante elétrico e, portanto, possui poucos elétrons livres, as cargas elétricas ficam localizadas somente na região onde ocorreu o atrito.

Ao aproximar a bexiga da extremidade do fio condutor, que possui grande quantidade de elétrons livres, as cargas elétricas da bexiga atraem as cargas de sinal oposto, presentes no fio, enquanto repelem as cargas de sinal contrário. Dessa forma, o fio condutor é eletrizado por indução: sua extremidade próxima à bexiga apresenta um acúmulo de cargas com sinal contrário as da bexiga, enquanto sua outra extremidade apresenta um acúmulo de cargas elétricas de mesmo sinal.

Uma vez que há um acúmulo de cargas elétricas, de mesmo sinal, na extremidade do fio condutor ligado à lâmina de alumínio, em formato de V, as duas pontas desta lâmina também apresentam um acúmulo de cargas elétricas de mesmo sinal e, portanto, tendem a se afastar uma da outra, devido a força eletrostática de repulsão. No entanto, essa interação é observada somente enquanto a bexiga está próxima do fio condutor, e cessa quando a bexiga é afastada.

Ao encostar a bexiga no fio condutor, ocorre a eletrização do fio por contato: as cargas elétricas fluem da bexiga para o fio, de modo que tanto a bexiga quanto o fio condutor ficam eletrizados com cargas elétricas de mesmo sinal. Assim, a lâmina de alumínio, presa à uma das extremidades do fio condutor, fica eletrizada com cargas de mesmo sinal e, portanto, suas metades se repelem, devido à força eletrostática de repulsão. Na eletrização por contato, o fio condutor se mantém eletrizado mesmo após a bexiga e o fio não estarem mais em contato.

Por fim, ao encostar o dedo no fio condutor, ocorre o processo de aterramento, em que, dependendo do sinal das cargas elétricas presentes no fio condutor, elétrons fluem da terra para o fio ou do fio para a terra, a fim de que o fio condutor fique eletricamente neutro.

4.2 Lei de Gauss para o magnetismo

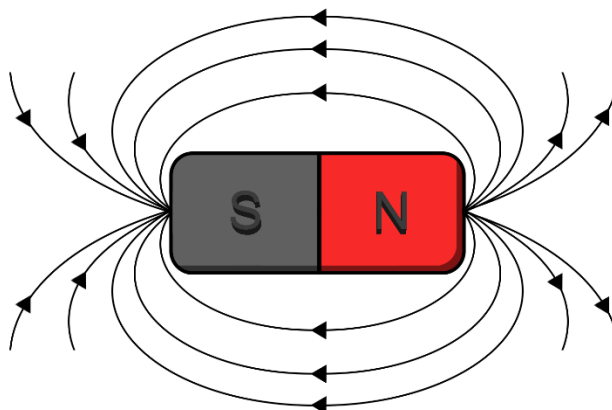
De modo semelhante à eletricidade, em que o campo elétrico é a entidade física responsável pela interação entre as cargas elétricas e materiais eletrizados em geral, no magnetismo é o campo magnético o responsável por mediar a interação entre materiais que apresentam propriedades magnéticas, como os materiais ferromagnéticos.

Na natureza, os campos magnéticos apresentam-se de forma diferente do que no caso da eletrostática: enquanto nesta última existem os monopolos elétrico – cargas elétricas positivas e negativas – geradores de campo elétrico, no magnetismo existem os polos

magnéticos norte e sul. No entanto, enquanto as cargas elétricas podem ser observadas separadamente na natureza, os polos magnéticos, até então, sempre foram observados em conjunto: um polo sul sempre está acompanhado de um polo norte, e vice-versa.

Materiais que possuem propriedades magnéticas apresentam, portanto, os dois polos magnéticos – norte e sul. Por convenção, na parte externa dos materiais com propriedades magnéticas, as linhas de campo magnético partem do polo norte e chegam ao polo magnético sul. Já na parte interna destes materiais, as linhas de campo partem do polo magnético sul e chegam ao polo magnético norte, formando, assim, uma configuração de linhas de campo que se fecham. Assim como no caso do campo elétrico, quanto maior for a densidade de linhas de campo magnético em uma determinada região, maior será a intensidade do campo.

Figura 9 - Linhas de campo magnético em um ímã retangular



Fonte: Autoria própria (2021)

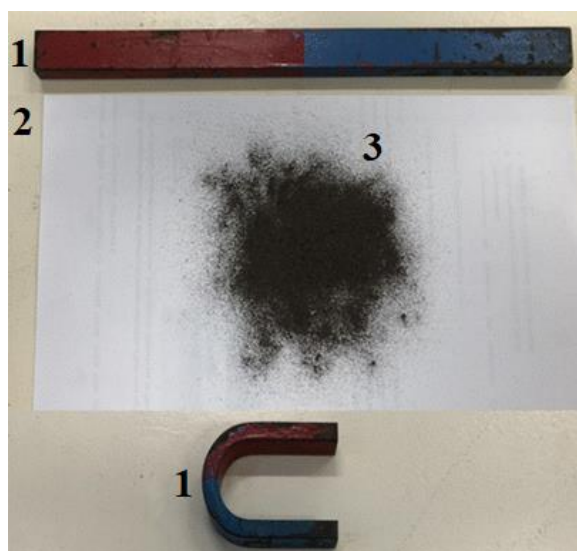
As linhas de campo magnético, apresentadas por materiais que possuem propriedades magnéticas, podem ser observadas, experimentalmente, com o auxílio de limalha de ferro, como na atividade experimental proposta:

Linhas de campo magnético

Materiais:

- 1- Um ímã em forma de barra e outro em forma de “U”;
- 2- Uma folha de papel A4;
- 3- Limalhas de ferro com baixa granulação.

Figura 10 - Materiais necessários para o experimento "Linhas de campo magnético"



Fonte: Autoria própria (2021)

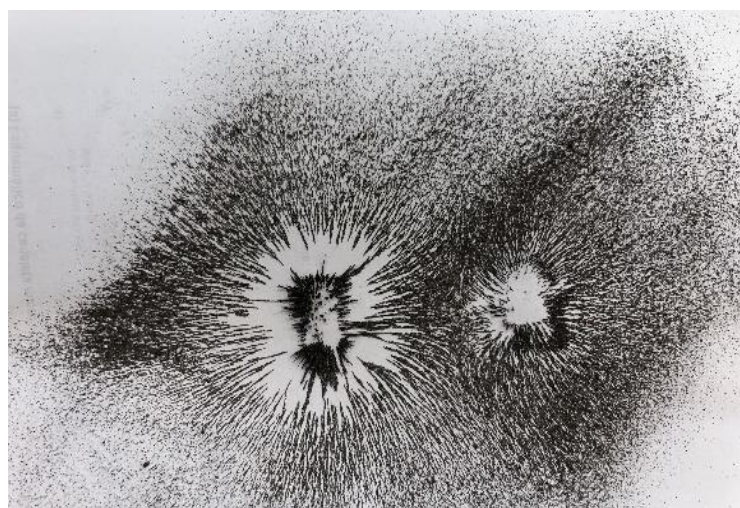
Procedimento experimental:

1- Coloque um dos imãs sobre a folha de papel e pulverise a limalha de ferro sobre a folha.

Como são as linhas de campo observadas?

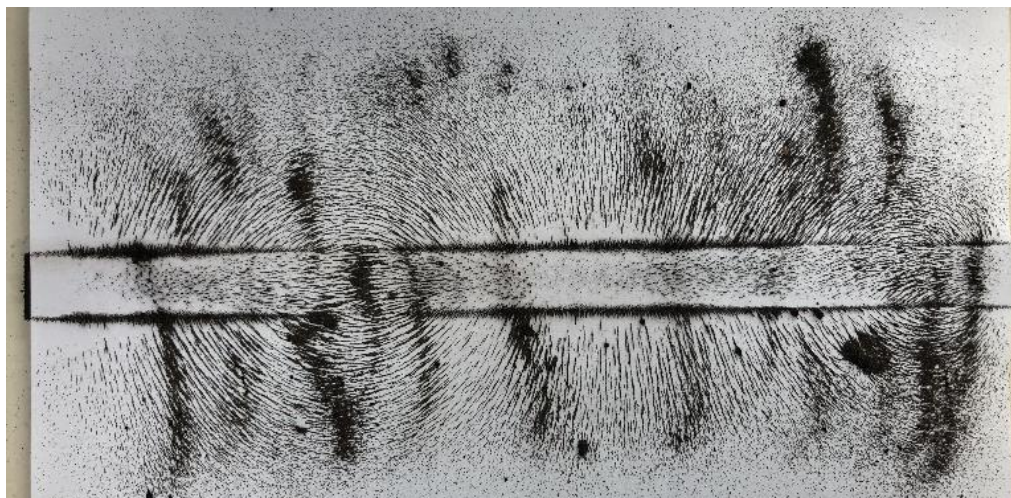
2- Repita o passo 1 com o outro imã. Como são as linhas de campo observadas?

Figura 11 - Linhas de campo magnético apresentadas por um imã em formato de "U"



Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 12 - Linhas de campo magnético apresentada por um ímã retangular



Fonte: A autoria própria (2021)

Análise do experimento:

Um ímã retangular possui os polos magnéticos, norte e sul, em suas extremidades, de modo que as linhas de campo partem do polo norte e entram no polo sul. O que se observa então, ao centro do ímã, são curvas que partem de uma extremidade e chegam até a outra.

Da mesma forma, os polos magnéticos do ímã em formato de “U” estão em suas extremidades, de modo que, externamente ao ímã, as linhas de campo partem do polo norte e chegam ao polo magnético sul. O que se observa, nesse caso, são curvas que partem das duas extremidades do ímã em “U” e se unem.

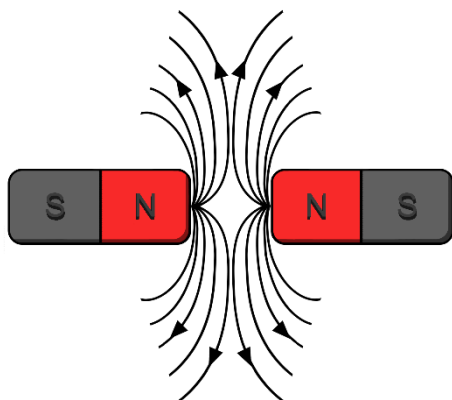
As propriedades magnéticas dos ímãs utilizados no experimento, ilustrado nas figuras 11 e 12, já estavam um tanto prejudicadas. Por esse motivo, as linhas de campo magnético, partindo do polo norte e chegando até o polo sul, não ficaram muito visíveis. No entanto, a utilização de ímãs novos melhora a nitidez do experimento.

Os efeitos do campo magnético podem ser observados através dos materiais que possuem propriedades magnéticas, como os ímãs naturais e artificiais: dois ímãs podem se atrair ou se repelir mutuamente – dependendo de sua orientação – e essa interação ocorre devido aos campos magnéticos apresentados por esses materiais.

Experimentalmente, observa-se que quando dois ímãs são aproximados de modo que o polo sul (ou norte) de um deles é direcionado também para o polo sul (ou norte) do outro, os ímãs tendem a repelir-se mutuamente, com as linhas de campo magnético afastando-se umas das outras. Já quando os ímãs são aproximados de forma que o polo sul (ou norte) de um dos ímãs é direcionado ao polo norte (ou sul) do outro, eles tendem a se atrair. Assim, analogamente à eletrostática, em que cargas elétricas iguais se repelem enquanto cargas elétricas diferentes se

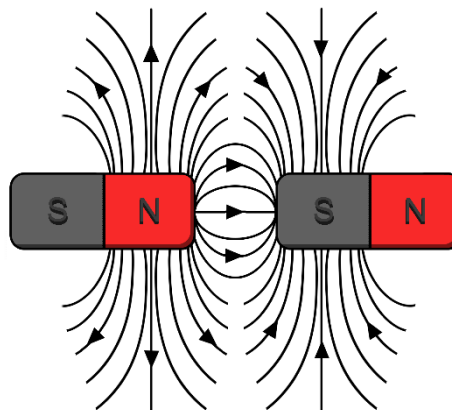
atraem; no magnetismo, polos magnéticos iguais se repelem, enquanto polos magnéticos diferentes se atraem.

Figura 13 - Repulsão magnética. O mesmo para quando dois polos sul são aproximados



Fonte: Autoria própria (2021)

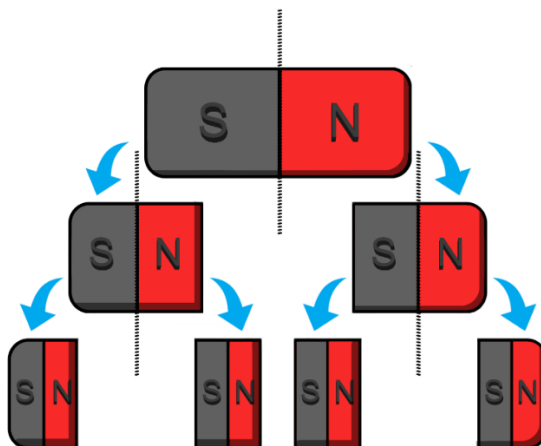
Figura 14 - Atração magnética



Fonte: Autoria própria (2021)

Experimentalmente, observa-se que ao dividir-se um ímã ao meio, dois novos ímãs – que apresentam os polos magnéticos norte e sul – são formados. A configuração dos polos magnéticos das duas metades ocorre de modo que ambas tendem a atrair-se para retornar ao ímã original.

Figura 15 - Inseparabilidade dos polos magnéticos



Fonte: Autoria própria (2021)

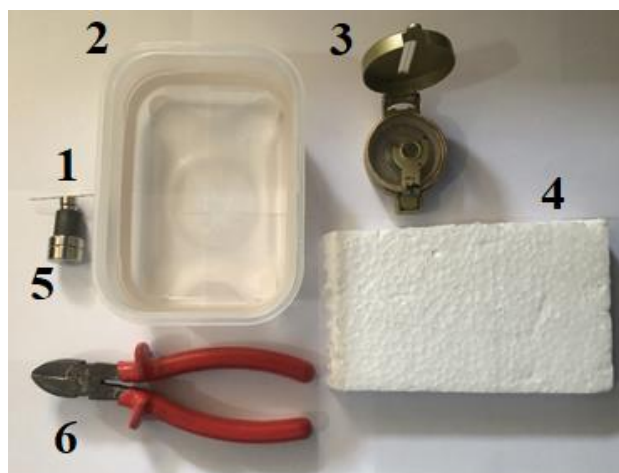
A inseparabilidade dos polos magnéticos, ou inexistência de cargas magnéticas pontuais como fontes de campo magnético, é descrita pela segunda equação de Maxwell do eletromagnetismo, conhecida também como lei de Gauss para o magnetismo. Esta descrição pode ser visualizada a partir da atividade experimental proposta:

Ausência de monopolos magnéticos

Materiais necessários:

- 1- Agulha de costura não-magnetizada;
- 2- Vasilha com água;
- 3- Bússola;
- 4- Peça de isopor;
- 5- Ímãs;
- 6- Alicates.

Figura 16 - Materiais necessário para o experimento "Ausência de monopolos magnéticos"



Fonte: Autoria própria (2021)

Procedimento experimental:

- 1- Para magnetizar a agulha pode-se utilizar de diversas técnicas de magnetização. Uma delas é deixar a agulha durante alguns minutos sob o efeito de um campo magnético intenso gerado por ímãs permanentes. Sendo assim, posicione a agulha próxima aos ímãs por alguns minutos para que seja magnetizada.
2. Insira dois pedacinhos de isopor, um em cada uma das extremidades da agulha, para que a mesma possa flutuar sobre a água;
3. Coloque a agulha para flutuar na vasilha com água;
4. Para verificar se a agulha foi magnetizada, ou seja, se apresenta os polos norte e sul, coloque a bússola ao lado da vasilha com água e compare as orientações da agulha e da bússola. Se a agulha estiver orientada da mesma forma que a bússola, a agulha estará magnetizada;
5. Com um alicate, corte a agulha ao meio. Coloque mais pedacinhos de isopor nas novas pontas da agulha. Novamente, coloque as duas metades da agulha para flutuar na vasilha com água;
6. Novamente, posicione a bússola ao lado da vasilha com água e compare a sua orientação com as orientações das duas metades da agulha. O que foi observado?

7. Novamente, corte ao meio cada uma das metades da agulha e coloque pedacinhos de isopor nas novas pontas. Coloque as quatro partes da agulha para flutuar na vasilha com água. Repita o procedimento do passo 6. O que foi observado?

Análise do experimento:

Ao deixar a agulha próxima dos ímãs, ocorre o processo de magnetização, em que a agulha se torna uma espécie de ímã retangular, apresentando os polos magnéticos norte e sul, em suas extremidades.

Ao se cortar a agulha magnetizada ao meio, o que ocorre não é a separação dos polos magnéticos, mas sim a formação de dois novos ímãs que também apresentam os polos magnéticos norte e sul. A cada novo corte na agulha magnetizada, novos ímãs são formados, de modo que os polos magnéticos nunca são separados.

4.3 Lei de Faraday-Lenz

A primeira equação de Maxwell para o eletromagnetismo carrega o significado físico de que as cargas elétricas, positivas e negativas, são as fontes e sumidouros do campo eletrostático. No entanto, há na natureza uma segunda fonte campo elétrico: variações de campo magnético.

A terceira equação de Maxwell para o eletromagnetismo, conhecida como lei de Faraday-Lenz, carrega o significado físico de que variações de um campo magnético em um circuito fechado geram um campo elétrico neste circuito.

O campo elétrico gerado pela variação de campo magnético é, no entanto, diferente do campo eletrostático – gerado pelas cargas elétricas. A diferença entre estes dois campos elétricos, além de suas fontes, está no formato das linhas de campo: enquanto o campo eletrostático possui simetria esférica, com as linhas de campo “entrando” ou “saindo” das cargas elétricas, o campo elétrico gerado por variações de campo magnético possui linhas de campo fechadas.

Uma maneira de observar a geração de campo elétrico a partir da variação de campo magnético, é através da observação dos efeitos do campo elétrico gerados sobre um material condutor. Nesse tipo de material, há uma grande quantidade de elétrons livres que, na presença de um campo elétrico, sofrem a ação da força elétrica e passam a se movimentar, gerando uma corrente elétrica que pode ser medida. Assim, ao se realizar variações de campo magnético em uma região próxima a um material condutor – espira condutora, por exemplo – haverá a geração

de campo elétrico em todo o espaço e que, no material condutor, exercerá força elétrica sobre os elétrons livres, de modo uma corrente elétrica será estabelecida no material.

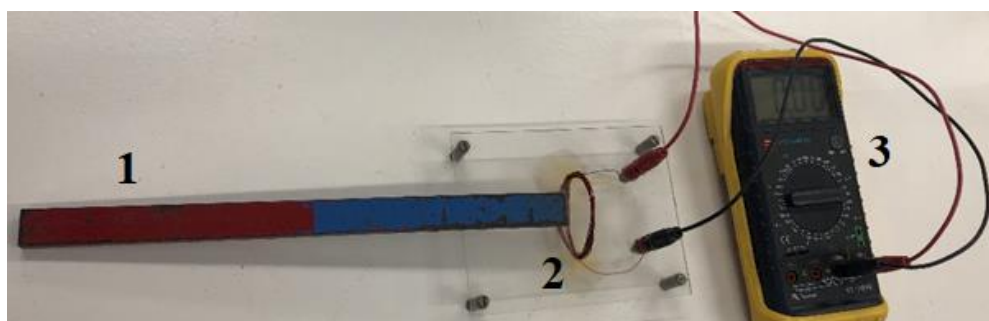
O sentido das linhas do campo elétrico gerado no espaço depende de como ocorre a variação de campo magnético: possuem um determinado sentido quando a variação de campo magnético ocorre de modo que a quantidade de linhas desse campo aumenta na região em que o campo elétrico é gerado; e possuem sentido contrário quando a quantidade de linhas de campo magnético diminui naquela região. Experimentalmente, o sentido assumido pelo campo elétrico pode ser visto através do sentido assumido pela corrente elétrica – gerada quando os elétrons sofrem a ação do campo elétrico.

Indução eletromagnética

Materiais necessários:

- 1- Imã;
- 2- Bobina enrolada com fio de cobre esmaltado de 12 ou de 600 espiras;
- 3- Multímetro.

Figura 17 - Materiais necessários para o experimento "Indução eletromagnética"



Fonte: Autoria própria (2021)

Procedimento experimental:

- 1- Uma bobina pode ser construída a partir de um cilindro obtido a partir do corte de cerca de 20 cm de comprimento de uma garrafa PET onde os fios podem ser enrolados e fixados através de fita adesiva;
- 2- Ajuste o multímetro para funcionar como um mili-amperímetro;
- 3- Conecte as extremidades do fio da bobina aos terminais do amperímetro.
- 4- Mantenha o imã parado próximo à bobina. O que o amperímetro acusou?
- 5- Aproxime rapidamente o imã da bobina de tal forma que ele penetre na parte oca da bobina. O que o amperímetro acusou? Em seguida, afaste rapidamente o imã da bobina. O que o amperímetro acusou?

Análise do experimento:

Quando o ímã fica parado próximo à bobina, o amperímetro não acusa a presença de corrente elétrica, pois não há a variação de campo magnético para que um campo elétrico seja gerado no espaço e uma corrente elétrica se estabeleça na bobina.

Quando o ímã é rapidamente aproximado da bobina, um campo elétrico é gerado no espaço pois há a variação de campo magnético naquela região. Este campo elétrico exerce força elétrica sobre os elétrons livres da bobina, fazendo com que uma corrente elétrica seja estabelecida e medida pelo amperímetro.

Quando o ímã é afastado da bobina, um campo elétrico também é gerado no espaço, devido à variação de campo magnético. No entanto, o sentido assumido pelo campo elétrico é oposto ao sentido do campo elétrico gerado quando o ímã foi aproximado da bobina. Como o sentido do campo elétrico foi invertido, o sentido da corrente elétrica também é, o que é acusado pelo amperímetro.

4.4 Lei de Ampère-Maxwell

A segunda equação de Maxwell para o eletromagnetismo carrega o significado físico da, até então, inexistência de cargas magnéticas. A quarta equação de Maxwell, conhecida como lei de Ampère-Maxwell, apresenta, então, quais são as fontes de campo magnético: correntes elétricas – cargas elétricas em movimento ordenado – e variações de campo elétrico.

A lei de Ampère, ainda sem o termo acrescentado por Maxwell – que determina que variações de campo elétrico também geram campo magnético – estabelece que um campo magnético circular é gerado em uma região do espaço quando correntes elétricas penetram aquela região. Assim, um fio retilíneo, por exemplo, pelo qual passa uma corrente elétrica gera, ao seu redor, um campo magnético circular, cuja intensidade é proporcional à corrente elétrica que passa pelo fio.

Experimentalmente, o campo magnético gerado a partir da variação de campo elétrico é de difícil observação. Já o campo magnético gerado por correntes elétricas pode ser verificado com mais facilidade, por meio da passagem de corrente elétrica em um fio condutor e da observação dos efeitos do campo magnético em uma bússola.

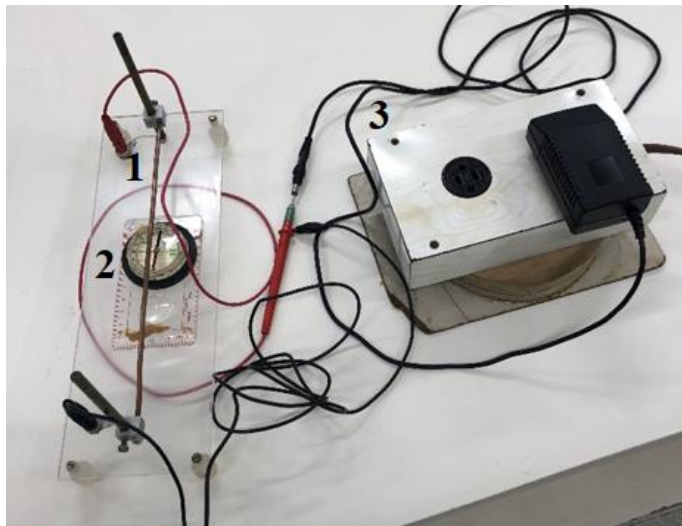
A experiência de Oersted

Materiais necessários:

- 1- Um metro de fio de cobre;
- 2- Uma bússola;

3- Uma fonte de 12 V, uma pilha grande de 6 volts, ou uma bateria pequena de 9 volts, todos de corrente contínua (CC).

Figura 18 - Materiais necessários para o experimento "A experiência de Oersted"



Fonte: Autoria própria (2021)

Procedimento experimental:

- 1- Prenda o fio de cobre de forma que ele fique de 1 a 2 cm acima da bússola;
- 2- Ajuste a bússola, abaixo do fio de cobre, de modo que seu ponteiro fique paralelo ao fio;
- 3- Conecte uma das extremidades do fio a um dos terminais da fonte ou bateria;
- 4- Apenas encoste a outra extremidade do fio de cobre ao outro terminal da fonte ou bateria e observe o que ocorre com a bússola;
- 5- Afaste a extremidade do fio do terminal da fonte e observe o que ocorre com a bússola;
- 6- Desconecte a extremidade do fio presa à um dos terminais da fonte, ou bateria, e conecte ao outro terminal;
- 7- Encoste a outra extremidade do fio de cobre ao outro terminal da fonte e observe o que ocorre com a bússola.

Análise do experimento:

Quando os dois terminais da fonte, ou bateria, são conectados ao fio de cobre, uma corrente elétrica se estabelece. Esta corrente, que passa pelo fio, gera ao seu redor um campo magnético – cujas linhas de campo circundam o fio. O que se observa é que o campo magnético gerado pela corrente que passa pelo fio, exerce uma força magnética no ponteiro (ímã) da bússola, desviando-o.

Ao inverter-se a conexão dos terminais da bateria, inverte-se o sentido da corrente elétrica estabelecida no fio de cobre. Como o sentido da corrente elétrica foi invertido, o sentido das linhas de campo magnético, que circundam o fio, também é invertido, de modo que o ponteiro da bússola passa a ser desviado com sentido contrário ao desvio observado anteriormente.

5 CONCLUSÕES

A partir da análise da abordagem das equações de Maxwell nos livros didáticos de física do ensino médio, aprovados pelo PNLN, conclui-se que as discussões, em grande parte qualitativas, que se apresentam acerca destas equações são pouco exploradas e carecem de profundidade. A ênfase do eletromagnetismo, tal como se apresenta nestes livros didáticos, está muito mais direcionada aos dispositivos elétricos e aplicações em geral, do que aos conceitos fundamentais da teoria eletromagnética, de modo que uma relação profunda entre ambos não é estabelecida.

Nesse sentido, o material didático temático, proposto como material complementar ao ensino de eletromagnetismo, buscou explorar os conceitos fundamentais da teoria eletromagnética, descritos pelas equações de Maxwell, a fim de que se torne possível estabelecer, então, uma relação um tanto mais direta entre tais conceitos e as aplicações do eletromagnetismo, como aquelas apresentadas nos livros didáticos. As demonstrações experimentais, propostas ao longo do material didático, compreenderam uma parte fundamental deste, tendo em vista as discussões apresentadas, ao longo deste trabalho, a respeito da importância da atividade experimental no ensino de física.

Para trabalhos futuros, é possível aplicar o material didático em sala de aula, como material complementar ao livro didático, de modo que seja possível estabelecer um diálogo entre os conceitos fundamentais do eletromagnetismo e suas aplicações.

REFERÊNCIAS

- ALVES FILHO, J. P. **Atividades experimentais: do método à prática construtivista**. 2000. 311 f. Tese (Pós Graduação em Educação) – Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2000.
- ALVES FILHO, J. P. Regras da transposição didática aplicadas ao laboratório didático. **Caderno brasileiro de ensino de Física**, v. 17, n. 2, p. 174-188, 2000.
- ARRUDA, S. M.; LABURÚ, C. E. Considerações sobre a função do experimento no ensino de ciências. *In*: NARDI, R. **Questões atuais no ensino de ciências**. São Paulo: Escrituras, 1998. p. 53-60.
- BACHELARD, Gaston. **A formação do espírito científico**. Rio de Janeiro: Contraponto, 1996. 316 p.
- BANDEIRA, Denise. **Materiais Didáticos**. Curitiba, 2009. Disponível em: <https://www.academia.edu/10850993/Materiais_did%C3%A1ticos>. Acesso em: 20 set. 2021.
- BARDIN, L. **Análise de conteúdo**. Lisboa: Edições 70, 1977.
- BOGDAN, R.; BIKLEN, S. **Investigação qualitativa em educação: uma introdução à teoria e aos métodos**. Porto editora, 1994.
- BRASIL. Base Nacional Comum Curricular. Brasília: Ministério da Educação, 2017.
- BRASIL. Ministério da Educação. **PNLD 2018: física** – guia de livros didáticos – ensino médio. Brasília, DF: Ministério da Educação, Secretária de Educação Básica, 2017b.
- BROCKINGTON, G.; PIETROCOLA, M. Serão as regras da Transposição Didática aplicáveis aos conceitos de Física Moderna?. **Investigações em Ensino de Ciências**, v. 10, n. 3, p. 387-404, 2016.
- CACHAPUZ, A. F.; PRAIA, J. F.; JORGE, M. Da educação em ciência às orientações para o ensino das ciências: um repensar epistemológico. **Ciência & educação**, v. 10, n. 3, p. 363-381, 2004.
- CERVO, A. L.; BERVIAN, P. A.; SILVA, R. **Metodologia científica**, 6. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2007.
- CHEVALLARD, Y; JOHSUA, M, A. **La transposition didactique: Du savoir savant au savoir enseigné**. Grenoble: La Pensée Sauvage, 1991.

CHEVALLARD, Y. Sobre a teoria da transposição didática: algumas considerações introdutórias. **Revista de Educação, Ciências e Matemática**, v. 3, n. 2, 2013.

FEYNMAN, R. P.; LEIGHTON, R. B.; SANDS, M. **Lições de física de Feynman**: volume 2. Bookman Companhia Editora Ltda, 2008.

FNDE. Edital de convocação nº 04/2015 – CGPLI. Edital de convocação para o processo de inscrição e avaliação de obras didáticas para o programa nacional do livro didático PNLD 2018. Brasília, FNDE: 2015.

GIL, A. C. *et al.* **Como elaborar projetos de pesquisa**. São Paulo: Atlas, 2002.

GIORDAN, M. O papel da experimentação no ensino de ciências. **Química nova na escola**, v. 10, n. 10, p. 43-49, 1999.

GRIFFITHS, D. **Eletrodinâmica**. 3. ed. São Paulo: Pearson Addison Wesley, 2011.

GUIMARÃES, O; PIQUEIRA, J. R.; CARRON, W. **Física**: volume 3. 2. ed. São Paulo: Ática, 2016.

HIGA, I.; OLIVEIRA, O. B. A experimentação nas pesquisas sobre o ensino de Física: fundamentos epistemológicos e pedagógicos. **Educar em Revista**, n. 44, p. 75-92, 2012.

HURAY, Paul G. Maxwell's equations. John Wiley & Sons, 2011.

LIMA, V. J. Z. S. **Propostas de ensino teórico e experimental das equações de Maxwell no ensino médio**. 2019. 59 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Física) – Universidade Federal do Ceará, Ceará, 2019.

LORENZ, K. M.; BARRA, V. M. Produção de Materiais Didáticos de Ciências no Brasil, Período 1950 a 1980. **Ciência e Cultura**, v. 38, n. 12 p. 1970-1983, 1986.

LUZ, A. M. R.; ÁLVARES, B. A.; GUIMARÃES, C.C. **Física**: Contexto e Aplicações. 2. ed. São Paulo: Editora Scipione, 2016.

MACHADO, K. D. **Teoria de eletromagnetismo**. v. 2. Ponta Grossa: Editora UEPG, 2002.

MAGALHÃES, M. F.; SANTOS, W.; DIAS, P. Uma proposta para ensinar os conceitos de campo elétrico e magnético: uma aplicação da História da Física. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 24, n. 4, p. 489-496, 2002.

MOZENA, E. R.; OSTERMANN, F. Sobre a Base Nacional Comum Curricular (BNCC) e o Ensino de Física. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 33, n. 2, p. 327-332, 2016.

NASCIMENTO, K. A. *et al.* Proposta de uma sequência didática para o ensino do eletromagnetismo. **Educere**, v. 19, n. 1, 2019.

OLIVEIRA, M. S. L.; NASCIMENTO, V. B. Ensino de ciências por investigação: uma sequência didática para o ensino de eletromagnetismo. *In: Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciências – ENPEC*, n. 9, Águas de Lindóia, 2013.

PENA, F. L. A.; FILHO, A. R. Maxwell, as equações do eletromagnetismo clássico e o livro didático de física do ensino médio. **Revista E.T.C. Educação, Tecnologia e Cultura**, v. 7, n. 6, p. 53-56, 2009.

PIETROCOLA, M. Inovação curricular em Física: transposição didática e a sobrevivência dos saberes. *In: Encontro de Pesquisa em Ensino de Física*, n. 11, Curitiba, 2008.

PRAIA, J.; CACHAPUZ, A.; GIL-PÉREZ, D. A hipótese e a experiência científica em educação em ciência: contributos para uma reorientação epistemológica. **Ciência & Educação**, v. 8, n. 2, p. 253-262, 2002.

ROCHA, C. H.; CATARINO, G. F. C. Kit experimental para ensino do eletromagnetismo: uma proposta de produto educacional. **Revista de Educação, Ciências e Matemática**, v. 9, n. 1, 2019.

ROSA, R. O. **As equações de Maxwell vista através de experimentos para alunos de nível médio**. 2017. 70 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Física) – Universidade Federal de Rondônia, Rondônia, 2017.

YAMAMOTO, K; FUKU, L. F. Física para o ensino médio: eletricidade e física moderna. 4. ed. São Paulo: Saraiva, 2016.

ZABALA, Antoni. **A prática educativa: como ensinar**. Porto Alegre: ArtMed, 1998.