

UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
MESTRADO NACIONAL PROFISSIONAL DE ENSINO DE FÍSICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENSINO DE FÍSICA EM REDE NACIONAL

ALINE CRISTINE GOMES DA SILVEIRA

INDUÇÃO MAGNÉTICA: uma proposta de UEPS fundamentada na Teoria da
Aprendizagem Significativa

SÃO LUÍS – MA

2022

ALINE CRISTINE GOMES DA SILVEIRA

INDUÇÃO MAGNÉTICA: uma proposta de UEPS fundamentada na Teoria da Aprendizagem Significativa

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física em Rede Nacional da Universidade Federal do Maranhão como requisito para obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Orientador: Prof. Dr. Jerias Alves Batista

SÃO LUÍS – MA

2022

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Diretoria Integrada de Bibliotecas/UFMA

Silveira, Aline Cristine Gomes da.

INDUÇÃO MAGNÉTICA:

uma proposta de UEPS fundamentada na Teoria da Aprendizagem Significativa / Aline Cristine Gomes da Silveira. - 2022.
266 f.

Orientador(a): Jerias Alves Batista.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Rede - Ensino de Física em Rede Nacional/ccet, Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2022.

1. Aprendizagem significativa. 2. Indução Magnética.
3. Unidade de ensino potencialmente significativo. I. Batista, Jerias Alves. II. Título.

ALINE CRISTINE GOMES DA SILVEIRA

INDUÇÃO MAGNÉTICA: uma proposta de UEPS fundamentada na Teoria da
Aprendizagem Significativa

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-
Graduação em Ensino de Física em Rede
Nacional da Universidade Federal do Maranhão
como requisito para obtenção do título de
Mestre em Ensino de Física.

Aprovada em: ____ / ____ / ____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Jerias Alves Batista (UFMA)
Presidente

Prof. Dr. Édson Firmino Viana de Carvalho (UFMA)
Examinador Interno

Profa. Dra. Pâmella Gonçalves Barreto Troncão (UFNT)
Examinadora Externa

“Educação não transforma o mundo. Educação muda as pessoas. Pessoas transformam o mundo.”

(Paulo Freire)

AGRADECIMENTOS

A DEUS, pela minha vida, e por me ajudar a ultrapassar todos os obstáculos ao longo do curso.

A todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física em Rede Nacional da Universidade Federal do Maranhão (PROFIS).

Ao meu orientador professor Dr. Jerias Alves Batista pela sua dedicação, paciência, orientação precisa, confiança que sempre depositou na minha pessoa, por ter me orientado e trilhado comigo essa jornada, de mãos dadas, me amparando sempre que precisei, um exemplo de profissional humano e íntegro.

À minha família, especialmente meus filhos, pais, irmãos, tia e namorado, que sempre estiveram comigo sustentando e apoiando, me incentivando nos momentos difíceis e compreendendo a minha ausência enquanto me dedicava à realização deste trabalho.

A todos aqueles que contribuíram, de alguma forma, para desenvolvimento deste trabalho de pesquisa.

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

RESUMO

Este trabalho apresenta um produto educacional que reúne uma sequência didática para o ensino sobre Indução Magnética como suporte para os professores do terceiro ano do Ensino Médio. Como tal, ele descreve os aspectos históricos, conceituais, matemáticos e aplicações de uma forma não explorada nos livros didáticos. Visando mudanças significativas no ensino da Física, a pesquisa tem como problema o seguinte questionamento: é possível ensinar o conteúdo de indução magnética através de uma Unidade de Ensino Potencialmente Significativa (UEPS), que possibilite o maior envolvimento, e conseqüentemente domínio do conteúdo, para estudantes do 3º ano do Ensino Médio? Os objetivos que norteiam a realização desta pesquisa buscam descrever o fenômeno associando-o com o cotidiano dos alunos, bem como verificar a eficácia deste método de ensino. O referencial teórico que dá suporte a utilização da UEPS são os princípios da Teoria da Aprendizagem Significativa de David Ausubel e Aprendizagem Significativa Crítica de Marco Antônio Moreira. Os alunos do terceiro ano do ensino médio de uma instituição pública estadual na cidade de São João dos Patos – MA foram os agentes interativos do projeto, tendo como mediadora a autora pesquisadora. A UEPS conta com uma sequência de seis encontros que busca respeitar os aspectos que constitui a sequência. Os dados coletados buscam associar o resultado descritivo dos estudantes indicando uma aprendizagem significativa através de relatório com consistência científica. Avaliamos o trabalho proposto nas diferentes etapas da sequência didática e constatamos que a participação positiva juntamente com a produtividade adquirida pelos estudantes pode nos levar a concluir que houve indícios de aprendizagem significativa, pois conseguimos detectar as dificuldades e estabelecer estratégias de como os estudantes pudessem superar tais desafios. Diante dos fatos, o projeto visa uma aprendizagem mais eficiente, motivando os educandos no processo de ensino aprendizagem, bem como auxiliar os professores no desenvolvimento do conteúdo relacionado à indução magnética.

Palavras-chave: Indução magnética; Aprendizagem significativa; Unidade de ensino potencialmente significativo.

ABSTRACT

This work presents an educational product that brings together a didactic sequence for teaching about Magnetic Induction as a support for teachers of the third year of high school. As such, it describes historical, conceptual, mathematical and application aspects in a way not explored in textbooks. Aiming at significant changes in the teaching of Physics, the research has as a problem the following question: is it possible to teach the content of magnetic induction through a Potentially Significant Teaching Unit (UEPS), which allows greater involvement, and consequently mastery of the content, to 3rd year high school students? The objectives that guide the accomplishment of this research seek to describe the phenomenon associating it with the students' daily life, as well as verifying the effectiveness of this teaching method. The theoretical framework that supports the use of UEPS are the principles of the Theory of Meaningful Learning by David Ausubel and Critical Significant Learning by Marco Antônio Moreira. Third year high school students from a state public institution in the city of São João dos Patos - MA were the interactive agents of the project, with the researcher author as a mediator. The UEPS has a sequence of six meetings that seeks to respect the aspects that constitute the sequence. The data collected seek to associate the descriptive result of the students indicating a significant learning through a report with scientific consistency. We evaluated the proposed work in the different stages of the didactic sequence and found that the positive participation together with the productivity acquired by the students can lead us to conclude that there were signs of significant learning, as we were able to detect the difficulties and establish strategies for how students could overcome such difficulties. challenges. In view of the facts, the project aims at more efficient learning, motivating students in the teaching-learning process, as well as helping teachers in the development of content related to magnetic induction.

Keywords: Magnetic induction; Meaningful learning; Potentially significant teaching unit.

LISTA DE FIGURAS |

Figura 1. Pontuação de alguns países na avaliação do PISA, 2006 –2018.....	17
Figura 2. Representação simplificada para o campo magnético gerado no vácuo por uma carga $+q$ em movimento.....	44
Figura 3. Campo magnético de uma espira com corrente elétrica.....	47
Figura 4. Perfil da intensidade do campo magnético na direção do eixo x de uma espira com corrente elétrica	51
Figura 5. Campo de um dipolo magnético.	52
Figura 6. A Terra forma um ímã gigante.....	54
Figura 7. Campo magnético no interior de um solenoide.....	55
Figura 8. Comparação entre campo magnético de um solenoide e de um ímã em barra.	55
Figura 9. Campo magnético nas proximidades de um fio com corrente elétrica.	56
Figura 10. Força magnética sobre uma partícula em movimento.....	60
Figura 11. Força magnética sobre um condutor com corrente elétrica.	61
Figura 12. Força magnética exerce torque sobre espira com corrente.....	63
Figura 13. Ilustração para a formação do dipolo magnético orbital.....	68
Figura 14. Ilustração para os momentos magnéticos dos átomos a) aleatoriamente orientados, b) orientados na mesma direção e c) orientados em diferentes direções.....	73
Figura 15. Descoberta da lei da indução magnética	75
Figura 16. Descoberta da lei da indução magnética	77
Figura 17. Condutor elétrico se movendo com velocidade v dentro de um campo magnético estacionário apontando para dentro da página	78
Figura 18. Corrente induzida em um fio fixo na forma de C com um condutor móvel deslizando sobre ele.....	80
Figura 19. Ilustração para a energia fluindo em um circuito elétrico estático e uma bateria móvel.	84
Figura 20. Ilustração para fluxo de campo magnético através de uma espira em vários ângulos.....	85
Figura 21. Ilustração para alteração do fluxo de campo magnético através de uma espira por meio da (a) aproximação e (b) afastamento do ímã.....	89
Figura 22. Ilustração para o campo elétrico induzido no espaço devido ao aumento no valor do campo magnético (a) na presença de uma espira condutora e (b) na ausência de uma espira condutora.	91

Figura 23. Ilustração para o campo elétrico e magnético induzidos formando uma onda eletromagnética.....	94
Figura 24. Ilustração para o gerador de corrente alternada.	96
Figura 25. Ilustração das partes de um transformador (b) fotografia de um transformador real.	98
Figura 26. Ilustração da corrente de Foucault em uma folha de metal em movimento.....	101
Figura 27. Fogão à indução magnética.....	102
Figura 28. Ilustração para o freio magnético.....	103
Figura 29. Ilustração para os detectores de metais (a) fixo e (b) portátil.	103
Figura 30. Resultado da questão 1 do pré-teste.....	107
Figura 31. Resultado da questão 2 do pré-teste.....	107
Figura 32. Resultado da questão 3 do pré-teste.....	108
Figura 33. Resultado da questão 5 do pré-teste.....	110
Figura 34. Resultado da questão 9 do pré-teste.....	115
Figura 35. Resultado da questão 10 do pré-teste.....	116
Figura 36. Mapas conceituais.....	117
Figura 37. Estudantes manuseando bússolas e ímãs em sala de aula.....	118
Figura 38. Tela do simulador Phet.....	119
Figura 39. Estudantes montando experiências do 5º encontro.....	121
Figura 40. Materiais para a experiência do motor de corrente contínua.....	122
Figura 41. Circuito montado para acender um led usando o fenômeno da indução magnética.....	123
Figura 42. Estudantes executando experiência com ímãs caindo em tubos de PVC e de metal.....	124
Figura 43. Estudantes executando experimento com limalha de ferro.....	125
Figura 44. Mapas conceituais pós teste.....	126
Figura 45. Print de relatórios entregue pelos alunos ao término da aplicação da UEPS.....	127
Figura 46. Resultado da questão 1 do pós-teste.....	128
Figura 47. Resultado da questão 2 do pós-teste.....	129
Figura 48. Resultado da questão 3 do pós-teste.....	130
Figura 49. Resultado da questão 5 do pós-teste.....	131
Figura 50. Resultado da questão 8 do pós-teste.....	134
Figura 51. Resultado da questão 10 do pós-teste.....	135

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Avaliação dos livros textos aprovados pelo PNLD 2018.....	23
Quadro 2. Apresenta as formas da aprendizagem significativa.....	30
Quadro 3. Tipos de aprendizagem significativa	30
Quadro 4. Respostas dos alunos em relação a questão 4 do pré-teste	108
Quadro 5. Respostas dos alunos em relação a questão 6 do pré-teste	110
Quadro 6. Respostas dos alunos em relação a questão 7 do pré-teste	112
Quadro 7. Respostas dos alunos em relação a questão 8 do pré-teste	113
Quadro 8. Respostas dos alunos em relação a questão 6 do pós-teste	132
Quadro 9. Respostas dos alunos em relação a questão 7 do pós-teste	133
Quadro 10. Pesquisa qualitativa e pesquisa quantitativa.....	234
Quadro 11. Planejamento da UEPS.....	236

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 IDENTIFICAÇÃO DO PROBLEMA E DELIMITAÇÃO DA PESQUISA	16
2.1 Justificativa e relevância da pesquisa	16
2.2 Sobre a concepção do tema da pesquisa	18
2.3 Sobre a formação da autora.....	24
2.4 Sobre o Ambiente da Pesquisa.....	25
2.5 Objetivos da pesquisa	25
2.5.1 Gerais.....	25
2.5.2 Específicos	26
3 REFERENCIAL TEÓRICO	27
3.1 Suporte das teorias pedagógicas	27
3.1.1 Teoria de David Ausubel	27
3.1.2 Teoria de Marco Antônio Moreira	30
3.1.3 Definição da UEPS	32
3.2 Suporte das Teorias Físicas.....	34
3.2.1 Concepções antigas: aspectos históricos.....	34
3.2.2 Concepções atuais: evolução conceitual	37
3.2.3 Matematização dos Conceitos	40
3.2.4 Sobre o Fenômeno da Indução Magnética e Suas Aplicações.....	73
3.2.5 Aplicações da lei da indução magnética	94
4 METODOLOGIA DE APLICAÇÃO DO PRODUTO EDUCACIONAL.....	104
5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	106
5.1 Análise e Discussão dos Dados	106
5.2 Avaliação Docente da UEPS	136
6 CONCLUSÃO.....	137
7 PERSPECTIVAS DE CONTINUIDADE	138
REFERÊNCIAS	139
APÊNDICE A: Questionário pré-teste idealizado e aplicado através do Google Forms.....	142

APÊNDICE B: Questionário pós-teste e avaliação da UEPS idealizado e aplicado através do Google Forms.	145
APÊNDICE C: Modelo de relatório descritivo.	148
APÊNDICE D: Alguns passos propostos para elaboração de mapas conceituais segundo Novak (2000).....	150
APÊNDICE E: Guia de elaboração de experimentos que nortearão etapa de implementação da UEPS	151
APÊNDICE F: Campo magnético sobre o eixo de uma espira com corrente elétrica....	154
APÊNDICE G: Cálculo de campo magnético de um dipolo magnético.....	157
ANEXO I: Lista de livros.....	160
APÊNDICE H: Produto educacional	161

1 INTRODUÇÃO

O anseio por encontrar processos educativos de ensino-aprendizagem eficientes e significativos nas diversas áreas do conhecimento tem motivado o desenvolvimento de várias metodologias desde a promulgação da Lei de Diretrizes e Bases da Educação Nacional (LDB) (BRASIL, 1996). O fundamento destas novas metodologias está baseado no ensino focado na vivência do aluno e centrada nele, de modo a proporcionar-lhe o rompimento da mentalidade de uma aprendizagem puramente mecanicista. Estas novas abordagens, denominadas construtivistas, possibilitam ao aluno uma melhor compreensão da natureza e do mundo tecnológico em que vive, bem como o desenvolvimento de habilidades que o tornará um ser questionador e livre para novas descobertas, relacionando-se socialmente de forma mais ativa e significativa.

Dentro deste contexto, Ausubel *et al.* (1980), explicita as condições necessárias para que haja aprendizagem significativa ou não mecanicista. A primeira é que o conteúdo a ser aprendido deve estar estreitamente relacionado com o que já existe na estrutura cognitiva do aprendiz, o que o autor denomina material potencialmente significativo. A segunda condição para que a aprendizagem ocorra é que o aprendiz manifeste uma predisposição em aprender, ou seja, uma motivação interior que o leve a querer aprender. Indo mais além, Moreira deixa claro como a aprendizagem com significado real pode ser transformada em uma abordagem crítica da realidade pelo aprendiz, a partir da elaboração de organizadores prévios, com auxílio de mapas conceituais (MOREIRA, 2011).

Os organizadores prévios são materiais que o professor deve apresentar a seus estudantes antes das discussões do assunto principal de sua aula. Ele deve conter informações mais generalizadas acerca do conteúdo a ser ministrado, com o objetivo de estimular o estudante a pensar e buscar conhecimentos já adquiridos que possam se conectar com os novos conceitos a serem aprendidos. A maneira eficiente de implementar os organizadores prévios em sala de aula é através de mapas conceituais, uma representação em forma de diagramas que indicam o máximo de relações possíveis entre os diferentes conceitos presentes nas mentes dos estudantes ou entre palavras que usamos para representar os conceitos.

Este trabalho de dissertação de mestrado tem como tema central a criação de uma Unidade de Ensino Potencialmente Significativa (UEPS), fundamentada nas diretrizes da teoria da aprendizagem de Ausubel, cujo foco é possibilitar aos alunos uma aprendizagem significativa. Esta UEPS é composta por uma sequência de ensino que se inicia com o reconhecimento do que já existe na composição cognitiva do estudante e se estrutura de maneira

que lhe permita organizar o que já tem armazenado com o que ele ainda vai estudar, contemplando a diferenciação progressiva e reconciliação integrativa, evitando a aprendizagem mecânica, como propõe Ausubel *et al.* (1980).

Toda a estrutura da UEPS será montada sobre alguns princípios norteadores, conforme descrito por Moreira (2011):

- ✓ O conhecimento prévio como variável mais influente para a aprendizagem significativa;
- ✓ Situações-problema que dão sentido aos novos conhecimentos, sendo criadas para despertar o interesse do aluno para aprender algo novo de forma significativa;
- ✓ O professor como o provedor de situações-problema, organizador do ensino e mediador da captação de significados por parte do aluno.
- ✓ A aprendizagem significativa crítica como um estímulo à busca de respostas, ao invés da memorização de respostas conhecidas, a partir do uso de materiais e estratégias instrucionais com um ensino centrado no aluno.

A UEPS a ser desenvolvida tem como foco a construção de um manual com instruções detalhadas sobre um dos temas da ciência que muito contribuiu para o desenvolvimento da humanidade, mas cujo conhecimento e entendimento não são bem consolidados pelos estudantes do Ensino Médio: a indução magnética. A escolha do tema se justifica pela sua importância na formação integral do estudante, como futuro membro de uma sociedade que demanda conhecimentos de ciência com grande abrangência e interdisciplinaridade.

Este trabalho será acompanhado de alguns experimentos simples, de caráter didático-demonstrativo, como método facilitador para o ensino (no contexto dos professores) e favorecer para o aprendizado (no contexto dos estudantes). A conexão de todos os conteúdos desenvolvidos na UEPS com a realidade cotidiana dos estudantes ficará explícita em cada conceito discutido ao longo deste trabalho.

Os benefícios da utilização de demonstrações experimentais correlacionadas aos conteúdos ensinados em sala de aula são inúmeros. Dentre eles, destaca-se a possibilidade de dinamização dos conteúdos indicados pelos livros didáticos, o que favorece a aprendizagem. Neste ambiente, torna-se possível estabelecer as relações entre teoria e prática, tornando os conteúdos estudados mais realistas para os estudantes. Por isso, aliar a teoria estudada dentro de sala de aula à prática demonstrativa remove os alunos de um estado de passividade, tornando-os agentes ativos de seus próprios saberes (BOMBONATO, 2011).

Dentro deste contexto, a Base Nacional Curricular Comum (BNCC), na área das Ciências da Natureza, expõe que os conhecimentos conceituais são sistematizados em leis, teorias e modelos. Cabe ao professor, juntamente com o aluno, despertar o interesse pela

elaboração, a interpretação e a aplicação dos modelos explicativos para fenômenos naturais e sistemas tecnológicos, aspectos fundamentais do fazer científico. Os processos e práticas de investigação devem propor aos estudantes do Ensino Médio a ampliação dos conhecimentos introduzidos no Ensino Fundamental, explorando experimentações e análises qualitativas e quantitativas de situações-problemas (BRASIL, 2017).

Quanto à estruturação deste trabalho, no Capítulo 2 será dedicado à identificação do problema e delimitação da pesquisa, bem como os seus objetivos. Um levantamento de todos os livros de Física adotados pelas escolas públicas do Brasil, aprovados pelo Ministério da Educação (MEC), mediante o Programa Nacional do Livro e do Material Didático (PNLD) para o triênio 2018-2020. O objetivo desta etapa é mostrar como os livros textos tratam o conteúdo *indução magnética*. A partir deste levantamento ficará evidente a necessidade de complementação dos livros textos com materiais didáticos com uma proposta alternativa para auxiliar o professor do Ensino Médio em alguns temas-chaves. Esta será a etapa da identificação do problema e da delimitação do tema para a aplicação da UEPS.

Em seguida, no Capítulo 3 apresentar-se-á a fundamentação teórica sobre a qual toda a construção da sequência didática está baseada. Inicialmente será feita uma breve revisão das teorias que dão suporte pedagógico adequado para a pesquisa e para a implementação da UEPS. Em seguida, será feita uma exposição detalhada do tema indução magnética com intuito de dar suporte físico ao professor. Esta fase se iniciará com um histórico, passando pela descrição matemática do fenômeno e culminado com aplicações relevantes em diversos cenários do cotidiano dos estudantes. Também dentro deste capítulo, alguns experimentos simples serão sugeridos e posteriormente executados em sala de aula durante o desenvolvimento da sequência didática. Ainda neste capítulo será apresentada uma definição da UEPS, proposta pedagógica a qual o trabalho se baseia.

O Capítulo 4 será destinado ao relato sucinto da metodologia de aplicação do produto educacional, reservamos o capítulo 5 para abordar uma apresentação e análise dos resultados da UEPS. A conclusão e perspectivas de continuação do trabalho são abordadas nos capítulos 6 e 7, respectivamente.

2 IDENTIFICAÇÃO DO PROBLEMA E DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

De acordo com a Constituição da República Federativa do Brasil de 1988, em seu artigo 205, deixa expresso que “A educação, direito de todos e dever do Estado e da família, será promovida e incentivada com a colaboração da sociedade, visando o pleno desenvolvimento da pessoa, seu preparo com o exercício da cidadania e sua qualificação para o trabalho” (BRASIL, 1988, p. 123). Baseado no texto da carta magna, os estudantes têm o direito de serem contemplados com um ensino baseado em um padrão de qualidade elevado, por meio de ações educacionais que resultem de programas suplementares de material didático escolar, visando a formação de cidadãos capazes de entender, interagir e modificar o seu contexto ambiental e socioeconômico. Nas próximas seções será feita a identificação do problema foco desta pesquisa, assim como sua delimitação no contexto geral do ambiente educacional.

O presente trabalho consiste em uma pesquisa que foi realizada através de um estudo de caso, usando o método amplo. Partindo dos subsunçores sobre Eletricidade e Magnetismo, pretende-se que o estudante estabeleça correlações entre estes e os novos conceitos discutidos na UEPS, de modo que a vinculação entre o conhecimento que ele já adquiriu e a exposição aos novos conhecimentos possa conduzi-lo ao aprendizado significativo crítico. O resultado final esperado é que o estudante seja capaz de descrever os novos conhecimentos adquiridos por meio de um relatório científico.

2.1 Justificativa e relevância da pesquisa

Nas últimas décadas o Estado tem se esforçado no cumprimento de suas responsabilidades no que diz respeito à oferta de vagas nas escolas e ao incentivo das matrículas de crianças e jovens. Entretanto, embora tenha havido o mesmo esforço para aumentar a qualidade da educação ofertada, os resultados das avaliações têm mostrado que as políticas nesta área não tiveram o mesmo sucesso. É fácil comprovar isto a partir da comparação do rendimento escolar dos estudantes brasileiros com o rendimento de estudantes de dezenas de países de todos os continentes, por meio do Programa Internacional de Avaliação de Estudantes (PISA), um programa da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE).

Desde a implantação do sistema de avaliação PISA, no ano 2000, o Brasil tem continuamente ocupado as últimas posições na classificação geral do rendimento escolar entre todos os países avaliados, sobretudo na área de ciências, interesse direto desta pesquisa.

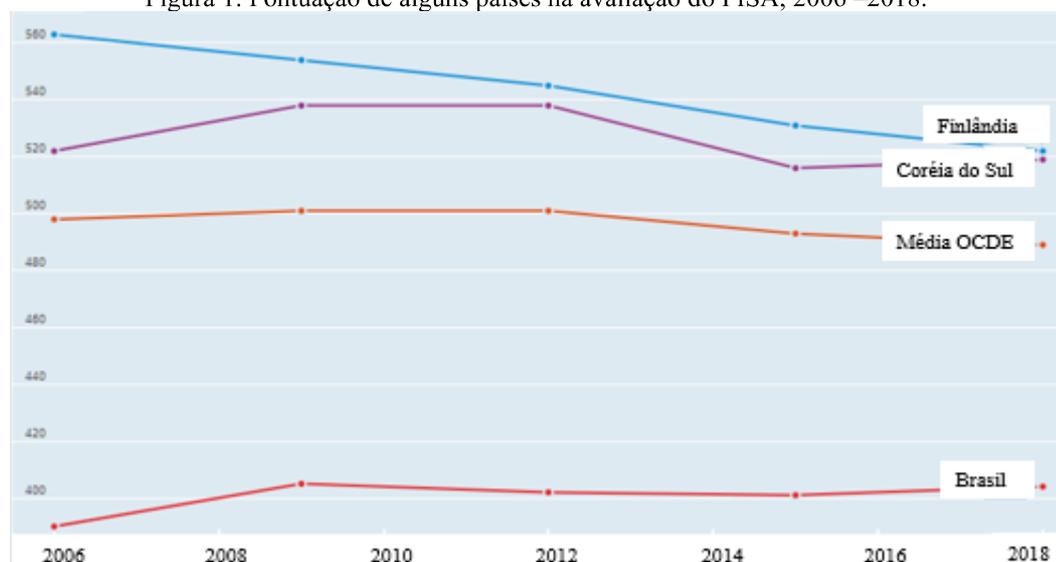
Precisamente, o Brasil foi o último colocado na primeira avaliação, realizada em 2000. Uma das variáveis levadas em conta pelo PISA em relação à avaliação de Ciências é o letramento científico, definido como a capacidade que uma pessoa tem para explicar fenômenos da natureza usando a linguagem científica, assim como de planejar, executar e analisar os dados de uma experiência científica, mesmo que de forma simples, porém com consistência. Segundo o relatório do PISA (BRASIL, 2019, p. 118):

“Uma pessoa letrada cientificamente, portanto, está disposta a participar de discussão fundamentada sobre ciência e tecnologia, o que exige as competências de:

1. **Explicar fenômenos cientificamente:** reconhecer, oferecer e avaliar explicações para uma gama de fenômenos naturais e tecnológicos;
2. **Avaliar e planejar investigações científicas:** descrever e avaliar investigações científicas e propor formas de abordar questões cientificamente;
3. **Interpretar dados e evidências cientificamente:** analisar e avaliar dados, afirmações e argumentos em uma variedade de representações, e tirar conclusões científicas apropriadas”.

Para expor a realidade precária da educação brasileira, e por consequência a do Estado do Maranhão, a Figura 1 mostra o resultado das avaliações realizadas entre 2006 e 2018 pelo programa PISA. Nesta figura estão indicadas as pontuações de alguns países que servem de referência, além do valor médio da avaliação de todos os países participantes. A Finlândia ocupou sempre o primeiro lugar no rendimento geral e na área de ciências. A Coreia do Sul, um país que teve toda a sua estrutura física e governamental completamente destruída em uma guerra na década de 1950, conseguiu se reerguer a partir de um investimento massivo em educação de qualidade e ocupa posição bem acima da média dos outros países. A figura mostra a posição do Brasil, muito inferior à média geral dos países quanto ao aprendizado em ciências.

Figura 1. Pontuação de alguns países na avaliação do PISA, 2006 –2018.



Fonte: OECD (2020)

A última avaliação do PISA mostra que 55% dos estudantes brasileiros estão abaixo da nota 2, numa escala que vai de 1 a 6. A nota 2 na escala do PISA é o limite mínimo definido para que uma pessoa consiga exercer sua cidadania condignamente com os conhecimentos adquiridos. 25% dos estudantes brasileiros se encontram dentro da faixa 2, enquanto os outros 20% se encontram nas faixas 3 a 5. Nenhum estudante foi avaliado na faixa 6.

Em 2006, dos 57 países participantes, o Brasil ocupou a posição de número 52. Na edição de 2018, dos 79 países que participaram da avaliação, o Brasil ocupou a posição de número 67 em ciências e 71 em matemática. No contexto da América Latina, o Brasil só aparece à frente do Panamá e República Dominicana. Considerando um país que possui a 9ª economia do mundo, esses dados são alarmantes e precisam ser mudados com urgência, levando-se em consideração que hoje o Brasil ocupa a 53ª posição em relação a todos os países participantes no mundo.

Diante destes números fica a pergunta: o que uma professora de Ensino Médio em uma cidade do interior do Estado mais pobre do Brasil pode fazer para mudar esta realidade tão negativa? Sabe-se que muitos fatores contribuem para este cenário e o foco deste capítulo é a identificação de alguns deles e a consequente proposição de possíveis enfrentamentos. A origem da avaliação do PISA surgiu com o objetivo de responder à questão: o que é importante que os cidadãos saibam e sejam capazes de fazer? A origem deste trabalho de dissertação tem como objetivo responder à questão: o que os estudantes que estão encerrando o ensino médio sabem sobre o fenômeno indução magnética? A escolha deste tema específico, dentre tantos outros da Física, se deve aos impactos tecnológicos advindos dele e portanto, é fundamental que o estudante adquira um conhecimento significativo e crítico sobre ele. Portanto, este é um tema de grande relevância para os cidadãos em seu contexto social e a pesquisa se restringe apenas a essa parte da Física.

2.2 Sobre a concepção do tema da pesquisa

Nesta seção ficará evidente o contexto no qual se deu a escolha do tema acima mencionado. Essencialmente, ele surgiu a partir da necessidade pessoal da autora, no que tange a implementação dos livros didáticos e problematização do estudo da Física, enquanto professora da componente curricular Física no Ensino Médio, no município de São João dos Patos, localizada a 540 km da capital do Estado do Maranhão. Desde o início das atividades em sala de aula foi perceptível a dificuldade para fazer os estudantes entenderem os conceitos discutidos no contexto físico, independente do conteúdo ministrado. Dois princípios

reverberavam na mente da autora – a determinação constitucional de que a educação deveria ser promovida “[...]visando o pleno desenvolvimento da pessoa, seu preparo com o exercício da cidadania e sua qualificação para o trabalho[...]”, e o juramento público que proferiu no ato da colação de grau como licenciada em Física, o qual determinava que “[...]os ensinamentos humanos e científicos adquiridos durante a vida acadêmica devem ser exercidos com lealdade, integridade e honestidade, a fim de que os alunos se tornem profissionais e cidadãos conscientes e responsáveis”. Com o passar do tempo e com acúmulo de experiências, pôde-se fazer um levantamento do cenário escolar, objetivando a identificação de possíveis causas. Segundo o entendimento desta pesquisadora, quatro fatores fundamentais poderiam estar associados às dificuldades, contribuindo isoladamente ou de forma acumulativa para o problema da falta de aprendizado significativo.

O primeiro fator dizia respeito à capacidade didática e a devida preparação do professor de Física. Neste ponto há que se destacar a defasagem dos Projetos Pedagógicos dos Cursos de Licenciatura das instituições formadoras de professores. Em geral, os licenciados são sujeitos a uma carga horária excessiva de conteúdos de Física e Matemática, em nível básico e avançado, mas completamente descontextualizados da realidade do Ensino Médio, tanto no que diz respeito aos conteúdos, sua multidisciplinaridade e à elaboração de projetos experimentais de simples execução. Como consequência, os professores formados nestes moldes sentem-se despreparados para lidarem com a situação real da sala de aula, nos seus mais diversos aspectos. Apenas no ano de 2015, o MEC, por meio do Conselho Nacional de Educação (CNE), aprovou a Resolução CNE/MEC nº 2 (BRASIL, 2015), instituindo a obrigatoriedade de 400 horas de práticas pedagógicas nos cursos de Licenciatura, visando reduzir o impacto da falta de preparo pedagógico dos físicos educadores.

O segundo fator dizia respeito ao conteúdo dos livros textos adotados pelo Programa Nacional do Livro Didático (PNLD), bem como a forma como estes eram apresentados pelos autores. O PNLD foi instituído pela Resolução/CD/FNDE nº 42, de 28 de agosto de 2012, tendo como objetivo a regularização de uma política de conteúdos e a distribuição igualitária de material didático para todas as escolas de Educação Básica no Brasil. Antes da implantação deste programa não havia uma política de uniformização dos conteúdos e nem da didática a ser adotada. Isto promoveu uma distorção no rendimento dos estudantes entre diferentes regiões e entre escolas públicas e privadas, com consequências desfavoráveis para a população mais fragilizada socioeconomicamente. Em relação a esse cenário, o PNLD do ano de 2018, informa que:

“[...] os livros de Física resumiam-se à abordagem sucinta de cada assunto, o suficiente apenas para apresentar uma fórmula trazida em destaque no interior de um quadro, seguido da resolução de alguns exercícios, exemplificando os usos daquela fórmula na solução de situações descontextualizadas da realidade. O objetivo principal era favorecer a destreza operacional em Matemática, em detrimento da compreensão profunda do fenômeno físico ali envolvido. Seguiu-se uma lista de exercícios propostos, a maioria de aplicação direta de fórmulas e de realização de algumas operações algébricas. Desse modo, o ensino de Física veiculado pelas coleções didáticas assemelhava-se ao ensino de “Matemática aplicada” (BRASIL, 2018, p. 29 e 30).

Desde a implantação do PNLD, o Conselho Nacional de Educação (CNE) tem incentivado uma mudança radical na abordagem dos textos para o Ensino Médio, aprovando, no âmbito do PNLD, apenas aqueles que se adequem às novas regras. Esta política do MEC já tem apresentado resultados significativos, conforme se observa no PNLD de 2018:

“Gradualmente essa realidade foi sendo modificada nas coleções didáticas, com a inserção de problematização e contextualização inicial dos conteúdos, experimentação, textos e imagens diversificados, História da Ciência e apoio de tecnologias de informação e comunicação, entre outros elementos. Embora a incorporação desses elementos tenha modificado de forma bastante positiva os livros didáticos de Física, ainda se observa nas coleções do PNLD 2018 uma concentração maior de exercícios propostos de resolução algébrica. Há, sem dúvida, questões conceituais, ..., mas a tônica de grande parte das coleções é a proposição de exercícios que repetem a resolução apresentada no livro, constituindo-se assim em “exercícios de fixação ou que estimulam exclusivamente a operacionalização algébrica de fórmulas e de sistemas de unidades” (BRASIL, 2018, p. 30).

O terceiro fator dizia respeito aos estudantes e suas realidades socioeconômicas. Como em quase todas as escolas brasileiras, os alunos chegavam às séries iniciais do Ensino Médio apresentando baixo rendimento em praticamente todas as disciplinas. Muitos apresentavam deficiências em sua formação a ponto de não saberem interpretar textos simples, construir argumentos lógicos, além de apresentarem dificuldades na execução das operações matemáticas elementares. Diante deste cenário, por mais competente e dinâmico que seja o professor na arte de ensinar e por mais didático que sejam os materiais de ensino à sua disposição, alcançar um padrão de ensino e aprendizagem minimamente aceitáveis é tarefa por demais árdua.

O quarto fator podia estar relacionado ao ambiente escolar, que não possui espaços adequados e confortáveis. As salas de aula em geral são sempre lotadas e a temperatura ambiente nem sempre é adequada, o que causa inquietação nos estudantes e a conseqüente dispersão de interesses. Os outros espaços coletivos da escola, como quadra poliesportiva, banheiros, pátio, cantina, etc., quase sempre não são adequados, ou não existem.

Dada a abrangência das variáveis que interferem diretamente na aprendizagem significava dos estudantes, a autora escolheu abordar apenas a temática relacionada aos livros

didáticos, não contemplando, portanto, a formação do professor, a realidade do estudante e nem o ambiente da aprendizagem. Diante deste cenário e com o tema da pesquisa já definido, a autora prosseguiu com o levantamento dos livros textos de Física adotados no Ensino Médio Brasileiro e aprovados pelo PNLD para o triênio 2018-2020. Fazendo um apanhado sobre os materiais, foi possível perceber que a maioria segue os parâmetros impostos pelo PNLD, tais como apresentar fatores históricos, interdisciplinaridade, aplicabilidade, observações de fenômenos, dentre outros. Todavia, nota-se que alguns autores deixam a desejar no que tange as suas abordagens teóricas, princípios importantes para fundamentação, contextualização, falta de relato quanto a origem dos termos, ou pelo menos não detalhado para compreensão do aluno.

O Quadro 1, mostra as respostas de dez questões que foram elaboradas para avaliar o conteúdo de interesse nos doze livros adotados no PNLD. Segundo o Conselho Nacional de Educação, o livro texto a ser adotado no Ensino Médio precisa responder positivamente estes questionamentos. As obras estão identificadas pelos números de 1 a 12. As informações detalhadas dos livros estão em anexo I. Todos os autores discorrem sobre o assunto indução magnética. Em relação aos vários experimentos que Faraday realizou para demonstração do fenômeno, dois foram os mais mencionados nos exemplares (introdução de ímã em uma bobina para percepção da corrente elétrica e o experimento com dois solenoides interligados formando assim corrente alternada, a partir da variação do fluxo magnético. Algumas obras fazem menção a apenas um deles como forma ilustrativa (3,7, 10 e 12)

A relação entre fluxo magnético e a formação da corrente é algo indispensável para entender o fenômeno de indução, a obra 1, fala do fluxo, mas não demonstra através de ilustrações as grandezas envolvidas e as relações que poderão interferir no seu valor; não demonstra também a equação do fluxo e nem sequer mencionam a lei de Lenz para descrever o sentido da corrente. As obras (2, 8, 9, 10 e 12), não deixam claro como se encontra o sentido da corrente induzida. Isto indica que falhas muito graves podem passar pela triagem avaliativa do Conselho Nacional de Educação.

Quanto aos aspectos históricos, as obras fazem referência aos principais físicos que contribuíram para descoberta do fenômeno e mostram datas. As obras (4, 6, 7, 8, e 9), relatam um pouco da trajetória dos cientistas que contribuíram diretamente para o tema. Todas obras apresentam aplicações do fenômeno da indução magnética, umas dando mais ênfase e listando várias aplicabilidades do estudo, outras apenas mencionando a questão dos geradores e motores elétricos. As obras (3 e 12), não fazem a correlação do tema com o cotidiano dos estudantes.

Quanto a análise dos exercícios (propostos e resolvidos), há presença de muitas questões mecânicas e outras que estimulam o pensamento crítico, mesmo que em pouca quantidade. De

forma geral, estas obras podem ser classificadas entre aquelas que apresentam maior ou menor quantidade de problemas que dão ênfase às competências e habilidades da área das Ciências da Natureza e suas tecnologias. As obras 1 a 7, possuem muito mais questões de cunho mecanicista e não estimulam o pensamento crítico do estudante. Já as obras 8 a 12, apresentam algumas questões com estímulo ao pensamento crítico, embora em quantidade aquém da ensejada pelos Parâmetros Nacionais Curriculares do Ensino Médio.

Os autores devem dar mais atenção aos exercícios propostos que permitam uma superação do “algebrismo”, valorizando as questões conceituais, as questões de natureza não algébrica e os exercícios que trazem situações-problema de fato. É certo que a realização de exercícios que façam o uso de fórmulas e operações algébricas não podem ser desprezadas. Todavia, não se pode condicionar o ensino e a aprendizagem da Física no Ensino Médio a este aspecto. As diferentes visões da Física (científica, humanista, cultural, socioambiental, etc.) devem ser tratadas de modo equilibrado. Optar por coleções didáticas que busquem esse equilíbrio é algo recomendável aos professores.

Com relação às atividades experimentais, graças às imposições do PNLD, a maioria das coleções didáticas atuais trazem uma quantidade relativamente grande de atividades de natureza experimental, geralmente propondo que sejam realizadas pelos estudantes organizados em pequenos grupos. As atividades têm potencial para enriquecer a abordagem dos assuntos, podendo ser utilizadas logo no início do estudo de determinado fenômeno e seus respectivos conteúdos, no sentido de problematizar e até mesmo buscar a resolução de uma situação-problema. Ainda podem ser realizadas após o desenvolvimento de um assunto, como complementação, ilustração ou reforço.

O estímulo à realização das atividades contribui não apenas para a aquisição de novos conhecimentos, como também para o desenvolvimento de habilidades (montar, medir, levantar dados, registrar, elaborar tabelas e gráficos, relatar, etc) e atitudes (trabalhar em grupo, ser colaborativo e solidário, respeitar opiniões divergentes, debater). Quando as atividades são propostas de maneira aberta, com perspectiva investigativa (sem roteiro pré-definido), elas podem favorecer o desenvolvimento de outras competências ou capacidades intelectuais, como levantar hipóteses e testá-las, elaborar planejamento de ações, buscar dados em fontes variadas, trabalhar colaborativamente em grupo, avaliar procedimentos e resultados. Estimula-se, assim, o desenvolvimento do pensamento crítico e de posturas autônomas.

A aula experimental leva o aluno a questionar ações, servindo como estratégia facilitadora da aprendizagem no ensino de Ciências. Embasado nessa importância, as Diretrizes Curriculares da Educação Básica, na qual o plano de trabalho docente dos professores do Estado

O texto propõe discussão sobre a relação do assunto com as tecnologias que fazem parte do dia a dia dos alunos, e relaciona ao desenvolvimento socioambiental? Existem exemplos de aplicação prática e uma relação de quais tecnologias são desenvolvidas a partir da indução magnética?	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
Os exercícios resolvidos e propostos estimulam o pensamento crítico sobre o tema?	S	S	S	N	N	S	S	N	S	N	S	S	S
O autor propõe observações do fenômeno no cotidiano ou execução de experiências simples fora do ambiente escolar, com o objetivo de estimular o estudante a pensar sobre o assunto estudado em sala de aula?	S	N	N	S	N	S	S	S	S	S	N	N	N
Quando apresenta as equações sobre o assunto, o texto faz menção de onde elas vieram (seus fundamentos e premissas) e deixam claro o limite de validade de cada uma delas?	N	N	S	S	N	N	N	S	S	N	N	N	N
Os autores são especializados em ensino de Física (licenciatura em Física, mestrado e doutorado em ensino de Física? São bacharéis em física, com especialização em metodologia do ensino superior?	S	S	N	N	S	S	S	S	S	S	S	S	S

Fonte: os autores (2020)

Legenda: S – Sim, N – Não.

2.3 Sobre a formação da autora

A autora é licenciada em Física pela Universidade Estadual do Piauí (UESPI) e Especialista em Docência do Ensino Superior pela Universidade de Ensino Superior São Judas Tadeu, ambas sediadas na cidade de Floriano-PI. Iniciou sua carreira como professora de Física em uma escola particular da cidade no ano 2000, mesmo ano de ingresso na Universidade, atuando como professora nas 1ª e 2ª séries do Ensino Médio. Atualmente trabalha na rede Municipal, com ensino fundamental de 6º a 9º como professora de Matemática e na rede Estadual como professora de Física da 1ª a 3ª série do Ensino Médio.

Estes anos de experiência docente foram determinantes para a construção da ideia da pesquisa. Entretanto, faltavam a abordagem, o conhecimento e os métodos advindos de uma orientação formal. Isto finalmente ocorreu com o ingresso no Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF), polo UFMA em São Luís. O ingresso no MNPEF foi determinante para a execução dos planos da pesquisa. No primeiro ano do programa foram ofertadas disciplinas pedagógicas de apoio à elaboração de trabalhos científicos, bem como de revisão de conteúdos de Física. O aprendizado destes conteúdos foi fundamental para a escolha do tema e da abordagem a ser dada na sua execução. Este trabalho certamente desenvolverá a

capacidade profissional da autora e estimulará outros profissionais da área para o aperfeiçoamento de suas práticas pedagógicas.

2.4 Sobre o Ambiente da Pesquisa

Levando-se em conta que a escola campo não apresenta estrutura e equipamentos disponíveis para dinamizar por completo as aulas, procurou-se pesquisar possíveis mudanças significativas no ensino da Física a partir da problemática – é possível ensinar o conteúdo de indução magnética através de uma proposta de UEPS que possibilite o maior envolvimento, e consequente domínio do conteúdo, para estudantes do 3º ano do Ensino Médio?

A UEPS foi implantada em uma escola Estadual do Maranhão localizada no município de São João dos Patos. A autora trabalha no turno integral com as três séries do ensino médio.

Quanto a estrutura física da escola, conta com um número de 9 (nove) salas de aulas funcionando no turno integral, sendo três de cada uma das séries do Ensino Médio, com a média de 40 alunos por turma. Não apresentando quadra poliesportiva no seu âmbito interno, os alunos precisam realizar atividades físicas em locais cedidos pelo município em espaços antecipadamente agendados. Os banheiros são em número de 4, 2 femininos e 2 masculinos, porém todos necessitando de reestruturação, tendo em vista que é alta para o número oferecido. A escola possui um refeitório, não suficiente para todos os alunos gerando dispersão no momento das refeições. Por isso as refeições são distribuídas por sala, objetivando a não aglomeração no momento de sua entrega e possíveis tumultos.

Em relação à estruturação das salas, foram devidamente forradas e equipadas com aparelhos de ar condicionado, apesar de algumas apresentarem problemas em suas aparelhagens, ficando estas mais aquecidas devido as altas temperaturas, principalmente no segundo semestre do ano. A escola ainda possui sala de professores, secretaria, diretoria, sala de educação inclusiva e laboratório de Ciências, que para sua utilização alguns instrumentos necessitam ser antecipadamente elaborados devido aos equipamentos estarem, em sua grande maioria, sem condições de uso ou mesmo inexistentes.

2.5 Objetivos da pesquisa

2.5.1 Gerais

Esta pesquisa tem como objetivo geral descrever uma sequência didática através de uma Unidade de Ensino Potencialmente Significativa (UEPS) sobre indução magnética, a fim ser

utilizada como material auxiliar pelos professores do Ensino Médio ou mesmo como substituto dos livros didáticos, quando este for o caso, no tocante ao conteúdo em questão. O material foi composto a partir da concepção, implantação, análise e avaliação de uma Unidade de Ensino Potencialmente Significativa em uma escola do estado do Maranhão no município de São João dos Patos e fundamentado nas Teorias da Aprendizagem Significativa de David Ausubel e Aprendizagem Significativa Crítica de Marco Antônio Moreira.

2.5.2 Específicos

- ✓ Descrever o fenômeno indução magnética de forma mais significativa, associando suas conexões com o cotidiano do estudante;
- ✓ Verificar a eficácia da UEPS como método de aprendizagem significativa para o estudante alvo desta pesquisa;

Conduzir o estudante a:

- ✓ Conceber experimentos simples a partir dos conceitos estudados;
- ✓ Organizar roteiro baseado em métodos científicos;
- ✓ Montar aparato e realizar experiência;
- ✓ Coletar, analisar e fazer conclusões dos resultados das experiências;
- ✓ Escrever relatório com consistência científica e entregar ao professor.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo serão apresentadas de forma resumida as teorias que fundamentam esta pesquisa. Por se tratar de uma pesquisa que envolve o binômio ensino-aprendizagem, inicialmente será feito um resumo dos principais pontos das Teorias da Aprendizagem Significativa de David Ausubel e Aprendizagem Significativa Crítica de Marco Antônio Moreira. Em seguida, serão descritos os principais conceitos relacionados ao conteúdo indução magnética, bem como suas implicações tecnológicas.

3.1 Suporte das teorias pedagógicas

Nas próximas seções serão apresentados a teoria de David Ausubel e Teoria de Marco Antônio Moreira.

3.1.1 Teoria de David Ausubel

A aprendizagem significativa envolve integração de sentimentos, pensamentos e ações – ela requer aquisição de conhecimentos com compreensão e elaboração no uso de sua própria capacidade de aplicação, transferência e clareza sobre aquilo que se está fazendo e o porquê disso (MASINI; MOREIRA, 2017, p. 9).

David Ausubel foi médico, psicólogo, psiquiatra, educador e professor. Filho de judeus, cresceu insatisfeito com a educação que recebera. Ausubel dizia que a educação é violenta e a escola, uma prisão. Era contra a aprendizagem mecânica e dedicou-se a encontrar uma educação fundamentada na estrutura cognitiva. Para ele, ao contrário da aprendizagem mecânica, a aprendizagem cognitiva é o ato de aprender de forma organizada, a partir de uma correlação forte e necessária entre o que já se sabe e o conteúdo a ser aprendido.

Tem-se o entendimento de Ronca (1994), ao argumentar que essa teoria de aprendizagem se correlaciona diretamente aos ensinamentos e noções que os alunos trazem em sua estrutura cognitiva. Cabe ao professor ser atento sobre os conceitos ou sobre as formas como eles se organizam. Vale ressaltar que essas informações se organizam cognitivamente de forma hierárquica, sendo aqueles pontos de maior relevância para os alunos se sobrepondo aos demais. Conforme Ronca (1994, p. 92):

“Nessa perspectiva, a aprendizagem significativa é um processo cognitivo no qual o conceito de mediação está plenamente presente, pois para que haja aprendizagem significativa é necessário que se estabeleça uma relação entre o conteúdo que vai ser aprendido e aquilo que o aluno já sabe, seja uma imagem, um conceito, ou uma proposição”.

Ausubel defende que o principal processo de aprendizagem significativa é por descoberta na qual o aluno pode aprender “sozinho”, descobrindo uma lei ou uma relação, ao chegar à solução de um problema. Em outras palavras ocorre uma aprendizagem quando envolve a aquisição de novos significados a partir do material de aprendizagem apresentado. Segundo o autor, o material necessita ser potencialmente significativo para que ele chegue à estrutura cognitiva do sujeito e possa interagir de tal forma que haja uma conexão entre os novos conhecimentos, e o já existente, podendo assim ser ancorado na sua memória. Ausubel pertencia à corrente cognitivista, corrente de pensamento que procura explicar a elaboração de objetos internos que acontecem na mente humana com relação ao aprendido e à estruturação do conhecimento.

A corrente cognitivista enfatiza o processo de cognição através do qual a pessoa atribui significados à realidade em que se encontra. Preocupa-se com o processo de compreensão, transformação, armazenamento e uso da informação envolvida na cognição e procura regularidades nesse processo mental. Nessa corrente, situam-se autores como Brunner, Piaget, Ausubel, Novak e Kelly. Alguns deles são construtivistas com ênfase na cognição (Brunner, Piaget, Ausubel e Novak) ou enfatizam o afetivo (Kelly e Rogers) (OSTERMANN; CAVALCANTI, 2011, p. 31).

A aprendizagem significativa é aquela em que ideias expressas simbolicamente interagem de maneira substantiva e não arbitrária com aquilo que o aprendiz já sabe. Esta se relaciona, interliga as aprendizagens realizadas aos conteúdos pré-existentes. Aos conhecimentos prévios dá-se o nome de subsunçor. O subsunçor, segundo Ausubel, é uma estrutura específica à qual uma nova informação pode integrar, produzindo novos conhecimentos. Ausubel considera que a assimilação de conhecimentos só ocorre quando novas informações são agregadas ao cognitivo de cada ser, ficando armazenadas e incorporadas apenas aquelas que são mais relevantes ou que fazem relação com outras já existentes. É necessário que o sujeito apresente uma pré-disposição para estabelecer essa relação, que o material que seja assimilado possa ser potencialmente significativo e que haja a existência de um conteúdo mínimo na estrutura cognitiva do indivíduo com subsunçores com suficiência para suprir necessidades.

Fazer com que o aluno aprenda significativamente é procurar minimizar as aulas baseadas nas simples memorizações de nomes, fórmulas, informações e conceitos, estabelecendo assim uma vinculação dos conhecimentos e conceitos do dia-a-dia dos alunos. Também é estimular no sujeito a motivação para o aprendido, permitindo assim seus primeiros passos para aprimoramento dos conhecimentos científicos.

A principal sugestão de Ausubel para manipular a estrutura cognitiva é a estratégia chamada “organizador prévio”. Eles servem como pontes cognitivas, mostrando ao estudante a relação existente entre o conhecimento prévio e aquele que está sendo incorporado à sua memória. Cabe ressaltar que um organizador prévio pode ser qualquer material que sirva como âncora e interligação entre os conhecimentos, como por exemplo um filme, um texto, situações cotidianas ou mesmo discussões sobre um determinado conteúdo. Em suma, é tudo aquilo que possa ser utilizado antes mesmo da discussão do assunto principal da aula, servindo como facilitadores do aprendizado.

Contrariamente à aprendizagem significativa, a aprendizagem mecânica enfatiza processos de memorização arbitrária, o que leva rapidamente ao esquecimento. Em outras palavras, a retenção cognitiva e a vinculação com os subsunçores é praticamente nula. Porém, um ponto que merece destaque em relação a aprendizagem mecânica é que, dependendo de como a nova informação for estruturada cognitivamente, mesmo desestruturada poderá tornar-se um subsunçor. Segundo Moreira e Masini (1982, p. 10), “[...]a aprendizagem mecânica ocorre até que alguns elementos de conhecimento, relevantes a novas informações na mesma área, existam na estrutura cognitiva e possam servir de subsunçores, ainda que pouco elaboradas”.

Um dos conceitos de fundamental importância da teoria de Ausubel é o de mapas conceituais. Eles podem ser aplicados na culminância dos organizadores prévios. Segundo Moreira (2010, p. 17), os mapas conceituais:

“[...] são representações concisas das estruturas conceituais que estão sendo ensinadas e, como tal, provavelmente facilitam a aprendizagem dessas estruturas. Entretanto, diferentemente de outros materiais didáticos, mapas conceituais não são auto-instrutivos: devem ser explicados pelo professor. Além disso, embora possam ser usados para dar uma visão geral do tema em estudo, é preferível usá-los quando os alunos já têm uma certa familiaridade com o assunto, de modo que sejam potencialmente significativos e permitam a integração, reconciliação e diferenciação de significados de conceitos”.

Uma vez estabelecida a condição da relação aprendiz-material potencialmente significativo, avança-se na compreensão da teoria de Ausubel com a classificação das formas e dos tipos de aprendizagem significativa. Nos Quadros 2 e 3, estão representadas as definições dadas por Moreira (2012).

Quadro 2. Apresenta as formas da aprendizagem significativa.

Formas de aprendizagem Significativa	Conceituação
Por subordinação	É uma nova informação, novo material, que adquire significados por meio dos subsunçores e reflete uma relação com a estrutura cognitiva preexistente de forma geral e abrangente.
Por supra – ordenação	Envolve processos de abstração, indução e síntese que levam a novos conhecimentos que passam a subordinar aqueles que lhes deram origem. É um mecanismo fundamental para a aquisição de conceitos.
Do combinatório	Uma forma de aprendizagem significativa em que a atribuição de significados a um novo conhecimento implica interação com vários outros conhecimentos já existentes na estrutura cognitiva, mas não é nem menos e nem mais inclusiva ou mais específica do que os conhecimentos originais.

Fonte: Moreira (2012)

Quadro 3. Tipos de aprendizagem significativa.

Tipos de aprendizagem Significativa	Conceito
Representacional	Ocorre quando símbolos arbitrários passam a representar, em significado, determinados objetos ou eventos em uma relação unívoca.
Conceitual	É uma extensão da representacional, ocorre quando o sujeito percebe regularidades em eventos ou objetos, passa a representá-los por determinado símbolo e não mais depende de um referente concreto do evento ou objeto para dar significado a esse símbolo, tornando-se algo mais abrangente e abstrato.
Proposicional	Implica em dar significado a novas ideias expressas na forma de proposição. O significado de uma proposição é a soma dos significados, dos conceitos e palavras nela envolvidos.

Fonte: Moreira (2012)

3.1.2 Teoria de Marco Antônio Moreira

A educação hoje prevê não apenas aprendizagens adquiridas a partir de conteúdos, mas que também permita ao aluno alcançar um processo de crescimento de suas habilidades, valores e atitudes, componentes essenciais para que a educação, além de ser significativa, consiga tornar o sujeito crítico quanto ao exercício da cidadania e apto a transformar informações adquiridas

em conhecimentos.

Para Moreira (2000), a aprendizagem significativa crítica está baseada em princípios que permite ao aluno fazer parte de sua cultura e, ao mesmo tempo, não serem julgados por ela, por seus ritos, mitos e ideologias. É por meio dela que as mudanças construtivamente poderão acontecer sem que haja o domínio da mesma pelo idealizador. O aprendiz manuseia, usufrui das informações para desenvolvimento de tecnologias, entendendo que deve estar sempre disponível as novas descobertas devido ao fluxo e velocidade com que os conhecimentos são adquiridos e incorporados.

Ele expõe também que uma aprendizagem significativa crítica é subversiva, no sentido que, o sujeito cria estratégias necessárias à sua sobrevivência na sociedade contemporânea, permitindo-o estar fora dela, mesmo presente, proporcionando-lhe ir em busca de novos questionamentos e seu crescimento cognitivo.

A interação cognitiva entre conhecimentos novos e prévios, e a pré-disposição em querer aprender são características chave da aprendizagem significativa, Ausubel (1963) já nos chamava atenção para isso. Nessa interação o novo conhecimento deve relacionar-se de maneira não arbitrária e não literal com aquilo que o aluno já sabe, ou seja, a absorção de conhecimentos novos irá incorporar-se aquilo que já existe, permitindo ao saber institucional, inserir saberes pessoais, proporcionando ao aprendiz um traço individual.

Diante disso, Moreira (2020) defende que a aprendizagem além de ser significativa precisa ter uma perspectiva antropológica, com criticidade e não com passividade, sendo necessário libertar-se de comportamentalismos e determinados modelos narrativos permitindo ao sujeito compreender a Física como algo inacabado, que vive em constante evolução, para que ela ocorra.

Sendo assim, alguns princípios, segundo Moreira (2020), são elencados como fundamentais para torná-la facilitadora, como:

- 1) Princípio dos conhecimentos prévios – Aprende-se a partir do que já se sabe, pois os conhecimentos prévios em nosso cognitivo servirão como ancorados para novos conhecimentos;
- 2) Princípio da interação social e do questionamento – Ensinar o aluno a ser mais questionador, tirando o foco somente da solução de problemas, falar menos permitindo um maior diálogo durante as aulas, ensinar o aluno a perguntar;
- 3) Princípio da não centralidade dos livros – Utilizar recursos educativos diferenciados, desvinculando-se do uso, exclusivamente do livro didático, ou pelo menos de um único texto base, o que torna as aulas mais monótonas e entediantes;

- 4) Princípio do aprendiz como preceptor/representador – Permitir ao aluno externar suas percepções e representações sobre determinados conteúdos, proporcionando ao professor compreender e até intervir para melhoramento do conhecimento;
- 5) Princípio do conhecimento como linguagem – Proporcionar durante as aulas uma maior comunicação e interação social, envolvendo o aluno na percepção da realidade;
- 6) Princípio da consciência semântica – Compreender o significado das palavras dentro do contexto físico é importante entender que, mesmo dentro da Física, a palavra pode ter significados diferentes dependendo do contexto e por isso, é necessário captar significados dentro de cada realidade;
- 7) Princípio da aprendizagem pelo erro – Entender que o ser humano aprende corrigindo seus erros, que o conhecimento não é algo acabado, permanente, absoluto e acima de tudo, buscar o erro é pensar criticamente, sendo possível aprender a aprender;
- 8) Princípio da desaprendizagem – Aprender que o conhecimento prévio serve como ancoradouro para novos saberes, porém se este não for bem formulado impede o sujeito de captar novos significados a respeito do novo conhecimento;
- 9) Princípio da incerteza do conhecimento – Estimular os questionamentos propicia ao sujeito torna-se ser pensante. As definições são criadas a partir do aprendido;
- 10) Princípio da não utilização do quadro de giz – Utilizar técnicas diferenciadas que permita ao professor desvincular-se do método tradicional no qual o professor copia e o aluno transcreve.

O professor não sendo mais o “detentor do saber”, tem o objetivo de desenvolver metodologias adequadas que auxiliem o estudante a contextualizar e se comunicar com o mundo a sua volta. O grande desafio nesse novo processo é que seja estimulada a estrutura cognitiva do aluno, através de organizadores prévios, e que os conceitos sendo claros e relevantes, permitam incorporar-se a um material novo, a fim de tornar a aprendizagem significativa.

Moreira (2005) ainda adverte que o aluno deve estar apto a ser um agente crítico de seu conhecimento, buscando em suas intervenções ser capaz de observar, interpretar, discernir e acima de tudo desenvolver perspectivas futuras de uma proposição.

3.1.3 Definição da UEPS

De acordo com Moreira (2011), uma Unidade de Ensino Potencialmente Significativa (UEPS) é uma sequência de ensino fundamentada teoricamente, voltada para a aprendizagem

significativa de tópicos específicos do conhecimento. Somente há ensino quando há aprendizagem significativa, sendo o ensino o meio e a aprendizagem significativa o fim. Este autor propõe as UEPS como sequências de ensino capazes de estimular a pesquisa aplicada em ensino, voltadas diretamente para sala de aula. Trata-se de unidades de ensino facilitadoras da aprendizagem significativa de tópicos específicos de conhecimento. Uma organização de atividades interligadas, pré-estabelecidas com uma única finalidade. Moreira (2011), ainda destaca que os passos para se construir uma UEPS são:

- 1) Definir o tópico a ser abordado;
- 2) Criar ou propor uma ou mais situações que levem o aluno a expressar seu conhecimento prévio (levantamento dos subsunçores);
- 3) Propor situações-problema, em nível introdutório, levando em conta o conhecimento prévio do aluno (organizadores prévios);
- 4) Após exploradas as situações iniciais, deve-se apresentar o conhecimento a ser ensinado e aprendido, levando em conta a diferenciação progressiva, abordando dos pontos mais gerais aos específicos;
- 5) Em continuidade, retomar os aspectos gerais do conteúdo da unidade de ensino, em nova apresentação, porém em nível mais alto de complexidade em relação à primeira apresentação e promover a reconciliação integradora;
- 6) Concluindo a unidade, retomar características mais relevantes (diferenciação progressiva) com uma perspectiva integradora, ou seja, buscando a reconciliação integrativa. Nessas novas situações, o problema deve ser proposto e trabalhado questões com nível mais alto de complexidade em relação as situações anteriores;
- 7) A avaliação da aprendizagem através da UEPS deve ser feita ao longo de sua implementação, registrando tudo que possa ser considerado evidência de aprendizagem significativa do conteúdo trabalhado;
- 8) A UEPS somente será considerada exitosa se a avaliação do desempenho dos alunos fornecer evidências de aprendizagem significativa, havendo evidências progressiva no comportamento do campo conceitual.

A utilização da UEPS para o ensino da Física deve proporcionar uma maior dinâmica e desenvolvimento do conteúdo, permitindo ao estudante aguçar sua curiosidade e promoção de sua ação-reflexão, tornando a ser atuante, mediador de seu conhecimento, permitindo-o que seja potencialmente significativo. Na construção de uma UEPS, segundo Moreira (2011, p. 2), devem ser considerados os seguintes pontos:

“OBJETIVO: desenvolver unidades de ensino potencialmente facilitadoras da aprendizagem significativa de tópicos específicos de conhecimento declarativo e/ou procedimental.

FILOSOFIA: só há ensino quando há aprendizagem e esta deve ser significativa; ensino é o meio, aprendizagem significativa é o fim, materiais de ensino que busquem essa aprendizagem devem ser potencialmente significativos.

MARCO TEÓRICO: a teoria da aprendizagem significativa de David Ausubel (1968, 2000), em visões clássicas e contemporâneas (Moreira, 2000, 2005, 2006; Moreira e Masini, 1982, 2006; Masini e Moreira, 2008; Valadares e Moreira, 2009), as teorias de educação de Joseph D. Novak (1977) e de D. B. Gowin (1981), a teoria interacionista social de Lev Vygotsky (1987), a teoria dos campos conceituais de Gérard Vergnaud (1990; Moreira, 2004), a teoria dos modelos mentais de Philip Johnson-Laird (1983) e a teoria da aprendizagem crítica de M. A. Moreira (2005)”.

3.2 Suporte das Teorias Físicas

3.2.1 Concepções antigas: aspectos históricos

Segundo Halliday e Resnick, os primeiros registros sobre o magnetismo se devem a Tales de Mileto, cerca de 650 anos a.C. Segundo consta na história, teria mencionado que o mineral, magnetita era capaz de atrair ou repelir pequenos fragmentos de metais. Este efeito seria associado muito tempo depois com o fenômeno do magnetismo. Embora não se saiba quando e nem onde o uso desse fenômeno foi iniciado pelos povos antigos, há registros de que 1100 anos d.C. os chineses já usavam hastes metálicas magnetizadas para sua orientação no mar (precursor das bússolas modernas). Eles haviam descoberto que lâminas de ferro magnetizadas se alinhavam com a direção Norte-Sul da Terra. Os antigos povos não sabiam explicar a origem deste fenômeno, mas já sabiam fazer uso dele.

Em 1600, passados mais de 2 milênios, William Gilbert publicou uma obra (De Magnete) na qual relatou os avanços sobre eletricidade e magnetismo até então. A partir de experimentos próprios, observou que outras substâncias tinham a mesma propriedade do âmbar, o qual, quando atritado, era capaz de atrair pequenos objetos. Na década de 1680, Otto Von Guericke observou a repulsão entre partículas carregadas com cargas semelhantes e desenvolveu o primeiro gerador eletrostático utilizando o processo de eletrização por atrito. Em 1731, Stephen Gray demonstrou a condução elétrica nos corpos, as quais foram classificadas como condutores e não-condutores. Não demorou muito a descoberta de mecanismos pelos quais os corpos neutros podiam manifestar a propriedade carga elétrica de forma relativamente bem controlada. Entretanto, ainda demoraria um tempo até que o efeito magnético fosse associado às cargas elétricas dos corpos.

Embora não houvesse uma explicação no nível mais fundamental, porque não se sabia

o que era a carga e nem como ela era armazenada dentro dos corpos, foram descobertos 3 mecanismos de produção da carga elétrica nos corpos neutros. O primeiro método foi mediante o atrito entre dois materiais não condutores, com transferência de carga entre eles. Neste processo, os corpos adquiriam cargas de sinais opostos, segundo a nomenclatura de Benjamim Franklin, dada em 1750. Se nada fosse feito os corpos continuavam carregados sempre. O segundo mecanismo foi o contato direto entre dois corpos condutores previamente carregados, também com transferência de cargas entre eles. Neste caso, como as cargas eram apenas compartilhadas entre os corpos condutores, elas tinham a mesma natureza (ou positiva ou negativa). De modo semelhante, se não houvesse contato com outros corpos estes continuavam carregados.

O terceiro mecanismo foi pela separação das cargas positivas e negativas dentro do próprio corpo neutro, fosse condutor de eletricidade ou não. Neste processo, não havia remoção de carga do corpo e assim ele continuava neutro como antes. Porém, de um lado dele as cargas positivas predominavam enquanto que do outro lado as cargas negativas predominavam. Esta separação das cargas dentro do corpo neutro ocorria pela aproximação dele com um corpo previamente carregado por um dos métodos anteriores, sem que houvesse contato entre eles. Tão logo os corpos fossem afastados, as cargas se reorganizavam internamente e o processo de carregamento desaparecia. Este mecanismo foi denominado de indução, porque as cargas eram localmente produzidas à distância pela ação de outras (Halliday e Resnick, 2012).

Em 1785, Charles Coulomb realizou uma série de experiências com balança de torção e comprovou o modelo matemático sugerido por Daniel Bernoulli que ficaria conhecido como lei de Coulomb. Esta lei, de caráter experimental, passou a ter uso amplo, pois explicava vários fenômenos elétricos então conhecidos. Mas ela possuía algumas limitações, sendo a que merece destaque aqui o fato de que os objetos carregados tinham que estar em repouso e fossem muito pequenos. Se eles entrassem em movimento, outro tipo de força elétrica associada ao movimento do objeto carregado eletricamente se manifestava. Como será visto posteriormente, esta última força é denominada de força magnética (Young/Freedman, 2009)

O Século XIX foi de grandes descobertas relacionadas ao tema eletromagnetismo. Em 1820, Hans Oersted divulgou os resultados de suas pesquisas nas quais descobriu, de forma puramente empírica, que quando uma partícula com a propriedade q se movia (como uma corrente elétrica) nas proximidades de uma bússola, a direção na qual sua agulha apontava era alterada em relação à direção original. Quando as partículas estavam muito próximas da agulha, mas não se moviam, a sua direção não sofria qualquer modificação. Em outras palavras, ele descobriu que uma corrente elétrica produzia um campo magnético que agia sobre a agulha

magnetizada da bússola. Isto de alguma forma mostrava que a presença da carga elétrica nas partículas poderia produzir outro tipo de força, além daquela descrita pela lei de Coulomb.

Esta foi uma das grandes descobertas da ciência, pois pela primeira vez pôde-se observar uma conexão entre os fenômenos considerados “puramente elétricos” e aqueles considerados “puramente magnéticos”. Estas experiências contribuíram para o início da unificação de dois fenômenos até então considerados totalmente distintos quanto à sua origem. E não demoraria muito até que esta unificação abrangesse outra área da Física em pleno desenvolvimento à época – os fenômenos luminosos.

Com a descoberta de Oersted, abriu-se um campo de pesquisa que tinha como objetivo encontrar uma maneira de modelar matematicamente a influência da força magnética produzida pelo movimento da partícula sobre a agulha de uma bússola e, posteriormente, poder explicar outros fenômenos observados na natureza. Isto, obviamente, passava pelo conhecimento da distribuição do campo magnético criado no entorno da carga em movimento. Este objetivo foi atingido no mesmo ano de 1820, por Jean-Baptiste Biot e Félix Savart. Eles encontraram uma relação matemática que descrevia o campo magnético gerado por cargas elétricas que se movem com velocidade constante (corrente constante), denominada lei de Biot-Savart. Como será visto nas próximas seções, esta lei, de caráter experimental, é o ponto de partida para o estudo do campo magnético e ela está para o estudo da Magnetostática assim como a lei de Coulomb está para o estudo da Eletrostática.

Poucos anos depois, em 1826, André-Marie Ampère, seguindo os trabalhos de Oersted, conseguiu elaborar um modelo matemático para calcular o campo magnético produzido por correntes que é muito mais fundamental do que o modelo de Biot-Savart, que só era aplicado a correntes constantes. A lei de Ampère é aplicada para todos os tipos de correntes. Em 1831 Michael Faraday fez uma das maiores descobertas da história da humanidade, um fenômeno inverso ao que Oersted havia descoberto, ou seja, que um campo magnético era capaz de produzir uma corrente elétrica. As discussões, aplicações e implicações desta descoberta são precisamente o foco deste trabalho de dissertação. Em 1835, Carl Friedrich Gauss encontrou um modo geral de relacionar o campo elétrico de um corpo carregado eletricamente com a quantidade de carga que ele possui. Embora este seja também o conteúdo da lei de Coulomb, a lei de Gauss é mais fundamental, uma vez que ela é aplicada a qualquer distribuição de cargas, enquanto a lei de Coulomb só é aplicada a cargas pontuais. As leis de Ampère, Faraday e Gauss são de caráter teórico, no sentido de que são relações matemáticas que descrevem os campos de forma muito mais abrangentes do que os resultados experimentais revelam (Young/Freedman, 2009).

Como foi mostrado nos parágrafos anteriores, os resultados experimentais estavam sendo encontrados de forma muito acelerada, porém faltavam explicações fundamentais que descrevessem as suas origens e conexões com outros fenômenos. Isto finalmente ocorreu no final da década de 1850 com os trabalhos de James Maxwell, o qual desenvolveu os conceitos matemáticos adequados para as linhas de força idealizadas por Michel Faraday para explicar o comportamento dos campos elétricos e magnéticos.

Em 1861, Maxwell conseguiu compilar todos os resultados experimentais obtidos até então sobre eletricidade e magnetismo e desenvolveu uma teoria que unificou definitivamente os fenômenos elétricos e magnéticos. E foi muito mais além, ao descobrir que sua teoria continha também os fenômenos ópticos. A partir deste ponto da história, passou a ser consenso entre os cientistas que os fenômenos elétricos, magnéticos e luminosos eram manifestações diferentes de um mesmo fenômeno geral, denominado campo eletromagnético.

Embora a teoria de Maxwell tenha unificado os estudos da eletricidade, magnetismo e óptica, ela não continha explicações para muitos fatos importantes. Por exemplo, ela foi construída sobre a premissa de que existia um meio (o éter) para justificar a propagação da luz no vácuo. Entretanto, as propriedades apontadas para esse meio eram inconsistentes fisicamente. Também não dava explicações sobre a origem das cargas elétricas nos corpos. Deve-se notar que até esta época o conceito de átomo era apenas uma ideia proveniente dos gregos antigos e não se sabia que de fato eles eram formados por unidades ainda menores. Isto só viria ser concretizado após a construção da teoria denominada Mecânica Quântica, na década de 1920 (Young/Freedman, 2009).

A descrição completa destes fenômenos e muitos outros ligados ao tema só viria a ser melhor entendida a partir da década de 1970, com o desenvolvimento da teoria denominada Modelo Padrão. Esta teoria descreve as partículas elementares e a forma como elas interagem entre si. Ela descreve todas as unidades fundamentais que formam tudo que encontramos na natureza. Em outras palavras, ela descreve adequadamente os verdadeiros “átomos”, segundo a concepção grega do indivisível.

3.2.2 Concepções atuais: evolução conceitual

De acordo com a teoria Modelo Padrão, o Universo é preenchido por 17 entidades físicas denominadas “campos”, sendo que cada um deles oscila no espaço e no tempo com amplitude resultante nula. Entretanto, em determinados locais do espaço ou em certos instantes de tempo, essas oscilações se combinam e dão origem à flutuações com amplitude não nula, que

permanecem por um curto intervalo de tempo ou duram um tempo infinito. Segundo esta teoria, assim são formadas as partículas fundamentais da natureza. Portanto, o que entendemos como partícula na escala macroscópica, como algo localizado que possui várias propriedades, na escala microscópica ela pode ser entendida como um modo de oscilação de um campo e suas propriedades advêm da interação entre os diversos campos presentes. Ao todo existem 17 tipos diferentes de partículas fundamentais, cada uma associada a seu campo, sendo apenas 3 delas importantes para este trabalho, porque formam tudo que se pode observar na natureza, desde uma gota de água até uma galáxia: elétron, *quark up* e *quark down* (Young/Freedman, 2009).

Os elétrons são partículas bem conhecidas no nosso cotidiano, seja por livros ou pela mídia. Termos tais como aparelho elétrico, corrente elétrica, carga elétrica etc., são bastante familiares ao leitor, sendo que todos fazem menção à esta partícula. Os *quarks*, entretanto, não têm a mesma exposição ao público geral. Isto ocorre porque estas partículas não são encontradas isoladas na natureza, mas geralmente em grupos de duas ou três delas.

Existem 6 tipos de *quarks*, porém será dado destaque a apenas 2 deles, por sua importância para este trabalho. O aglomerado formado por 3 *quarks* (2 *up* + 1 *down*) forma a partícula composta conhecida como próton, enquanto a combinação de 3 *quarks* (1 *up* + 2 *down*) forma a partícula composta conhecida como nêutron. Essas duas últimas partículas formam os núcleos dos átomos. Com exceção do átomo de hidrogênio, que é formado por apenas 1 próton e 1 elétron, todos os outros átomos são formados por elétrons, próton e nêutrons, assim como todas as moléculas e materiais. Em resumo, toda a matéria conhecida é formada por elétrons, *quarks up* e *quarks down*. Os elétrons e prótons podem ser estudados a partir da identificação de três propriedades fundamentais as quais, juntamente com as interações entre as partículas, dão origem a todas as outras propriedades conhecidas: a massa m , a carga elétrica q e o campo magnético intrínseco s (ou *spin*). Os nêutrons possuem massa e *spin*, mas não possuem carga elétrica.

É importante lembrar aqui que, enquanto a massa m pode assumir qualquer valor, a carga elétrica q não pode assumir infinitos valores, mas apenas múltiplos inteiros da quantidade e , que é igual à carga de um elétron ou de um próton. Assim, as cargas dos objetos são iguais à $q = n(-e)$ ou $q = n(+e)$. A propriedade s só possui dois valores e para as partículas elétron, próton e nêutron eles são $-1/2$ e $+1/2$. Pelo fato das cargas elétricas e do *spin* apresentarem valores com sinais contrários, elas formam dois polos ou, como é mais familiar, formam dipolos.

Quanto aos campos associados às partículas, para os objetivos desta dissertação é suficiente dizer eles recebem os nomes de campo de Higgs H (associado a m), campo elétrico

\vec{E} (associado a q) e campo magnético \vec{B}_s (associado a s). Como será visto, o movimento de uma partícula com as propriedades m e q também produz um campo magnético \vec{B}_q , que apresenta características semelhantes ao campo de *spin* \vec{B}_s , inclusive havendo superposição. Portanto, além do campo magnético \vec{B}_s associado ao *spin* s , tem-se o campo magnético \vec{B}_q associado à q e a \vec{v} . Será visto também que o movimento coletivo de cargas elétricas, denominado de corrente elétrica, também gera um campo magnético, que será descrito por \vec{B}_I . Embora tenham origens diferentes, pelo menos é o que as teorias têm dado a saber, quanto aos seus efeitos, estes campos magnéticos \vec{B}_s , \vec{B}_q e \vec{B}_I serão tratados de forma semelhante neste trabalho, sendo que as diferenças serão dadas a saber apenas pelas suas aplicações. São estes campos que estão intimamente ligados ao fenômeno da indução magnética, tema central desta dissertação.

Quanto às partículas que geram o campo magnético \vec{B}_q , elas podem tanto se mover em torno do núcleo de um átomo, como os elétrons o fazem, ou fora do próprio átomo, como os elétrons livres dentro de um condutor em um circuito elétrico ou qualquer outra partícula carregada eletricamente. O importante para gerar este tipo de campo magnético é que as partículas tenham carga elétrica e estejam em movimento. Enquanto a Eletrodinâmica Clássica estuda as consequências da presença q e v na formação de \vec{B}_q e \vec{B}_I , a Mecânica Quântica se encarrega da explicação do campo magnético \vec{B}_s devido ao *spin*, s . Em certos aspectos é possível entender a propriedade s a partir da Eletrodinâmica Clássica e esta será a ênfase neste trabalho.

Até hoje não se sabe exatamente qual a origem da carga elétrica. Entretanto, sabe-se que ela está presente em mesma quantidade nas partículas prótons e elétrons que compõem os átomos, mas com efeitos opostos. Benjamim Franklin designou esses efeitos opostos de positivo e negativo. Deve-se deixar claro, contudo, que os termos positivo e negativo usados por ele é apenas uma nomenclatura, não querendo dizer que existam cargas positivas e negativas na natureza. Franklin poderia ter usado qualquer par de palavras que tivessem a ideia de algo contrário, como direita e esquerda, preto e branco, acima e abaixo. Pode-se verificar que a carga elétrica possui este comportamento colocando-se dois prótons ou dois elétrons próximos – eles se afastam espontaneamente. Colocando-se um próton e um elétron próximos eles se aproximam espontaneamente.

Como será visto, estes efeitos possuem profundas implicações na natureza, haja vista que seu equilíbrio é determinante para a formação dos átomos, das moléculas e, finalmente, da existência dos corpos. Com efeito, as forças que atuam na escala macroscópica, responsáveis

pela estrutura da matéria e por quase todos os fenômenos físicos e químicos que intervêm em nossa vida diária, são de natureza magnética. Além de sua importância quanto à formação dos corpos, o eletromagnetismo é o ramo da ciência que contribuiu significativamente para evolução tecnológica para o bem-estar humano.

3.2.3 Matemática dos Conceitos

Este trabalho tem como objetivo fornecer explicações e implicações mais significativas sobre o fenômeno da indução magnética, além de descrever roteiros para a execução de experiências simples, visando facilitar o ensino de Física para o 3º ano do Ensino Médio. Para tanto, é necessário fazer uma breve revisão sobre os conteúdos discutidos anteriormente sobre campo magnético e força magnética. Segundo a visão dos autores, é importante que a matemática dos conceitos seja feita de forma concomitante às discussões dos mesmos por meio de demonstrações simples, evidenciando a manifestação de cada aspecto sob várias condições diferentes. Deste modo, o estudante pode entender melhor como as equações são formadas e qual o propósito de cada variável contida nelas. Esta é uma abordagem diferente das encontradas nos livros do PNL, nos quais o professor e estudantes encontram “fórmulas lançadas no meio do texto sem muita contextualização”.

3.2.3.1 Uma aula diferente: brincando com ímãs e bússolas

Para o ensino de conceitos mais abstratos, como é o caso de campo magnético e força magnética, é sempre importante o professor iniciar suas atividades pedagógicas com demonstrações simples, porém concretas e bastante elucidativas. O professor deve preparar o cenário e estimular o estudante, consciente de que é este quem deve tomar a atitude de ir buscar novos saberes. No caso específico do ensino sobre o campo magnético e suas manifestações, o professor sugere solicitar na aula anterior que os estudantes instalem um aplicativo de bússola. Por questões de uniformidade, um único aplicativo deve ser indicado, de preferência um de boa qualidade e que seja disponibilizado gratuitamente nas lojas de aplicativos. O professor também sugere dispor de algumas bússolas físicas em sala de aula, além de dois ímãs cilíndricos e 1 m linha fina e resistente. Estes são materiais de baixo custo e cuja aquisição está ao alcance de todos os professores.

Antes do início das atividades de demonstração, o professor pede aos estudantes que identifiquem com suas bússolas eletrônicas a direção do Norte geográfico da Terra em relação

à sala de aula. Pede-se aos estudantes que girem seus celulares na horizontal e observem a posição da agulha da bússola. A conclusão é que a posição da agulha não muda em relação à sala, embora os celulares estejam sendo girados. Uma vez identificada a direção Norte, o professor pode disponibilizar aos estudantes algumas bússolas, chamando a atenção para escala e a agulha de metal imantada no centro. Neste momento o professor pode aguçar a curiosidade dos estudantes aproximando um dos ímãs dos celulares e pedindo aos estudantes que observem o que ocorre. A conclusão deles é que a posição do desenho da agulha não se altera com a presença do ímã. O professor faz a mesma experiência com a bússola portátil e os alunos verificarão que a posição da agulha é muito sensível com a presença do ímã. O professor informa que esse fenômeno será explicado posteriormente.

Com este novo conhecimento adquirido, o professor solicita aos estudantes que guardem seus celulares e deem atenção à próxima etapa. Ele prende a extremidade de uma porção de 50 cm da linha no centro de um dos ímãs de modo que ele fique pendurado na horizontal. Faz o mesmo com uma caneta. Faz-se uma marcação com pincel na face do ímã que fica apontada para o Norte geográfico, para facilitar a identificação durante a demonstração. O professor chama a atenção da turma para que observe, gira cuidadosamente o ímã pendurado até um certo ângulo pequeno e o solta. Pede para que os estudantes observem que no final de algumas oscilações o ímã retornará à posição original, ou seja, a face marcada retornará ao mesmo local. Isso significa que tem “algo” forçando o ímã a permanecer naquela posição privilegiada. Deve ser “a mesma coisa” que agiu sobre as agulhas das bússolas, impedindo que elas girassem junto com os celulares e que também agiu sobre a bússola portátil mudando drasticamente sua posição angular. O professor deve informar que a agulha na bússola de um celular é apenas um desenho e não um ímã. Mas dentro do aparelho tem dispositivos microscópicos que desempenham o mesmo papel do ímã que está em suas mãos e que serão melhor entendidos em outro momento da sequência didática. Deve-se deixar claro que o desenho da agulha na tela é programado para seguir a orientação determinada pelos ímãs microscópicos.

O professor deve chamar a atenção para o fator localização do efeito: em toda a extensão da sala todas as bússolas e o ímã do professor apontaram para a mesma direção. Então, o que quer que esteja agindo sobre os celulares e sobre o ímã está agindo não apenas em um local, mas em todos os lugares. Não é necessário o estudante fazer a experiência em toda a superfície do planeta para se convencer de que esse fenômeno está em todos os locais nas proximidades da Terra.

Com a finalidade de aguçar ainda mais a curiosidade da turma para o assunto, o professor solicita auxílio a dois estudantes. Um segura a linha com o ímã e outro a linha

amarrada no meio de uma caneta. Certifique-se de que eles estejam afastados um do outro para evitar choque entre ímã e caneta durante a movimentação. Chame a atenção da turma para que todos vejam para que lado o ímã está apontado (se não houver impedimentos a face do ímã marcada deve estar apontando para o polo Norte da Terra). Depois peça para cada estudante dar uma volta completa em torno de seu próprio corpo, de forma bem lenta para evitar que os objetos oscilem. Enquanto eles estão girando lentamente, solicite ao restante da turma que observe atentamente a posição da caneta e da face marcada do ímã. Ao final da demonstração, estimule a classe para debater os resultados da observação com as seguintes questões: 1) Por que a caneta girou 360 graus em relação à sala, junto com o estudante que a segurou, enquanto o ímã continuou apontando sempre para o mesmo lado, ou seja, sem girar? 2) O que tem no ímã e não tem na caneta para ter acontecido isto? 3) Como é possível provar que o ímã permaneceu parado por causa de “alguma coisa” que veio da Terra? Isto certamente despertará a curiosidade dos estudantes para o que se seguirá.

Neste ponto é importante ter em mente que, embora se diga que é o campo magnético da Terra que está agindo sobre as bússolas e sobre o ímã, não se sabe ainda o que é um campo magnético e nem como ele é gerado, nem na Terra e nem nos ímãs. Mas é necessário partir de algum ponto e considerar que existe um campo magnético \vec{B}_q ou \vec{B}_l gerado pela Terra, analisar sua influência sobre determinados objetos (ímã e celulares) que se pode dizer ser também dotados de um campo magnético do tipo $\vec{B}_{q,l}$ ou \vec{B}_s . A partir da observação da interação entre o campo magnético da Terra e do objeto, pode-se fazer medidas de algumas quantidades e, a partir dos padrões observados, pode-se finalmente conhecer o que é o campo magnético.

Antes de iniciar a explicação sobre o que é um ímã, como ele influencia ou é influenciado pelo ambiente ao seu redor, o professor sugere fazer alguma experiência para convencer os alunos de que o ímã de fato está sendo influenciado pela Terra por meio de seu campo magnético, ou seja, que foi a Terra com seu $\vec{B}_{q,l}$ que forçou o ímã a ficar parado durante a rotação do estudante. Para isso, ele deve providenciar outro ímã, semelhante ao usado na primeira demonstração e então pedir auxílio a um terceiro estudante. A ideia aqui é provar que um ímã tem \vec{B}_s e que esse \vec{B}_s interage com o $\vec{B}_{q,l}$ da Terra e se alinha com ele. O professor instrui o estudante a aproximar os dois ímãs cuidadosamente, bem devagar e, sob seu comando, pede para ele descrever para os colegas da sala o que está sentindo: 1) uma força de atração ou de repulsão entre os ímãs? 2) A força é a mesma desde longe ou ela aumenta bruscamente quando os ímãs estão bem próximos? 3) Se a força for de repulsão (atração), o professor deve pedir ao estudante que gire um dos ímãs de 180 graus, repita a experiência e responda às

mesmas perguntas.

Para dar mais credibilidade às respostas dos estudantes, o professor sugere solicitar o auxílio de um quarto estudante, de preferência um que esteja mais distraído ou alheio ao que está acontecendo. Isso pode motivá-lo a se interessar pelo aprendizado do conteúdo, uma vez que participa diretamente da ação. No final da demonstração, o professor sugere explicar que cada ímã tem um campo \vec{B}_s , cuja origem será explicada posteriormente. O campo magnético \vec{B}_s se estende por toda a região externa do ímã, mas de maneira não uniforme, ou seja, ele é mais concentrado nas faces do ímã cilíndrico (e regiões próximas a estas) do que em suas laterais. Isto pode ser facilmente confirmado na experiência de aproximar os dois ímãs no qual do lado de dentro do ímã o campo é praticamente uniforme.

O professor pode provar este fato para os estudantes colocando o ímã sob uma folha de papel com limalha de ferro sobre ela. A limalha de ferro pode ser obtida a partir de palhas de aço facilmente encontradas em todas as cozinhas. Após estas demonstrações, o professor pode explicar que o ímã é uma porção de matéria que apresenta imantação produzida natural ou artificialmente. A imantação é fenômeno físico que resulta do alinhamento dos momentos de dipolo magnético. Um momento de dipolo magnético, por sua vez, é uma maneira bem prática de representar um campo magnético, porque ele é escrito em termos de propriedades mensuráveis do ímã e será mostrado mais adiante.

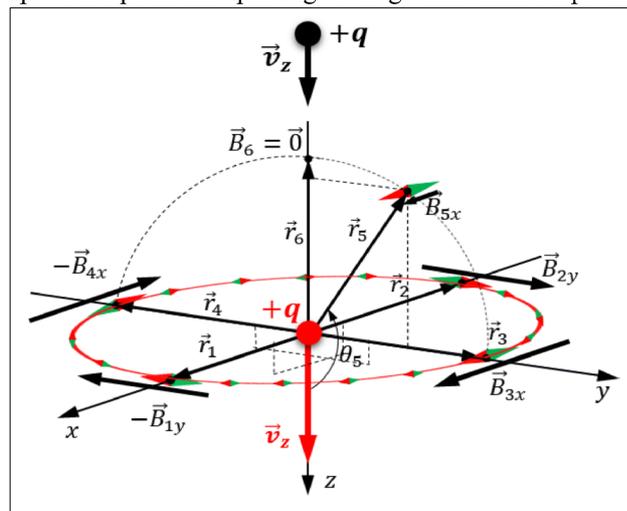
3.2.3.2 Carga em movimento criando um campo magnético

Para construir um modelo matemático destas ideias, lembre-se que foi mencionado na seção anterior que o campo magnético $\vec{B}_{q,l}$ pode ser gerado a partir do movimento dos elétrons, em torno do núcleo ou não, ou do movimento de outras partículas carregadas eletricamente fora dos átomos, como em um circuito com corrente elétrica, trocas iônicas, movimento de convecção de fluidos carregados, etc., assim como o campo magnético \vec{B}_s é gerado pela propriedade *spin*. É melhor começar a construir o modelo por algo concreto e, a partir dele, estender as ideias para algo mais abstrato. O que se tem de concreto até aqui é que a Terra força o ímã a se alinhar sempre na direção dos polos Norte-Sul terrestre do planeta. Então, o que quer que haja dentro do ímã, este também deve apontar na mesma direção Norte-Sul do planeta, quando está na posição de repouso, como na demonstração feita anteriormente.

Conforme visto em aulas anteriores, uma partícula carregada eletricamente em movimento cria um campo magnético \vec{B} cuja descrição foi realizada experimentalmente pelos físicos franceses Jean-Batiste Biot e Félix Savart, em 1820. Após muitas experiências, usando

bússolas e fios com corrente elétrica dispostos verticalmente, eles descobriram o valor e a direção do campo magnético produzido por partículas carregadas eletricamente em todas as regiões do espaço no entorno destas (Figura 2). Neste caso, em vez de uma corrente elétrica, mostra-se uma única carga em movimento, criando um campo, porque o foco neste momento é determinar o campo gerado por uma carga elétrica em movimento. Posteriormente será feita a extensão dos resultados para o caso de uma corrente elétrica (Tripler e Mosca, 2017).

Figura 2. Representação simplificada para o campo magnético gerado no vácuo por uma carga $+q$ em movimento.



Fonte: os autores (2020)

Legenda: verde- Norte, vermelho-Sul.

A Figura 2 ilustra uma possível maneira para identificar o campo magnético produzido por uma partícula que se move verticalmente na direção do eixo z . Coloca-se o fio na vertical por causa da limitação do movimento da agulha da bússola, que é sempre no plano horizontal. A ideia é usar várias bússolas ao redor do eixo z e observar como as suas agulhas giram quando a partícula se aproxima delas. Será feita inicialmente uma análise do campo magnético no plano que contém a partícula (plano xy da Figura 2). Todas as agulhas das bússolas inicialmente estão paralelas e apontam no sentido do polo Norte da Terra. Quando a partícula passa pelo plano xy a agulha da bússola colocada no ponto 1 (sobre o eixo y e identificado pelo vetor posição \vec{r}_1) aponta no sentido negativo de y , conforme ilustrado pelo símbolo de uma agulha de bússola e pelo vetor $-\vec{B}_{1y}$ indicando o sentido do campo. Observando a bússola colocada à mesma distância no ponto 2, oposto ao ponto 1 sobre o eixo x (identificado pelo vetor posição \vec{r}_2), sua agulha se alinha também o eixo y , mas apontando no sentido positivo e o campo é \vec{B}_{2y} . De modo semelhante, as bússolas colocadas nas posições 3 e 4 (identificadas pelos vetores posição \vec{r}_3 e \vec{r}_4), tem suas agulhas apontadas nos sentidos positivo e negativo do eixo x , respectivamente,

conforme ilustrado na figura pelos campos \vec{B}_{3x} e $-\vec{B}_{4x}$.

Observando as posições das agulhas chega-se à conclusão que, para quem olha de cima para baixo, o campo magnético pode ser imaginado como sendo formado por linhas circulares, com orientação bem definida no sentido horário. Isto está ilustrado pela linha circular contendo pequenos símbolos de agulhas sobre ela. Observa-se também que se o valor da carga elétrica da partícula for aumentado, a agulha se movimenta com maior facilidade, indicando que o valor do campo magnético aumenta neste local. Mantendo as bússolas nos mesmos locais e aumentando-se o valor da velocidade da partícula, percebe-se que o valor do campo também aumenta. Isto indica que o campo magnético é diretamente proporcional à carga elétrica e também à velocidade da partícula, ou seja $B \propto qv$. Se as bússolas são afastadas do eixo z , ainda sobre o plano xy , observar-se uma redução no valor do campo magnético. Então, o valor do campo gerado é inversamente proporcional à distância até a partícula em movimento. Fazendo-se muitas medidas em função da distância do eixo z é possível descobrir a dependência do campo com a distância, que vem a ser $B \propto 1/r^2$.

Outro fato que se observa é que se a bússola for colocada sobre o eixo z (ponto 6, identificado pelo vetor \vec{r}_6), sua agulha não será afetada pelo movimento da partícula. Isto indica que a partícula não produz campo magnético na direção do seu movimento (identificado como $-\vec{B}_6$), mesmo que a velocidade e a carga elétrica sejam grandes. Então tem mais alguma coisa que afeta o valor do campo magnético da partícula, além de q , v e r . Para descobrir o que é, coloca-se uma bússola fora dos eixos, como exemplo no ponto 5, identificado pelo vetor \vec{r}_5 cujo módulo é igual aos outros vetores. Neste local, com a bússola sobre o plano yz , verifica-se que o campo magnético aponta na direção positiva do eixo x , mas seu valor é menor. Mantidos os valores de q , v e r constantes e variando-se o local da bússola ao longo da linha circular do ponto 3 ao ponto 4, passando pelos pontos 5 e 6, descobre-se que o valor do campo magnético muda de máximo para zero de acordo com a função seno. Portanto, todas essas observações podem ser condensadas na seguinte equação matemática:

$$B_q = \frac{\mu_0 qv \text{sen}\theta}{4\pi r^2}. \quad (1)$$

O símbolo μ_0 , denominado constante magnética, representa a facilidade com que o vácuo é magnetizado. Seu valor é tabelado de forma exata e vale $\mu_0 = 4 \times 10^{-7} \text{ H/m}$. H é a unidade de indução magnética, dada em homenagem a Joseph Henry, um dos estudiosos do

fenômeno da indução magnética, conforme será discutido na seção 3.2.4.1. A constante 4π é proveniente do uso do sistema internacional de unidades. Baseado na equação, vê-se que o campo magnético é máximo na direção perpendicular à velocidade, sobre o plano xy que contém a partícula, no qual θ forma um ângulo de 90° em relação à velocidade, pois $\text{sen}\theta = 1$. Este é o cenário das posições 1 a 4 da Figura 2. Na direção do movimento da partícula ($\theta = 0^\circ$ ou $\theta = 180^\circ$) o campo magnético é nulo, pois $\text{sen}0^\circ = 0$ e $\text{sen}180^\circ = 0$. Em todas as outras direções o valor do campo é intermediário a esses. Se em vez de única partícula houvesse várias, o valor do campo seria máximo em toda a extensão do fio, perpendicular ao mesmo (Tripler e Mosca, 2017).

A Equação 1 apresenta apenas o valor do campo. Pela Figura 2 vê-se que sua direção é sempre perpendicular ao plano formado pelos vetores velocidade \vec{v} e posição \vec{r} , mas existe uma regra simples para encontrar a direção do campo, denominada regra da mão direita, na qual se usa o polegar para indicar o sentido do vetor velocidade e os outros dedos encurvados indicam o sentido do campo. Ela vale para cargas positivas. Para cargas negativas o sentido do campo é o contrário, para os mesmos \vec{v} e \vec{r} . Denominando \hat{r} um vetor unitário que aponta na direção do vetor posição \vec{r} , pode-se completar a descrição do campo magnético de q incluindo a direção:

$$\vec{B}_q = \frac{\mu_0}{4\pi} q \frac{\vec{v} \times \hat{r}}{r^2}. \quad (2)$$

Para quem não está muito familiarizado, o termo $\vec{v} \times \hat{r}$ é uma maneira de escrever o produto vetorial entre dois vetores. O resultado deste produto é um vetor perpendicular tanto a \vec{v} como a \hat{r} e seu valor é o da Equação 1. Deve-se deixar claro que os campos magnéticos mostrados nas equações deste texto são calculados no vácuo, ou seja, em uma região onde não há matéria.

Para encerrar esta discussão inicial vale à pena ressaltar que, diferente do campo eletrostático de um dipolo elétrico, que é interpretado como saindo da carga positiva e se dirigindo para a carga negativa, o campo magnético não se inicia em um ponto específico do espaço e nem se dirige para outro, mas forma linhas circulares fechadas com a partícula no seu centro. Entretanto, uma maneira de facilitar o entendimento dessa propriedade campo magnético é observando seu comportamento em uma pequena região apenas, como exemplo no entorno do ponto 1. O campo $-\vec{B}_{1y}$ aí pode ser imaginado como sendo gerado por algo que esteja do lado positivo do eixo y e que se dirige para algo que esteja do lado do mesmo eixo.

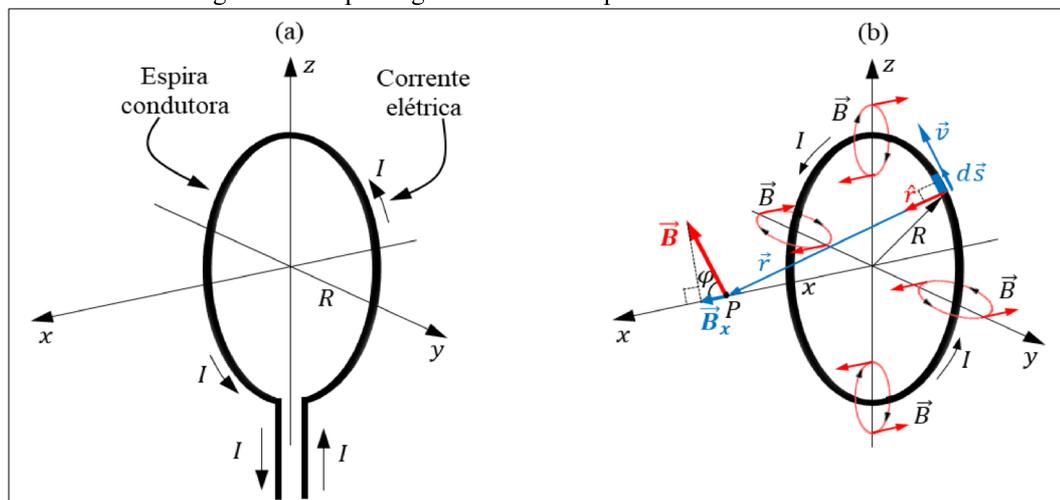
Na verdade, não existe “esse algo” que esteja criando este campo nessas regiões. Já foi

visto que quem cria esse campo magnético é a partícula que está na origem dos eixos. Mas para facilitar seu entendimento e aplicações, é importante manter alguma analogia com algo mais concreto, como o dipolo elétrico formado por duas partículas eletricamente carregadas com sinais opostos. Nesse cenário, diz-se que existe um dipolo magnético e o seu campo magnético aponta em uma direção específica, assim como o dipolo elétrico. Por uma razão que será vista logo a seguir, os sentidos associados à essa direção são denominados de Norte e Sul magnético, e não positivo e negativo, como no dipolo elétrico. Quando existe campo magnético em uma determinada região dizemos que ela está imantada. O próprio termo ímã se refere a este fato, ou seja, uma porção de matéria que se comporta como os vetores que representam os campos da Figura 2.

3.2.3.3 Cargas em movimento criando um campo magnético

Agora pode-se estender as noções de campo magnético de várias cargas em movimento (movimento de um feixe de cargas) em condutores. Este é de longe o cenário mais importante, porque os circuitos sempre são alimentados com correntes, constantes ou não. Motivados pelo comportamento circular do campo no entorno da carga da Figura 2, formando localmente o que foi definido como dipolo magnético, será escolhido um circuito no formato circular de raio R para estudar o campo de uma corrente I e verificar seu comportamento para ser utilizado em futuras aplicações. Este tipo de circuito, denominado de espira, está representado pela Figura 3a. Todos os resultados obtidos para espiras circulares se aplicam para o caso de espiras com qualquer formato, desde que o condutor forme uma superfície fechada.

Figura 3. Campo magnético de uma espira com corrente elétrica.



A Figura 3b é uma idealização de uma espira real. Usando-se a regra da mão direita é fácil descobrir como o campo magnético se distribui em torno do fio. Assim como no caso da carga única no plano xy da Figura 2, o campo magnético gerado pelo aglomerado de cargas em movimento (corrente elétrica) forma círculos concêntricos com o condutor, sendo mais intenso próximo ao fio. Entretanto, diferente do caso de uma carga apenas, esse tipo de geometria para o movimento das cargas resulta em um campo que aponta no sentido positivo do eixo x ao longo de toda a região do interior da espira e aponta para o sentido negativo de x em toda a região fora dela. Isto está ilustrado em quatro pontos da espira. Pode-se adaptar a lei de Biot-Savart (Equação 1) para determinar o campo magnético em qualquer local, fazendo aparecer a corrente explicitamente na equação. Para isso, basta considerar que uma quantidade de carga elétrica dq em movimento ocupe um trecho muito pequeno de tamanho ds da espira (ilustrado na parte superior direita da Figura 3b), sendo $d\vec{s}$ um vetor deslocamento paralelo à velocidade \vec{v} das partículas e $\vec{v} = d\vec{s}/dt$ (Young/Freedman, 2009). Considerando que ds seja muito menor do que o comprimento da circunferência da espira, a carga pode ser tratada como uma partícula infinitesimal. Assim, $dq\vec{v} = dq \frac{d\vec{s}}{dt} = \frac{dq}{dt} d\vec{s} = Id\vec{s}$. Substituindo na Equação 2, tem-se:

$$d\vec{B}_l = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Id\vec{s} \times \hat{r}}{r^2}. \quad (3)$$

Observe que esta fórmula fornece o campo magnético apenas para um pequeno segmento da corrente que se encontra dentro de $d\vec{s}$. Para saber o campo magnético total é necessário somar o campo de todos os outros segmentos ao longo de todo o caminho fechado. Isso só pode ser feito quando se souber a geometria da espira. Para ilustrar como isso é feito, o campo magnético de um segmento de corrente está indicado na Figura 3b. Para facilitar os cálculos, apenas o campo sobre o eixo x será calculado, ou seja, ao longo do eixo da espira. Depois este cálculo será generalizado para o campo em qualquer local e ângulo. Existem duas razões para isto: o ângulo entre a direção da velocidade e do vetor unitário é 90 graus e todas as componentes do campo magnético na direção y e z serão canceladas pelos campos produzidos por elementos de correntes do lado oposto da espira. Utilizando a Equação 3, tem-se:

$$dB_{lx} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Ids}{r^2} \cos\varphi. \quad (4)$$

Pode-se mostrar que o campo magnético no ponto P somando-se todos os elementos de corrente da espira a uma distância x da origem é escrita como:

$$\vec{B}_{\text{espira}} = \frac{\mu_0}{2} \frac{IR^2}{(x^2 + R^2)^{3/2}} \hat{x}. \quad (5)$$

Segundo Young/Freedman (2009), este resultado revela como o campo magnético se distribui ao longo do eixo da espira (eixo x), seja do lado positivo ou negativo deste. Detalhes da demonstração da Equação (5) se encontram no Apêndice F. O fato dele depender de x^2 mostra que o campo é sempre positivo, ou seja, aponta sempre no mesmo sentido, já que $(-x)^2 = (+x)^2$. Existem duas regiões de particular interesse para futuras aplicações, que são o campo no centro da espira e também muito longe desta. Para achar o campo no centro da espira basta fazer $x = 0$ na Equação (5). O resultado fica reduzido a:

$$\vec{B}_{\text{centro}} = \frac{\mu_0 I}{2R} \hat{x}. \quad (6)$$

Este é o maior valor possível para o campo magnético e depende da corrente I e do raio R da espira. No outro extremo, pode-se encontrar o comportamento para o campo fazendo $x \gg R$ na Equação 5. O resultado fica reduzido a:

$$\vec{B}_{\text{espira}} \approx \frac{\mu_0 IR^2}{2 x^3} \hat{x} = \frac{\mu_0}{2} \frac{2\pi IR^2}{2\pi x^3} \hat{x} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2I(\pi R^2)}{x^3} \hat{x} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2IA}{x^3} \hat{x},$$

ou

$$\vec{B}_{\text{espira}} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2\vec{\mu}}{x^3}. \quad (7)$$

Aqui $A = \pi r^2$ é a área da espira e,

$$\vec{\mu} = IA\hat{x}. \quad (8)$$

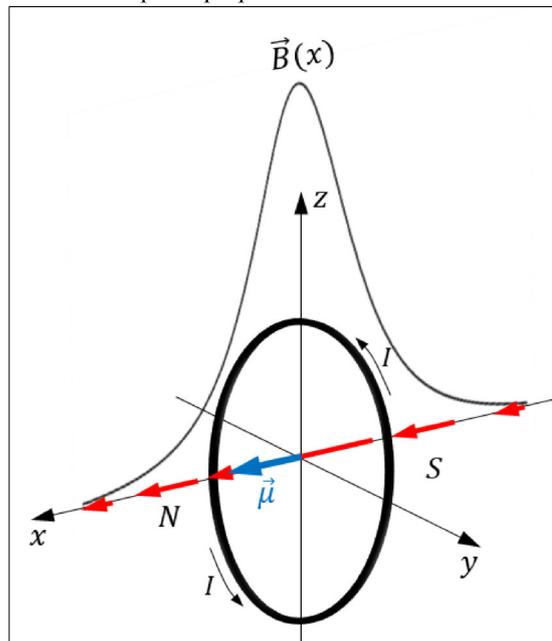
O símbolo $\vec{\mu}$ é um vetor denominado momento do dipolo magnético, que aponta sempre na direção perpendicular ao plano da espira. Esta é uma propriedade muito importante do ponto de vista prático, porque quando se diz que um campo magnético se alinha com outro, como no caso dos campos da bússola e da Terra, quer dizer que os momentos de dipolos de um se alinham

com os do outro. O alinhamento aqui é sempre acompanhado de uma rotação do vetor $\vec{\mu}$ do dipolo magnético. Portanto, a força magnética de um dos campos produz um torque cujo valor é $\tau = rF_B \sin\alpha$ sobre o vetor $\vec{\mu}$ do outro campo, fazendo-o se alinharem. Antigamente, o torque de uma força era denominado de “momento de uma força”, de modo que o torque de uma força magnética passou a ser designado como “momento da força magnética”, ou momento magnético do dipolo, em alusão ao fato de que em geral sobre $\vec{\mu}$ existe um torque quando o dipolo é colocado em um campo externo. A medida direta do campo magnético (o lado esquerdo da Equação 7) é uma tarefa difícil, enquanto a medida de $\vec{\mu}$ (lado direito da Equação 7) é relativamente fácil, pois depende apenas de I e de A , conhecendo x . Portanto, tendo o lado direito da Equação 7 obtém-se o campo \vec{B} .

Para facilitar a visualização e interpretação do campo das Equações 5 a 8, veja a Figura 4. O valor do campo magnético longe da espira tende a zero (Equação 7) e aumenta sempre apontando para o sentido positivo do eixo x . A curva acima da espira ilustra o valor do campo, enquanto os vetores sobre o eixo x ilustram seu comportamento global como um vetor. No centro da espira ele atinge o valor máximo (Equação 6). Conclui-se que a espira se comporta como um dipolo magnético, como se o campo saísse do lado negativo de x e se dirigisse para o lado positivo. Isto está indicado pelo vetor momento de dipolo magnético $\vec{\mu}$. A espira se comporta como um ímã e esta associação será usada de agora em diante neste trabalho. O vetor $\vec{\mu}$ aponta do polo Sul ao polo Norte. Em muitos casos, uma espira, um ímã ou o próprio campo magnético serão representados apenas pelo seu vetor $\vec{\mu}$.

Antes de ir para a próxima seção, vale a pena chamar a atenção para o símbolo μ usado nesse texto. Em alguns lugares ele aparece como um subíndice 0, μ_0 , sem uma seta na parte superior. Esse representa a permeabilidade magnética do vácuo. Nesta seção ele aparece como com uma seta superior, $\vec{\mu}$, indicando que se trata de um vetor momento de dipolo magnético. No contexto dessa seção, às vezes ele aparece sem a seta, μ , indicando que é apenas o módulo do vetor momento de dipolo magnético. Na seção 3.2.5.2 ele vai aparecer como μ_{mat} , representando a permeabilidade magnética da matéria. Pelo contexto da discussão ficará claro a que propriedade o símbolo estará relacionado.

Figura 4. Perfil da intensidade do campo magnético na direção do eixo x para uma espira com corrente elétrica disposta perpendicular ao eixo x .

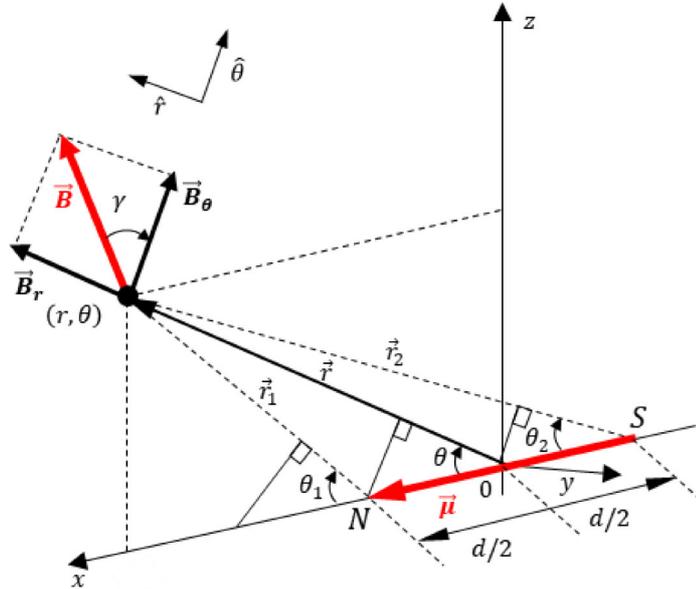


Fonte: os autores (2020)

3.2.3.4 O dipolo que cria um campo magnético

Conforme mostrado na Figura 4, o campo magnético da espira foi calculado apenas sobre o seu eixo (eixo x). Entretanto, algumas informações importantes não puderam ser identificadas com este caso particular. Sem entrar em detalhes dos cálculos, será discutido brevemente o comportamento do campo ao longo de todo o plano xz perpendicular ao plano da espira da Figura 4. A Figura 5 ilustra um dipolo magnético $\vec{\mu}$ na origem do sistema coordenadas. Observe atentamente que a espira com corrente foi substituída por um dipolo magnético. Lembre-se que no início havia uma espira circular com uma corrente elétrica. Após o cálculo do campo magnético, este foi escrito em função apenas do momento magnético $\vec{\mu}$ do dipolo formado (Equação 7). Na forma como a Equação 7 foi escrita, ela mostra que a fonte do campo magnético é o momento magnético. Este modelo facilita muito os cálculos dos campos magnéticos dos materiais em geral e será usado de agora em diante.

Figura 5. Campo magnético de um dipolo magnético. O campo em qualquer ponto do plano (x, z) é dado pelas componentes \vec{B}_r e \vec{B}_θ . Sobre o eixo x $B_\theta = 0$ e sobre o eixo z $B_r = 0$.



Fonte: os autores (2020)

O campo magnético fora dos eixos x e z possui duas componentes: uma na direção do raio r (\vec{B}_r) e outra na direção do ângulo θ (\vec{B}_θ). Os cálculos serão feitos no sistema de coordenadas polares (r, θ) por serem mais simples. Eles sim, são relevantes para as discussões e aprendizado. O campo magnético total e suas componentes \vec{B}_r e \vec{B}_θ são, respectivamente iguais a (W. Lowrie, 2007):

$$\vec{B}_{dipolo} = \vec{B}_r + \vec{B}_\theta = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi r^3} (2\cos\theta \hat{r} + \sin\theta \hat{\theta}), \quad (9)$$

$$\vec{B}_r = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi r^3} 2\cos\theta \hat{r}, \quad \vec{B}_\theta = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi r^3} \sin\theta \hat{\theta}. \quad (10)$$

Os detalhes da demonstração das Equações (10) se encontram no Apêndice G. Na região dos polos (sobre o eixo x), $\theta = 0$ e apenas a componente B_r sobrevive com valor igual a:

$$\vec{B}_r = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2\mu}{r^3} \hat{r}. \quad (11)$$

Observe que este é o mesmo resultado mostrado na Equação 7. Na região do equador do dipolo, sobre o eixo z ($\theta = 90^\circ$) apenas a componente B_θ sobrevive, e tem valor igual a:

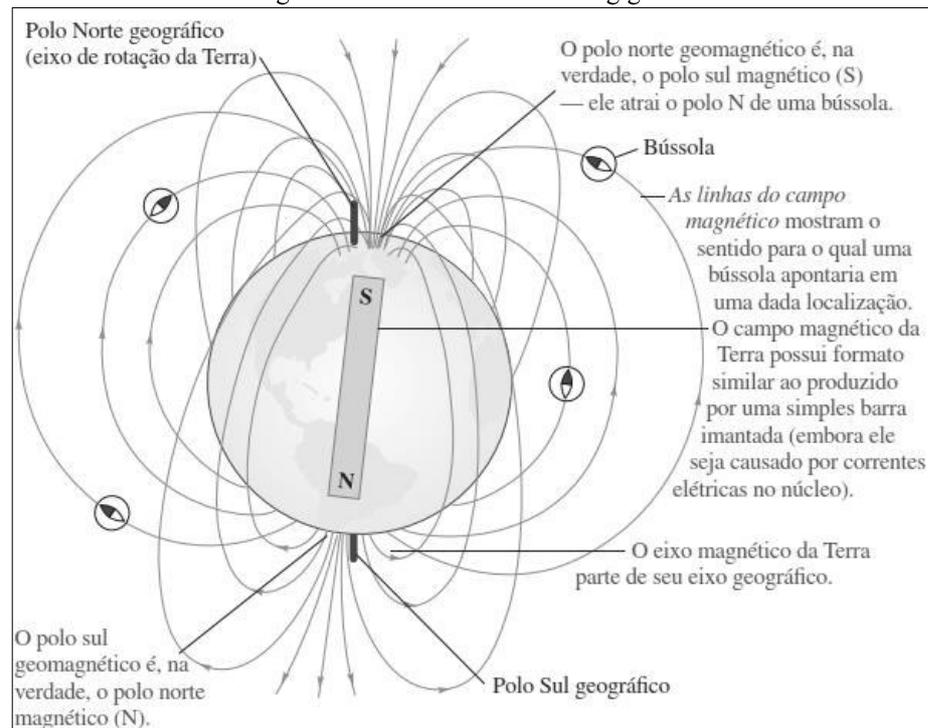
$$\vec{B}_\theta = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi r^3} \hat{\theta}. \quad (12)$$

Estes resultados revelam que a intensidade do campo magnético na região dos polos é duas vezes maior do que na região do equador do dipolo magnético. Além disso, definindo a inclinação magnética γ como o ângulo formado pelo campo total \vec{B} em um ponto e a direção horizontal local ($\hat{\theta}$), tem-se:

$$\tan \gamma = \frac{B_r}{B_\theta} = \frac{\frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2\mu}{r^3}}{\frac{\mu_0}{4\pi} \frac{\mu}{r^3}} = 2 \cot \theta = 2 \tan(90^\circ - \theta). \quad (13)$$

Em sua obra “De Magnete”, de 1600, William Gilbert verificou que o campo magnético da Terra se comportava como um dipolo cuja direção era a mesma do raio da Terra e seu centro coincidia com o centro da Terra. A teoria mais aceita hoje é que o campo da Terra seja gerado por correntes de convecção de ferro fluido ionizado do núcleo da Terra em direção à sua crosta. Por causa da rotação do planeta de Oeste para Leste, forças laterais (de Coriolis) deslocam a massa carregada eletricamente na direção Leste-Oeste, formando espiras de correntes cujo eixo liga os polos Norte-Sul da Terra. Como a massa em movimento não é homogênea, o eixo do dipolo magnético formado não coincide com eixo Norte-Sul da Terra. A Figura 6 ilustra o campo da Terra. O eixo do dipolo magnético está ligeiramente inclinado em relação aos eixos dos polos geográficos, sendo que o polo sul magnético aponta para o polo norte geográfico. Esta é a direção em que as bússolas dos celulares e dos dispositivos aponta naturalmente, caso não haja outra fonte de campo magnético na mesma região. Devido à concentração maior das linhas de campo nos polos, seu valor aí é maior, conforme análise das Equações 11 e 12.

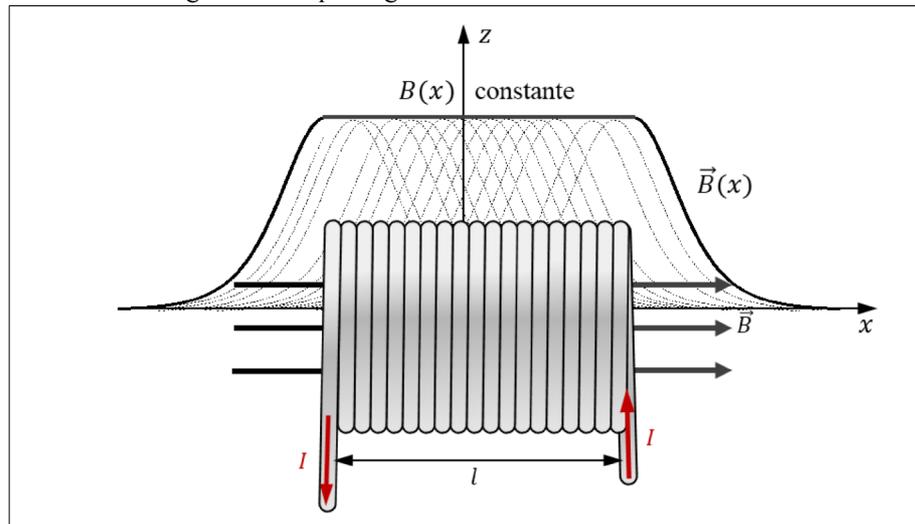
Figura 6. A Terra forma um ímã gigante.



Fonte: Young e Freedman (2009)

Devido ao tamanho do planeta, o campo magnético da Terra é aproximadamente constante nas aplicações em distâncias típicas do cotidiano. Entretanto, em muitas aplicações do fenômeno da indução magnética, é necessário que o campo magnético produzido por ímãs naturais ou artificiais também sejam constantes dentro de uma certa região do espaço. Com apenas uma espira isso não é possível, conforme mostrado na Figura 4. Entretanto, se forem colocadas muitas espiras bem próximas umas às outras, os campos de todas elas irão se superpor. No lado interno do conjunto de espiras o campo magnético aponta para o mesmo sentido e o resultado é a envoltória mostrada na Figura 7. A essa estrutura formada por várias espiras juntas dá-se o nome de solenoide ou bobina. Assim como uma espira serve como modelo para um dipolo magnético, um solenoide é uma representação para um campo magnético constante em uma região do espaço, bem como serve para representar um ímã. Um dos dispositivos mais importantes de um circuito eletrônico com corrente alternada é denominado de indutor, que nada mais é do que uma bobina construída com N espiras na forma de um solenoide de comprimento l . Dentro da bobina o campo magnético de cada espira aponta para o mesmo sentido e a soma de todos eles tem valor aproximadamente constante, sendo que o valor total depende do número de espiras. Fora da bobina o campo de cada espira aponta para direções diferentes e o valor total é praticamente nulo (Randall, D. Knight, 2009).

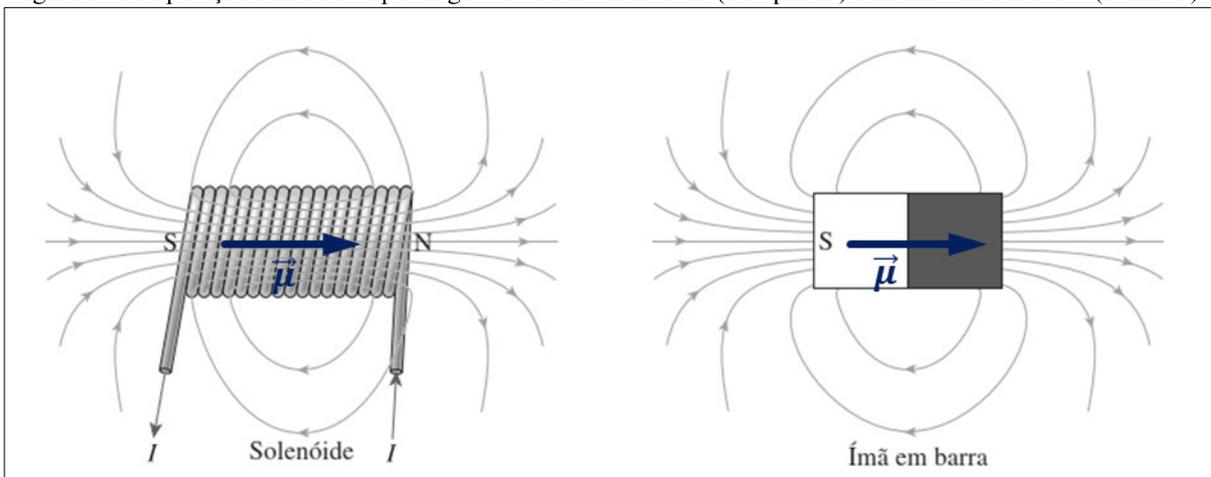
Figura 7. Campo magnético no interior de um solenoide.



Fonte: os autores (2020)

A Figura 8 ilustra a distribuição interna e externa das linhas de campo magnético de uma bobina e sua semelhança com o ímã de barra. Deve-se ressaltar que, embora a distribuição do campo magnético seja semelhante para os dois objetos, a origem do campo da bobina e do ímã são diferentes. Enquanto o campo magnético da bobina é produzido pelo movimento de elétrons livre no condutor (corrente) devido à uma fonte de força externa, e por isso este dispositivo é às vezes denominado de eletroímã, o campo do ímã natural é produzido pelo movimento dos elétrons presos aos átomos (campo magnético orbital) e pelo campo de *spin*. Estes campos serão brevemente estudados mais à frente.

Figura 8. Comparação entre o campo magnético de um solenoide (à esquerda) e de um ímã em barra (à direita).

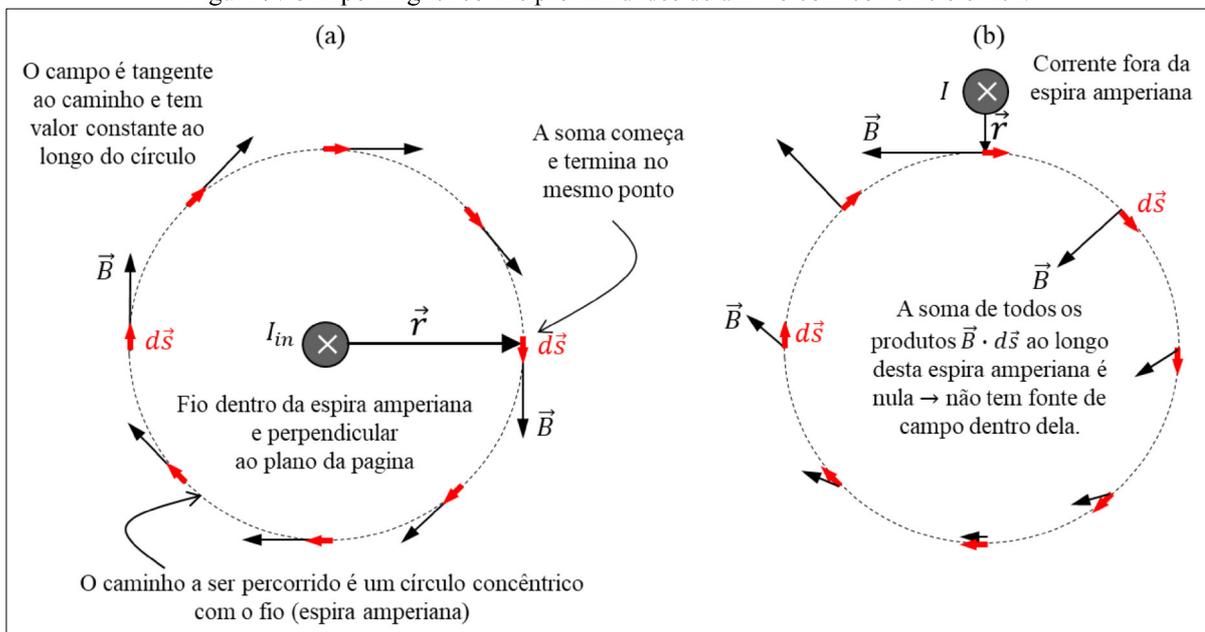


Fonte: adaptado de Randall D. Knight (2009)

Para calcular o campo magnético dentro do solenoide, em vez de usar a lei de Biot-Savart, que é mais complicada, pode-se usar a lei de Ampère, que é escrita na forma de uma

relação matemática elegante e mais simples em alguns cenários. A lei de Ampère está para a magnetostática assim como a lei de Gauss está para a eletrostática e é mais fundamental do que a lei de Biot-Savart. Ela é muito útil para achar o campo magnético quando este permanece constante ao longo de um caminho fechado, como no caso das espiras já estudadas. A Figura 9a ilustra o campo magnético no entorno de um fio que está perpendicular ao plano da página e a corrente elétrica está no sentido para dentro da página (representado pelo símbolo \times). A corrente I que passa no fio gera um campo \vec{B} dentro do pequeno trecho de comprimento $d\vec{s}$ da linha circular pontilhada, denominado espira ou amperiana. Escolhe-se esse caminho porque o campo magnético sobre ele tem valor constante e sua direção é sempre tangente a ele.

Figura 9. Campo magnético nas proximidades de um fio com corrente elétrica.



Fonte: os autores (2020)

O objetivo é conectar o campo B com a corrente I no fio e para isso toma-se o produto escalar $\vec{B} \cdot d\vec{s}$. Que o produto tem que ser do tipo escalar se justifica pelo que foi discutido no contexto da Figura 2. As bússolas colocadas ao redor da carga ou de uma corrente mostram que o campo gerado é circular em torno da partícula em movimento. Então, para garantir que somente as componentes do campo que sejam paralelas ao caminho amperiano sejam contadas, toma-se o produto escalar com ele. O procedimento seguinte é percorrer toda a extensão da espira amperiana e somando $\vec{B} \cdot d\vec{s}$ em cada $d\vec{s}$. Expandindo o produto escalar tem-se $\vec{B} \cdot d\vec{s} = B ds \cos\alpha$. No presente caso $\alpha = 0$ e $\vec{B} \cdot d\vec{s} = B ds$. Mas o comprimento total do caminho a ser percorrido pelo elemento ds é igual a $2\pi r$, o comprimento da circunferência de raio r .

Portanto, $\vec{B} \cdot d\vec{s} = 2\pi rB$. O campo B na equação $2\pi rB$ é o campo total gerado pela corrente no fio. Assim, pode-se fazer a associação $2\pi rB = \mu_0 I$. Daqui,

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}. \quad (14)$$

Formalmente, os passos anteriores são descritos em termos de uma soma contínua, ou seja, na situação em que $d\vec{s} \rightarrow 0$. Usa-se este procedimento para garantir que de fato todo o campo \vec{B} gerado pela corrente elétrica do fio seja efetivamente incluído na soma. Usa-se o símbolo matemático \int para representar a soma de termos infinitesimalmente pequenos, representados por $d\vec{s}$. Como a soma se dá ao longo de um caminho fechado (começa e termina no mesmo ponto do espaço), usa-se o mesmo símbolo com um círculo no centro \oint . Para indicar que a soma é ao longo do caminho \vec{s} , o resultado da soma é representado por:

$$\oint_0^s \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 I. \quad (15)$$

A Equação 15 representa um efeito causado pela corrente no fio, conhecido como fluxo magnético. Considerando que entre o fio e o local onde o campo é medido seja um ambiente evacuado de matéria e considerando-se também que a corrente que produz o campo na posição r está dentro da espira amperiana, sendo que o subíndice “*in*” na corrente (I_{in}) é para deixar claro que apenas correntes internas à espira amperiana contribuem para o campo medido. Correntes externas à espira amperiana imaginária geram campo total nulo ao longo dela. Isto está ilustrado na Figura 9b. Observe que nem o valor do campo e nem o seu sentido são constantes ao longo da espira amperiana. Ao efetuar a soma o produto $\vec{B} \cdot d\vec{s}$ ao longo de uma metade do caminho encontra-se um certo resultado \vec{B} . Ao se proceder a soma ao longo da outra metade o resultado é igual a $-\vec{B}$. Portanto, o campo total é nulo. Existem campos magnéticos ao longo da espira, mas eles se cancelam totalmente, sendo que o efeito físico é como se não houvesse nenhum campo.

A lei de Ampère é muito útil para calcular o campo magnético no entorno de uma distribuição de corrente elétrica com simetria conhecida. A escolha do caminho por onde se faz a soma é fundamental e, por isso, existem três restrições fundamentais para seu uso prático: *i*) Olhando para o produto $\vec{B} \cdot d\vec{s} = B ds \cos\alpha$, para que B possa ser retirado da soma (colocado

em evidência na integral) ele precisa ser constante ao longo de todo o caminho. *ii)* Para que $\cos\alpha$ seja retirado da soma ele precisa ser o mesmo ao longo de todo o caminho, ou seja, o caminho tem que ser escolhido de tal forma que o ângulo entre a direção do campo magnético e o deslocamento $d\vec{s}$ seja sempre o mesmo. No caso do campo do fio o \vec{B} é sempre paralelo a $d\vec{s}$, o que resulta em $\cos\theta = \cos 0 = 1$. *iii)* É preciso conhecer a forma como a corrente está distribuída no espaço para então se escolher a forma da espira amperiana. No presente caso, a corrente está dentro de um fio cujo diâmetro é muito menor do que a distância r até a espira amperiana, de modo que ela é considerada unidimensional e assim o campo forma círculos concêntricos com a corrente. Assim, já se sabe, a priori, o comprimento do caminho a ser percorrido ($s = 2\pi r$). Aplicando-se formalmente a lei de Ampère ao caso do fio, tem-se:

$$\oint_0^s \vec{B} \cdot d\vec{s} = \oint_0^s B \cos(0) ds = B(1) \oint_0^s ds = B(s - 0) = B(2\pi r - 0) = \mu_0 I \rightarrow B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}. \quad (16)$$

Este é o mesmo resultado obtido na Equação 14, só que de uma forma muito mais simples e elegante. O campo magnético no interior do solenoide de raio R pode ser obtido diretamente da Equação 14, para o caso de uma espira, simplesmente, multiplicando-se este resultado pelo número de espiras:

$$\vec{B}_{bobina} = N \frac{\mu_0 I}{2R} \hat{x}. \quad (17)$$

Este resultado é muito útil. Medir o campo magnético diretamente é uma tarefa difícil, sobretudo dentro de uma bobina ou em locais onde o aparelho de medir (magnetômetro) não pode ser utilizado por questões de espaço ou outros impedimentos. Neste ponto, a matemática vai muito além e mostra que conhecendo-se o raio da bobina, a corrente elétrica que passa nela e o número de espiras o campo pode ser conhecido facilmente (Randall, D. Knight, 2009).

3.2.3.5 Conhecendo o campo magnético pela ação de suas forças

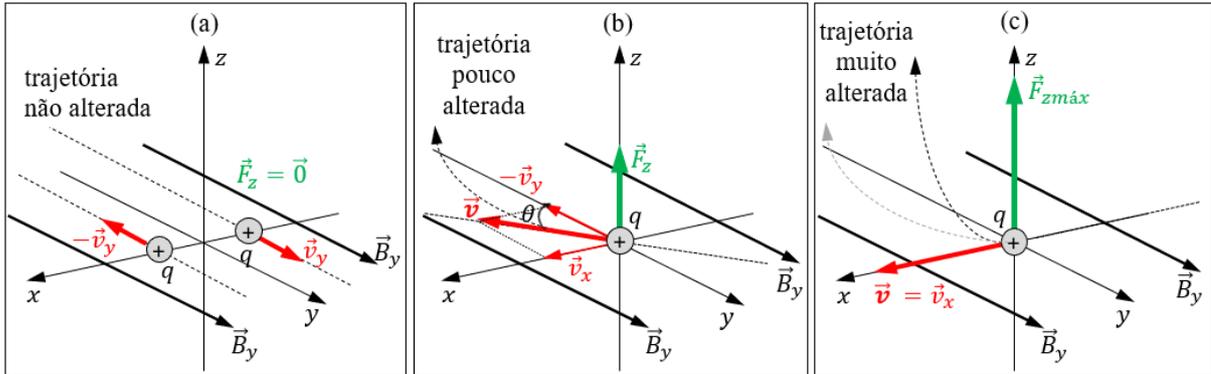
O estudo do campo magnético de uma carga ou várias em movimento usando bússolas, conforme apresentado até aqui, é uma forma qualitativa de fazer as coisas. Uma maneira mais apropriada e quantitativa é pelo monitoramento da trajetória de partículas carregadas nos locais onde se quer medir o campo magnético. Os passos são os seguintes: determina-se a trajetória

da partícula, a partir dela determina-se a força sobre esta partícula e a partir da força determina-se o campo magnético ao longo da trajetória. Em outras palavras, conhecendo-se a força que atua sobre uma partícula com carga elétrica q que se movimenta com velocidade \vec{v} , é possível obter o campo magnético \vec{B} de um ímã ou de outra fonte de campo que está nas proximidades.

Na prática isto é feito lançando-se uma partícula com carga elétrica e velocidade conhecidas na região que contém o campo a ser estudado. Na experiência ilustrada na Figura 10a, uma partícula é lançada na direção positiva e negativa do eixo y e nada acontece, ou seja, a direção do movimento da partícula não é alterada, e nem o valor de sua velocidade. Portanto conclui-se que não existe força neste cenário, mas dá para concluir que não existe campo magnético. Mas se ele existe, não interage com a partícula. Na experiência da Figura 10b, a partícula é lançada numa direção formando um ângulo θ em relação ao eixo y negativo. Desta vez observa-se claramente que a trajetória da partícula é alterada, conforme indicado pela trajetória pontilhada, no sentido positivo do eixo z , o que indica que deve existir uma força apontando na direção do eixo z .

Quando a partícula é lançada no sentido positivo do eixo x a sua trajetória se desvia mais ainda, conforme ilustrado na Figura 10c. Depois de muitos lançamentos com uma partícula com carga elétrica positiva em várias direções, fica fácil identificar que para a um campo magnético no sentido positivo do eixo y existe uma força apontada no sentido positivo do eixo z , cujo valor é máximo quando a partícula se move no sentido do eixo x positivo (perpendicular ao campo B). Se a partícula se move no sentido negativo do eixo x a força também será máxima e aponta no sentido negativo do eixo z . Após muitas experiências, nota-se que o raio de curvatura fica menor (maior desvio da trajetória linear) quando os valores da carga elétrica, da velocidade e do campo magnético são maiores. Portanto, a força depende diretamente de q , v , B e de suas direções relativas.

Figura 10. Força magnética sobre uma partícula em movimento com velocidade \vec{v} dentro de um campo magnético na direção do eixo y , \vec{B}_y . (a) \vec{v} paralelo a \vec{B}_y (a força magnética tem valor zero). (b) \vec{v} formando um ângulo θ com \vec{B}_y (a força magnética tem valor intermediário). (c) \vec{v} perpendicular a \vec{B}_y (a força magnética tem valor máximo).



Fonte: os autores (2020)

Após catalogar todas as informações das experiências, descobre-se que o valor da força obedece a uma relação matemática do tipo:

$$F = qvB\text{sen}\theta. \quad (18)$$

Sendo θ o ângulo entre \vec{v} e \vec{B} , conclui-se que esta relação pode ser rescrita na forma vetorial como:

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}. \quad (19)$$

Este resultado condensa o comportamento da força de um campo magnético sobre uma carga em movimento. Mas muito mais importante, do ponto de vista deste trabalho, é a força que um campo magnético exerce sobre um condutor com corrente elétrica, porque os circuitos elétricos são formados por condutores nos quais existem correntes elétricas. Da definição de corrente elétrica, $q = I\Delta t = I(l/v)$, sendo l a distância percorrida pela carga q durante um intervalo de tempo Δt . Substituindo na Equação 18:

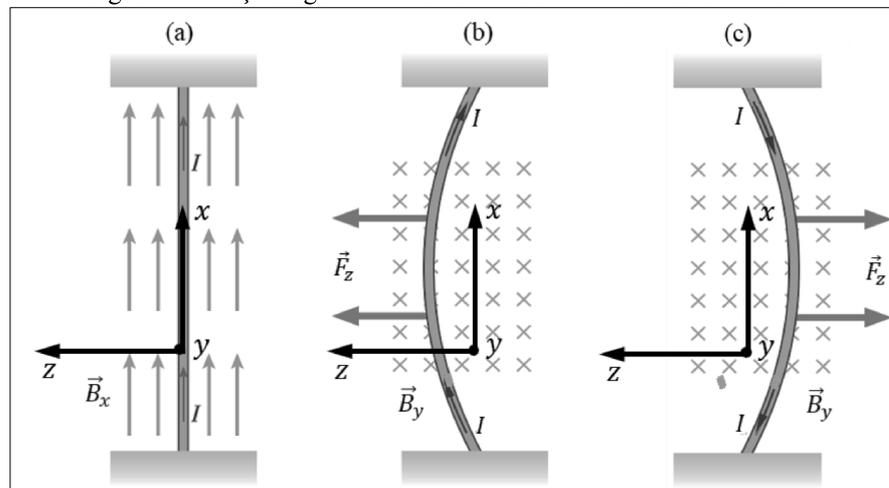
$$F = I \left(\frac{l}{v} \right) vB\text{sen}\theta = IlB\text{sen}\theta. \quad (20)$$

Definindo o vetor deslocamento \vec{l} cuja direção é a mesma da velocidade \vec{v} e cujo módulo é l , tem-se:

$$\vec{F} = I\vec{l} \times \vec{B}. \quad (21)$$

Este resultado é de fundamental importância para explicar porque a agulha da bússola ou qualquer material magnetizado, seja natural ou artificial, gira para se alinhar com um campo magnético externo. Além disso, ele é a base de uma das aplicações que serão exploradas no final deste trabalho, o canhão eletromagnético. A Figura 11 ilustra como a força magnética age sobre um fio com corrente. Na Figura 11a a corrente e o campo magnético estão orientados no sentido positivo do eixo x (são paralelos) e nenhuma força se manifesta. Mantenha em mente que o campo magnético aqui não é gerado pela corrente e sim por outra fonte que não está mostrada na Figura. Na Figura 11b a corrente continua no sentido de $+x$ e o campo está perpendicular, orientado na direção do eixo $+y$ (para dentro da página, representado pelo símbolo \times). Agora, a força magnética é máxima e puxa o fio para a esquerda, na direção do eixo $+z$. Na Figura 11c o sentido da corrente é invertido (se dirige para $-x$) e o campo continua no sentido de $+y$. Agora a força do campo sobre o fio aponta para a direita, no sentido de $-z$. A inversão no sentido da força magnética causada pela inversão no sentido da corrente elétrica tem muitas aplicações no cotidiano, como em autofalantes, osciladores eletromagnéticos, etc., conforme será visto na seção de indução magnética.

Figura 11. Força magnética sobre um condutor com corrente elétrica.



Fonte: os autores (2020)

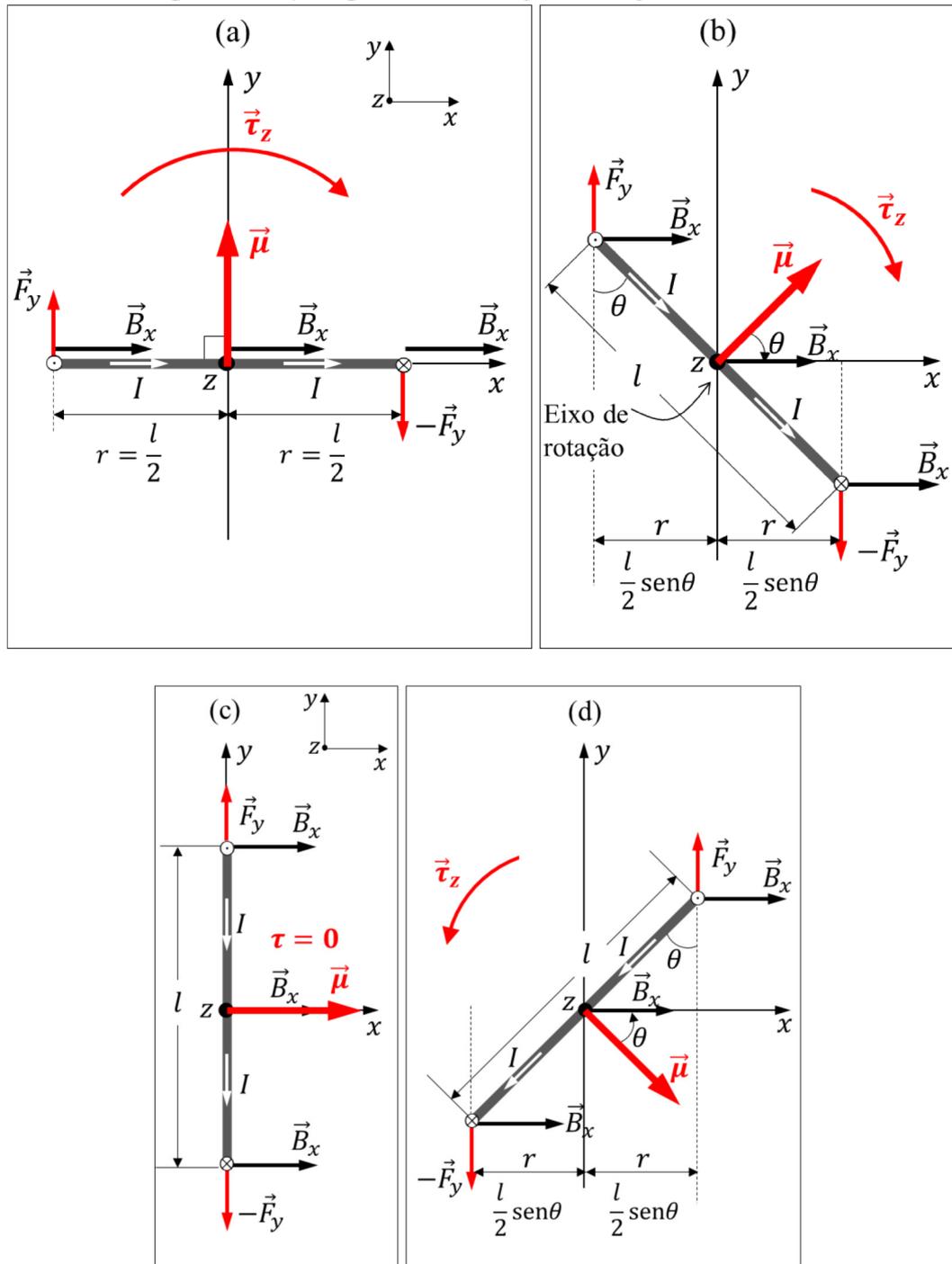
A existência do comportamento dipolar de algumas estruturas magnéticas e a sua descrição pela propriedade momento magnético do dipolo $\vec{\mu}$ foi a principal descoberta feita até aqui em termos dos objetivos deste trabalho. Entretanto, qual é exatamente a utilidade prática desta propriedade $\vec{\mu}$? Foi visto nas experiências em sala de aula que as agulhas das bússolas sempre tentavam se alinhar com o campo magnético da Terra ou com o eixo dos ímãs cilíndricos. Mas por que e como esse alinhamento acontece? A resposta à primeira pergunta é

mais simples: o alinhamento ocorre porque a energia potencial compartilhada pelo ímã-Terra ou ímã-agulha da bússola deve ser a menor possível, como será mostrado mais à frente. Para responder à segunda pergunta, é necessário analisar o comportamento um dipolo magnético dentro de um campo magnético externo.

Em muitos cenários os fios condutores não são retos, como na Figura 11, mas formam espiras fechadas presas a um eixo que passa pelo centro, permitindo que elas girem em torno dele. Este é um modelo idealizado no qual muitas aplicações e explicações estão baseadas, como nos motores e geradores elétricos. O processo de alinhamento dos ímãs e agulhas será explicado a partir dele. A Figura 12a ilustra uma espira quadrada de lado l dentro de um campo magnético uniforme \vec{B} . Ela está livre para girar em torno do eixo de rotação, que coincide com o eixo z , perpendicular ao plano da página. O plano da espira está paralelo ao eixo z , de modo que apenas um de seus lados está mostrado. A corrente elétrica circula no sentido mostrado, saindo do plano da página no lado superior (indicado pelo símbolo \odot) e entrando no plano da página no lado inferior (indicado pelo símbolo \otimes).

Usando a Equação 20 verifica-se que corrente em cada um dos quatro lados da espira experimenta uma força exercida pelo campo magnético. Como os valores da corrente e do campo são os mesmos ao longo da espira, as forças na direção do eixo z (\vec{F}_z) são sempre iguais e opostas uma à outra e, portanto, se anulam. Estas forças não estão mostradas na Figura. De igual modo, as forças na direção do eixo y (\vec{F}_y) são iguais e se anulam. Entretanto, as linhas de ação de \vec{F}_y não coincidem, mas estão separadas pela distância $r = l/2$ em relação ao eixo de rotação. Em vez de enfatizar a espira com corrente, o foco estará no seu momento magnético de dipolo $\vec{\mu}$. Veja que na Figura 12a $\vec{\mu}$ é perpendicular ao campo \vec{B}_x ($\theta = 90^\circ$) e nessa posição a tendência de rotação no sentido horário é a maior possível. Em outras palavras, se deixada nesta posição, a aceleração angular teria seu maior valor.

Figura 12. Força magnética exerce torque sobre espira com corrente.



Fonte: os autores (2020)

A Figura 12b ilustra a espira deixada na posição com seu dipolo magnético $\vec{\mu}$ fazendo um ângulo θ com a direção do campo magnético. Neste caso, as distâncias entre as linhas de projeções de \vec{F}_y e o eixo de rotação são menores ($r = l \sin \theta / 2$) e, portanto, verifica-se que a tendência de rotação ou a aceleração angular diminuem. A Figura 12c ilustra a situação em que

a espira é solta na posição vertical, quando θ é nulo ($\vec{\mu}$ e \vec{B}_x são paralelos). Agora as linhas de ação das forças \vec{F}_y são coincidentes e ambas passam sobre o eixo de rotação. Experimentalmente observa-se que se a espira for deixada nesta posição ela não se move, ou seja, aquela tendência de girar desaparece. Se a espira for deixada na posição indicada pela Figura 12d, as forças tentarão girar a espira no sentido anti-horário. Existe uma razão para isto e deve ser a mesma que mantinha a agulha das bússolas apontadas para o Norte ou na direção de um ímã próximo à ela, nas experiências realizadas em sala de aula. Isto será discutido nos próximos parágrafos.

Existe uma propriedade física que mede a eficácia que uma força possui para girar um objeto em torno de um eixo, denominada de torque. Observa-se que no caso da Figura 12a, o valor do torque é máximo e pode ser escrito como:

$$\tau = \left(\frac{l}{2}\right)F + \left(\frac{l}{2}\right)F = 2\left(\frac{l}{2}\right)F = lF. \quad (22)$$

Veja que neste caso a distância $r = l/2$ é a máxima possível, razão pela qual a tendência à rotação é também a máxima. No caso das Figuras 12b,d o ângulo entre a direção do momento de dipolo e o campo é menor que 90° e a tendência à rotação diminui, podendo ser escrita como:

$$\tau = lF\text{sen}\theta. \quad (23)$$

Observe a diferença entre as Figuras 12b e 12d. Para um mesmo ângulo θ positivo e negativo, a tendência de rotação é o contrário. Isto é um bom indicativo de que a energia de interação do dipolo magnético $\vec{\mu}$ e o campo externo \vec{B}_x deve ser a menor possível para $\theta = 0$. Para facilitar a análise, em vez de descrever o torque sobre a espira em função de r , um parâmetro puramente geométrico, é muito mais adequado, para o interesse deste trabalho, descrevê-lo apenas em função das grandezas magnéticas. Para isso, fazendo-se uso das Equação 8 e 20, tem-se:

$$\tau = (F)(l\text{sen}\theta) = (IlB)(l\text{sen}\theta) = (Il^2)B\text{sen}\theta = (IA)B\text{sen}\theta,$$

$$\tau = \mu B\text{sen}\theta. \quad (24)$$

Agora ficou mais claro ver porquê o torque na Figura 12a é máximo ($\sin 90^\circ = 1$ e $\tau = \mu B$), enquanto na Figura 12c ele é nulo ($\sin 0^\circ = 0$ e $\tau = 0$). Conforme as Figuras 12, θ é também o ângulo entre $\vec{\mu}$ e \vec{B} , de modo que o resultado acima por ser escrito na forma vetorial:

$$\vec{\tau} = \vec{\mu} \times \vec{B}. \quad (25)$$

Por este resultado pode-se verificar que o vetor torque é perpendicular ao plano formado pelos vetores $\vec{\mu}$ e \vec{B} , ou seja, o torque é perpendicular ao plano da página e apontado para dentro dela nas Figuras 12a,b e para fora na Figura 12d. Agora se sabe como e quando a espira gira. Mas ainda não foi explicado o motivo desta tendência à rotação quando ela não se encontra com $\vec{\mu}$ e \vec{B} paralelos. Foi dito acima que a energia de interação armazenada no sistema $\vec{\mu}$ e \vec{B} devia ser mínima no cenário da Figura 12c. Para ver isso melhor, é necessário que se conheça o comportamento da energia de interação em função do ângulo θ . Sem entrar nos detalhes da demonstração, o valor da energia de interação (ou energia potencial) de um dipolo dentro de um campo magnético externo é escrito como:

$$U = -\vec{\mu} \cdot \vec{B} = -\mu B \cos \theta. \quad (26)$$

Agora fica fácil analisar os valores da energia de interação do dipolo com o campo magnético. Para $\theta = 180^\circ$, $\cos \theta = -1$ e $U = +\mu B$. Neste caso, o dipolo está orientado contra o campo e o sistema tem a maior energia (não mostrado na Figura 12). Para $\theta = 0^\circ$, $\cos \theta = 1$ e $U = -\mu B$ (Figura 12c) e a energia é a menor possível. Para $0^\circ < \theta < 90^\circ$, $\cos \theta < 1$ e $U > -\mu B$. Portanto, a razão para que um dipolo magnético gire quando colocada dentro de um campo externo é a busca pela posição de menor energia. Muitas aplicações são baseadas neste princípio, como os motores e geradores elétricos, a ressonância magnética nuclear, a magnetização de materiais ferrosos, o alinhamento das agulhas das bússolas com o campo magnético da Terra ou de um ímã, entre outros (Randall, D. Knight, 2009).

3.2.3.6 Nas entranhas de um ímã

Diferente da espira condutora estudada anteriormente, à qual só gera um campo se houver uma bateria para produzir corrente através dela, o ímã cria um campo magnético sem conexão com qualquer fonte de força motriz externa. Do ponto de vista da escala atômica, os

elétrons na espira se movem exatamente num movimento de translação através dela, impulsionados de algum modo pela força externa da bateria. Mas isto não ocorre com os elétrons em uma porção de matéria, como um ímã, que não possuem conexão com fontes externas. Portanto, é coerente supor que o movimento que produz o campo magnético em um ímã deve ser, em princípio, proveniente da rotação dos elétrons em torno dos núcleos dos átomos.

Neste ponto, é didático introduzir um quarto tipo de campo, denominado campo magnético orbital, \vec{B}_o . Na verdade, não se trata de um novo tipo de campo e sim um campo magnético gerado pelo movimento de uma carga elétrica, tal como \vec{B}_q ou \vec{B}_I , mas sem a conexão com uma bateria externa, ou seja, o elétron possui seu movimento perpétuo alimentado pela energia interna do próprio átomo. De igual modo, associado ao campo orbital \vec{B}_o tem-se um dipolo magnético $\vec{\mu}_o$. Para entender como isto ocorre, é preciso analisar o movimento circular dos elétrons dentro dos átomos do material, descrever a corrente elétrica advinda desse movimento, modelar o campo magnético orbital \vec{B}_o gerado por ela e, finalmente, comparar as previsões do modelo com o campo magnético que se observa nas proximidades dos ímãs com o auxílio de bússolas, conforme feito em sala de aula.

Além disso, em 1922 foi descoberto que os elétrons possuem um dipolo magnético intrínseco e, conseqüentemente, os átomos deveriam também manifestar esta propriedade em certas circunstâncias, como quando possuem um número ímpar de elétrons em seus orbitais. Isto tem que ser assim porque os elétrons nos orbitais atômicos possuem as direções desses dipolos apontados em sentidos opostos aos pares. Portanto, se existe um número par de elétrons em um átomo, a soma de todos os dipolos será nula. Observando as semelhanças de comportamentos na natureza, isso deveria ser esperado mesmo – o elétron tem massa, o que lhe permite interagir com o campo gravitacional; possui carga elétrica, o que lhe permite interagir com o campo elétrico. Então, de alguma forma, ele deveria interagir com o campo magnético e, para fazê-lo, ele deveria possuir um tipo de dipolo magnético intrínseco, denominado de dipolo do spin, $\vec{\mu}_s$.

Do ponto de vista clássico não existe uma explicação para a origem de um quarto tipo de campo magnético, \vec{B}_s , associado ao momento de dipolo magnético $\vec{\mu}_s$. O que se sabe é que ele está presente em elétrons, prótons e também nos nêutrons, mesmo que este último não tenha carga elétrica. As conseqüências da presença de \vec{B}_s são as mesmas dos campos \vec{B}_q , \vec{B}_I e \vec{B}_o , exceto pelos valores que \vec{B}_s pode assumir. Enquanto os campos \vec{B}_q e \vec{B}_I podem assumir todos

os valores possíveis e mudar de um valor para outro continuamente, \vec{B}_s só tem 2 valores iguais e opostos em sinal. Vale à pena ressaltar que do ponto de vista macroscópico os valores de \vec{B}_s a serem considerados não são de apenas uma partícula, mas sim de uma quantidade enorme delas (tipicamente 10^{23} partículas para cada cm^3 de material). Quando o material manifesta campo magnético sem a presença de movimento de portadores produzido por uma fonte de força eletromotriz (*fem*), como em um circuito elétrico, ele é denominado de ímã natural. Por outro lado, quando o material não possui imantação natural, mas permite a passagem de corrente elétrica, gerado um campo magnético, ele é denominado de eletroímã ou ímã artificial. Neste trabalho, serão exploradas aplicações dos dois tipos de ímãs.

Ímãs permanentes, fitas de gravação magnética, discos de computadores e uma grande quantidade de dispositivos dependem diretamente do magnetismo de alguns materiais especiais. Como exemplo, quando se grava uma informação em um disco rígido (HD) de computador, o que se faz, na verdade, é criar uma rede de ímãs microscópicos em uma finíssima camada de um material na superfície de um disco móvel no interior do HD. Logo, é importante examinar alguns aspectos das propriedades dos elétrons dentro dos átomos que formam estes materiais.

Quando estão nos átomos, os elétrons possuem movimento circular e, portanto, se comportam como se fossem espiras de correntes microscópicas que produzem seus próprios campos magnéticos \vec{B}_o , além do \vec{B}_s que os elétrons possuem naturalmente, independentemente de estarem dentro ou fora dos átomos. Em muitos materiais, os momentos magnéticos $\vec{\mu}_o$ e $\vec{\mu}_s$ destes campos apontam em todas as direções do espaço, tendo como resultado um momento magnético total nulo, ou seja, o campo magnético total é nulo. Isto ocorre sobretudo por causa da agitação térmica dos átomos, que introduz uma energia maior do que a necessária para haver o alinhamento dos dipolos.

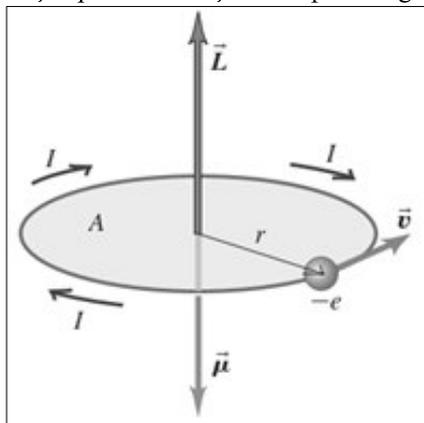
Contudo, quando se coloca este material dentro de uma região que tem campo magnético produzido por outras fontes (campo magnético externo), muitos momentos magnéticos $\vec{\mu}_o$ e $\vec{\mu}_s$ se orientam paralelamente ao campo externo e o resultado é que agora além do campo magnético externo, tem-se também um campo magnético gerado pelo alinhamento dos momentos magnéticos $\vec{\mu}_o + \vec{\mu}_s$. A esse fenômeno do alinhamento de $\vec{\mu}_o$, $\vec{\mu}_s$ e a consequente produção de um campo \vec{B}_o e \vec{B}_s dá-se o nome de magnetização, ou seja, o material fica magnetizado. Esta é a razão porque alguns materiais da natureza (ímãs) são capazes de atrair ou repelir outros materiais metálicos.

Para entender como as correntes microscópicas que geram \vec{B}_o surgem, veja a Figura 13. Ela ilustra de forma simplificado um elétron girando em torno do núcleo de um átomo. O elétron

tem massa m , carga elétrica $-e$ e velocidade \vec{v} e se move em um círculo de raio r , formando uma espira circular. O objetivo é encontrar uma expressão para o momento de dipolo magnético do elétron, $\vec{\mu}_o$. Para isso, pode-se imaginar o movimento da carga como uma corrente elétrica $I = q/T$, sendo T o tempo para uma volta completa em torno do núcleo atômico, denominado de período. Assim,

$$I = \frac{e}{T} = \frac{ev}{2\pi r}. \quad (27)$$

Figura 13. Ilustração para a formação do dipolo magnético orbital $\vec{\mu}_o$.



Fonte: adaptado de Randall D. Knight (2009, p.1028)

Da Equação 8, o momento de dipolo de uma espira é $\mu = IA$. Portanto, multiplicando os dois lados da Equação 27 por $A = \pi r^2$, a área da espira circular, tem-se:

$$IA = \frac{ev(\pi r^2)}{2\pi r} = \frac{evr}{2},$$

$$\mu_o = \frac{e}{2}vr. \quad (28)$$

Observe que do lado esquerdo desta equação tem-se uma propriedade magnética, enquanto, do lado direito tem-se apenas propriedades mecânicas. Do ponto de vista experimental, é muito mais útil escrever o lado direito em termos de uma propriedade que se possa medir facilmente, o momento angular orbital L_o do elétron. Como o momento angular é definido por $L = mrv$, então basta multiplicar e dividir este resultado pela massa m_e do elétron. Assim,

$$\mu_o = \frac{e}{2m_e} m_e v r,$$

e

$$\mu_o = \frac{e}{2m_e} L_o. \quad (29)$$

Até aqui já se foi longe demais com os argumentos da Física Clássica, uma vez que se está tentando descrever as propriedades de um único elétron dentro em um átomo. As previsões da mecânica clássica falham completamente neste cenário. Portanto, este é o ponto no qual se coloca, sem as devidas explicações, alguns resultados encontrados pela teoria quântica – o momento angular L_o do elétron não pode assumir qualquer valor, como ocorre com o momento angular L no cenário clássico. Para um elétron, qualquer componente de L_o em uma dada direção é sempre um múltiplo inteiro $n = 1, 2, 3, \dots$ da quantidade $h/2\pi \equiv \hbar$. Aqui, $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ é uma constante fundamental, conhecida como constante de Planck. Com esta nova informação, o momento angular do elétron, fica:

$$L_o = m_e v r = \frac{nh}{2\pi}. \quad (30)$$

Das Equações 29 e 30 chega-se ao valor do momento magnético orbital do elétron:

$$\mu_o = n \left(\frac{he}{4\pi m_e} \right), \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (31)$$

Para $n = 1$

$$\mu_o = \frac{he}{4\pi m_e} \equiv \mu_B. \quad (32)$$

A Equação 32 mostra o menor valor para o momento magnético orbital de dipolo para um elétron com movimento orbital em torno de um núcleo do átomo é μ_B , denominado de magnéton de Bohr. Assim, o momento magnético do elétron dentro do átomo só pode ter os valores:

$$\mu_o = \mu_B, 2\mu_B, 3\mu_B, \dots \quad (33)$$

Agora retorne à Equação 8, que mostra o comportamento de um dipolo macroscópico (caso clássico) possui qualquer valor e faça uma comparação com a Equação 33, que mostra o comportamento de um dipolo microscópico (caso quântico), o qual só possui valores discretos ou quantizados. Mantenha em mente que ambos os dipolos, seja o clássico ou o quântico, estão associados a um campo magnético produzido por uma carga elétrica em movimento. A diferença é que o contexto da Equação 8 é de uma partícula, enquanto o da Equação 33, embora se fale de elétron como partícula, sua quantização provém de uma abordagem ondulatória.

Entretanto, além do dipolo causado pelo movimento orbital, os elétrons também possuem um momento angular intrínseco, que não está relacionado com o movimento orbital, mas que pode ser descrito classicamente como oriundo da “rotação do elétron em torno de seu próprio eixo”. Este é um fenômeno que não tem analogia clássica, de modo que o que for dito acerca dele aqui deve ser analisado com cuidado. Classicamente, pode-se dizer que o elétron possui movimento no sentido horário ou no sentido anti-horário, o qual está associado a um momento angular s que possui apenas dois valores: $s = +1/2$ e $s = -1/2$, dependendo do seu sentido de rotação. Associado a esse momento angular mecânico de *spin* tem-se um momento magnético intrínseco ou momento de spin (μ_s), mencionado anteriormente, o qual vale:

$$\mu_s = 2s\mu_B = 2\left(\frac{1}{2}\right)\mu_B = \mu_B. \quad (34)$$

Para Young/Freedman (2009), este resultado mostra que o valor do dipolo de *spin* é igual ao valor do dipolo orbital de menor energia ou magnéton de Bohr. Portanto, ambos contribuem significativamente para a imantação da matéria, haja vista que os materiais quase sempre se encontram no chamado estado fundamental ou de mais baixa energia. Associado a este momento magnético de dipolo tem-se o campo magnético \vec{B}_s , mencionado na seção 3.2.2. Diferente do campo \vec{B}_q gerado por uma carga elétrica em movimento, o campo \vec{B}_s só pode ser conhecido pelo seu dipolo associado.

3.2.3.7 A imantação dos materiais

Até aqui falou-se do comportamento de espiras e bobinas ligadas a fontes externas de energia (baterias) e de elétrons individuais dentro dos átomos. Entretanto, antes de passar para o conteúdo de indução magnética propriamente, é fundamental mostrar como os elétrons dentro dos átomos se comportam coletivamente quando bilhões de bilhões deles se juntam para formar

os materiais. Isto é justificado pelo fato de que nas aplicações do fenômeno da indução magnética não se trabalha com elétrons individuais, mas com materiais de dimensões macroscópicas, como ímãs e circuitos elétricos.

Pode-se fazer uma analogia não muito precisa, mas que serve para facilitar o entendimento daqueles que pretendem usar este trabalho em suas ações pedagógicas no Ensino Fundamental e Médio. Classicamente, pode-se comparar um átomo ao sistema solar. Entretanto, enquanto todos os planetas se movem em torno do Sol em um mesmo sentido, os elétrons se movem em torno do núcleo em órbitas com sentidos contrários umas às outras. Para cada elétron que se move em sentido anti-horário existe outro elétron que se move em sentido horário. Desta maneira os dipolos magnéticos das órbitas individuais tendem a se cancelar e o momento magnético resultante $\vec{\mu}_o$ é essencialmente nulo. O cancelamento prossegue à medida que os átomos são unidos para formar moléculas ou sólidos. Portanto, somente a formação do dipolo orbital $\vec{\mu}_o$ (Equação 31) não explica os intensos efeitos magnéticos observados em alguns materiais, como o ferro, níquel, cobalto e suas ligas, assim como aqueles que possuem a adição de neodímio e boro.

Uma explicação para o forte campo que se observa no entorno de um ímã pode ser dada a partir do momento magnético de *spin*, μ_s . Considera-se que os dipolos magnéticos de *spin* também se opõem uns aos outros à medida que os elétrons são distribuídos em uma camada (ou orbital) no interior do átomo, fazendo com que o momento magnético de uma camada completa seja nulo. Quando os átomos se juntam para formar os materiais geralmente a direção dos *spins* dos elétrons é aleatória, ou seja, eles são totalmente desalinhados, conforme está ilustrado na Figura 14a. Nesta figura os pontinhos representam os elétrons e as setas orientadas representam os *spins*. Neste cenário, os dipolos não interagem uns com os outros de forma que dentro de pequenas regiões do material, denominadas de domínios magnéticos, eles são independentes uns dos outros e assim não possuem um alinhamento preferencial. O resultado disto é que dentro destas regiões tem-se $\sum \mu_s = 0$. É por esta razão que a grande maioria dos materiais da natureza não manifesta o magnetismo.

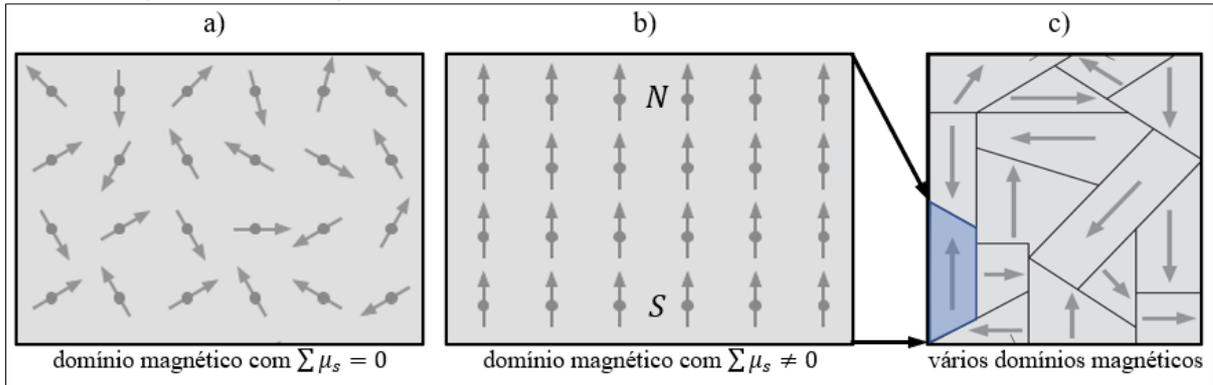
Quando este tipo de material é exposto à um campo magnético externo, B_{ext} , alguns dos μ_s se alinham no mesmo sentido de B_{ext} . Neste caso, a soma dos μ_s alinhados dentro de um certo volume de material é diferente de zero, o que dá origem ao campo denominado de magnetização, \vec{M} da matéria. Assim, o material apresenta uma pequena magnetização e o objeto do qual ele é feito é atraído por um ímã. Quando B_{ext} é retirado, os dipolos μ_s voltam a se alinhar aleatoriamente, levando \vec{M} a se anular. Materiais que apresentam este tipo de

comportamento são denominados de paramagnéticos. Um exemplo clássico de um material paramagnético é o alumínio.

Até aqui foi explicado porque não há manifestação magnética em muitos materiais. Não obstante, existem vários deles que exibem fortes propriedades magnéticas. Nestes casos, como exemplo no ferro, os dipolos dos átomos interagem entre si de maneira que dentro de um domínio magnético eles se alinham em uma determinada direção do espaço controlada pela interação coletiva. Neste caso, dentro destas regiões tem-se que a soma dos momentos $\sum \mu_s \neq 0$, e os dipolos μ_s são facilmente alinhados com B_{ext} . A consequência disto é que o material pode apresentar um grande campo de magnetização \vec{M} , se comportando como um ímã. De fato, os ímãs permanentes são produzidos aplicando-se um forte campo magnético sobre a uma porção de material deste tipo. Por causa da natureza da interação entre os dipolos μ_s , uma vez alinhados numa direção eles demoram muito a se desalinham, resguardadas algumas condições, como a temperatura. Materiais que apresentam este comportamento, a exemplo do ferro, níquel e cobalto, são denominados de ferromagnéticos. A Figura 14b ilustra um dos domínios de um material ferromagnético. Por conta do alinhamento do μ_s de cada átomo, o material apresenta uma grande magnetização e assim age como um ímã que pode ser caracterizado pelos polos Norte e Sul.

A Figura 14c mostra um setor ampliado de um material formado por muitos domínios magnéticos. Dentro de cada domínio os momentos magnéticos se alinham em uma direção diferente, conforme ilustram as setas. Entretanto, com já foi dito, estes diferentes vetores magnetização podem se alinhar na mesma direção pela ação de um campo magnético externo. Diferente dos dois casos discutidos nos parágrafos anteriores, existem materiais nos quais o momento magnético total $\sum \mu_s$ de cada domínio se alinha no sentido contrário ao campo magnético externo, resultando em um material que repele um ímã colocado nas suas proximidades. Estão são denominados materiais diamagnéticos, tendo como representantes mais comuns a água, o cobre, o chumbo e a prata. Assim como paramagnetismo, o diamagnetismo só pode ser devidamente explicado pela teoria quântica, o que não é foco deste trabalho.

Figura 14. Ilustração para os momentos magnéticos dos átomos. a) dentro de um domínio magnético com os μ_s aleatoriamente orientados e b) dentro de um domínio magnético com os μ_s orientados na mesma direção e c) vários domínios magnéticos com os μ_s orientados em diferentes direções.



Fonte: adaptado de Randall D. Knight (2009, p. 1029)

As discussões feitas até este capítulo tiveram como objetivo dar ao professor um subsídio conceitual para que este compreenda as aplicações que se serão tratadas no próximo capítulo. Mantenha em mente o que foi estudado até agora: uma corrente elétrica I gerada por uma *fem* (bateria) em uma espira condutora produz um campo magnético \vec{B}_q , que se comporta como um dipolo magnético, melhor descrito pelo momento magnético $\vec{\mu}$ do dipolo. Foi estudado também que os ímãs podem ser explicados a partir dos mesmos conceitos de dipolo magnético estudados com as espiras condutoras, estando estes associados aos campos magnéticos orbital \vec{B}_o e de *spin* \vec{B}_s . Para a completeza deste trabalho, falta mostrar que o inverso acontece, ou seja, que um campo magnético, produzido por uma bobina ou ímã, é capaz de produzir uma corrente elétrica em um condutor, sem que este esteja conectado à uma bateria, fenômeno conhecido como indução magnética. Será mostrado que este é um dos fenômenos da natureza que contribuiu significativamente para o desenvolvimento da tecnologia associada ao desenvolvimento da humanidade (Randall, D. Knight, 2009).

3.2.4 Sobre o Fenômeno da Indução Magnética e Suas Aplicações

3.2.4.1 Descrição Fenomenológica

Conforme discutido na seção 3.2.1, em 1820 Hans Christian Oersted descobriu que quando um fio com corrente elétrica era colocado nas proximidades de uma bússola a direção na qual sua agulha apontava era alterada. Logo ficou claro que a agulha mudava de direção por causa da força magnética gerada pelo campo magnético criado pela corrente elétrica. Motivados por este fenômeno e conhecendo com certa profundidade as funcionalidades dos ímãs, logo

surgiu a pergunta se o contrário seria possível e quais as possíveis implicações disso. Em outras palavras, buscou-se respostas à questão se o campo magnético de um ímã permanente ou o campo magnético das correntes elétricas dos fios seria capaz de produzir uma corrente elétrica em outros condutores colocados dentro de tais campos. Em muitas experiências fios e bobinas foram colocados dentro de ímãs ou em volta deles, mas nenhuma foi capaz de produzir uma corrente mensurável

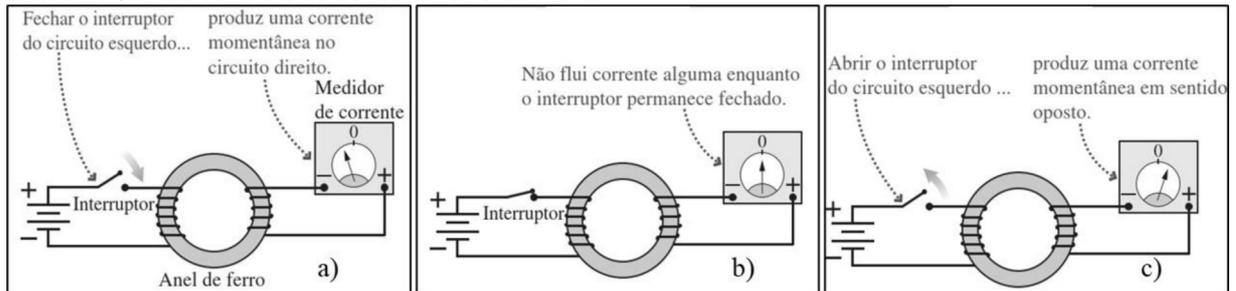
Onze anos após a descoberta de Oersted, o físico americano Joseph Henry, em 1831, descobriu como produzir uma corrente elétrica a partir do magnetismo. Entretanto, ele não divulgou seus resultados e acabou não levando os créditos pela brilhante descoberta. Paralelamente, ao longo de toda a década de 1820, o inglês Michael Faraday trabalhou como assistente técnico do famoso químico Humphrey Davy e passou a ter contato com equipamentos de laboratórios, o que o levaria a se tornar o experimentalista de maior influência de todos os tempos, embora não tivesse formação universitária.

No final do ano de 1831, Faraday anunciou a formulação original que levou à conhecida lei da indução eletromagnética. Mas essa lei não foi apresentada através de uma equação matemática, como usualmente a conhecemos. Faraday era autodidata em laboratório e não tinha uma boa base matemática, de modo que a lei da indução só foi escrita formalmente como um modelo matemático posteriormente por James Clerk Maxwell, no que viria a ser uma das quatro leis fundamentais do eletromagnetismo. Foi também Maxwell que deu sequência aos trabalhos de Faraday sobre o conceito de linhas de força, que está na origem do conceito de campo. Em ciência, o crédito geralmente é dado ao primeiro que publica seus resultados e é por isso que hoje estudamos a lei de Faraday em vez da lei de Henry. Embora Faraday não tivesse a prioridade da descoberta, foi ele quem estabeleceu as propriedades da indução eletromagnética e percebeu a grande importância da descoberta de uma nova lei da natureza, algo que Henry não fez.

A Figura 15 mostra um esquema simplificado para explicar a ideia central de Faraday. Ele fez experimentos com duas bobinas de fios enrolados em volta de um anel de ferro. Esperava-se que o campo magnético gerado pela bobina da esquerda induzisse um campo magnético dentro do ferro e que este campo pudesse criar uma corrente no circuito do lado direito. Como em todas as suas tentativas anteriores, essa experiência não produziu resultado algum. Entretanto, Faraday percebeu que a agulha do medidor de corrente se movia rapidamente em sentidos contrários nos instantes em que ele fechava e abria o interruptor do circuito à esquerda, conforme ilustrado nas Figuras 15a e 15c. Enquanto o interruptor permanecesse fechado a agulha permanecia no zero da escala do medidor, como na Figura 15b. Faraday concluiu que o

movimento da agulha indicava a existência de corrente no circuito à direita. Mas o efeito durava apenas um intervalo de tempo muito pequeno, enquanto a corrente à esquerda estava iniciando ou cessando e não enquanto estava estável (Randall, D. Knight, 2009).

Figura 15. Descoberta da lei da indução magnética. a) a chave é fechada e o campo magnético conduzido pelo ímã até a bobina do lado direito gera momentaneamente corrente em um sentido; b) logo após a chave ser fechada a corrente elétrica na bobina da direita desaparece; e c) quando a chave é aberta aparece uma corrente na bobina da direita no sentido contrário ao do fechamento da chave.



Fonte: Randall D. Knight (2009)

Antes de continuar a discussão vale um comentário sobre as correntes elétricas em circuitos que tenham apenas uma fonte de força eletromotriz cuja diferença de potencial entre seus terminais \mathcal{E} é contínua. Se a *fem* (ou bateria) for contínua, ela produzirá uma corrente constante (ou contínua) nos fios, cujo valor é $i_{m\acute{a}x} = \Delta V_{m\acute{a}x}/R = \mathcal{E}/R$, sendo $\Delta V_{m\acute{a}x}$ o valor da diferença de potencial através do circuito e R a resistência dos fios conectados a ela. Este é o modelo usado quando se trabalha com circuitos de corrente contínua no terceiro ano do Ensino Médio. Entretanto, o efeito observado por Faraday não aconteceu quando a corrente no circuito já estava estabilizada em $\Delta V_{m\acute{a}x}$, mas sim enquanto ela ainda estava se estabilizando. Portanto, é necessário que o professor entenda estas nuances para não deixar de discutir conceitos cruciais para o entendimento do fenômeno da indução.

Por causa da inércia dos elétrons nos condutores e da criação do campo magnético dentro da bobina, o valor $i_{m\acute{a}x}$ para a corrente não é atingido imediatamente após a chave ser ligada, mas somente após um tempo τ durante o qual a diferença de potencial $\Delta V(t)$ nas extremidades do circuito ainda não é igual a \mathcal{E} . Até isso acontecer, a corrente no circuito pode ser modelada como $i(t) = i_{m\acute{a}x}(1 - e^{-t/\tau})$. Deste modelo pode-se inferir que para um tempo t muito longo após a chave ser fechada, a corrente $i(t)$ atinge seu valor máximo $i_{m\acute{a}x}$ e o ponteiro do medidor de corrente retorna a marcar zero, pois a corrente permanece estável. De fato, para $t = 5\tau$, $i(t) = 0,99 i_{m\acute{a}x}$. Assim, o movimento do ponteiro do medidor de corrente na experiência de Faraday ocorria apenas dentro de um intervalo de tempo bem pequeno, tipicamente $t \approx \tau$, cujo valor pode ser alguns milissegundos ou muito menor, a depender do

tipo de circuito e dos condutores utilizados.

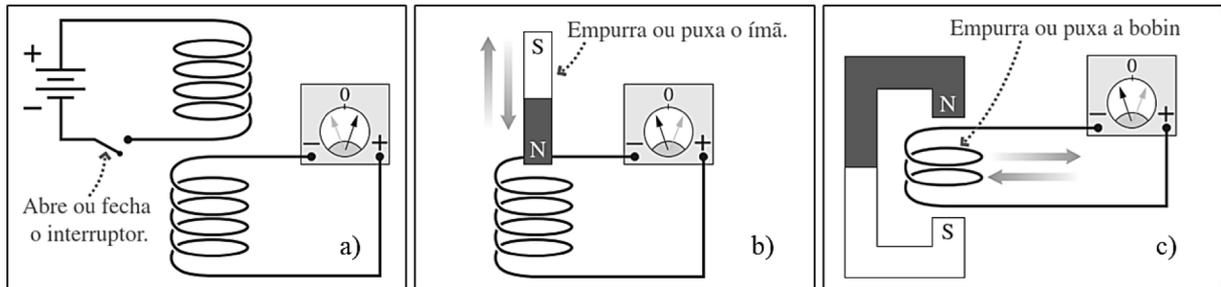
Para explicar o que estava ocorrendo, Faraday aplicou sua figura mental de linhas de campo. Primeiro, a corrente da esquerda magnetiza o anel de ferro, cujo campo magnético gerado alcança a bobina da direita. A observação de Faraday de que a agulha do medidor de corrente saltava apenas quando o interruptor era fechado ou aberto sugeriu-lhe que a corrente na bobina da direita era induzida somente durante o tempo no qual o campo magnético estava variando através desta, conforme já foi discutido. Isso explicaria por que todas as experiências anteriores foram malsucedidas, uma vez que em todas elas foram usadas apenas campos magnéticos constantes no tempo e no espaço.

Como grande experimentalista, Faraday suspeitou que a corrente na segunda bobina era causada pela mudança no valor do campo magnético criado na primeira, de modo que, em princípio, não seria necessária a presença de um anel de ferro. Ele refez as experiências de várias maneiras diferentes. A Figura 16 ilustra umas das possíveis experiências, na qual dispôs as duas bobinas bem próximas e sem o anel de ferro. Não fluiu corrente no circuito inferior enquanto o interruptor era mantido fechado; entretanto aparecia uma corrente momentânea toda vez que o interruptor era aberto ou fechado. Então o fenômeno definitivamente não era devido ao campo magnético gerado pelo núcleo de ferro. A Figura 16b ilustra outra experiência na qual são usados apenas a segunda bobina e um ímã permanente. Faraday movimentou um ímã para dentro e para fora da bobina e percebeu o mesmo efeito das experiências anteriores. Curiosamente, com o ímã parado no interior da bobina não foi observado nenhuma corrente elétrica, mesmo que nesse cenário o campo magnético na bobina seja o maior possível. Quando o ímã era aproximado da bobina o ponteiro se movia numa direção e quando ele era afastado o ponteiro se movia em sentido contrário.

A Figura 16c mostra uma experiência diferente, na qual em vez do ímã, a bobina é movimentada para perto e para longe do ímã. Um efeito semelhante à experiência anterior foi observado. Em outras palavras, não faz diferença o que causa a variação do campo magnético: se é uma corrente variando em um circuito posicionado próximo, se é a movimentação de um ímã dentro de uma bobina ou se é o movimento de uma bobina nas proximidades de um ímã. O efeito será o mesmo em todos os casos. Se o campo que atravessa a bobina não variar, conclui-se que não é o campo magnético em si o responsável pela corrente induzida, mas sua variação com o tempo, no mesmo ponto do espaço ou a sua mudança de valor em diferentes pontos do espaço no mesmo instante de tempo. Esta descoberta foi uma das mais importantes da história da humanidade, pois foi a primeira vez que se produziu corrente elétrica sem a necessidade de uma bateria, como era comum aos circuitos até essa época. Descrita em palavras, a lei

descoberta por Faraday pode ser enunciada da seguinte forma: uma corrente elétrica é estabelecida em uma bobina desconectada de uma bateria se ela estiver sujeita a um campo magnético variável.

Figura 16. Descoberta da lei da indução magnética. a) uma bobina estacionária e outra em movimento produzindo corrente induzida; b) uma bobina estacionária e um ímã em movimento produzindo corrente induzida; e c) uma bobina em movimento e um ímã estacionário produzindo corrente induzida.



Fonte: Randall D. Knight (2009)

3.2.4.2 Uma bateria carregada por seu próprio movimento

Uma vez que o fenômeno da indução magnética foi devidamente explicado do ponto de vista fenomenológico, o professor pode passar a discutir os aspectos quantitativos do fenômeno. Como a essência da indução está na variação do campo magnético, isto pode ser feito por meio de duas abordagens diferentes:

- i. variando o tamanho ou a orientação do circuito elétrico dentro de um campo magnético estacionário;
- ii. variando o valor ou a direção do campo magnético que atravessa um circuito elétrico estacionário.

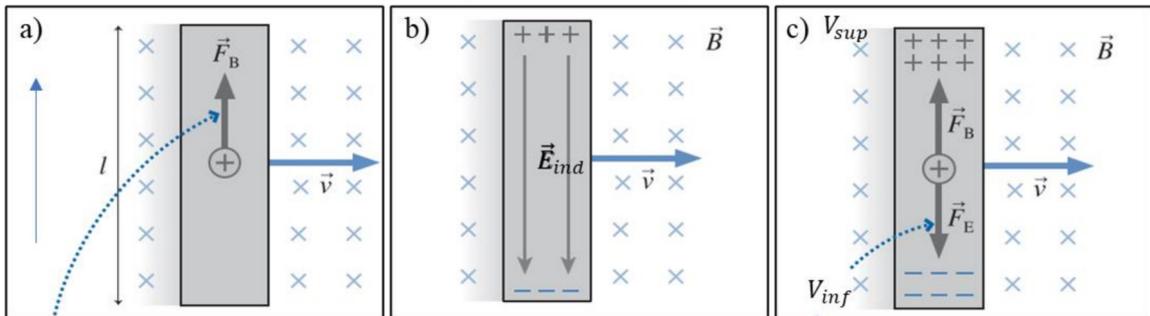
Embora os efeitos nos dois casos sejam os mesmos, as causas são diferentes. A Figura 17a ilustra o movimento de um condutor elétrico de comprimento l com velocidade \vec{v} para a direita dentro de um campo magnético estacionário, \vec{B} , orientado para dentro da página e representado pelo símbolo \times , conforme já indicado anteriormente. O movimento do condutor é causado por uma força externa não mostrada na figura. Como as cargas elétricas dentro do condutor também se movem com velocidade \vec{v} em relação ao campo, elas ficam sujeitas a uma força magnética dada pela Equação 18, $F_B = qvB\sin\theta$. Como aqui \vec{v} e \vec{B} são perpendiculares, a força é máxima e igual a $F_B = qvB$. Antes do início do movimento, as cargas positivas e negativas do condutor se encontram uniformemente distribuídas. Como consequência disto, o campo elétrico total em qualquer região do condutor é nulo. Existem campos gerados por

prótons e elétrons dentro dos átomos; mas por causa das cargas de sinais opostos, e devido à grande proximidade destas cargas dentro dos átomos, o efeito macroscópico destes campos é nulo.

Entretanto, por causa do movimento, a força F_B movimenta os portadores de cargas negativas (elétrons) para baixo, deixando cargas positivas (átomos ionizados) na parte superior do condutor. A separação de cargas cria um campo elétrico induzido \vec{E}_{ind} no interior do condutor apontado para baixo, como ilustrado na Figura 17b. Por causa deste campo elétrico, uma força F_E surge entre as cargas positivas e negativas. Esse movimento de separação das cargas acontece até que a condição de equilíbrio seja alcançada, ou seja, $F_E = F_B$, ilustrado na Figura 17c. Considerando a definição dessas forças, tem-se $qE_{ind} = qvB$ e o valor do campo elétrico induzido pela separação das cargas dentro do condutor móvel é:

$$E_{ind} = vB. \quad (35)$$

Figura 17. Condutor elétrico se movendo com velocidade \vec{v} dentro de um campo magnético estacionário apontado pra dentro da página. a) Os portadores de carga são puxados para cima pela força magnética \vec{F}_B ; b) a separação das cargas cria um campo elétrico \vec{E} apontado para baixo no circuito e c) as cargas se separam até que a força elétrica \vec{F}_E seja igual à força magnética \vec{F}_B . V_{sup} é maior que V_{inf} .



Fonte: Randall D. Knight (2009)

A Equação 35 mostra que a força magnética sobre os portadores de carga dentro do condutor induz um campo elétrico no seu interior. O campo elétrico surge por causa do desbalanceamento na energia potencial dos portadores de carga, provocado pela ação da força magnética que, por sua vez, transmite a energia introduzida no condutor pela força externa para o campo elétrico. Por esta razão, surge uma força elétrica para tentar igualar a energia potencial ao longo de toda a extensão do condutor. É importante associar a diferença de potencial criada entre as extremidades do condutor (energia potencial por unidade de carga elétrica) ΔV_{ind} com o campo B :

$$\Delta V_{ind} = V_{sup} - V_{inf} = -E_{ind}l = -(-vB)l = vBl. \quad (36)$$

A Equação 36 mostra que a diferença de potencial depende apenas da dimensão perpendicular do condutor em movimento e da sua velocidade em relação ao campo magnético presente. Como todas as grandezas do lado direito são conhecidas, pode-se obter facilmente ΔV_{ind} . Vale à pena comentar aqui que a diferença de potencial \mathcal{E} de uma bateria convencional estática também é criada pela separação das cargas de sinais contrários no interior dela por uma força que não é elétrica, mas que provém de um gradiente de concentração dos portadores de cargas. Neste caso, \mathcal{E} é igual ao valor do trabalho por unidade de carga elétrica ($\mathcal{E} = W/q$) realizado pela força não elétrica que separa as cargas. Já no caso da Equação 36, a diferença de potencial ΔV_{ind} é induzida pelo trabalho das forças magnéticas para separar os portadores de cargas de sinais contrários. Assim, o condutor em movimento pode ser visto como uma “bateria em movimento” que se mantém carregada com uma *fem* igual a \mathcal{E} enquanto estiver se movendo, mas que se descarrega instantaneamente tão logo pare de se mover. Por esta razão, $\Delta V_{ind} \equiv \mathcal{E}$ é comumente denominada força eletromotriz de movimento.

3.2.4.3 Corrente elétrica induzida e a energia do circuito

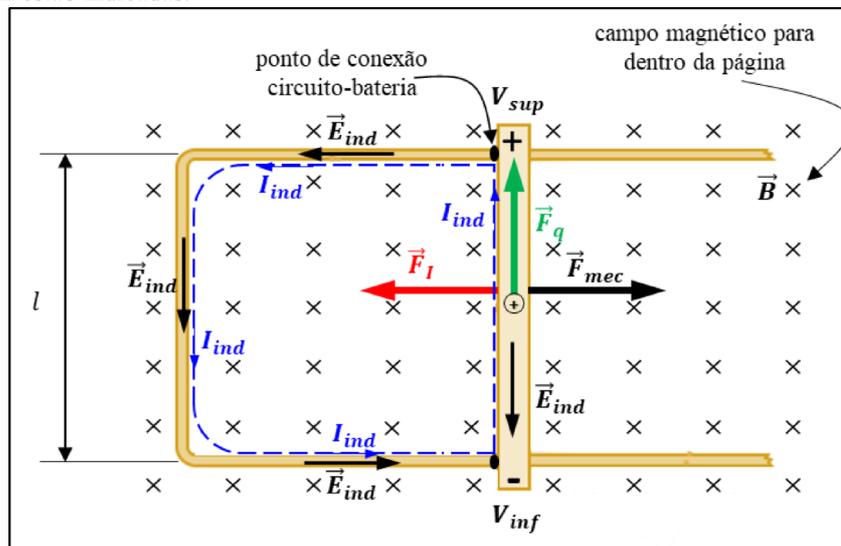
O leitor deve ter em mente que a redistribuição das cargas dentro da barra condutora da Figura 17 ocorre durante um intervalo de tempo muito curto, sendo $V_{sup} > V_{inf}$. Os portadores de carga se manterão afastados enquanto a barra estiver em movimento. Neste caso, como a barra não está conectada a um circuito externo, isso significa que os portadores de carga vão se separar até que $\Delta V(t) = \Delta V_{ind} = \Delta V_{máx}$. A partir desse ponto, não haverá mais movimento pela separação das cargas e a força de separação \vec{F}_B é igual à força de atração \vec{F}_E , neste cenário a diferença de potencial é máxima. Para dar utilidade a esse tipo de bateria é necessário conectá-la a um circuito externo, assim como ocorre com as baterias que funcionam por reações químicas. Quando isto ocorre, os portadores de carga de sinais contrários tendem a se unir através do circuito externo condutor, uma vez que dentro dele não existe a força separadora magnética \vec{F}_B , porquanto este não se encontra em movimento. À medida que as cargas elétricas vão se movendo da extremidade da barra condutora para o circuito externo por causa da força eletrostática, a força magnética \vec{F}_B as repõe na mesma taxa com que elas saem, de modo que o sistema não atinge o equilíbrio até que o circuito externo esteja desconectado da barra. Em termos de energia, pode-se concluir que esta entra no circuito pela ação de uma força mecânica externa \vec{F}_{mec} que a transforma em energia cinética da barra, que se transforma em energia potencial elétrica das cargas dentro da barra via força magnética e, finalmente, esta se

transforma em energia cinética dos elétrons no circuito externo via força eletrostática.

A Figura 18 mostra a mesma barra condutora agora conectada a um fio na forma de C, formando um circuito fechado dentro do mesmo campo magnético orientado para dentro da página. Como já foi discutido, a barra condutora em movimento perpendicular ao campo magnético forma uma bateria cujo potencial na parte superior V_{sup} é maior que o potencial na parte inferior V_{inf} . Quando a barra é conectada ao fio de resistência R , os pontos de conexão deste adquirem os mesmos potenciais das extremidades da barra. O campo elétrico induzido na barra \vec{E}_{ind} é estabelecido quase que instantaneamente dentro do fio, de modo que seus portadores de carga iniciam um movimento do local de maior potencial para o local de potencial menor em busca do equilíbrio energético, o qual ocorre para $V_{sup} = V_{inf}$. Em outras palavras, as cargas se redistribuem dentro do fio buscando o cenário no qual os potenciais nas suas extremidades tenham o mesmo valor. Entretanto, enquanto a barra condutora estiver em movimento, a condição $V_{sup} > V_{inf}$ será mantida pela força magnética, a condição de equilíbrio nas extremidades do fio não será atingida e, assim, a corrente induzida dentro dele (denotada por I_{ind} na figura) permanece não nula. O valor desta corrente no circuito pode ser encontrado a partir da lei de Ohm:

$$I_{ind} = \frac{\Delta V_{ind}}{R} = \frac{vBl}{R}. \quad (37)$$

Figura 18. Corrente induzida em um fio fixo na forma de C com um condutor móvel deslizando sobre ele. O conjunto inteiro forma uma espira fechada e está dentro de um campo magnético uniforme. As forças, campos e correntes também estão indicadas.



Fonte: os autores (2021)

A Figura 18 também mostra as três forças envolvidas no evento. A força mecânica \vec{F}_{mec} (seta preta) para a direita é a força externa responsável pelo movimento da barra condutora sobre o circuito. Como já foi discutido, os portadores de carga livres dentro da barra se movem junto com ela, dando origem à uma força magnética $\vec{F}_q = q\vec{v} \times \vec{B}$, conforme mostrada na Equação 19, apontada perpendicularmente à velocidade da barra. Use a regra da mão direita e certifique-se que a força magnética \vec{F}_q está apontada para cima (seta verde). Esta força promove a separação das cargas elétricas dentro da barra, produzindo a diferença de potencial ΔV_{ind} necessária para produzir o desequilíbrio da distribuição de cargas dentro do circuito, gerando a corrente elétrica nele. Por causa de ΔV_{ind} , agora existe corrente no circuito externo conectado à barra condutora. Veja que a corrente possui continuidade ao longo de todo o circuito em questão. Mas tenha claro em mente que, embora os valores das correntes no circuito e na bateria sejam os mesmos, as causas destas correntes são diferentes. A origem da corrente na “bateria móvel” é a força magnética, enquanto a origem da corrente no circuito é a força elétrica devido ao campo elétrico dentro do fio.

Como já foi estudado na Equação 21, um fio com corrente elétrica dentro de um campo magnético também fica sujeito à uma força magnética $\vec{F}_I = I\vec{l} \times \vec{B}$. Novamente, usando a regra da mão direita, descobre-se que existe outra força magnética sobre a barra condutora, apontada para a esquerda (seta vermelha). A força magnética \vec{F}_I sempre se opõe à força mecânica no circuito. Quando $\vec{F}_I = \vec{F}_{mec}$ a barra passa a se mover com velocidade constante. Assim, quando o circuito se encontra em equilíbrio, tem-se que \vec{F}_{mec} fornece energia para o circuito, enquanto \vec{F}_I retira energia na mesma taxa, de modo que a energia do circuito permanece constante, cujo valor é obtido usando a Equação 37:

$$F_{mec} = F_I = \left(\frac{vBl}{R}\right)lB = \frac{vl^2B^2}{R}. \quad (38)$$

A energia cinética que entra no circuito pode ser modelada a partir do conceito de trabalho da força mecânica:

$$E_{entra} = F \cdot v = \frac{v^2 l^2 B^2}{R}. \quad (39)$$

Esta energia elétrica é transformada em energia térmica e é dissipada nas partes internas do circuito, cujo valor é obtido usando a Equação 37:

$$E_{sai} = I_{ind}^2 R = \left(\frac{vBl}{R} \right)^2 R = \frac{v^2 l^2 B^2}{R}. \quad (40)$$

As Equações 39 e 40 mostram que a energia do circuito permanece constante o tempo inteiro. Deve-se deixar claro que, embora o valor da energia seja o mesmo, não se trata da mesma energia. O princípio de conservação da energia só impõe que o valor da energia no circuito seja o mesmo, mas não significa que a porção de energia que entrou no circuito é a mesma que sai dele. Trata-se de um equilíbrio dinâmico – o valor de energia que entra é igual ao que sai, sendo este um processo instantâneo. Entretanto, a energia mecânica que entra no circuito precisa ser convertida na forma térmica e isso toma um certo tempo para ocorrer, por causa da inércia do sistema.

A Figura 18 também mostra o campo elétrico \vec{E} dentro dos condutores do circuito. Este campo elétrico é igual ao campo elétrico induzido \vec{E}_{ind} dentro da bateria móvel devido à redistribuição das cargas desta.

Para concluir esta discussão, é importante destacar um ponto interessante sobre a energia em um circuito elétrico. Pelas discussões feitas até aqui, ficou claro que a energia disponibilizada em todo o circuito elétrico vem da bateria móvel, que por sua vez entra na bateria por meio da força mecânica externa. Esta é a explicação encontrada em todos os livros textos, do Ensino Médio até o Ensino Superior. Entretanto, como explicar a rapidez com que a energia elétrica é disponibilizada em determinadas partes no circuito quando a bateria móvel está distante deles, como é o caso das cidades e das hidroelétricas que as alimentam com energia? Como exemplo, parte da energia elétrica usada em São Luís, no Maranhão, vem da hidroelétrica de Tucuruí, no Pará, a cerca de 1000 km de distância. A velocidade típica dos portadores de carga dentro do circuito elétrico é apenas de 20 cm/h ou 0,020 km/h. Se a energia fosse transportada pelo “movimento ordenado das cargas elétricas”, como explicar que ela possa cruzar toda essa distância em apenas 3 milissegundos?

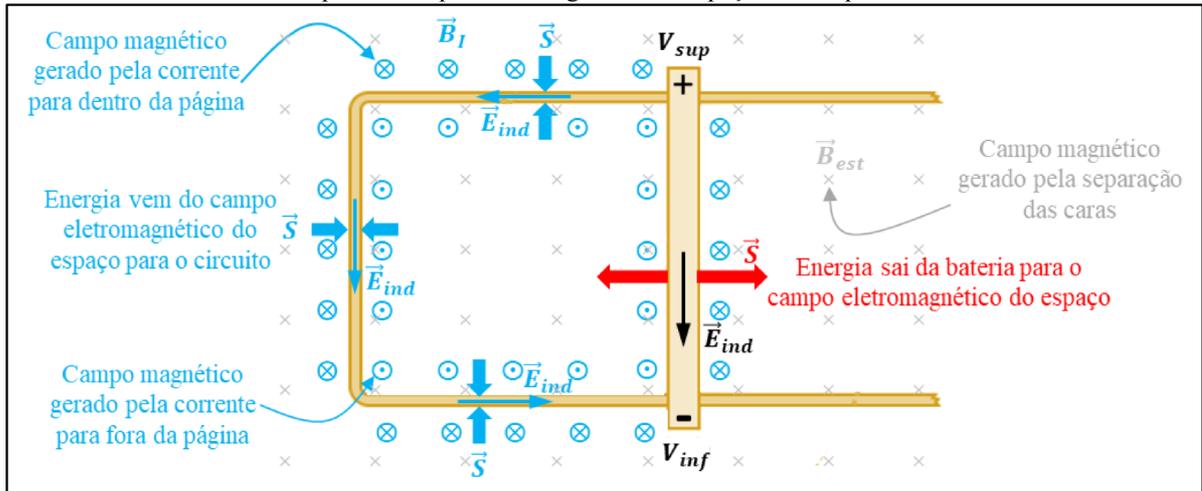
Este problema será discutido a partir de duas informações. A primeira foi discutida na seção 3.2.2, na qual foi informado que o campo eletromagnético está em todos os locais do Universo e cuja energia média oscila em torno do valor zero. Além disso, uma carga elétrica apenas altera os valores médios destes campos em sua vizinhança e estas alterações são comumente denominadas de campo elétrico e magnético na literatura. Outro ponto é que a energia elétrica é transportada pelo campo eletromagnético, cujo fluxo é dado por:

$$\vec{S} = \frac{\vec{E}_{ind} \times \vec{B}_I}{\mu_0}. \quad (41)$$

O símbolo \vec{S} representa o fluxo de energia (quantidade de energia que atravessa uma certa área) e é denominado de vetor de Poynting. O símbolo μ_0 é a constante magnética do vácuo. Do cálculo vetorial, tem-se que a direção do vetor \vec{S} é perpendicular ao campo elétrico induzido \vec{E}_{ind} e pelo campo magnético gerado pela corrente no circuito \vec{B}_I em qualquer local do espaço, conforme ilustrado na Figura 19. Esta figura mostra os campos \vec{E}_{ind} e \vec{B}_I e a direção do fluxo de energia \vec{S} . Da Equação 41 e desta figura fica claro de onde vem a energia que é usada ao longo do circuito – vem do campo eletromagnético do espaço ao redor do circuito. De forma semelhante, a energia da bateria móvel vai para o campo eletromagnético no espaço, conforme mostra a figura 19. Isso parece estranho, haja vista que este assunto não nunca é abordado desta forma nos livros textos, mas é o que realmente acontece. A conservação da energia descrita pelas Equações 39 e 40 afirma que a quantidade de energia que entra no circuito é igual à quantidade de energia que sai dele, mas não afirma que estas energias têm que ser as mesmas. Como a redistribuição de energia no campo eletromagnético ocorre à velocidade causal c (que coincide com a velocidade da luz no vácuo), isso explica a rapidez com que a energia que sai da fonte chega até os usuários no circuito elétrico externo.

Somente a partir dessa abordagem fica resolvida uma questão que antes não era respondida pela explicação tradicional na qual a energia é transportada pelos elétrons da bateria para o circuito, qual seja a rapidez com que uma lâmpada acende quando o interruptor é ligado, ou como cidades distantes sofrem *blackout* imediatamente após a queda de uma torre das linhas de transmissão. O argumento que afirma que a energia usada por um equipamento em um circuito seja proveniente da bateria não está de todo errado, mas é necessário entender que o que a bateria móvel de fato faz é criar as condições necessárias para que o circuito use a energia que está armazenada no campo eletromagnético e não fornecer sua energia diretamente via movimento de elétrons com massa m_e (Bauer, Westfall e Dias, 2012).

Figura 19. Ilustração para a energia fluindo em um circuito elétrico estático e uma bateria móvel. A energia da bateria vai para o campo eletromagnético do espaço e deste para o circuito.



Fonte: os autores (2021)

3.2.4.4 A lei da indução magnética

Após essa explanação sobre os princípios de operação de uma fonte de força eletromotriz móvel, agora é a hora de tratar a indução magnética com mais detalhes. Observando com cuidado a Figura 19, percebe-se que a quantidade de linhas de campo magnético (representado pelos símbolos \times) dentro do circuito aumenta à medida em que a barra condutora se move para a direita. Isso pode ser interpretado como um aumento da área efetiva do circuito que está dentro do campo magnético. Na seção 3.2.3.2 foi dito que a essência da indução está na variação do campo magnético. Mas agora pode-se deduzir que a indução também ocorre quando existe um campo constante e a área efetiva do circuito é variável. Estas informações podem ser colecionadas sob um único conceito, o de fluxo magnético, ϕ_B , que mede a quantidade de campo dentro de um circuito de área A .

A Figura 20 ilustra o conceito de fluxo magnético através de uma espira de área fixa ($A = ab$), disposta em vários ângulos dentro de um campo magnético estático, \vec{B}_{est} . A direção do vetor \vec{A} serve para indicar a direção do plano da espira, enquanto seu módulo indica o valor da área da espira. As figuras superiores indicam a visão lateral, enquanto as inferiores são o equivalente para quem observa da direção do campo magnético. Na figura da esquerda a espira é perpendicular ao campo \vec{B}_{est} e o máximo número de linhas desse campo a atravessa, porque a área efetiva A_{ef} (área da espira projetada na direção do campo) coincide com a área da própria espira, de modo que $A_{ef} = A$. Na figura do meio, a espira foi girada de um ângulo θ e a quantidade de linhas de campo que a atravessa diminui. Veja que a área da espira é a mesma,

mas sua projeção na direção do campo diminui $A_{ef} < A$. Finalmente, quando a espira está paralela ao \vec{B}_{est} (seu plano é perpendicular) a área projetada A_{ef} é nula e por isso nenhuma linha de campo a atravessa. Portanto, a quantidade de linhas de campo que atravessa a espira depende do valor de \vec{B}_{est} , de A e da inclinação θ da espira em relação do campo. A partir desses achados pode-se montar uma equação para o fluxo de campo da seguinte forma:

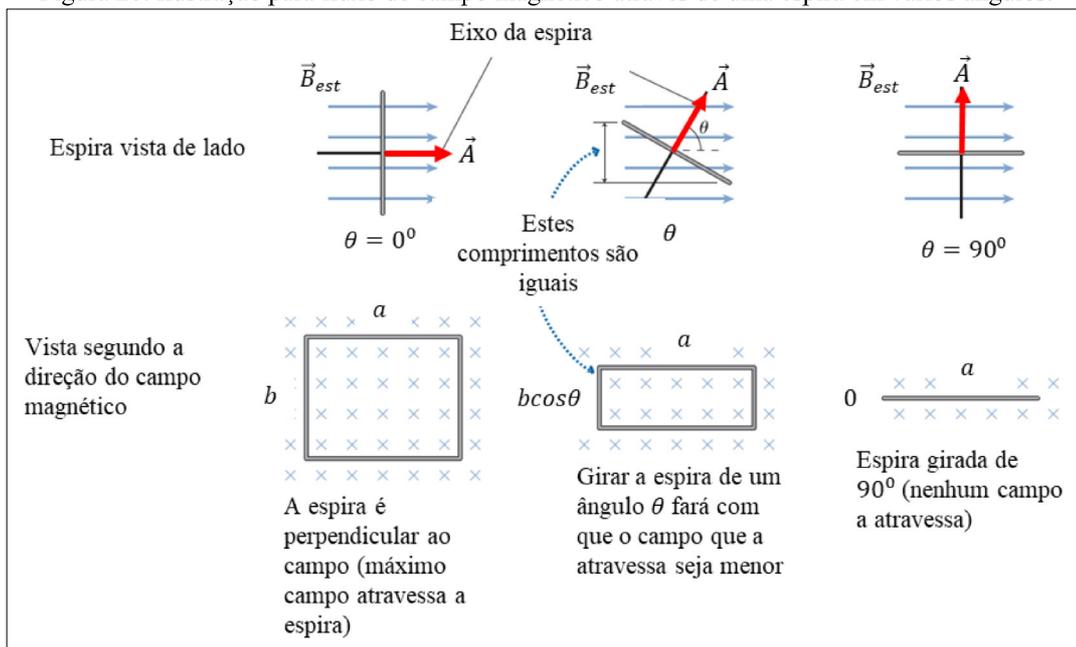
$$\phi_B = AB\cos\theta = A_{ef}B. \quad (42)$$

sendo $A_{ef} = A\cos\theta$. Como θ é o ângulo entre \vec{B}_{est} e \vec{A} , a equação acima pode ser escrita na forma:

$$\phi_B = \vec{A} \cdot \vec{B}. \quad (43)$$

A unidade de fluxo magnético no SI é Wb (weber), sendo $1 Wb = 1 Tm^2$.

Figura 20. Ilustração para fluxo de campo magnético através de uma espira em vários ângulos.



Fonte: adaptado de Randall D. Knight (2009)

Na Equação 37 foi mostrado que a corrente induzida depende da força eletromotriz da bateria móvel, $I_{ind} = \Delta V_{ind}/R = vBl/R$. Após muitas experiências, Faraday percebeu que a corrente induzida dependia da intensidade do campo magnético para um circuito fixo, da área

fixa do circuito utilizado e também da orientação do circuito em relação à direção de um campo magnético constante. Portanto, devia haver uma correlação entre a corrente observada e as propriedades geométricas do circuito, bem como do valor do campo magnético. Se qualquer uma dessas propriedades variasse no tempo uma corrente induzida seria observada. A partir destas informações, pode-se montar uma relação que explicita a dependência da corrente com tais propriedades. Da Equação 42 e da Figura 18 tem-se:

$$\phi_B = A_{ef}B = lxB = lvtB = (vBl)t = \mathcal{E}t. \quad (44)$$

Derivando este último resultado em relação a t , obtém-se a relação conhecida como lei da indução de Faraday.

$$\mathcal{E} = \frac{d\phi_B}{dt}. \quad (45)$$

Em palavras, uma *fem* será induzida ao longo de uma espira fechada se o fluxo magnético através da mesma sofrer variação. Finalmente, a corrente induzida por ser escrita da lei de Ohm ($i = \mathcal{E}/R$):

$$I_{ind} = \frac{1}{R} \frac{d\phi_B}{dt}. \quad (46)$$

Esta equação mostra que uma corrente é induzida no circuito sempre que o fluxo magnético variar com o tempo. Na forma compacta como está escrita, as Equações 45 e 46 escondem dois fenômenos importantes que precisam ser destacados. Usando a Equação 43 e tomando caso particular de uma espira perpendicular ao campo \vec{B} , obtém-se:

$$\mathcal{E} = \frac{d}{dt}(\vec{A} \cdot \vec{B}) = \vec{B} \cdot \frac{d\vec{A}}{dt} + \vec{A} \cdot \frac{d\vec{B}}{dt}, \quad (47a)$$

ou

$$\mathcal{E}_{total} = \mathcal{E}_{\Delta A, B} + \mathcal{E}_{\Delta B, A} = vBl + A \frac{dB}{dt}. \quad (47b)$$

E a corrente pode ser descrita como:

$$I_{ind} = \frac{1}{R} \frac{d}{dt} (\vec{A} \cdot \vec{B}) = \frac{vBl}{R} + \frac{A dB}{R dt}. \quad (48)$$

onde o símbolo \mathcal{E}_{total} representa a *fem* total induzida; $\mathcal{E}_{\Delta A, B}$ e $\mathcal{E}_{\Delta B, A}$ são as *fems* produzidas pelas variações da área da espira e do campo magnético, respectivamente. Deve-se deixar claro que as Equações (47b e 48) são válidas para o circuito da Figura 18. Mas a Equação (47a) tem validade geral.

Escrevendo a *fem* induzida na forma das Equações (47) pode-se verificar que há duas maneiras diferentes de se obter a corrente induzida no circuito: i) quando a espira se move, se expande ou gira; ii) quando o campo magnético varia no tempo. O primeiro termo do lado direito da Equação 48 representa a corrente proveniente da *fem* de movimento. Este foi o caso estudado nas Figuras 18 a 20. Esse termo inclui não somente situações como a do circuito da Figura 18, onde a área A varia, mas também o caso de espiras que giram na presença de um campo magnético, já que a área da seção transversal muda com o tempo. Ou seja, a espira possui movimento de translação ou de rotação, enquanto o campo magnético permanece estático. O movimento da espira faz como que forças magnéticas atuem sobre os portadores livres presentes nela, movendo-os (Randall, D. Knight, 2009).

O segundo termo do lado direito da Equação 48 representa um fenômeno novo. Veja que aqui não há movimento e por isso não existe a *fem* de movimento, conforme foi ilustrado nas Figuras 18 e 19. Ele mostra que uma corrente também pode ser criada pela variação de um campo magnético. Observe que a lei de Faraday não faz diferença entre estas fontes de corrente, mas expressa apenas que existe corrente elétrica quando o fluxo magnético é alterado, independente da sua causa. Mas o que causa este segundo tipo de corrente?

Foi dito que a causa do movimento dos elétrons no circuito (corrente elétrica induzida) é a força elétrica que provém do campo elétrico criado pela separação das cargas no condutor pela força magnética, que por sua vez surge em resposta à atuação de uma força mecânica externa que move o condutor (a *fem* móvel). Dito de outra forma compacta, a força magnética é a responsável pela separação dos elétrons que cria a *fem* de movimento. Mas quem move os elétrons que constituem a outra componente de corrente elétrica, se não existe a força magnética? Ela não pode ser explicada pelos argumentos anteriores, uma que vez que neste caso nada se move.

Antes de achar a causa para este fenômeno é necessário explicar um detalhe muito importante que está faltando na lei da indução de Faraday. Ela fornece o valor da corrente induzida, mas não informa nada sobre o sentido dela. Nas discussões da Figura 16b foi dito que

quando se movimenta um ímã próximo a uma bobina percebe-se o surgimento da corrente induzida cujo sentido é para um lado quando o ímã se aproxima e para o lado oposto quando o ímã se afasta. A causa desta oposição de comportamentos não foi discutida ainda e também não está incluído na lei de Faraday mostrada na Equação 45. De fato, a explicação para o sentido da corrente no circuito só foi dada 3 anos após Faraday ter divulgado sua lei, por Heinrich Lenz. Após estudar em detalhes as experiências de Faraday, Lenz chegou à conclusão de que o sentido da corrente induzida é tal que o campo magnético induzido se opõe à variação do fluxo.

Este resultado é interessante e pode ser entendido a partir do princípio de conservação da energia. Em primeiro lugar, observe que quando o ímã se encontra longe da espira a intensidade do campo magnético através dela é nulo. Da Figura 16b, quando o ímã se aproxima da espira, o campo magnético aumenta. Já sabemos que isto vai gerar a corrente induzida na espira. Mas qual o seu sentido? Bom, pela conservação da energia, o campo magnético total deveria ser nulo para que nada acontecesse aos elétrons. Então, já que a corrente é necessariamente produzida, o seu sentido é tal que o campo gerado por ela mesma vai se opor ao campo magnético gerado pelo ímã, na tentativa de evitar que o campo magnético total na região da espira não sofra alteração enquanto o ímã se aproxima.

Para ficar mais claro, a Figura 21a ilustra o cenário de uma espira estática e um ímã se aproximando da esquerda para a direita. Quando o ímã está longe da espira, o campo magnético \vec{B} gerado por ele na região onde ela se encontra é zero. Entretanto, à medida que o ímã se aproxima, o valor do campo aumenta na região da espira começa a aumentar, de modo que a corrente induzida nela produz um campo magnético \vec{B}_i de modo a cancelar o aumento do campo do ímã nesta região. Pela regra da mão direita, o campo \vec{B}_i tem que apontar para a esquerda, e assim a corrente é no sentido anti-horário do ponto de vista de quem observa a espira a partir do ímã móvel. Aqui a espira tenta repelir o ímã.

A Figura 21b ilustra o caso no qual o ímã já se encontra próximo à espira e o campo \vec{B} onde ela se encontra agora é máximo. O ímã então começa a se afastar para a esquerda, de modo que o valor do seu campo magnético na região da espira começa a diminuir. Para evitar que isto ocorra, a corrente induzida se direciona de modo que seu campo magnético \vec{B}_i aponta para a direita, reforçando o campo do ímã, tentando impedir que ele seja alterado em relação ao valor máximo atingido. Assim, a corrente se estabelece no sentido horário, para quem a observa a partir do ímã que se afasta para a esquerda. Aqui a espira tenta atrair o ímã. Unindo estes dois efeitos de aproximação e afastamento do ímã de forma contínua nas proximidades de um condutor, este por sua vez oscilará na mesma frequência. Nas próximas seções serão exploradas

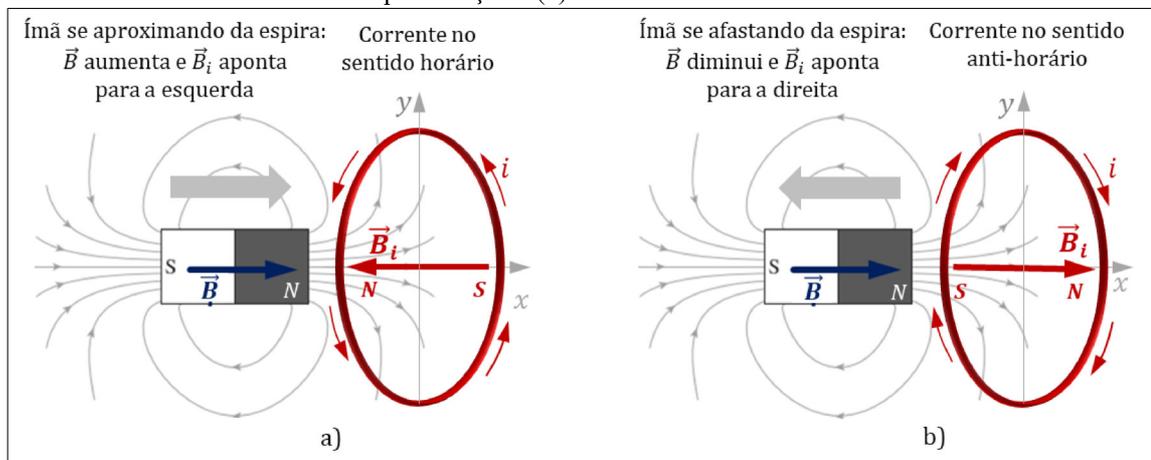
algumas aplicações que estão baseadas exatamente neste princípio.

Como consequência da discussão dos parágrafos anteriores, a lei de Faraday precisa ser alterada para incluir este efeito. Em outras palavras, a corrente gerada se opõe à variação do fluxo magnético, de modo que a lei de Faraday-Lenz se escreve como:

$$\mathcal{E} = -\frac{d\phi_B}{dt}. \quad (49)$$

É interessante como muitas vezes o estudante e alguns professores não dão o devido valor aos sinais nas equações de Física. Neste caso específico, o sinal negativo na lei de Faraday é uma lei da natureza que reflete o princípio de conservação da energia. Relembre que as Equações 39 e 40 mostram a energia total envolvida neste processo. A energia fica armazenada no campo magnético B ou se encontra em movimento com velocidade v nas partes móveis do sistema, mas seu valor total deve permanecer constante com o tempo. Para satisfazer a esse princípio geral é que os elétrons se movem para um lado ou para outro dentro do circuito.

Figura 21. Ilustração para a alteração do fluxo de campo magnético através de uma espira por meio da (a) aproximação e (b) afastamento do ímã.



Fonte: os autores (2021)

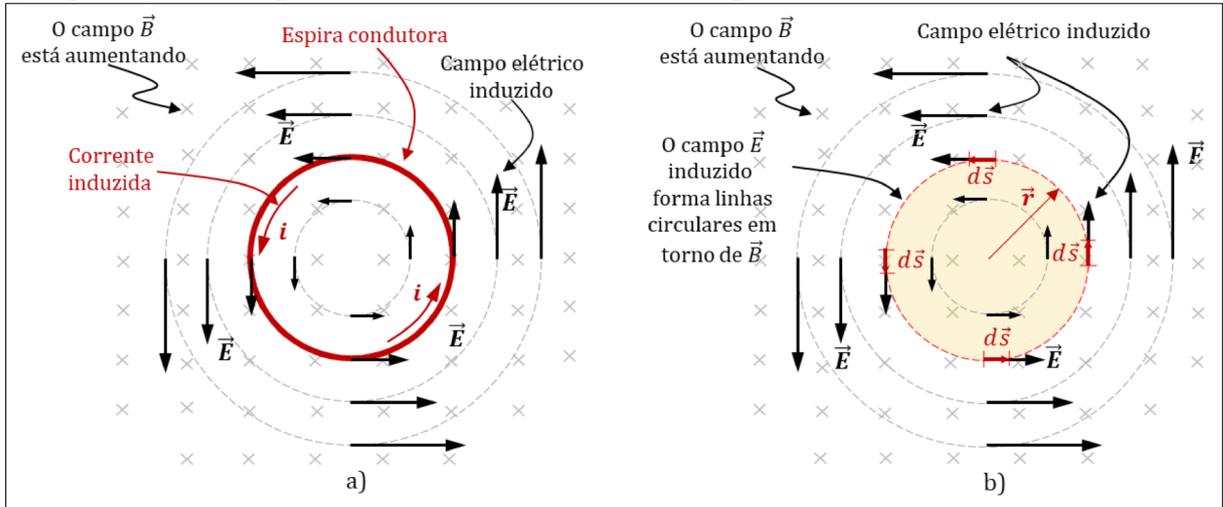
Agora que a lei de Faraday está completa, é hora de retornar e responder a pergunta “Quem move os elétrons que constituem a corrente induzida quando não existe *fem* de movimento? Ou seja, como os elétrons da espira da Figura 21 se movem se ela está em repouso? E se não tiver a espira condutora com elétrons livres para se moverem, a causa do movimento ainda persiste? Essa questão será respondida agora, e a Figura 22 será usada como meio facilitador da explicação. A Figura 22a é uma reprodução da Figura 21a do ponto de vista de quem olha da posição do ímã para a espira. À medida que o ímã se aproxima da espira, a

intensidade do campo \vec{B} aumenta. De acordo com a lei de Lenz, existe uma corrente induzida em sentido anti-horário na espira. Como a corrente elétrica obrigatoriamente ocorre, deduzimos que existe uma força elétrica para mover os elétrons dentro da espira. Portanto, concluímos que existe um campo elétrico induzido ao longo de toda a região onde o campo \vec{B} aumenta e que sua direção deve ser a mesma da força e, portanto, da corrente elétrica. Tal campo elétrico causado pelo campo magnético variável é denominado campo elétrico induzido. É este campo elétrico induzido o mecanismo que cria a corrente dentro da espira estacionária quando ocorre uma variação do campo magnético.

O surgimento da corrente elétrica ocorre meramente porque existem portadores livres e um caminho de condução para eles se moverem. Mas o campo elétrico induzido existe independentemente da presença da espira condutora. Isto está representado na Figura 22b, na qual não existe uma espira condutora. O espaço no qual o campo magnético varia é permeado pelo campo elétrico induzido, que se arranja em círculos perpendicularmente às linhas de campo magnético. Uma linha de campo elétrico se arranja sempre tangente à circunferência de raio r destacada na figura, cujo comprimento ($2\pi r$) é a soma de todos os pequenos elementos $d\vec{s}$. Ao longo do caminho circular o campo \vec{E} é paralelo a $d\vec{s}$. Lembre-se que o mesmo comportamento circular é apresentado pelo campo magnético em torno das linhas de campo elétrico, conforme discutido no contexto da Figura 3.

Todos os campos elétricos estudados até este ponto foram criados por cargas elétricas. Nestes casos, os vetores do campo elétrico apontam para fora da região de cargas positivas e para dentro da região de cargas negativas. Entretanto, o campo elétrico induzido mostrado na Figura 22 não é criado por cargas elétricas, mas pela variação temporal do campo magnético, e por isso ele não aponta para regiões com cargas, mas se distribui circularmente no espaço. Veja que este campo ocorre no espaço e não dentro dos materiais. Entretanto, qualquer material condutor colocado dentro desta região com campo elétrico induzido sofrerá os mesmos efeitos de um campo elétrico gerado por cargas elétricas.

Figura 22. Ilustração para o campo elétrico induzido no espaço devido ao aumento no valor do campo magnético (a) na presença de uma espira condutora e (b) na ausência de uma espira condutora.



Fonte: os autores (2021)

Só falta agora quantificar estas ideias e associá-la com a lei de Faraday. Logo de início, pode-se perceber uma diferença fundamental entre o campo elétrico produzido pelo campo magnético e aquele produzido por cargas elétricas – ele não é conservativo, ou seja, o trabalho realizado pela força associada a este tipo de campo elétrico $\vec{F} = q\vec{E}$ é diferente de zero em um trecho fechado (ida e volta), porque ela age sempre na mesma direção e sentido do movimento. Portanto, diferente do campo elétrico gerado por cargas, não é possível associar o campo elétrico induzido a um potencial elétrico, como foi feito no estudo da eletrostática em aulas anteriores. Mas é possível associá-lo à *fem* de movimento de Faraday, descrita pela Equação 48, já que ele é uma parte dela, conforme mostrado no termo $\vec{A} \cdot (d\vec{B}/dt)$ da Equação 47. Por definição, a *fem* é equivalente ao trabalho exercido pelas forças externas para separar as cargas elétricas de sinais contrários:

$$\mathcal{E} = \frac{W}{q}. \quad (50)$$

Por outro lado, o trabalho exercido pela força do campo elétrico induzido para mover os elétrons pode ser escrito como:

$$W = \vec{F} \cdot d\vec{s} = q\vec{E} \cdot d\vec{s}. \quad (51)$$

Como o campo elétrico induzido forma círculos em torno das linhas de campo magnético, o elemento de caminho $d\vec{s}$ ilustrado na Figura 22a percorre toda a circunferência e

o trabalho total numa volta completa é escrito como:

$$W_{curva\ fechada} = q \oint \vec{E} \cdot d\vec{s}. \quad (52)$$

O símbolo \oint significa que a soma deve ser feita obrigatoriamente ao longo de um percurso fechado. Usando a Equação 50, encontra-se a *fem* gerada apenas pelo campo elétrico induzido:

$$\mathcal{E} = \frac{W_{curva\ fechada}}{q} = \oint \vec{E} \cdot d\vec{s}. \quad (53)$$

Considerando o caso particular mostrado na Figura 22, em que a espira é perpendicular ao campo magnético e somente este varia, pode-se escrever a lei de Faraday como:

$$\mathcal{E} = \left| \frac{d\phi_B}{dt} \right| = A \left| \frac{dB}{dt} \right|. \quad (54)$$

Usando a Equação 53, tem-se:

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = A \left| \frac{dB}{dt} \right|. \quad (55)$$

Este resultado ilustra uma outra maneira de escrever a lei de Faraday, em que associa explicitamente o campo elétrico induzido no espaço ao campo magnético variável no tempo. Quando se trata de campos gerados por cargas elétricas, estes sempre começam e terminam em cargas elétricas e por isso são denominados campos coulombianos. O campo elétrico induzido é um campo não-coulombiano, pois é criado não por cargas elétricas, mas por um campo magnético variável no tempo. Sem a presença de cargas elétricas, as linhas do campo elétrico induzido devem formar espiras fechadas.

Pode-se dar utilidade prática à Equação 54 usando a Figura 22b. Para resolver a integral do lado esquerdo basta escolher um círculo genérico de raio r , orientado no sentido horário. A Figura mostra que os vetores do campo elétrico são tangentes à curva em qualquer ponto da circunferência, de maneira que a integral de linha de é:

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = \oint E \cos 0^\circ ds = E \oint ds = Es = 2\pi rE. \quad (56)$$

O símbolo s indica o comprimento da linha fechada, que pode ser circular ou não. O importante é que ela seja fechada. O parâmetro A do lado direito da Equação 55 representa a área cuja fronteira é delimitada pela linha s do lado esquerdo. Como o círculo da Figura 22b está sendo usado como ilustração para o cálculo, tem-se $A = \pi r^2$, e assim:

$$2\pi rE = \pi r^2 \left| \frac{dB}{dt} \right| \quad \text{e} \quad E = \frac{r}{2} \left| \frac{dB}{dt} \right|. \quad (57)$$

Esse resultado mostra que o valor do campo elétrico induzido equivale à metade do valor da variação do campo magnético dentro do círculo de raio r . Veja que o valor do campo elétrico não depende do valor do campo magnético, mas da rapidez com que ele varia no tempo. Quanto mais rápido o campo magnético variar, maior será o campo elétrico induzido.

Para finalizar esta discussão sobre o fenômeno da indução magnética, deve-se ressaltar que a Equação 55 prevê que a variação temporal do campo magnético produz um campo elétrico. É possível que o contrário ocorra, ou seja, que a variação temporal de um campo elétrico produza um campo magnético? Nas seções anteriores ficou claro que os campos magnéticos são gerados pelo movimento de partículas carregadas eletricamente. A existência de um campo magnético gerado por um campo elétrico nunca havia sido concebida teoricamente, até porque experimentalmente ela nunca tinha sido verificada. Mas a mente brilhante do grande físico teórico James Maxwell levou-o a considerar tal hipótese, reivindicada pela simetria da natureza – se um campo magnético cria um campo elétrico, o contrário deveria ser verdadeiro. A hipótese de Maxwell foi verificada experimentalmente vários anos depois que ele publicou sua teoria (MAXWELL, 1861).

A consequência mais importante do achado de Maxwell foi a descoberta de que campos elétricos e magnéticos podem subsistir sem a presença de cargas elétricas. Isto quer dizer que uma vez que estes são produzidos nas cargas e correntes, podem se autossustentar no espaço, sendo agora a variação temporal do campo magnético que produz o campo elétrico e a variação temporal do campo elétrico produz o campo magnético. Portanto, a energia emitida pelas partículas carregadas poderia se propagar no espaço, com ou sem a presença de partículas carregadas dentro dele. Estas ideias amadureceram e resultaram na descoberta de que a luz, um fenômeno distinto do eletromagnetismo à época, fosse considerada como sendo formada por campos elétricos e magnéticos oscilantes no tempo que se autorregeneravam. Esta foi uma das maiores descobertas da ciência. Maxwell tratou logo de encontrar a equação para a onda de luz,

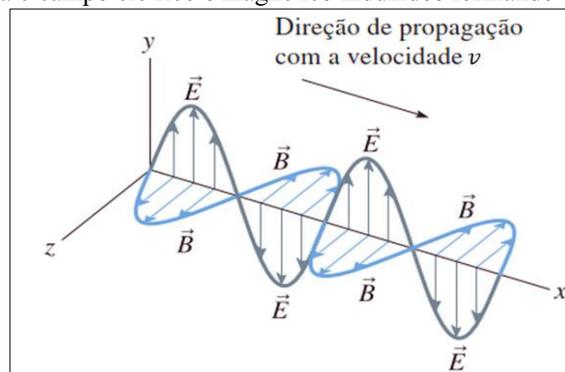
já que em 1875 esta já era considerada um fenômeno ondulatório, a partir das experiências de Thomas Young realizadas em 1802 (YOUNG, 1802).

A onda encontrada por Maxwell (1861) tinha uma geometria especial, mostrada na Figura 23, na qual os campos se encontravam perpendicularmente entre si, bem como perpendicular à direção de propagação da onda, ou seja, a onda de luz, agora uma eletromagnética, deveria ser uma onda transversal. Além disso, a teoria de Maxwell previa que a onda teria uma velocidade que dependia das propriedades do meio material ou não, dentro do qual viajava:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}. \quad (58)$$

onde ϵ_0 e μ_0 são as constantes elétrica e magnética no vácuo (informam a facilidade para um campo elétrico e magnético se estabelecerem no vácuo). As constantes já eram conhecidas à época, de modo que o valor da velocidade da onda eletromagnética foi de aproximadamente 300.000 *km/s*, coincidindo com os valores medidos para a velocidade da luz.

Figura 23. Ilustração para o campo elétrico e magnético induzidos formando uma onda eletromagnética.



Fonte: os autores (2021)

3.2.5 Aplicações da lei da indução magnética

Nesta seção serão apresentadas algumas aplicações para o fenômeno da indução magnética. De todos os fenômenos físicos, este certamente é um dos que contribuiu para o maior desenvolvimento tecnológico e para a melhoria da qualidade de vida da humanidade, através de muitos equipamentos que operam baseado em seus princípios.

3.2.5.1 Gerador de corrente alternada

A primeira aplicação da indução magnética que será discutida é responsável pela produção de cerca de 97% de toda a energia elétrica consumida no mundo. Isso por si só já mostra o tamanho do impacto que ela gerou para o desenvolvimento da humanidade. Sem a energia na forma elétrica não haveriam carros, aviões, TVs, celulares, ou equipamentos elétricos de quaisquer tipos; além disso, praticamente não existiriam muitos bens de consumo que se tem na atualidade, uma vez que todos eles utilizam a energia elétrica na sua produção. De forma simples, um gerador pode ser explicado a partir das discussões da Figura 18, na qual um fio deslizante é puxado sobre um trilho em forma de U na presença de um campo magnético. Este circuito é um gerador elétrico porque ele transforma energia mecânica em energia elétrica.

A Figura 24 ilustra um gerador elétrico de forma mais prática. Uma bobina, acionada por uma força externa (não mostrada na figura), gira na presença de um campo magnético. As forças externas geralmente vêm da queda de água líquida em uma hidroelétrica, do vapor de água em alta pressão em usinas termelétricas e nucleares, do vento em usinas eólicas e do movimento das marés em usinas maremotrizes. O campo magnético e a área real da espira são constantes, mas o fluxo magnético através da espira varia continuamente à medida que ela gira, porque a área efetiva (seção transversal) muda com o movimento rotacional. Na Figura 24 o campo magnético está orientado na direção do eixo y , o eixo da espira está na direção do eixo x e seu plano, descrito pelo vetor \vec{A} , está em um ângulo θ em relação ao campo magnético.

Deve-se deixar claro que \vec{A} não o vetor área, já que área não é vetor. Mas ele pode ser interpretado como um vetor cuja magnitude é igual à área A da espira e cuja direção é perpendicular ao seu plano. Veja que quando $\theta = 0$, o plano da espira é perpendicular ao eixo y , e o máximo de linhas de campo magnético atravessam a espira. Assim o fluxo magnético ϕ_B é o máximo possível. Quando $\theta = 90^\circ$, o plano da espira é paralelo ao campo magnético, de modo que nenhuma de suas linhas pode atravessá-la. Assim o fluxo magnético ϕ_B através dela é nulo. A corrente induzida sai da espira girante por meio de escovas pressionadas contra anéis deslizantes, que também giram. O fluxo magnético através da bobina é:

$$\phi_B = \vec{A} \cdot \vec{B} = AB\cos\theta = AB\cos\omega t. \quad (59)$$

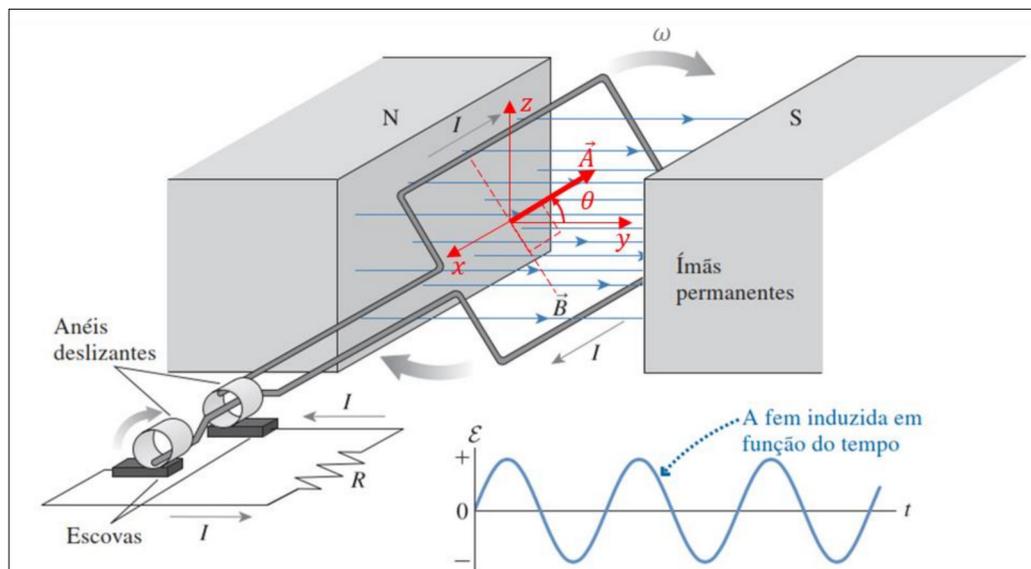
onde ω é a frequência angular de rotação da bobina (número de rotações para cada unidade de radiano ($\omega = 2\pi f$), sendo f a frequência linear (número de rotações por cada unidade de

tempo). Usando a lei de Faraday (Equação 49), a força eletromotriz induzida em uma bobina composta por N espiras é:

$$\mathcal{E}_{bobina} = -N \frac{d\phi_B}{dt} = -ABN \frac{d}{dt}(\cos\omega t) = \omega ABN \text{sen}\omega t. \quad (60)$$

onde N é o número de espiras da bobina. É importante notar que para $0^\circ < \omega t < 90^\circ$, $\text{sen}\omega t > 0$ e o sinal de \mathcal{E}_{bobina} é positivo. Para $90^\circ < \omega t < 180^\circ$, $\text{sen}\omega t < 0$ e o sinal de \mathcal{E}_{bobina} é negativo. O gráfico da função seno foi inserido na Figura 24 para tornar este conceito mais claro. Portanto, o sinal da *fem* é alternado e a corrente através do resistor R também tem seu sentido alternado para trás e para a frente. Portanto, o gerador da Figura 24 é um gerador de corrente alternada. Este é o método usado por todos os sistemas de produção de energia elétrica em grande escala. Uma turbina é girada por um potente fluxo de água líquida ou vaporizada, no eixo da qual são fixados grandes ímãs que giram com ela. Ao redor e muito próximo dos ímãs, ficam as bobinas condutoras estáticas.

Figura 24. Ilustração para o gerador de corrente alternada.



Fonte: adaptado de Randall D. Knight (2009)

Os motores elétricos funcionam exatamente com as mesmas partes do gerador elétrico. A única diferença entre estes dois dispositivos é que, em vez de uma força externa girar a turbina, ligam-se as extremidades das bobinas em uma fonte força eletromotriz externa com o objetivo de gerar força mecânica. O gerador transforma energia mecânica em energia elétrica,

enquanto o motor transforma energia elétrica em energia mecânica. Tanto gerador quanto o motor elétrico estão na base do desenvolvimento humano. Virtualmente todos os itens de consumo nos dias atuais utiliza um motor elétrico para a sua construção.

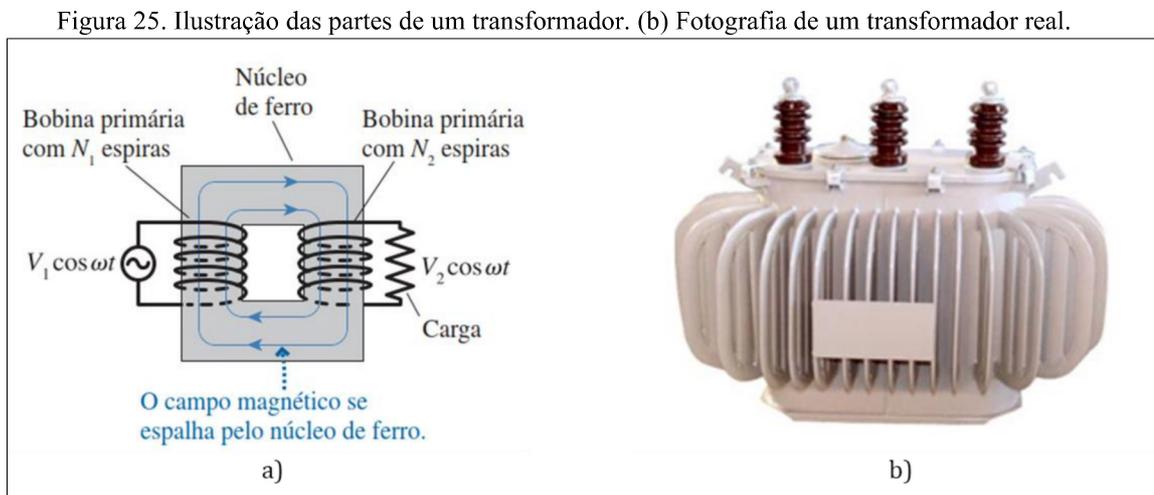
3.2.5.2 Transformador

A energia produzida nos geradores elétricos precisa ser transportada até os consumidores que, em geral, estão longe das estações geradoras. Para otimizar os custos de transmissão, é conveniente que a *fem* gerada em 18 *kV* seja elevada tipicamente para 500 *kV* ou 700 *kV* e a energia transmitida por meio de torres com até 30 m de altura por razões de segurança. Quando a energia chega aos consumidores por meio de uma *fem* tão elevada, é necessário que esta seja reduzida em uma subestação, a fim de ser redistribuída entre os vários tipos de consumidores, de pequenas residências até grandes indústrias. Em geral, ela é reduzida para cerca de 75 *kV* (como é o caso da rede com cabos grossos e enormes postes de concreto com cerca de 15 m entre subestações), para 13 *kV* nas redes de alta tensão das ruas (postes de altura de até 8 m com três fios geralmente na horizontal), e para 220 V nas redes comuns, contendo geralmente 5 fios instalados verticalmente a uma altura mínima 5 m do solo.

Como o método de produção mais eficiente de energia elétrica é o que usa a indução magnética, a *fem* produzida é necessariamente alternada e possui valores muito mais elevados do que o consumidor precisa. Por isso, o único dispositivo que pode reduzi-la é o transformador. Transformador é o nome dado ao dispositivo que tem como objetivo reduzir ou aumentar uma diferença de potencial alternada. Portanto, pelo exposto acima, pode-se concluir que sem os transformadores não seria possível o uso direto da energia elétrica produzida em usinas hidroelétricas, termoelétricas, eólicas ou nucleares. Em resumo, seria impossível ter a energia elétrica como ela é disponibilizada atualmente. Além disso, todos os dispositivos eletrônicos usam energia em baixíssimas tensões, tipicamente entre 1,5 V e 20 V. Em geral as pessoas não refletem sobre o impacto que as descobertas científicas têm nas suas vidas. Daqui fica óbvio que sem a descoberta de Faraday e os produtos dela decorrentes, a vida humana atualmente seria equivalente à de séculos atrás, sem iluminação por lâmpadas, sem computadores, celulares, TVs, carros, aviões, equipamentos hospitalares de todos os tipos e centenas de outros bens de uso generalizado pela sociedade. Já imaginou como o mundo sem tudo isso?

O princípio de funcionamento do transformador pode ser explicado a partir da Figura 15 e das discussões dela decorrentes. A lei de Faraday foca no surgimento da *fem* alternada em uma bobina (secundária) quando uma corrente elétrica varia em outra bobina próxima

(primária). Mas o foco agora estará no valor da *fem* na bobina secundária, que pode ser maior ou menor do que a *fem* da bobina primária, a depender do número de espiras em cada uma delas. A Figura 25a ilustra duas bobinas enroladas em um mesmo núcleo de ferro. A bobina da esquerda é a bobina primária. Ela tem N_1 espiras e é alimentada por uma *fem* oscilatória $V_1 \cos \omega t$ produzida por um gerador, conforme foi explicado na seção anterior. O campo magnético da bobina primária é conduzido pelo núcleo de ferro e atravessa a bobina da direita, a secundária, que possui N_2 espiras. A Figura 25b mostra um transformador de três fases tipicamente encontrado em postes urbanos. As hastes externas são para melhor troca de calor entre o óleo e o meio externo. O óleo é usado para o resfriamento das espiras, que aquecem por causa da grande corrente nas espiras (Randall, D. Knight, 2009).



Fonte: (a) Randall D. Knight (2009) (b) <https://webautomacaoindustrial.blogspot.com/>

Antes de continuar a discussão sobre o transformador é necessário explicar em poucas linhas o papel do núcleo de ferro entre as bobinas. O espaço vazio (vácuo) oferece uma reação quando se tenta estabelecer um campo magnético não nulo nele. Em outras palavras, o campo magnético intrínseco do espaço vazio, \vec{H} , discutido na Seção 3.2.2, tem seu valor no vácuo alterado por uma das quatro fontes: carga em movimento, corrente elétrica, campo elétrico oscilante ou *spin* de alguma partícula. Não se sabe exatamente como se dá esse processo, mas ele pode ser quantificado por meio de uma quantidade, que representa o valor da alteração do campo \vec{H} .

De forma geral, pode-se escrever $\vec{B} = \mu_0 \vec{H}$, sendo \vec{B} o campo magnético gerado por uma das quatro fontes mencionadas. μ_0 já foi definida na Equação 1 e é a constante magnética ou permeabilidade magnética do vácuo. Ela informa o quanto o campo \vec{H} em uma região do

vácuo é alterado por uma das quatro fontes. Se na região onde o campo produzido por uma das fontes anteriores houver matéria, esta será magnetizada pelo campo \vec{H} , produzindo um campo denominado de magnetização \vec{M} , discutido na Seção 3.2.3.7, que também pode ser escrito em termos do campo do vácuo como $\vec{M} = \chi\vec{H}$. O símbolo χ , denominado de susceptibilidade magnética, informa o quanto a matéria pode ser magnetizada pelo campo \vec{H} . Assim, o campo magnético total dentro uma região do espaço com matéria pode ser escrito como:

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M}) = \mu_0(\vec{H} + \chi\vec{H}) = \mu_0(1 + \chi)\vec{H}. \quad (61)$$

Materiais diamagnéticos possuem χ negativo e da ordem de 10^{-5} . Quando um material diamagnético é colocado dentro de uma região com campo magnético ele “repele” as linhas do campo de modo que poucas passarão dentro dele, o que significa que este tipo de material ao ser magnetizado por um ímã será levemente repelido por ele. Materiais paramagnéticos possuem χ positivo e da ordem de 10^{-4} . Um material paramagnético colocado na região de um campo externo “atrai” algumas linhas de campo para dentro dele, o que significa que serão levemente atraídos pelo ímã. Materiais ferromagnéticos, como o ferro do núcleo do transformador, possuem χ positivos e muito grandes, alguns atingindo a ordem de 10^6 . Na prática isso quer dizer que um material ferromagnético “atrai” fortemente as linhas de campo magnético que estão ao seu redor, de modo a concentrar o máximo delas dentro de si. Este tipo de material, de forma figurativa, como uma lente de biconvexa, que concentra a luz em um ponto focal. É por essa razão que se coloca ferro entre as bobinas do transformador, para que o campo alternado gerado na espira primária se concentre ao máximo na região da espira secundária, sendo que esse campo é canalizado pelo núcleo de ferro. Pela lei de Ampère, quanto maior a variação do fluxo na região da bobina secundária, maior será a *fem* gerada lá. Sem o núcleo de ferro haverá um campo muito pequeno na região da segunda bobina, o que torna a geração da *fem* um efeito insignificante (Bauer, Westall e Dias, 2012).

Após essas explicações sobre o papel do núcleo de ferro, a discussão sobre o princípio de funcionamento do transformador pode ser retomada. A corrente alternada através da bobina primária com N_1 espiras produz um campo magnético oscilante que é conduzido pelo núcleo de ferro até a bobina secundária com N_2 espiras. A *fem* induzida nesta bobina é transferida para a resistência de carga externa como a voltagem oscilatória $V_2 \cos \omega t$. É precisamente esta a voltagem utilizada nas nossas casas e indústrias. Existe uma relação simples entre a voltagem da espira 1 e da espira 2, que pode ser escrita como:

$$V_2 = \frac{N_2}{N_1} V_1. \quad (62)$$

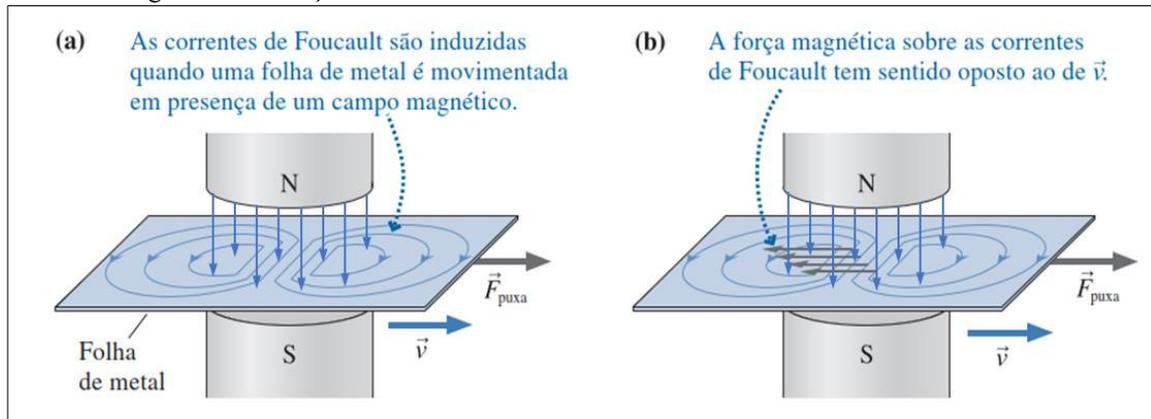
Observe que a magnitude de V_2 depende da relação entre N_2 e N_1 . Se N_2 for maior que N_1 o transformador aumenta a voltagem inicial. Este é o caso da transformação nas usinas geradoras, que eleva a voltagem para a transmissão de energia em grandes distâncias. Se N_2 for menor que N_1 o transformador reduz a voltagem. Este é o caso dos transformadores de subestações, dos que se encontram nos postes de ruas e aqueles que se encontram em todos os equipamentos elétricos e eletrônicos.

3.2.5.3 Fogões à indução, frenagem magnética e detectores de metais

Antes de explicar como funciona um fogão à indução, os freios magnéticos e os detectores de metais, é necessário fazer uma rápida discussão sobre um dos fenômenos decorrentes da lei da indução magnética. Nas discussões sobre indução magnética, as correntes induzidas estavam sempre confinadas em percursos bem definidos nos condutores que formavam os circuitos. Contudo, existem casos nos quais em vez de um fio condutor tem-se grandes placas metálicas se deslocando no interior de um campo magnético ou placas metálicas localizadas em uma região onde existe um campo magnético variável. Nessas circunstâncias, surgem correntes induzidas que circulam no material condutor, de nominadas de correntes de Foucault.

Imagine uma folha de metal não magnético colocada entre dois ímãs próximos, conforme ilustrado na Figura 26. Quando em repouso, a folha não sofre a ação de forças magnéticas. Entretanto, se ela for puxada para a direita, como mostrado na Figura 26a, os portadores de carga estarão em movimento para a direita com velocidade \vec{v} , e uma força magnética desaceleradora aparece sobre a corrente e , portanto, sobre a folha. Estas forças estão ilustradas na Figura 26b. Este tipo de força aponta no sentido contrário ao movimento mecânico, conforme foi discutido na seção 3.2.3.5 e seus detalhes também foram discutidos no contexto da Figura 18. Veja que o padrão de corrente é o mesmo que se estabelece em um fio, formando caminhos fechados. É necessário exercer uma força externa para puxar um pedaço de metal para fora do campo magnético, assim como é necessária uma força para empurrá-lo para dentro do campo. Se a força que puxa a folha cessar, a força magnética rapidamente desacelerará o pedaço de metal até pará-lo. A corrente de Foucault e suas consequências possuem várias implicações importantes, conforme serão discutidas nos próximos parágrafos.

Figura 26. Ilustração da corrente de Foucault em uma folha de metal em movimento.



Fonte: Randall D. Knight (2009)

As correntes de Foucault possuem aspectos mais positivos que negativos, sendo que em cada um deles podem-se encontrar aplicações importantes. Quanto ao aspecto negativo, elas são chamadas de correntes parasitas, porque elas dissipam parte da energia que, em princípio, deveria ser usada para outras finalidades. Isto ocorre porque os materiais por onde estas correntes passam possuem resistência elétrica, sendo que a taxa com que a energia é retirada do campo magnético depende do quadrado da corrente, segundo a fórmula estudada em eletricidade: $P = Ri^2$. A potência dissipada pelas correntes de Foucault pode causar um aquecimento imprevisto, e as forças magnéticas sobre elas indicam que energia extra deve ser gasta para mover metais em presença de campos magnéticos. Um exemplo é o caso do transformador. Quando o campo magnético se estabelece dentro do núcleo de ferro, correntes de Foucault aparecem dentro dele, resultando em aquecimento do mesmo. Por isso é necessário adicionar um sistema de resfriamento aos transformadores. Isso pode ser visto pelas aletas externas do transformador da Figura 25b, que são instaladas objetivando a trocar energia via calor com o meio externo ao transformador.

O Aquecimento nos transformadores é um aspecto negativo das correntes de Foucault. Mas existem vários cenários nos quais a presença da corrente é um fator muito positivo. Neste caso não se deve dar um aspecto negativo para a energia dissipada pelas correntes de Foucault, porque ela é justamente a causa de outro efeito que se deseja ocorrer. Um exemplo é o fogão à indução magnética. A Figura 27 mostra a parte superior de um fogão que aquece os alimentos via indução magnética. A Figura 27a destaca com círculos na tampa do fogão as regiões que são magneticamente ativas. Debaxo destas se encontram bobinas metálicas que transportam corrente alternada, gerando um campo magnético variável na região acima do tampo. Uma panela metálica colocada dentro do círculo desempenha o mesmo papel da placa metálica da Figura 26. Correntes de Foucault serão formadas no fundo da panela e a energia dissipada pela

corrente, ou retirada pela resistência elétrica do metal da panela, é usada para aquecer o alimento.

Uma grande vantagem deste tipo de fogão em relação ao fogão elétrico ou à gás é que apenas partes metálicas aquecem, gerando uma grande segurança para quem operador dele. Uma prova disso é mostrada na Figura 27b, na qual uma barra de chocolate, que é programada para derreter em temperatura de $45\text{ }^{\circ}\text{C}$, recebe energia térmica apenas pela parte metálica da panela. O tampo do fogão não se aquece, mas apenas partes metálicas colocadas sobre ele dentro da região demarcada. Não há perigo em colocar as mãos sobre a “boca do fogão”, uma vez que estas não retiram a energia do campo magnético.

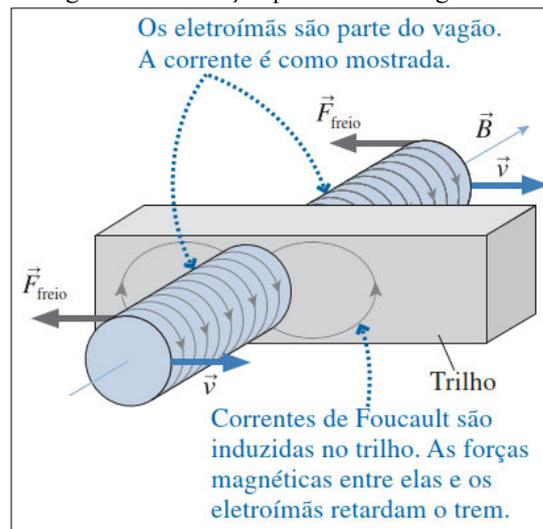
Figura 27. Fogão à indução magnética.



Fonte: <https://muellerhome.us/>

A Figura 26b mostra que a força magnética exerce um papel de desacelerar o movimento provocado pela força mecânica. Ou seja, qualquer que seja a tendência do movimento a força magnética se oporá a ela. Este fenômeno tem aplicações muito úteis em vários setores da indústria. A Figura 28 ilustra um vagão de trem fixo e duas bobinas bem próximas aos seus dois lados. Quando uma corrente elétrica alternada passa nas bobinas, o seu campo induz corrente de Foucault no metal do trilho. Se as bobinas se movem para a direita, as forças magnéticas sobre as correntes no trilho apontarão para a esquerda, e agirão como freio para as bobinas. Este é o mecanismo usado para frear trens modernos, montanhas-russas, e muitos outros sistemas girantes eletrificados. Os sistemas magnéticos de frenagem são muito eficientes e possuem a vantagem adicional de aquecer o trilho, e não os freios.

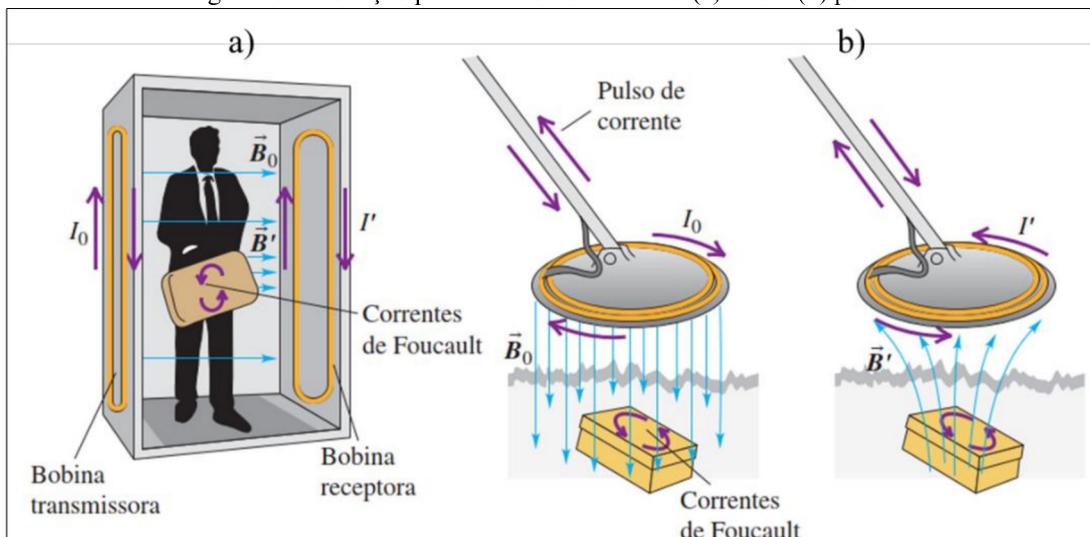
Figura 28. Ilustração para o freio magnético.



Fonte: Randall D. Knight (2009)

Para encerrar as discussões sobre algumas aplicações da indução magnética, os detectores de metais serão discutidos em poucas linhas. A Figura 29a ilustra um arranjo típico para os detectores de metal usados em pontos de segurança de embarque e desembarque de aeroportos. Uma bobina gera um campo magnético alternado \vec{B}_0 . Este campo induz correntes de Foucault no objeto condutor transportado pelo passageiro que passa através do detector. As correntes induzidas produzem um campo magnético alternado B' , que por sua vez induz uma corrente na bobina receptora do detector. A Figura 29b ilustra um detector de metais portátil, usados para detectar minas ou qualquer peça de metal enterrados e que funciona sob o mesmo princípio.

Figura 29. Ilustração para detectores de metais (a) fixo e (b) portátil.



Fonte: Young e Freedman (2009)

4 METODOLOGIA DE APLICAÇÃO DO PRODUTO EDUCACIONAL

As metodologias são aplicações de procedimentos e técnicas que devem ser observadas para a construção de um determinado conhecimento. Segundo Praça (2015,p.73):

A metodologia científica é capaz de proporcionar uma compreensão e análise de mundo através da construção do conhecimento. O conhecimento só acontece quando o estudante transita pelos caminhos do saber, tendo como protagonismo deste processo o conjunto ensino/aprendizagem. Pode-se relacionar então metodologia como o “caminho de estudo a ser percorrido” e ciência com “o saber alcançado” .

Na visão de Nérice (1987), a metodologia de ensino inclui um conjunto de procedimentos ordenadamente utilizados pelo professor com a finalidade que o educando seja capaz de alcançar os objetivos e adquira as habilidades necessárias na elaboração de seu conhecimento.

Diante desses pensamentos, este capítulo tem a finalidade de apresentar os procedimentos metodológicos que serão utilizados nesse trabalho.

A aplicação da proposta pedagógica ocorreu em uma escola Estadual do Maranhão na cidade de São João dos Patos. Essa escola apresenta 9 salas de aula com capacidade para 40 alunos, funcionando no turno integral. A turma escolhida para construção e aplicação do produto educacional advindo desta pesquisa foi uma turma de terceira série do ensino médio do ano letivo de 2021, sendo a escolha realizada por equivalência do conteúdo programado.

A aplicação do produto educacional ocorreu nos dias 16, 17, 18, 23, 24 e 25 de novembro de 2021. Foram realizados seis encontros cuja descrição das estratégias serão apresentadas de forma geral neste capítulo com toda a descrição e detalhamento do passo a passo no Apêndice F.

No primeiro encontro, os primeiros minutos foram dedicados à apresentação do projeto, sua justificativa, seus objetivos, a descrição de suas etapas e cronograma de execução. Logo após foi iniciado o questionário pré-teste na plataforma de formulário online e posteriormente a confecção de mapas conceituais com o objetivo de investigar se os alunos possuem os subsunçores necessários para aprender o novo conteúdo sobre indução magnética, avaliando o nível de informação e conhecimentos que os alunos tinham adquirido ao longo das aulas anteriores.

No segundo encontro foi destinado à projeção do filme “O menino que descobriu o vento”, o filme foi utilizado como uma ação motivacional servindo de organizado prévio como proposta de problematização. Neste encontro foi projetado em sala de aula com auxílio de computador e projetor de mídia em forma de cinema permitindo que os estudantes analisassem

o contexto do filme e posteriormente registrassem comentários para que pudessem ser utilizados em avaliações futuras.

No terceiro encontro foi destinado a uma aula expositiva formal visando o aprofundamento de conceitos sobre força magnética e campo magnético, para tanto, foram utilizadas ímãs e bússolas como forma de despertar a curiosidade e entendimento sobre os conceitos acima elencados. Foi um encontro onde os estudantes manusearam as bússolas e os ímãs realizando experimentos e compreendendo sua base de funcionamento. Este momento da aplicação do projeto estimulou o debate, observações e questionamentos.

No quarto encontro foi o momento de estudar a indução magnética de maneira mais formal do que nas discussões anteriores, através de uma aula expositiva e com a utilização do simulador Phet alguns tópicos relevantes sobre campo magnético foram evidenciados, abrangendo nesta etapa da aplicação aspectos matemáticos da lei. Dando mais suporte ao momento alguns experimentos com ímãs, espiras, bobinas foram realizados passando credibilidade aos conceitos embutidos nas equações matemáticas objetivando mostrar indicativos da força eletromotriz.

No quinto encontro foi dedicado a continuação da aula expositiva anterior sobre o conteúdo de indução magnética. Através da projeção de slides o foco esteve atrelado aos pontos mais fundamentais do assunto (força eletromotriz do movimento, correntes de Foucault e aplicações do fenômeno) trabalhando com equações matemáticas relevantes para o estudo. O estudo da indução magnética foi evidenciado também com demonstrações de experiências simples em sala de aula (indução usando bobinas, gerador elétrico, freio de indução usando ímã e cano de alumínio) com a participação dos estudantes e, posteriormente, construção de relatório que buscasse observar e avaliar se realmente o conhecimento proposto foi alcançado.

No sexto e último encontro da aplicação do projeto o foco foi avaliar a eficácia da UEPS, utilizando-se de questionário previamente elaborado os alunos tiveram a oportunidade de responder e analisar os pontos positivos e negativos, ou aqueles que favoreceram o aprendizado acerca do assunto em questão. Momento também serviu para elaborar mapas conceituais mais sistematizados podendo revisar conteúdos e melhorar a organização em sua estrutura cognitiva dos tópicos analisados durante a execução do projeto.

5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1 Análise e Discussão dos Dados

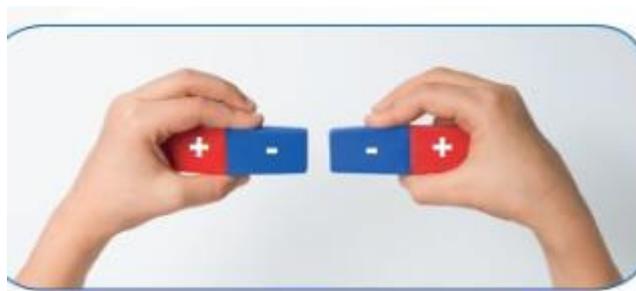
Esta seção tem como propósito mostrar o desenvolvimento do trabalho de pesquisa realizado pela pesquisadora na terceira série do Ensino Médio, os direcionamentos tomados antes e durante a execução do trabalho, os relatos dos alunos e resultados que procuram revelar a eficiência do aprendizado após a aplicação da UEPS.

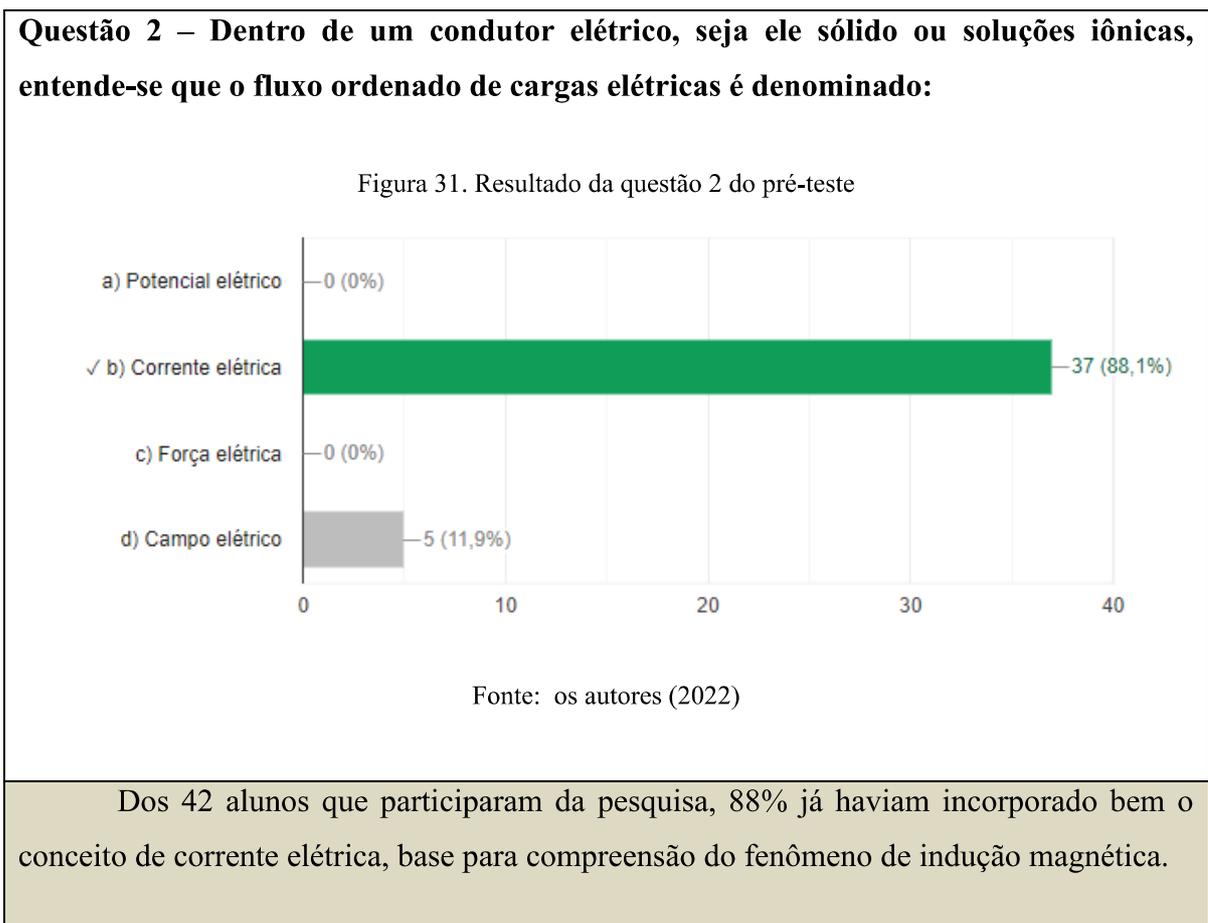
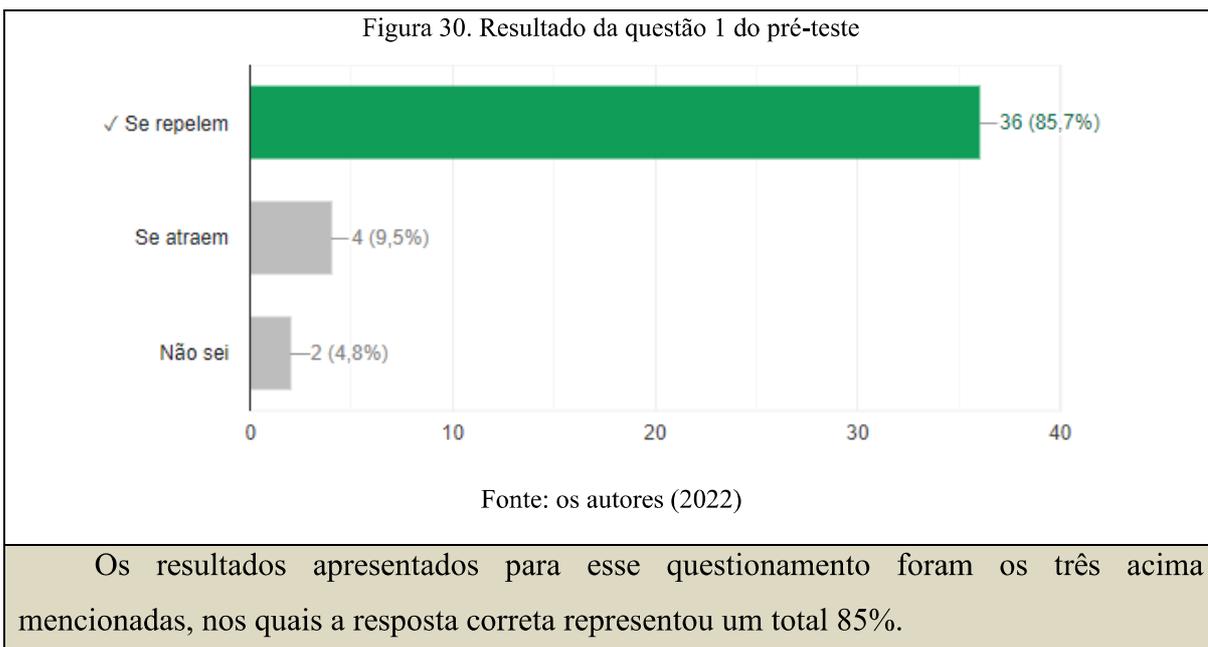
Determinadas ferramentas e estratégias nortearam a coleta e análise dos dados. Discussões orais em sala, questionários pré e pós, dados coletados das simulações e experimentos, relatórios e construções de materiais formativos que permitiram que a pesquisadora chegasse a sua resposta do problema de pesquisa.

A UEPS foi iniciada 16 de novembro, sendo composta de 06 encontros contando da apresentação da sequência até o momento de avaliação do trabalho desenvolvido. O primeiro encontro consistiu em uma apresentação estrutural da sequência, abrangendo seus objetivos, estratégias e cronograma de aplicação. Ainda nesse primeiro momento foi aplicado um pré-teste montado previamente, com o objetivo de investigar conteúdos básicos para a compreensão do fenômeno da indução magnética. Observou-se com os questionamentos realizados que os conhecimentos básicos acerca do assunto de eletricidade e magnetismo, tais como corrente elétrica, campo magnético, força magnética etc. já haviam sido bem incorporados no cognitivo dos alunos, e outros necessitando de maiores explanações que servissem como embasamento para estudos posteriores.

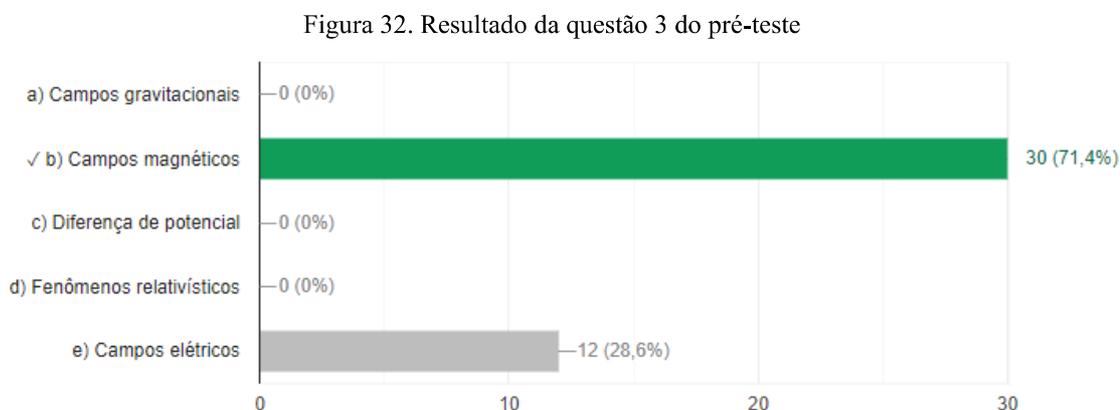
Seguem abaixo as respostas dos estudantes que evidenciam os conhecimentos adquiridos, ou não, nessa fase inicial de aplicação da sequência da UEPS.

Questão 1 - O que acontece se aproximarmos dois ímãs de acordo com as especificações abaixo?





Questão 3 – O movimento de cargas elétricas, tendo como ponto de referência um observador inercial, de acordo com o estudo de Eletromagnetismo, resulta no surgimento de:



Fonte: os autores (2022)

Questão 4 – Qual a definição de circuito elétrico?

Quadro 4. Respostas dos alunos em relação a questão 4 do pré-teste

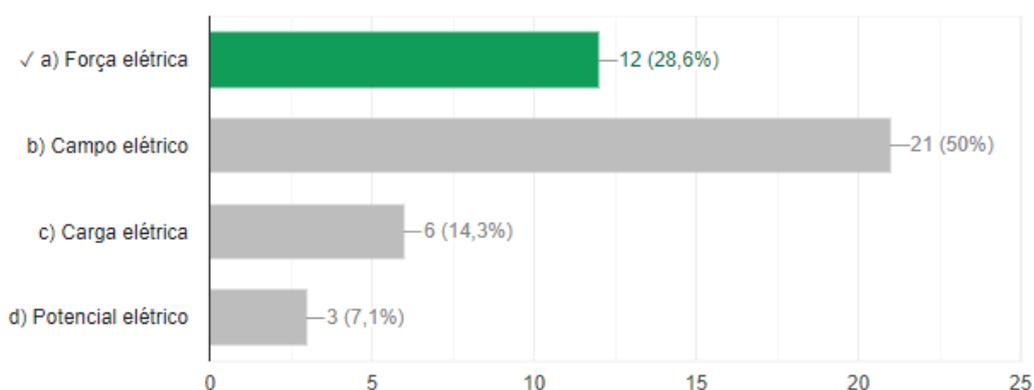
ALUNO	RESPOSTA
1	Onde tem condutores elétricos
2	São ligações de dispositivos, como os resistores
3	Um conjunto de fluxo elétrico
4	Um ciclo de elétrons que estão em constante movimento
5	Proporcionar energia entre aparelhos eletrônicos
6	É o caminho por onde a corrente elétrica percorre
7	Fluxo ordenado de cargas elétricas
8	Onde ocorre o movimento de cargas elétricas
9	O circuito elétrico controla e conduz eletricidade
10	Um sistema condutor de energia
11	Sobrecarga dos resistores
12	Denominamos circuito quando temos um esquema, ou seja, temos o condutor de energia, fios, capacitores, etc.
13	É a passagem de determinada quantidade de energia
14	Ligação de dispositivos elétricos com geradores, capacitores, etc, feito por meio de um fio condutor que conduz que permite a passagem de cargas elétricas pelos elementos do circuito
15	É uma área limitada das cargas
16	É uma ligação de elementos elétricos como resistores, isolantes, condutores, etc.

17	Ligação de dispositivos com resistores e geradores
18	Está dentro do campo magnético
19	É uma força que faz correr a energia
20	O circuito é onde cargas positivas e negativas tem uma circulação em um objeto
21	Ligações de dispositivos, como os resistores
22	É a ligação de elementos elétricos, como resistores, isolantes, condutores
23	Circuito elétrico é o processo que a eletricidade passa até chegar a determinado ponto
24	É uma certa ligação onde tem corpos ligados a uma certa tensão e controlados por um interruptor
25	Várias lâmpadas ligadas por uma tensão formando um circuito elétrico
26	É uma ligação entre elementos elétricos
27	Locais onde circulam correntes elétricas
28	É um curto circuito que ocorre quando a corrente elétrica atravessa um condutor
29	São cargas elétricas que passam por dentro dos fios que passam energia para os eletrodomésticos
30	Ligação entre lâmpadas, tomadas
31	É o movimento de cargas elétricas dentro de um condutor elétrico
32	Cargas negativas e positivas
33	Ele é responsável para combater circuito
34	É a junção de capacitores, geradores e resistores
35	Circulação de energia
36	Fluxo ordenado de cargas elétrica
37	É um conjunto de interruptores, disjuntores
38	Ligação de dispositivos com resistores e geradores
39	É quando há uma carga elétrica em determinada área
40	É onde as cargas elétricas flui no condutor elétrico
41	O circuito elétrico controla e conduz a eletricidade
42	Ligação de dispositivos elétricos como geradores, capacitores, etc., por meio de um fio condutor que conduz cargas elétricas

Fonte: os autores (2022)

Questão 5 – Segundo a Física Quântica, a matéria é constituída de átomos, e estes possuem prótons, nêutrons e elétrons, que apresentam uma organização estrutural que permite que os elétrons fiquem em órbita sendo atraídos pelo núcleo (prótons+nêutrons) do átomo. Que agente é responsável por essa atração?

Figura 33. Resultado da questão 5 do pré-teste



Fonte: os autores (2022)

Questão 6 – O que diferencia materiais isolantes de condutores?

Quadro 5. Respostas dos alunos em relação a questão 6 do pré-teste

ALUNO	RESPOSTA
1	Os materiais isolantes não atraem energia, já os condutores atraem energia
2	Apresentam respectivamente, baixa e alta resistência à passagem de eletricidade ou energia, como fios de cobre
3	Isolantes: não repassam cargas elétricas, condutores: são mais fáceis para conduzir a energia
4	Materiais isolantes tem por sua vez propriedades capazes de não conduzir eletricidade, isolando átomos eletricamente carregados
5	Isolante como diz o nome diz, isola a carga e condutores conduzem a carga elétrica para determinado ponto
6	Isolantes: são materiais que impedem a passagem de corrente elétrica (ex: borracha). Condutores: são materiais que conduzem a passagem de corrente elétrica (ex: cobre)
7	Materiais isolantes são os que não atraem energia, e os condutores atraem energia
8	Isolantes não produzem energia elétrica, condutores tem a função de atrair energia
9	Condutores são aqueles que transmitem uma corrente como a maioria dos metais, os isolantes são aqueles com a capacidade de conter essas correntes
10	Porque os materiais isolantes isolam o fio para que o condutor conduza
11	Um isola e outro conduz a corrente elétrica
12	Os materiais condutores, são aqueles capazes de conduzir energia, ou seja, eles organizam os elétrons tendo

	assim, a condução de energia. Os isolantes são aqueles que são capazes de conduzir corrente elétrica
13	Isolantes são materiais que conduzem ou absorvem pouca quantidade de calor e condutores absorvem melhor o calor
14	Isolantes oferecem grande oposição à passagem da carga elétrica; condutores, materiais que possibilitam a movimentação de cargas elétricas em seu interior com facilidade
15	Os isolantes impedem a passagem de corrente elétrica; os condutores permitem a passagem da corrente
16	Materiais isolantes são aqueles que não contém energia já os condutores conduzem ou atraem energia
17	Isolantes são materiais que se comportam de maneira opostas à corrente elétrica, condutores permite a movimentação dos elétrons
18	Pois os condutores têm cargas e os isolantes têm átomos
19	Isolante impede que a energia passe, condutores permite que a energia passe
20	Materiais condutores são aqueles que passam corrente e os isolantes são os que não conduzem corrente
21	Condutores são aqueles que transmitem uma corrente como a maioria dos metais, os isolantes são aqueles com a capacidade de conter essas correntes
22	Materiais isolantes: são aqueles que oferecem grande oposição e passagem de cargas elétricas. Condutores: são materiais que possibilitam a movimentação de cargas elétricas
23	Isolantes eles sugam a carga e os condutores a distribuem
24	Condutores conduzem as cargas, e isolantes, impedem que as cargas se movimentem
25	Materiais isolantes são aqueles que não conduz eletricidade e materiais condutores conduz eletricidade
26	Condutor: facilita a movimentação de cargas; isolante: isola a movimentação de cargas elétricas
27	Isolantes não conduzem energia, condutor conduz energia
28	Condutores possibilitam a movimentação de cargas elétricas. Materiais isolantes são os que retardam a passagem de cargas elétricas.
29	Isolantes, isolam a energia; condutores são os que conduzem energia
30	Não sei
31	Condutores conduzem energia elétrica, já os isolantes, não
32	Os isolantes isolam a energia e os condutores conduzem
33	Condutor carrega energia, isolante não possui energia
34	Os materiais isolantes são aqueles que não transmitem energia, e os condutores são o contrário, já eles transmitem energia
35	Isolantes não conduzem energia, condutores conduzem
36	Materiais isolantes são baixos condutores de energia, já os condutores são o contrário
37	Isolantes são materiais usados para isolar a carga para que não haja choque, e condutor conduz a carga
38	Os condutores conduzem energia, enquanto os materiais isolantes isolam essa energia para que ela fique menor ou nula

39	Materiais isolantes são os que não atraem energia, já os condutores atraem energia
40	Que os condutores são um lugar onde as cargas elétricas vão e vem, e os materiais isolantes são onde elas ficam e sai de um por um devagar
41	Materiais isolantes não conduzem eletricidade e condutores conduzem
42	Os isolantes isolam a energia e os condutores conduzem

Fonte: os autores (2022)

Questão 7- O que acontece com dois corpos que apresentam cargas elétricas de mesmo sinal? E cargas elétricas de sinais contrários?

Quadro 6. Respostas dos alunos em relação a questão 7 do pré-teste

ALUNO	RESPOSTA
1	Se atrai/ Se repele.
2	No primeiro caso ela irá se afastar uma da outra, no segundo caso elas irão se unir, porque cargas diferentes se atraem.
3	Sinais iguais se repelem; sinais diferentes se atraem.
4	Se repele /Se atrai.
5	Mesmo sinais se repelem, sinais diferentes se atraem.
6	Se repelem/Se atraem.
7	A eletricidade vai ser rompida (sinais iguais), vai continuar funcionando normalmente (sinais diferentes).
8	Sinais diferentes irão se aproximar, sinais iguais não apresenta corrente.
9	Sinais iguais se repelem, sinais diferentes se atraem.
10	O mesmo sinal vai se repelir e sinal diferente vai se atrair.
11	Do mesmo sinal se repele, de sinais diferentes se atrai.
12	Mesmo sinal se separam, diferentes se juntam.
13	Cargas iguais se repelem e diferentes se atraem.
14	Sinais iguais se repelem, diferentes se atraem.
15	As de mesmo sinal se atraem, já as de sinais diferentes se repelem.
16	Quando os corpos apresentam cargas elétricas de mesmo sinal eles se repelem, e se os sinais forem diferentes os corpos se atraem.
17	Mesmo sinal se repelem, sinais diferentes se atraem.
18	Os dois corpos do mesmo sinal, se repelem e sinais diferentes atrai.
19	Cargas de mesmo sinal vão se repelir, cargas diferentes vão se atrair.
20	Com o mesmo sinal elas não tem totalmente força, quando as cargas são diferentes passa a ter uma eletricidade.
21	As cargas elétricas de mesmo sinal se repelem e as cargas de sinais opostos se

	atraem.
22	Quando eles são iguais acontece uma força de repulsão, não produzindo corrente.
23	Cargas iguais se repelem, e cargas diferentes se atraem.
24	Cargas diferentes se juntam e cargas iguais se separam.
25	Cargas de mesmo sinal vão se repelir e cargas de sinais diferentes vão se atrair.
26	Iguais: repele as cargas de volta, diferente: passa a corrente elétrica.
27	Mesmos sinais se afastam, sinais diferentes se atraí.
28	Do mesmo sinal se repele, sinais diferentes se atraem.
29	Sinais iguais ocorre uma repulsão, sinais diferentes se atraí.
30	Se repele, se atraí.
31	Elas se repelem. E as cargas de sinais diferentes se atraem.
32	Irão se repelir, de sinais diferentes se atraem.
33	Vai se repelir, depois vai se atrair.
34	Sinais iguais se repelem e sinais diferentes se atraí.
35	Elas se afastam, elas se atarem.
36	As do mesmo sinal se repelem e as de sinais diferentes se atraem.
37	Iguais repelem e diferentes atraí.
38	Sinais iguais não produzem energia, sinais diferentes sim.
39	Mesmo sinal, as cargas não são compatíveis, já os de sinais diferentes tem atração positivas e compatíveis.
40	As cargas de mesmo sinal se repulsam e vão pra longe e cargas de sinais diferentes se atraí.
41	Mesmo sinal se repelem, sinais diferentes se atraí.”
42	Corpos de cargas elétricas iguais se repelem e cargas elétricas de sinais diferentes se atraem.

Fonte: os autores (2022)

8- Qual sua definição para CAMPO MAGNÉTICO?

Quadro 7. Respostas dos alunos em relação a questão 8 do pré-teste

ALUNO	RESPOSTA
1	Aonde tem energia.
2	Ficam ao redor de materiais em corrente elétrica, se formam pela força magnética.
3	É uma área que exerce uma força sobre dois corpos.
4	Uma força eletromagnética delimitada dependendo da força que atraí materiais como o ferro.

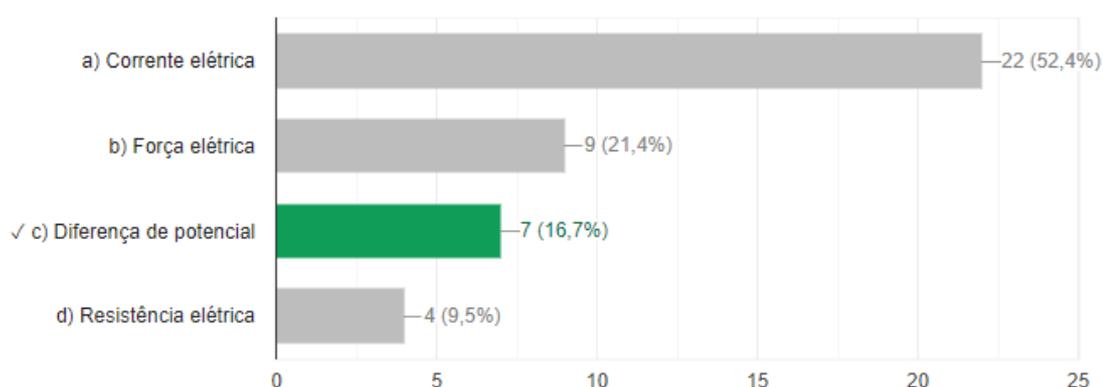
5	Quando dois corpos conseguem ser atraídos ou repelidos, através de uma força de campo.
6	É uma área de atração do ímã.
7	Não sei.
8	Quando dois corpos conseguem ser atraídos, sem contato, apenas através de uma força que possa existir, devido a natureza.
9	O campo e a área em que ocorre há um número, corpo que pode atrair ou repelir cargas.
10	Tem um polo sul e outro norte, que entre si se repele e em contato com outro se atrai.
11	Movimento de cargas elétrica.
12	Campo magnético é uma área contendo energia magnética ao redor de um corpo.
13	São ondas elétricas emitidas pela Terra.
14	Cercam materiais em correntes elétricas e são detectadas pela força que exercem sobre materiais ou cargas elétricas em movimento.
15	É a área onde o alcance dos polos pode se atraírem ou repelirem-se.
16	Campo que provém da força exercida entre dois ou mais corpos, sem que haja contato, por meio de uma corrente elétrica.
17	Força na que a uma atração quando possuem sinais diferentes e uma repulsão quando apresentam sinais iguais.
18	Campo que tem cargas positivas e negativas que tem atração de outros corpos.
19	É aquilo que permite que algo seja atraído ou se repelido.
20	Onde existe bastante eletricidade de cargas onde ocorre com o ímã onde eles são de polos diferentes eles se juntam.
21	É uma concentração de força magnética por uma volta de carga no espaço.
22	É a concentração de magnetismo que é criado em torno de uma carga magnética num determinado espaço.
23	É o espaço onde ocorre a atração magnética, ou a dispersão de dois objetos.”
24	É uma certa área onde há força magnética entre dois corpos.
25	Uma determinada área onde objetos metálicos ou outros ímãs são atraídos para dentro dele.
26	Circulam materiais em correntes elétricas, que atua sobre materiais magnéticos.
27	É um campo que apresenta vários tipos de cargas.”
28	É basicamente uma força que exerce sobre materiais magnéticos ou cargas elétricas.”
29	Ela só define sobre duas forças: atração e repulsão.
30	Não sei.
31	O campo magnético é a atração de ímãs com polos diferentes. Ex: se pegar um ímã com o polo norte e o outro com o polo sul, eles se atarem.

32	Atrai algo sem a necessidade de um contato muito próximo.
33	Serve para circulação de energia elétrica.
34	É até onde o ímã consegue se atrair.
35	É uma força de campo natural, que consegue atrair ou repelir dois corpos.
36	Delimitação de espaço com forças magnéticas opostas, ex: N e S.
37	É quando se colocam polos diferentes entre os polos irão formar um campo magnético.
38	Campo onde dois corpos conseguem ser atraídos ou repelidos através da magnitude.
39	É a área que o ímã faz ao seu redor.
40	É um campo com força magnética aonde consegue atrair dois corpos sem chegar muito perto.
41	É um campo criado através de ímãs, com forças que se repelem ou se atraem.”
42	Não sei.

Fonte: os autores (2022)

Questão 9 – Assim como nosso corpo necessita de energia para realizar atividades, e essa energia provém dos alimentos, assim também as cargas elétricas dentro de um condutor precisam se movimentar dentro de um campo para transportar a energia entre dois pontos distintos. Essa energia é denominada:

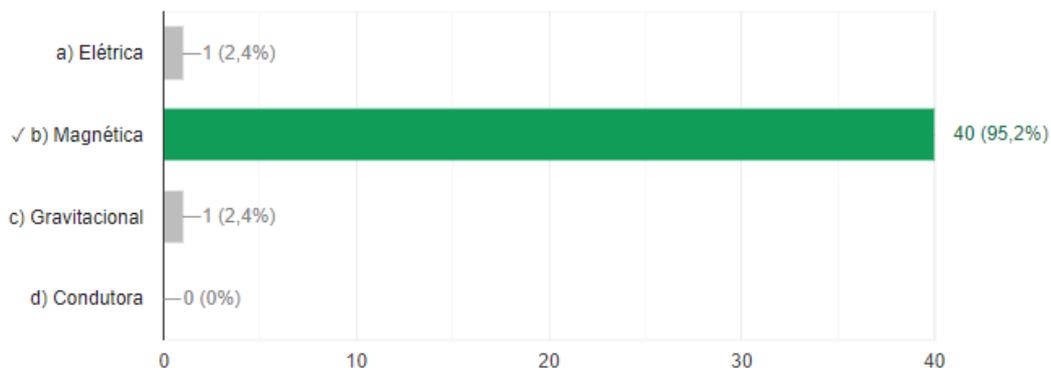
Figura 34. Resultado da questão 9 do pré-teste



Fonte: os autores (2022)

Questão 10 – Quando dois corpos conseguem ser atraídos ou repelidos, sem a necessidade de um contato, apenas através de uma força de campo que possa existir, devido à natureza do material que é formado, essa força recebe o nome de:

Figura 35. Resultado da questão 10 do pré-teste

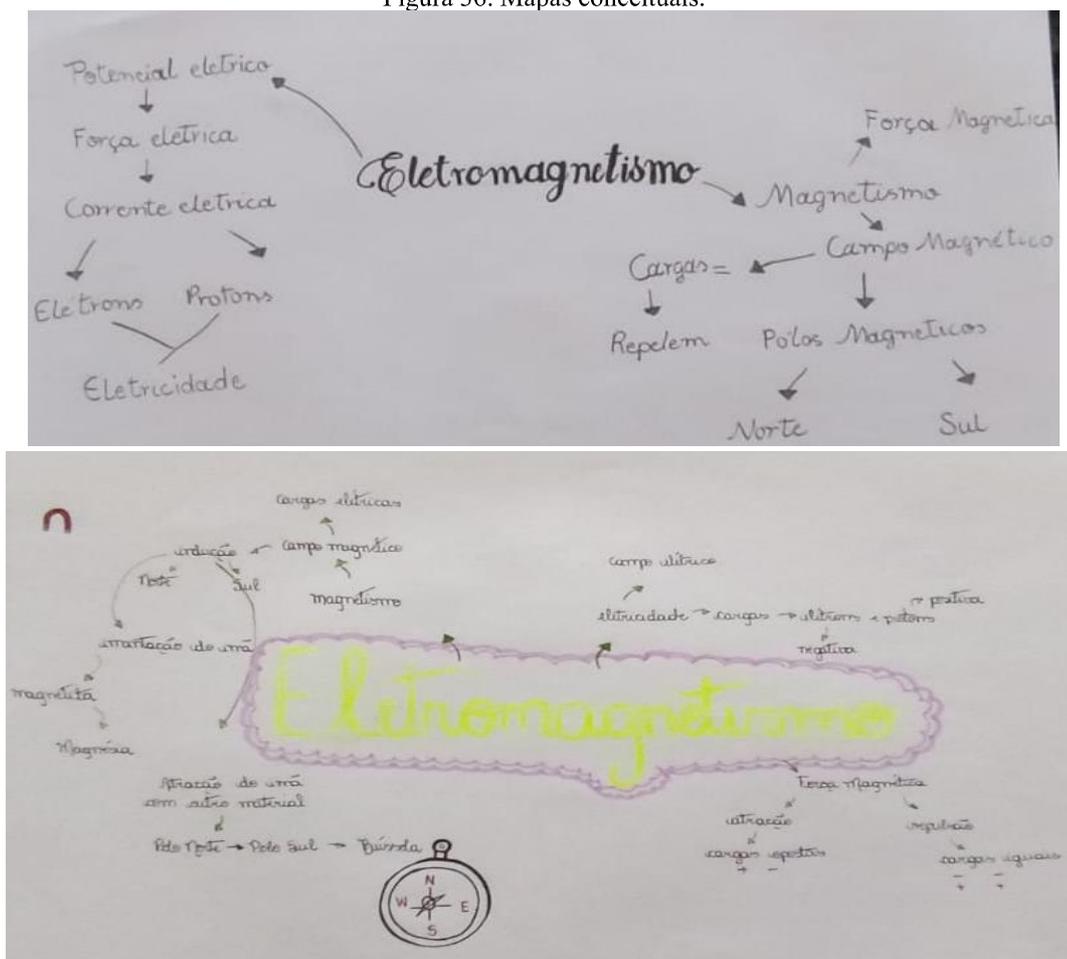


Fonte: os autores (2022)

O questionário acima serviu como um “termômetro” de conhecimentos, medindo a compreensão já adquirida e os saberes ainda necessários para dar continuidade a sequência de atividades. Analisando as respostas, nenhum aluno errou todas as questões do questionário, o que mostra que existiam subsunçores em certo grau, conhecimentos esses adquiridos no primeiro semestre letivo. É visível que nenhum aluno acertou todas as questões, evidenciando uma deficiência na compreensão adequada dos assuntos já ministrados.

Buscou-se então discutir os resultados obtidos através do questionário, apresentando as correções de todas as questões do pré-teste, pontuando dúvidas e erros, podendo ainda proporcionar debates como forma de sistematizar os conteúdos estruturantes que norteiam o entendimento do fenômeno. Ainda como proposta para o primeiro encontro, foram sugeridos e construídos mapas conceituais que estabelecessem essa relação entre os fenômenos elétricos e magnéticos, avaliando a abrangência dos subsunçores mostrados, e eficiência para iniciação do estudo em questão. A partir dos mapas conceituais confeccionados e de relatos percorridos pelos estudantes no momento da escrita dos relatórios, mostrados na Figura 36, ficou claro que os mapas conceituais são uma excelente ferramenta didática que facilita a fixação do conteúdo. Tal estratégia permite uma melhor compreensão dos conteúdos, tornando-se uma forma “fácil” de assimilação do mesmo.

Figura 36. Mapas conceituais.



Fonte: alunos da 3ª série -ensino médio

Tendo realizado esse primeiro momento, partiu-se para o segundo encontro, no qual foi estabelecida uma ação motivacional sobre o tema. Para implementação dessa ação foi proposto uma situação problema que servisse como organizador prévio. Ao projetar o filme “O menino que descobriu o vento” (SUFYAN ZAHID, 2019) buscou-se, além de evidenciar uma história de superação, persistência diante da miséria de uma população, retratando a realidade de um menino africano, mostrar a revolução do conhecimento científico através do estudo da Física. O garoto, no filme, utiliza um dínamo, que converte energia mecânica em energia elétrica, alimentando assim uma bateria. O objetivo para utilização do dispositivo é a produção de corrente elétrica a partir do movimento do ímã existente dentro do dispositivo, despertando nos estudantes o entendimento do porquê a lâmpada da bicicleta acendia somente quando ela estava em movimento, servindo assim de ponte cognitiva para o novo conhecimento.

Em seus relatórios, os estudantes relatam que a passagem do filme foi primordial para uma interpretação melhor do fenômeno abordado, mencionando o dínamo, um gerador elétrico capaz de converter a energia cinética da ação mecânica do vento em energia elétrica, concluindo

ainda que a compreensão do fenômeno de indução que relaciona a mudança de fluxo magnético, sendo um aspecto positivo para o estudo abordado.

O terceiro encontro foi o momento em que o conteúdo da sequência didática começou a ser explorado de maneira mais formal, no qual os alunos interagindo com ímãs e bússolas, observaram na prática a relação estabelecida entre força magnética e campo magnético. Neste momento os conceitos deixaram de ser apenas abstratos. Realmente, o despertar pelo interesse foi notório. Os estudantes expressavam comentários, como: “olha que legal, a agulha aponta sempre para a mesma posição, mesmo girando a bússola”; “o uso da bússola para explicar o fenômeno de campo magnético ficou bem claro”; “nesse momento fica mais claro a relação entre força e campo magnético”. A interatividade fez com que a aula fluísse e atingisse o objetivo esperado.

Diálogos e aulas expositivas motivaram os estudantes à descrição das atividades experimentais, buscando mostrar os fenômenos, relacionando-os aos conhecimentos no contexto científico. As exposições realizadas inicialmente com ímãs, bússolas e outros materiais foram interligados às aulas teóricas, levando os estudantes a estabelecerem a compreensão de forma mais significativa. A Figura 31 mostra os estudantes manuseando os dispositivos em sala de aula. Ao término do terceiro encontro, já se inicia planejamentos para o próximo passo da aplicação da UEPS.

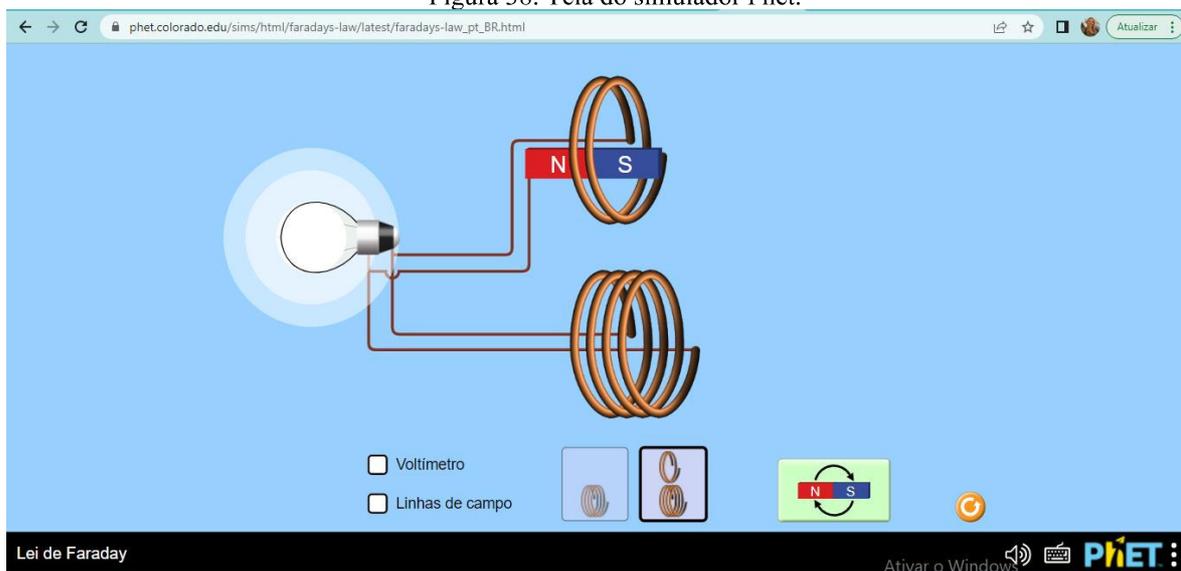
Figura 37. Estudantes manuseando bússolas e ímãs em sala de aula.

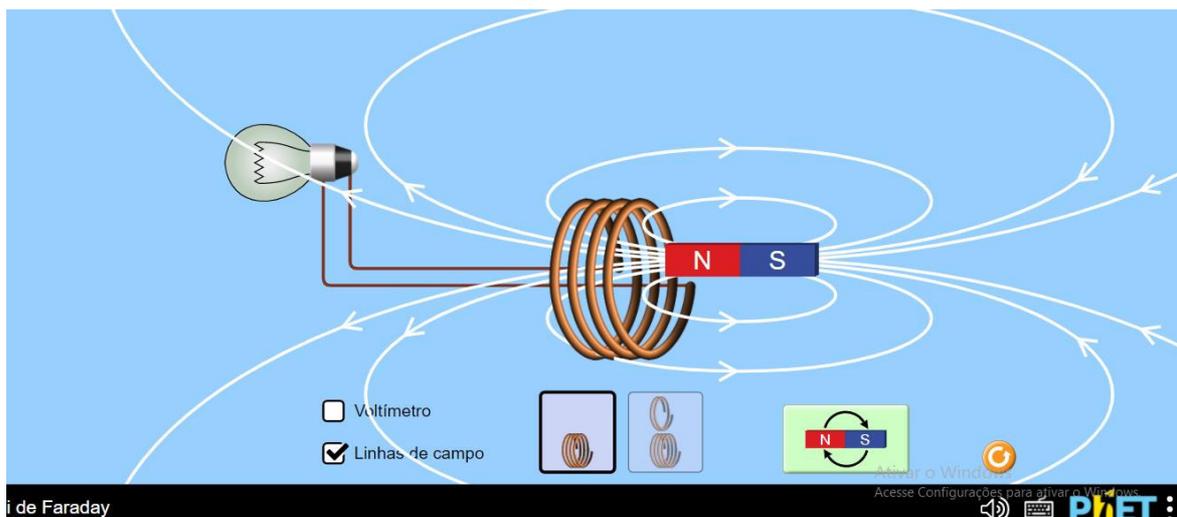


Fonte: os autores (2022)

O quarto encontro foi o momento de dar continuidade a exposição formal do conteúdo, focando em tópicos fundamentais para entendimento do assunto. A proposta de trabalhar com o simulador *Phet*, uma tecnologia digital de informação, iria consolidar conceitos já abordados anteriormente, propondo uma aprendizagem mais significativa, objetivando que os estudantes após esse encontro mostrassem evidências da variação de um campo magnético a partir do momento que o simulador mostrava sua variação de fluxo através do movimento do ímã em relação as espiras. Deveriam também observar que o sentido da corrente induzida mudava dependendo da aproximação ou afastamento do ímã em relação à bobina. Nessa etapa de aplicação da UEPS os alunos conseguiram obter uma melhor assimilação do conteúdo. Foram feitos comentários como: “o visual melhora o aprendizado”, “... nos possibilitou aprender mais como funciona a Lei da indução de Faraday”. Observou-se que a relação e questionamentos por parte dos estudantes tornou o momento super interativo, social e facilitador da aprendizagem. Nesse quarto encontro objetivou-se relacionar aspectos matemáticos da lei a partir do simulador.

Figura 38. Tela do simulador Phet.





Fonte: simulador Phet Colorado (2021)

A motivação e o envolvimento em cada etapa subsequente evidenciam uma observação mais intensa por parte dos alunos, enquanto o conteúdo vai sendo ministrado de acordo com o que fora planejado. No quinto encontro, o conteúdo efetivou-se explorando a aula com foco em pontos fundamentais para o conteúdo de indução magnética. Os estudantes acompanharam a explanação do assunto, cujo objetivo era conduzir o aluno à compreensão das aplicações do fenômeno da indução magnética. Esse foi o momento em que a descrição puramente matemática do efeito deu lugar à experimentação, possibilitando melhor entendimento do fenômeno. Para tanto, foram intercalados experimentos simples com materiais de fácil acesso, mas que explicitavam os fundamentos do conteúdo. Foram notórias a participação e envolvimento dos estudantes. O ambiente da sala de aula foi contagiado pelo envolvimento e contribuição na estruturação do conteúdo. A linguagem matemática relacionada e evidenciada através dos fenômenos começava a ser traduzida a partir das demonstrações. Os experimentos construídos, juntamente com os estudantes, foram meramente qualitativos, permitindo maior ancoragem do fenômeno. A cada resultado positivo, a vibração tomava de conta; muitos tiveram que repetir procedimentos para que suas construções fossem exitosas. Porém, ao término, frases como: “nossa, que massa”, “não acreditava que isso podia dar certo”, “isso é muito legal”, foi tornando-se a certeza de um conhecimento assimilado com cunho significativo.

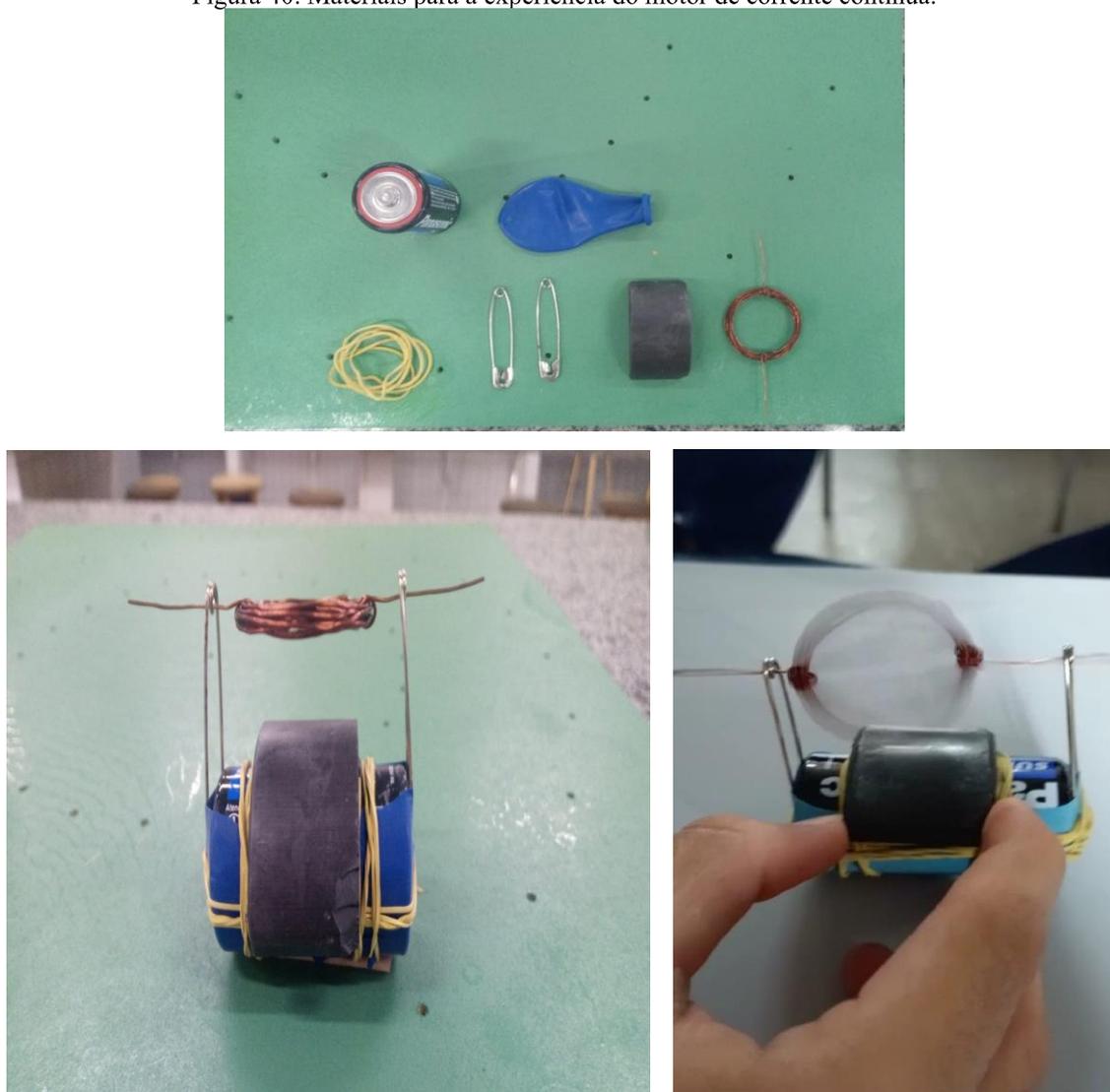
Figura 39: Estudantes montando as experiências do 5º encontro.



Fonte: os autores (2022)

A primeira atividade experimental apresentada foi o motor caseiro de corrente contínua utilizando o fenômeno de indução, manuseando uma espira para visualização de seu movimento rotatório por meio da variação de fluxo. Esta experiência é baseada na Equação 42, sendo a área efetiva A_{ef} da espira o parâmetro a ser variado. A Figura 40 ilustra os materiais e o dispositivo montado e em pleno funcionamento. Nesse experimento, os alunos conseguiram compreender de forma clara os fundamentos do funcionamento de um motor elétrico de corrente contínua. Em suas experimentações e análises o conceito de repulsão ficou evidente. O giro da bobina surgiu em alguns grupos após algumas tentativas devido à dimensão de alguns materiais utilizados, e/ou montados de forma inadequada. No final, a avaliação verbal foi muito positiva. Embora os materiais usados fossem bastantes simples, o fenômeno da indução ficou bastante evidente para os estudantes.

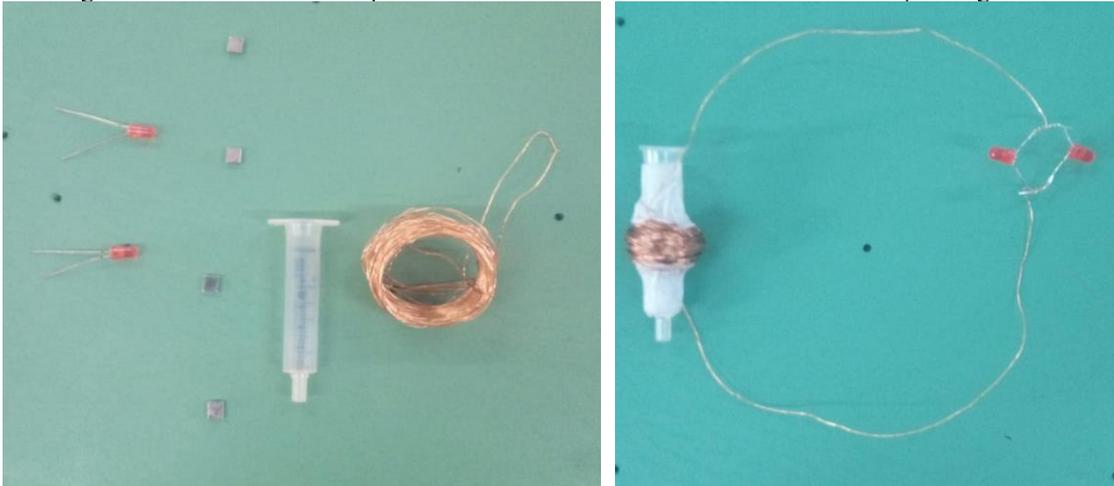
Figura 40. Materiais para a experiência do motor de corrente contínua.



Fonte: os autores (2022)

A segunda atividade experimental abordou a confecção de um gerador de energia elétrica utilizando a agitação de dois eletroímãs inseridos em uma seringa, cuja movimentação permitiu a indução de uma corrente elétrica no circuito. O objetivo era acender um o led conectado ao circuito. Levando a compreensão de que, a energia gerada no circuito provém da movimentação mecânica do ímã, sendo esta convertida em energia elétrica.

Figura 41. Circuito montado para ascender um led usando o fenômeno da indução magnética.



Fonte: os autores (2022)

A terceira atividade experimental incluiu demonstração da Lei de Lenz através do freio de indução magnética. Para tanto, foram utilizados dois tubos, um de pvc e outro de alumínio, com lançamento de super ímãs em seu interior e evidenciando as forças de atração e repulsão no momento do deslocamento do ímã.

Os estudantes deixaram dois ímãs caírem ao mesmo tempo por dentro dos tubos e observaram o tempo de queda. Claramente o ímã que caiu pelo tudo de PVC chegou ao chão primeiro, pois estava sujeito somente à força gravitacional. Os estudantes começaram a discutir a razão da demora na queda do ímã que desceu pelo tubo de alumínio. “Professora, deve ser porque o tubo de pvc é um isolante, por isso nada acontece e o ímã cai rapidinho”, “eu acho que tem algo freando esse ímã aí dentro”. Aos poucos foram percebendo que o campo magnético estava diretamente relacionado com a experiência apresentada. Então a conexão com a geração de energia que acontece nos geradores foi claramente explicada quando relacionaram que por isso que necessitava de fatores externos para movimentar os “sistemas” de geração de energia, a água nas usinas hidrelétricas, o ar nas usinas eólicas, e assim sucessivamente. Outro aluno lembrando de nosso organizador prévio, o filme – O Menino que descobriu o vento, disse, “agora entendi porque a lâmpada da bicicleta só acendia quando o pedal girava, a energia só é gerada por causa da variação do campo magnético.”

Figura 42. Estudantes executando experiência com ímãs caindo em tubos de PVC e de metal.



Fonte: os autores (2022)

A quarta e última atividade experimental buscou mostrar a orientação de um campo magnético, utilizando limalha de ferro sobre uma bandeja. Os estudantes se empolgaram com a disposição do pó de ferro e o contato com o ímã no momento do seu manuseio. Alguns ainda falaram assim: *“O interessante é que eles (ímãs) não necessitam de um contato direto para movimentação do pó de ferro, não é professora? Outro, empolgadíssimo disse “Que massa! Muito legal o que o ímã, mesmo embaixo da bandeja, pode fazer com esse pó de ferro. Aí com certeza acontece a interação de uma força”*.

Figura 43. Estudantes executando experimento com limalha de ferro.

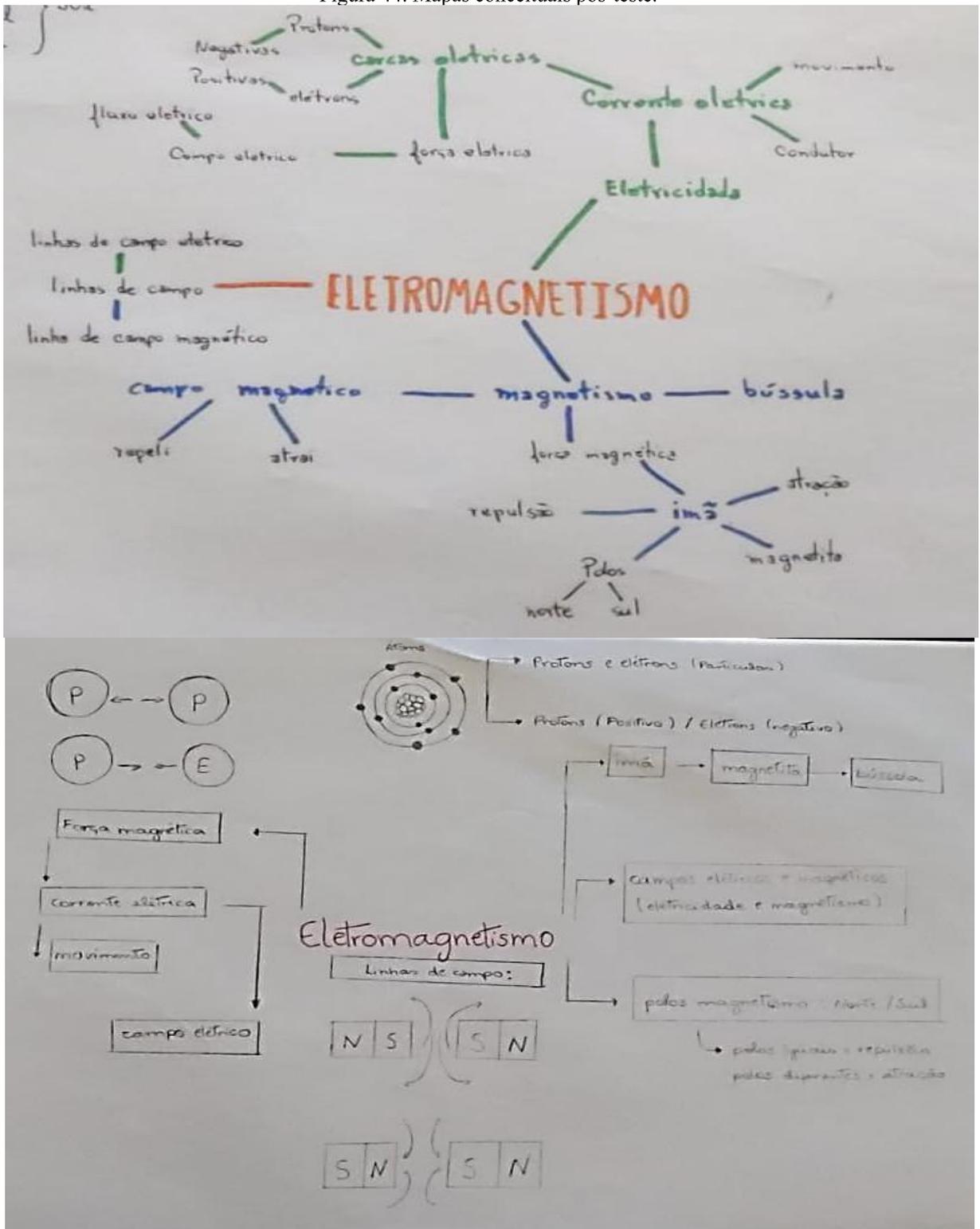


Fonte: os autores (2022)

O sexto e último encontro teve a finalidade de saber a opinião dos alunos a respeito da utilização da UEPS como estratégia metodológica para estudo do fenômeno, objetivando uma melhor compreensão do conteúdo, observando se o assunto foi bem assimilado. Para tanto, foi aplicado um questionário pós teste. Os quarenta e dois alunos que participaram da pesquisa e que estudam na turma de 3^a série do ensino médio da escola responderam as dez perguntas deste questionário, que analisou o aprendizado adquirido e a eficiência da UEPS.

Além do questionário, os alunos entregaram um relatório de cunho científico onde puderam expor suas análises acerca do estudo e estratégia utilizada. Ao término puderam elaborar novos mapas conceituais acerca do assunto de eletromagnetismo e mostraram em suas estruturas maior domínio e sequenciamento de conceitos.

Figura 44. Mapas conceituais pós-teste.



Fonte: alunos da 3ª série - ensino médio (2021)

Figura 45. Print de relatórios entregues pelos alunos ao término da aplicação da UEPS.

Relatório das metodologias utilizadas para o ensino-aprendizagem do conteúdo INDUÇÃO ELETROMAGNÉTICA.

Objetivos da Atividade:
A indução eletromagnética ocorre quando a variação de um campo magnético nas proximidades de um condutor causa-lhe o surgimento de uma força eletromotriz induzida. Ela é descrita qualitativa e matematicamente pela lei de Faraday-Lenz. Esse fenômeno explica o surgimento da força eletromotriz induzida em bobinas condutoras inseridas em regiões dotadas de campo magnético variável, podendo ser essa variação de módulo, direção ou sentido.
Podemos encontrar a indução eletromagnética no nosso dia a dia, como por exemplo nos geradores de corrente elétrica, como Gerador Luminoso e placas solares, e transformadores de segurança dos equipamentos que estão sendo alimentados. As aulas experimentais, são de suma importância para permitir a visualização da teoria na prática, e de maior entendimento do conteúdo.

Introdução:
Para as aulas de indução eletromagnética, foi utilizada as seguintes metodologias, para melhor entendimento:
Aplicação questionário (pré-teste)

Professora: **Aline Cristine Gomes da Silveira**

Relatório de Física

O objetivo deste relatório é evidenciar o desenvolvimento das possíveis condições de aprendizagem do conteúdo na aula de Física ministrada pela professora Aline em sala de aula e também em laboratório, usando o quadro, data show e objetos do laboratório como: **ímãs, pó de ferro, capacitores, resistores entre outros.**

Iniciamos com o pré teste que tinha finalidade observar o conhecimento sobre magnetismo e eletricidade, posteriormente fizemos um mapa conceitual, utilizamos um simulador PHET (um aplicativo que simula equações matemáticas e físicas mostrando além da equação como ela funciona e sua aplicabilidade) mostrando que o ímã quando em movimento através de uma espira formam uma corrente eletromagnética.

Aulas na **Sala e Laboratório:**

- Aulas Teóricas e Práticas
- Mapa Conceitual
- Diálogo
- Matemática

O filme **"O menino que descobriu o vento":**

- Dinamo
- Energia Eólica
- Movimento

O **pó de ferro** junto com o **ímã** foi utilizado para mostrar como são formados os campos eletromagnéticos, o pó quando colocado sobre uma bandeja e o ímã posto embaixo mostra que polos iguais se repelem e polos iguais se atraem. A rotação é um tipo de energia chamada **energia mecânica.**

Uma outra aula de laboratório foi a confecção de um **motor elétrico** feito pelos alunos instruídos pela professora, o motor consistia em mostrar como funciona por exemplo um motor de ventilador porém de forma reduzida, e também um **gerador elétrico** feito com: **Seringa, pilhas, ímã, fio de cobre e led.**

Se o ímã ficar parado dentro de uma espira não há produção de energia elétrica. **Fluxo Magnético** consiste na movimentação do ímã dentro da bobina se o mesmo estiver em repouso não há eletricidade, quanto mais espiras maior é a luminosidade.

Mapa conceitual fizemos uma relação entre **eletricidade** e **magnetismo** usando palavras chaves para mostrar que os dois estão interligados.

1. INTRODUÇÃO

Em sala de aula o assunto indução eletromagnética foi iniciado por meio de um pré-teste com intuito de avaliar o conhecimento dos estudantes a respeito do tema, esse pré-teste servia para medir a noção que temos sobre eletricidade e o magnetismo.

Com outras metodologias de ensino, tivemos aulas com o simulador Phet Interactive Simulations, onde visualizamos simulações de como ocorria as interações na física, um exemplo disto é sobre a espiral, o ímã e uma lâmpada, que quanto maior for a quantidade de espirais, maior vai ser a energia passando para a lâmpada, e quanto menor a quantidade de espirais, menor será a quantidade de energia, sendo importante ressaltar que se o ímã estiver em repouso não haverá produção de energia elétrica, sendo necessário a existência de variação do fluxo magnético. (Fluxo magnético: movimentação do ímã dentro da bobina, se o ímã estiver em repouso não existe eletricidade).

Foi mostrado também durante a aula a relação entre dois ímãs que tem polos iguais onde ocorre um fenômeno de repulsão e quando os polos são diferentes há uma atração entre si. Em outra aula no laboratório aprendemos sobre a confecção de um motor elétrico que funciona a partir da repulsão entre dois ímãs, um natural e um eletroímã, na qual tinha o objetivo de visualizar como é convertido energia por meio de indução, transformando a energia em magnetismo nas bobinas fazendo elas girarem e essa rotação cria energia mecânica que também pode ser convertida de volta em energia elétrica, ao captar a energia mecânica da rotação das bobinas para converter em energia elétrica.

Os geradores elétricos convertem energia não elétrica como por exemplo a energia mecânica em energia elétrica, sendo que a tensão gerada pelo gerador elétrico depende da força eletromotriz menos a resistência multiplicada pela corrente.

Em sala de aula foi trabalhado as aulas teóricas, diálogo, e a matemática dos conceitos abordados.

Nas aulas teóricas foram abordados sobre os conceitos e funções do conteúdo de indução, além disso foram feitas atividades de resolução e demonstrações de como acontece tal fenômeno tanto na física como no cotidiano.

Assistimos ao filme "O menino que descobriu o vento" sendo possível perceber a relação que ele tem com a física, pois depois que o William teve contato com o estudo, ele descobriu como os motores e a eletricidade funcionavam, porém ele só veio despertar a curiosidade quando mexeu na bicicleta do professor, girando o pedal viu que o dínamo acendia o farol da bicicleta, mas quando parava de girar o pedal não tinha mais nenhuma luminosidade saindo do farol. E quando ele leu um livro de como produzir a energia descobriu que um moinho poderia bombear água e gerar energia. Foi assim que William salvou da seca a aldeia em que vivia ao montar um moinho de vento usando o dínamo que possibilitou bombear água do poço para ser utilizada na irrigação da plantação. (Dínamo: é um aparelho que utiliza energia cinética para gerar energia elétrica por meio de um processo chamado indução eletromagnética descoberta por Michael Faraday).

Relatório

Titulo: Indução Eletromagnética

Objetivo = Quando a variação de um campo magnético nas proximidades de um condutor causa o surgimento de uma força eletromotriz induzida

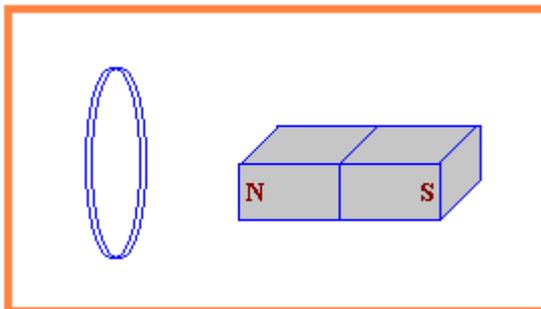
- Produzir energia elétrica utilizável
- Aplicar através dos experimentos sobre indução eletromagnética nos dois meios entendimentos.
- Compreender sobre Indução Eletromagnética através dos exercícios propostos e das aulas experimentais me fez entender que a indução está relacionada ao movimento de uma corrente elétrica por meio de um condutor imerso em um ímã existente campo magnético, no momento em que se dá a variação do fluxo que atrairá tal campo.

Discussão = Aplicação de uma prova, além de testes mais aprendizados sobre o assunto.

- Aula na sala (experimentos e demonstrativos) com um ímã, sem uso, e ímã parado não se cria a luz, e com o ímã em movimento, sim.
- Apresentação do filme "O menino que descobriu o vento" no filme, o objeto usa um método de energia para salvar sua comunidade, esse método se chama: "Energia Eólica". Ele relaciona com a física por usar de elementos da natureza e elementos que estão dentro de estudo em vida física.
- Como ele usa o estudo dos elementos da física:

Questionário pós e avaliação da UEPS

1- As figuras abaixo representam uma espira e um ímã próximos.

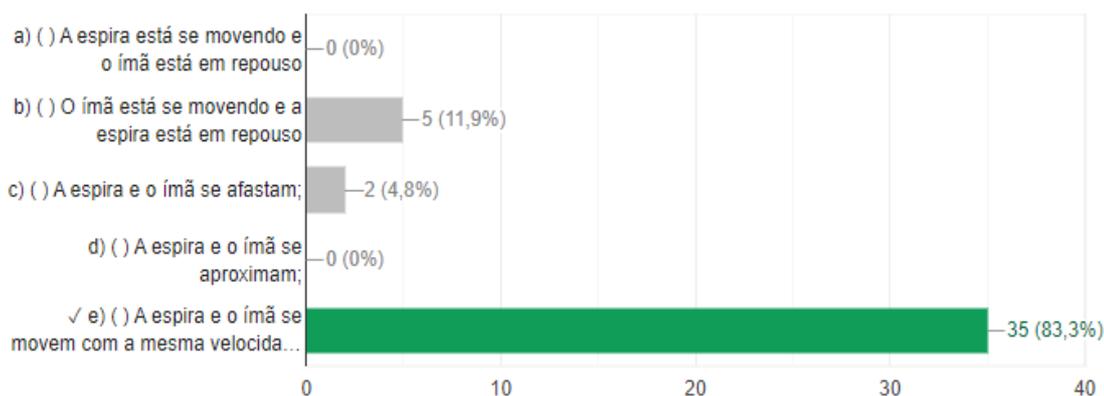


Fonte: coladaweb (2020)

Das situações seguintes, indique a que não corresponde à indução de corrente em espira.

- a) A espira está se movendo e o ímã está em repouso;
- b) O ímã está se movendo e a espira está em repouso;
- c) A espira e o ímã se afastam;
- d) A espira e o ímã se aproximam;
- e) A espira e o ímã se movem com a mesma velocidade para a direita.

Figura 46. Resultado da questão 1 do pós-teste



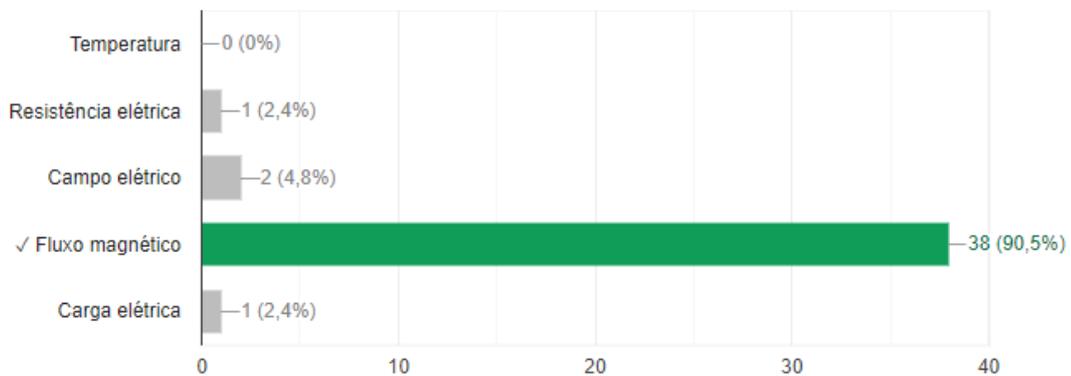
Fonte: os autores (2022)

Nesta primeira questão os alunos deveriam indicar qual situação não corresponderia à indução de corrente na espira. Dos 42 alunos estudantes, 35 acertaram a resposta, correspondendo a 83,3% do total. A percepção em relação a interpretação foi valiosa, uma vez que fica evidente que o estudante consegue entender a relação da indução magnética com a variação do fluxo.

2- O fenômeno da indução magnética se faz presente em diversos equipamentos que utilizamos no nosso cotidiano. Ele é utilizado como forma de gerar energia elétrica e a base para sua explicação é o aparecimento de uma *fem* (força eletromotriz) entre as extremidades de um condutor. O que é necessário para que essa força surja?

- a) Temperatura
- b) Resistencia elétrica
- c) Campo elétrico
- d) Fluxo magnético
- e) Carga elétrica

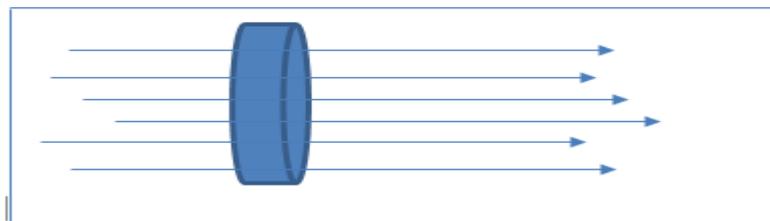
Figura 47. Resultado da questão 2 do pós-teste



Fonte: os autores (2022)

Em relação as respostas apresentadas pelos estudantes, 38, dos 42, manifestaram como correta a alternativa “d”, relacionando que o fator necessário para que exista a força, sendo a presença da variação de fluxo magnético. O percentual de acerto de mais de 90% demonstra um aprendizado mais efetivo por parte dos estudantes.

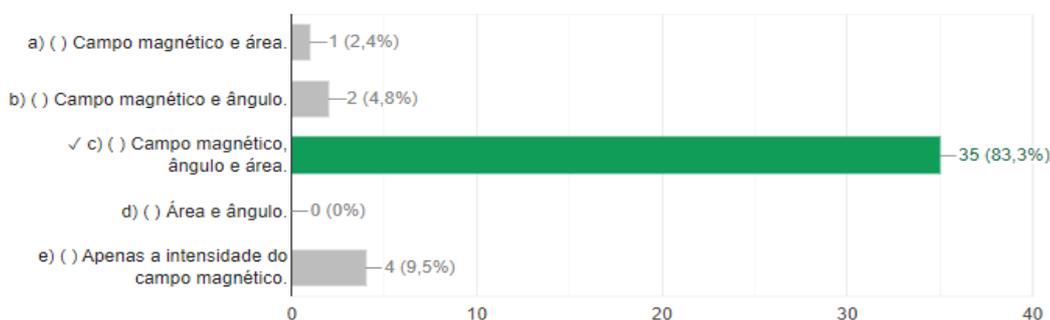
3- Objetivando encontrar o fluxo magnético sobre uma certa região, alguns fatores são determinantes. Mediante a ilustração abaixo, relacione aqueles que influenciam diretamente no seu resultado.



Fonte: os autores (2022)

- a) Campo magnético e área.
 b) Campo magnético e ângulo.
 c) Campo magnético, ângulo e área.
 d) Área e ângulo.
 e) Apenas a intensidade do campo magnético.

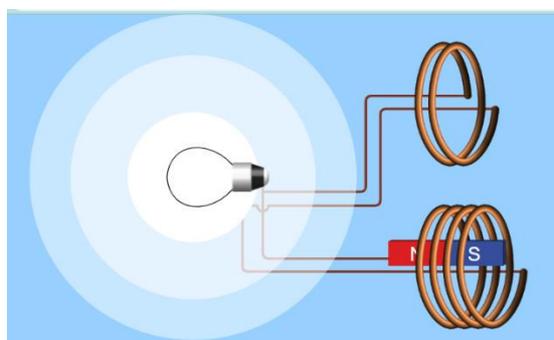
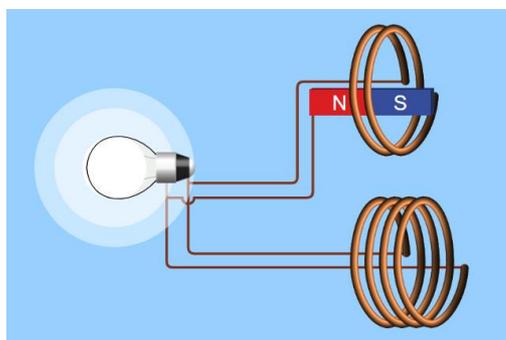
Figura 48. Resultado da questão 3 pós-teste



Fonte: os autores (2022)

Nesta questão mais de 83% das respostas foram corretas, evidenciando que os estudantes entenderam os conceitos relacionados ao fluxo magnético.

4- A Lei de Faraday enuncia que a força eletromotriz é resultado de uma variação de fluxo magnético em um certo intervalo de tempo. Na imagem abaixo, o que foi necessário para que a lâmpada acendesse? Por que as lâmpadas têm luminosidades diferentes?

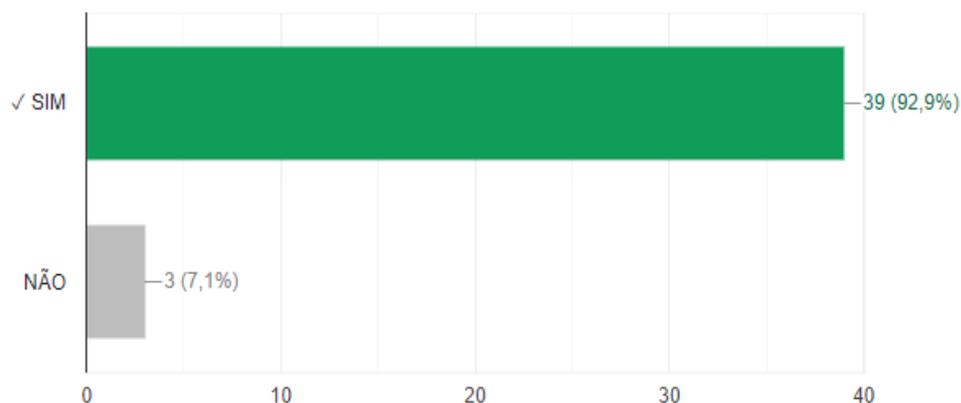


Para solucionar essa questão os alunos observaram e relataram claramente a relação do movimento do ímã diante da espira. Algumas respostas são registradas a seguir. “se o ímã ficar parado não haverá energia para ligar a lâmpada”; “o que produz eletricidade é a movimentação do ímã, ou seja, a variação do fluxo que proporciona a força”; “professora,

isso parece com o experimento do gerador que fizemos com o LED – para acender tem que sacudir o ímã na seringa”. E assim os alunos foram demonstrando o entendimento sobre a causa da corrente induzida. Dos 42 alunos envolvidos apenas 2 não souberam falar sobre a simulação. Quanto a segunda indagação, eles logo relacionaram a luminosidade com o número de espiras associadas, o que me deixou muito satisfeita com o resultado.

5 - O assunto estudado, INDUÇÃO MAGNÉTICA, apresenta conexão com seu cotidiano?

Figura 49. Resultado da questão 5 pós-teste



Fonte: os autores (2022)

A resposta dos estudantes para essa questão foi exatamente o esperado. Em seus comentários foi perceptível o entendimento em relação a vinculação do conteúdo com o cotidiano. A maioria comentou a aplicação do conteúdo em relação aos geradores de corrente elétrica relacionando sua produção de energia com a aplicabilidade nas residências em ligar os vários aparelhos (televisão, geladeira, ventilador, entre outros), aos transformadores de energia e motores elétricos. 92,9% dos alunos estabeleceram conexão do conteúdo de Indução Magnética com atividades diárias. Ainda elencaram a consequente evolução tecnológica a partir de estudos que nos levam ao conhecimento de um fenômeno de tanta aplicabilidade.

6 – Concluimos nessa etapa uma sequência de aulas que nos possibilitou estudar o fenômeno de indução magnética. Você compreendeu o fenômeno? Argumente.

Quadro 8. Respostas dos alunos em relação a questão 6 do pós-teste

ALUNO	RESPOSTA
01	Sim. Ele é utilizado como forma de gerar energia elétrica.
02	Sim. A variação magnética ocorre quando tem uma variação de campo magnético.
03	Sim. Entendemos a geração de energia através de campo magnético.
04	Sim. Entendi que um fenômeno que origina a produção de uma força eletromotriz devido a presença do campo magnético.
05	Sim. Ele ocorre quando há uma variação no campo magnético, atuando nas proximidades de um condutor para gerar energia.
06	Sim. É a geração de energia por causa da variação do fluxo magnético.
07	Sim. Ocorre quando se produz energia a partir da presença do campo magnético.
08	Sim. A professora explicou bem, mostrando a aplicabilidade no cotidiano.
09	Sim entendi que o fenômeno gera energia através de um campo criado por um ímã.
10	Sim. Como a energia é produzida pela movimentação contínua do fluxo magnético.
11	Não.
12	Sim. É uma variação de fluxo magnético próximo a um condutor fazendo surgir energia elétrica
13	Sim. É quando surge uma força eletromotriz por causa da variação de fluxo magnético.
14	Não
15	Sim. É a variação de um campo magnético produzindo energia elétrica.

Fonte: os autores (2022)

Nessas argumentações apresentadas, os estudantes evidenciaram a percepção do fenômenos e manifestaram a facilidade de se adquirir o aprendizado diante da sequência de atividades diferenciadas desenvolvidas; apenas 3 dos 42 alunos pesquisados comentaram não conseguir compreender e relacionar o estudo do fenômeno. O envolvimento, segundo os alunos, permitiu uma observação minuciosa e de fácil compreensão.

7 – Quais aulas ou métodos utilizados que você destacaria ter sido essencial para aprendizagem do conteúdo?

Quadro 9. Respostas dos alunos em relação a questão 7 do pós-teste

ALUNO	RESPOSTA
01	Considero que foram as aulas de laboratório e simulações.
02	Gostei muito da experiências e explanação do conteúdo em sala.
03	As simulações e o filme, junto com as experiências me fez entender melhor.
04	O filme foi maravilhoso junto com os experimentos.
05	Gostei de cada uma das aulas, mas as experiências foi massa.
06	Professora, foi tudo maravilhoso, entendi de uma forma fácil.
07	O fenômeno da indução ficou bem fácil de ver através das aulas de laboratório e as simulações, junto com as explicações em sala.
08	Foi muito bom trabalhar esse assunto com tanta coisa diferente, mas gostei mesmo do filme e das experiências.
09	As experiências.
10	O simulador junto com o filme e as aulas de montar experimento foi ótima.
11	Aulas de laboratório.
12	Prática de laboratório.
13	As aulas práticas, trabalho em equipe.
14	Aulas teóricas, resolução de questões e experimentos.
15	Filme e experimentos.
16	Práticas experimentais e simulações.
17	Práticas laboratoriais e aplicabilidade no dia a dia.
18	Aula prática de laboratório.
19	Aulas de laboratório que foi essencial para entender o conteúdo.
20	Todas foram eficaz.

Fonte: os autores (2022)

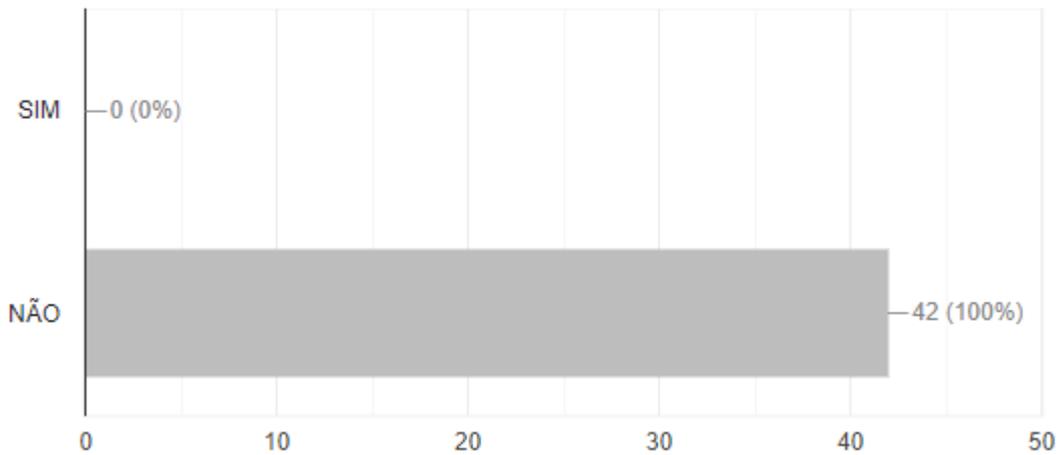
No que se refere aos métodos utilizados durante a sequência, foram elencados com mais intensidade, acarretando 100% de resultados, as aulas práticas, onde pudemos realizar em sala os experimentos simples de cunho qualitativo, mas que demonstram de uma forma mais simples o fenômeno; outros dois métodos que mereceram destaque foram a explanação do filme como organizador prévio, permitindo uma visão geral do assunto e a simulação associada à matematização, analisando todos os resultados, os estudantes demonstraram em suas respostas a importância de aulas diferenciadas que estimulem a participação e trabalho em equipe.

8 – A Sequência Didática proposta se assemelha ao modelo de aprendizagem que costuma estudar?

() SIM

() NÃO

Figura 50. Resultado da questão 8 pós-teste



Fonte: os autores (2022)

De forma unânime, os alunos responderam que NÃO. A informação nos relatórios ainda consta que os professores desenvolvem metodologias diferenciadas em algumas aulas, porém não uma sequência de metodologias que buscam potencializar o aprendizado em vários âmbitos diferentes. Acrescentando ainda que a implantação da UEPS foi algo inovador e que despertou bastante a curiosidade.

9 – Faça um breve relato considerando pontos positivos e/ou negativos de todas as experiências que participaram da sequência.

Formidavelmente nenhum aluno apontou aspectos negativos, pelo contrário, cada nova etapa da implantação da sequência eles já ficavam ansiosos pela seguinte, e empolgados levando-os a comentários e discussões acerca de cada novo momento. Eis algumas respostas fornecidas no momento do questionário:

Aluno 1 – “Tenho certeza de que agora não só para mim, mas como para os demais alunos, as aulas e a forma como foi conduzida pela professora o aprendizado do conteúdo, ficou muito mais fácil.”

Aluno 2 - “As aulas me ajudaram mais a compreender o assunto deste período, tive grande aprendizagem, onde pude estabelecer uma linha de conhecimento.”

Aluno 3 – “O ensino desse conteúdo foi de grande destaque para a turma fazendo assim desenvolvermos habilidade de calcular e exercer práticas abordadas em laboratórios no dia-a-dia.”

Aluno 4 – “A metodologia utilizada foi muito suficiente para o ensino-aprendizagem, em nenhum momento as aulas deixaram a desejar. Ela permitiu ver na prática as informações teóricas aprendida em sala de aula.”

Aluno 5 – “A metodologia utilizada foi muito dinâmica e essencial para o entendimento, em especial os experimentos mostrados e o filme.”

Aluno 6 – “Na sala de aula experimentos na prática foram bastante vantajosos para formação acadêmica e pessoal.”

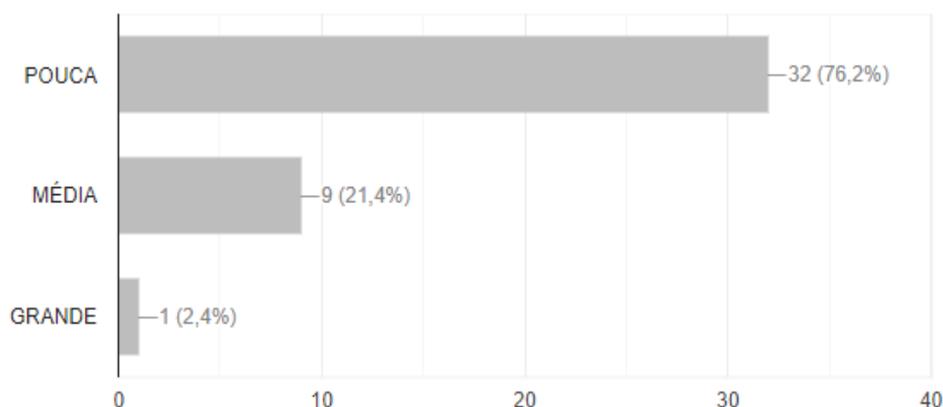
10 – Para você, qual o grau de dificuldade para compreensão do fenômeno de indução magnética a partir do sequenciamento de atividades propostas.

() POUCA

() MÉDIA

() GRANDE

Figura 51. Resultado da questão 10 do pós-teste



Fonte: os autores (2022)

Dos 42 que participaram da pesquisa, apenas 1 apresentou grande dificuldade para compreensão do conteúdo, mesmo diante da sequência de atividades propostas; 9 estudantes mostraram uma dificuldade mediana, e 76 % dos envolvidos indicaram que a metodologia utilizada permitiu que o fenômeno pudesse ser entendido sem maiores dificuldades.

5.2 Avaliação Docente da UEPS

Diante do exposto, dos resultados analisados e apresentados através de vários mecanismos de coleta de dados disponibilizados, levando-se em consideração os objetivos da pesquisa que visam descrever o fenômeno de uma maneira mais objetiva e significativa baseada num produto educacional que contemple uma Unidade de Ensino Potencialmente significativa sobre o fenômeno da indução magnética que possa servir como guia norteador e auxiliar para professores, foi notório o desempenho dos alunos durante cada uma de suas etapas.

Além do aspecto qualitativo, foi observado também o engajamento e boa aceitação da turma no desenvolvimento do projeto, além da sensibilidade e interesse por parte dos alunos para que essa unidade de ensino pudesse ser desenvolvida. Em nenhum momento houve rejeição para seu desenvolvimento, o que levou ao alcance do objetivo. Sabemos que as dificuldades iniciais existiram no momento da aplicação do pré-teste e que alguns conhecimentos essenciais ainda não haviam sido incorporados no cognitivo dos estudantes. Contudo, foi evidente a necessidade de um enfoque para determinados tópicos.

De forma geral, apesar de não conseguir que 100% dos estudantes conseguissem assimilar de forma íntegra todos os itens avaliados ao término da aplicação do trabalho, a UEPS atendeu as expectativas e foram satisfatórias, dando indícios de uma aprendizagem significativa, os resultados mostram a eficiência da metodologia.

6 CONCLUSÃO

A escolha do objeto de estudo, metodologias de aplicação e técnicas de investigação de ensino e aprendizagem surgiu antes do início das atividades do Mestrado, porém só consolidado e cientificamente organizado após ingresso no programa de Ensino de Física, diante de dificuldades sempre encontradas em trabalhar a Física de forma mais interativa e lúdica e por considerar o conteúdo de Indução Magnética um tópico cuja abordagem muito contribuiu para o desenvolvimento da humanidade, mas cujo conhecimento e entendimento não são bem consolidados pelos estudantes do Ensino Médio.

O projeto foi elaborado e previamente apresentado para direção da escola ao qual o trabalho foi aplicado e, posteriormente, aos alunos agentes interativos neste processo. A aplicação aconteceu no segundo semestre do ano letivo de 2021 contando com a participação de 42 estudantes matriculados em uma turma da terceira série do Ensino Médio.

O objetivo principal do trabalho foi ensinar o tópico sobre Indução Magnética através de uma Unidade de Ensino Potencialmente Significativa (UEPS) apresentando um sequência de atividades conectadas e inter-relacionadas para desenvolvimento e absorção do tópico. Para tanto procurou-se elencar metodologias variadas a fim de que as importantes aplicações do fenômeno da indução magnética em relação, principalmente, a geração de energia elétrica, transformações de energia, pudessem ser incorporado significativamente no cognitivo do aluno.

Em síntese, de acordo com a descrição e observação dos resultados relacionados ao desempenho dos alunos durante a aplicação do produto educacional, observou-se, em análise comparativa entre os questionários utilizados para avaliação diagnóstica e os relatórios e questionários pós aplicação do produto que, houve um aumento no desempenho da turma em relação à média de acertos e relação dos conhecimentos associados demonstrando resultado satisfatório para a implementação da pesquisa realizada. Além do aspecto quantitativo foi observado também o envolvimento e boa aceitação em cada uma das etapas da aplicação do trabalho, conseqüentemente, pode-se constatar que os objetivos foram alcançados, levando a crer que houve vestígios de aprendizagem significativa.

7 PERSPECTIVAS DE CONTINUIDADE

Conforme pode-se acompanhar ao longo desse trabalho, planejou-se uma sequência de metodologias diversificadas buscando envolver o aluno no processo de ensino-aprendizagem, levando-o a utilização de novas ferramentas capazes de solucionar problemas e, principalmente, objetivando que a aprendizagem seja significativa e o conhecimento, como propõe a BNCC, seja sistematizado, proporcionando maior contextualização e abertura para novas visões de mundo.

Esperamos também que a elaboração da UEPS possa servir como guia norteador para os professores no tocante ao assunto de Indução Magnética, permitindo amenizar as dificuldades de distanciamento entre a Física e o cotidiano do alunado, promovendo assim maior envolvimento, mesmo diante de vários fatores que dificultam o ensino aprendizagem, como comentado.

Contudo, planejou-se essa Unidade de Ensino Potencialmente Significativa, pretendendo maior abrangência dos alunos no processo de ensino, levando-os a interação, participação, discussão sobre o fenômeno em estudo e esperando que, ao final de todas as etapas, o entendimento sobre o fenômeno da indução magnética pudesse ser adquirido de forma satisfatória e exitosa.

REFERÊNCIAS

- ANDRADE, M. L. F.; MASSABNI, V. G. O desenvolvimento de atividades práticas na escola: um desafio para os professores de ciências. **Ciência & Educação (Bauru)**, v. 17, n. 4, p. 835-854, 2011.
- AUSUBEL, D. P. **A psicologia da aprendizagem verbal significativa**. Nova York: Grrune e Stratton Editora, 1963.
- AUSUBEL, D. P. et al. **Psicologia Educacional**. 2. ed. Rio de Janeiro: Interamericana, 1980.
- BAUER, W.; WESTFALL, G. D.; DIAS, H. **Física para Universitários**. Vol 3. 2ª ed. São Paulo: AMGH, 2012.
- BRASIL. Constituição (1988). **Constituição da República Federativa do Brasil de 1988**. Brasília, DF: Senado Federal: Centro Gráfico, 1988.
- _____. Lei. 9394, de 20 de dezembro de 1996. Estabelece as diretrizes e bases da Educação Nacional. **Diário Oficial da União**: Brasília, DF, 20 de dez. 1996. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/CCIVIL_03/Leis/L9394.htm. Acesso em: 25 maio de 2020.
- _____. Ministério da Educação. **Base Nacional Comum Curricular**. Brasília, 2017. Disponível em: <http://basenacionalcomum.mec.gov.br/abase/#estrutura>. Acesso em: 25 maio de 2020.
- _____. Ministério da Educação. Secretaria de Educação Básica. **Guia PNLD 2018**. Brasília, DF: Ministério da Educação, 2018. Disponível em: <https://www.fnde.gov.br/index.php/programas/programas-do-livro/pnld/guia-do-pnld/item/11148-guia-pnld-2018>. Acesso em: 04 de novembro de 2020.
- _____. **Relatório Brasil no Pisa 2018 (versão preliminar)**. Diretoria de avaliação da Educação Básica. Brasília-DF: Inep/MEC 2019. Disponível em: **Erro! A referência de hiperlink não é válida..** Acesso em: 20 de setembro de 2020.
- BOMBONATO, L. G. G. **A importância do uso do laboratório nas aulas de ciências**. 2009. 49 f. Monografia (Especialização em Ensino de Ciências) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Paraná, 2011.
- BORGES, R. M. R.; MORAES, R. **Educação em Ciências nas séries iniciais**. Porto Alegre: Sagra Luzatto, 1998.
- CRESWELL, J. W. **Research Design: Qualitative, Quantitative, and Mixed Methods Approaches**. 3. ed. United States of America: SAGE, 2009.
- DICKER, L. **Percepção de valor em sistemas de informação orientados para o pequeno e médio varejo brasileiro**. 2009. Dissertação (Mestrado em Administração) - Faculdade de Ciências Empresariais, Universidade Fumec, Belo Horizonte, 2009.
- FÍSICA AMAPÁ. **O ensino da Física na perspectiva da aprendizagem significativa crítica – Prof. Antônio Moreira**. Porto Alegre: Física Amapá, 2020. 1 vídeo (1 hora 50 min 11 seg).

Disponível em: https://www.youtube.com/watch?v=_9UycHXue8A. Acesso em: 22 de outubro de 2020.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R. **Fundamentos da Física**. Vol 3. 8ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

KNIGHT, R. D. **Física 3 – Uma abordagem estratégica**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2009.

LORENCINI, A. J. O ensino de Ciências e a formulação de perguntas e respostas em sala de aula. In: TRIVELATO, S. L. F. (Org.) **Coletânea Escola de Verão para professores de prática de ensino de Física, Química e Biologia**. Serra Negra, SP: FEUSP, 1995. p. 105-114.

LOWRIE, W. **Fundamentals of Geophysics**. Second edição. São Paulo, 2007.

MASINI, E. F. S.; MOREIRA, M. A. **Aprendizagem Significativa na ESCOLA**. 1. ed. Curitiba: CRV, 2017.

MAXWELL, J. C. On Physical Lines of Force. **Philosophical Magazine and Journal of Science**, v. 4, 1861.

MOREIRA, M. A. ¿Al final, qué es aprendizaje significativo? **Qurrriculum**, v. 25, p. 29-56, 2012.

MOREIRA, M. A. **Aprendizagem significativa crítica**. Lisboa: Atas do III Encontro Internacional sobre Aprendizagem Significativa, 2000.

MOREIRA, M. A. Aprendizagem significativa: um conceito subjacente. **Aprendizagem Significativa em Revista**. v. 1, n. 3, p. 25-46, 2011.

MOREIRA, M. A. Aprendizaje significativo crítico. **Indivisa, Boletín de Estudios e Investigación**, n. 6, p. 83-101, 2005

MOREIRA, M. A. **Mapas conceituais e aprendizagem significativa**. São Paulo: Centauro, 2010.

MOREIRA, M. A.; MASINI, E. F. S. **Aprendizagem significativa: a teoria de David Ausubel**. São Paulo: Moraes, 1982.

MOREIRA, M. A. **Unidade de Ensino Potencialmente Significativas – UEPS**. Porto Alegre: Instituto de Física UFRGS, 2011. p. 1-22.

NÉRICE, I.G. **Didática geral dinâmica**. 10 ed., São Paulo: Atlas, 1987.

NOVAK, J. D. **Aprender, criar e utilizar conhecimentos**. 1. ed. Lisboa: Plátano-Edições Técnicas, 2000.

OECD. Science performance. **Programa Internacional de Avaliação de Estudantes (PISA)**. PISA: OECD, 2020. Disponível em: <https://data.oecd.org/pisa/science-performance-pisa.htm>. Acesso em: 03 de agosto de 2020.

OSTERMANN, F.; CAVALCANTI, C. J. H. **Teorias de Aprendizagem**. 1. ed. Porto Alegre: Evangraf; UFFRGS, 2011.

PARANÁ. Secretaria de Estado da Educação. **Diretrizes Curriculares da Educação Básica**. Curitiba: SEED, 2008.

PHET INTERACTIVE SIMULATION. **Simulações Interativas para Ciência e Matemática**. 2002. Disponível em: https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulations/filter?subjects=physics&type=html,prototype. Acesso em: 04 de novembro de 2020.

POLETTI, N. **Estrutura e Funcionamento do Ensino Fundamental**. 26 ed. São Paulo: Ática, 2001.

PRAÇA, F.S.G. METODOLOGIA DA PESQUISA CIENTÍFICA: ORGANIZAÇÃO ESTRUTURAL E OS DESAFIOS PARA REDIGIR O TRABALHO DE CONCLUSÃO. 08, nº 01, p.72-87, JAN-JUL, 2015. **Revista Eletrônica “Diálogos Acadêmicos”** (ISSN:0486-6266).

Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 31, n. 1, 1306 (2009).

RONCA, A. C. C. Teorias de Ensino: A Contribuição de David Ausubel. **Temas em Psicologia**, v. 2, n. 3, p 91-95, 1994.

ROSA, C. T. W. Concepções teórico-metodológicas no Laboratório didático de Física na Universidade de Passo Fundo. **Revista Ensaio**, v. 5. n. 2. p. 94-108, 2003.

SANTOS, C. S. **Ensino de ciências: abordagem histórico-crítica**. 1. ed. Campinas Autores Associados, 2005.

SUFYAN ZAHID. **The boy Who harnessed the wind 2019 Netflix Series with English Subtitles**. Sufyan Zahid, 2019. 1 vídeo (1h 53 min 59 seg). Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=fCZt9QpDXuU>. Acesso em: 04 de agosto de 2020.

TIPLER, P. A.; MOSCA, G. **Física para Cientistas e Engenheiros**. Vol 2. 6ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017.

VERGARA, S. C. **Métodos de pesquisa em administração**. São Paulo: Atlas, 1997.

WIEMAN, C. E.; PERKINS, K. K.; ADAMS, W. K. Oersted Medal Lecture 2007: Interactive simulations for teaching physics: What works, what doesn't, and why. **American Journal of Physics**, v. 76, n. 4 e 5, p. 393-399, 2008.

YOUNG, H. D.; FREEDMAN, R. A. **Física III: Eletromagnetismo**. 12. ed. São Paulo: Pearson, 2009.

APÊNDICES

• APÊNDICE A

Questionário pré-teste idealizado e aplicado através do Google Forms.

Link de acesso:

https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLScFGgFc4dKa4ylAqeGtrB9TBcYTqPXXjllWimnXYC3k2fxiJw/viewform?usp=sf_link

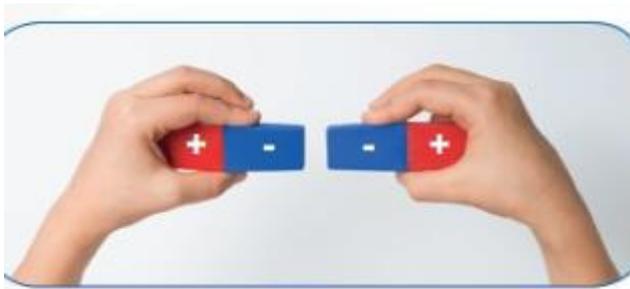
Pré-teste de Eletromagnetismo

Questionário de avaliação sobre os conceitos básicos de eletricidade e magnetismo.

Nome completo: _____

3ª série

1- O que acontece se aproximarmos dois ímãs de acordo com as especificações abaixo?



2- Dentro de um condutor elétrico, seja ele sólido ou soluções iônicas, entende-se que o fluxo ordenado de cargas elétricas é denominado:

- a) () Potencial elétrico
- b) () Corrente elétrica
- c) () Força elétrica
- d) () Campo elétrico

3- O movimento de cargas elétricas, de acordo com o estudo de Eletromagnetismo, surge pela influência de:

- a) Campos gravitacionais
- b) Campos magnéticos

- c) Diferença de potencial
- d) Fenômenos relativísticos
- e) Campos elétricos

4- Qual a definição de CIRCUITO ELÉTRICO?

5- Segundo a Física Quântica, a matéria é constituída de átomos, e estes possuem prótons, nêutrons e elétrons, que apresentam uma organização estrutural que permite que os elétrons fiquem em órbita sendo atraídos pelo núcleo (prótons+nêutrons) do átomo. Que agente permite essa atração?

- a) Força elétrica
- b) Campo elétrico
- c) Carga elétrica
- d) Potencial elétrico

6- O que diferencia materiais isolantes de condutores?

7- O que acontece com dois corpos que apresentam cargas elétricas de mesmo sinal? E cargas elétricas de sinais diferentes?

8- Qual sua definição para CAMPO MAGNÉTICO?

9- Assim como nosso corpo necessita de energia para realização de atividades, e essa energia, em certa quantidade, provém dos alimentos, as cargas, dentro de um condutor elétrico, para se movimentarem, precisa que exista energia para movê-las entre dois pontos distintos de um campo. Essa energia é denominada:

- a) Corrente elétrica
- b) Força elétrica
- c) Diferença de potencial
- d) Resistência elétrica

10- Quando dois corpos conseguem ser atraídos ou repelidos, sem a necessidade de um contato, apenas através de uma força de campo que possa existir, devido à natureza do material o qual é formado, essa força recebe o nome de:

- a) Elétrica
- b) Magnética
- c) Gravitacional
- d) Condutora

• **APÊNDICE B**

Questionário pós-teste e avaliação da UEPS idealizado e aplicado através do Google Forms.

Link de acesso:

https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLSe6naVwBu9S6huR5iTRD1swhA0Y0dfZPjXwH29IHWOUy0J8g/viewform?usp=sf_link

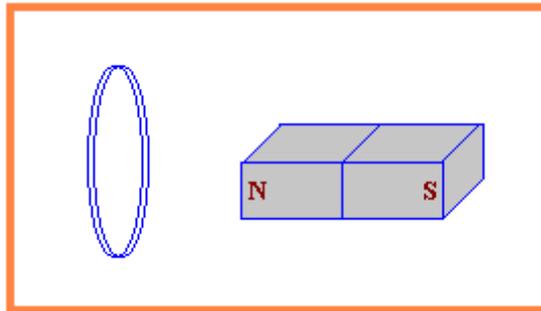
Pós-teste de Indução magnética

Questionário de avaliação sobre o conteúdo estudado INDUÇÃO MAGNÉTICA, baseado nos conhecimentos prévios de eletricidade e magnetismo.

Nome completo: _____

3ª série

4- As figuras abaixo representam uma espira e um ímã próximos.



Fonte: coladaweb (2020)

Das situações seguintes, indique a que não corresponde à indução de corrente em espira.

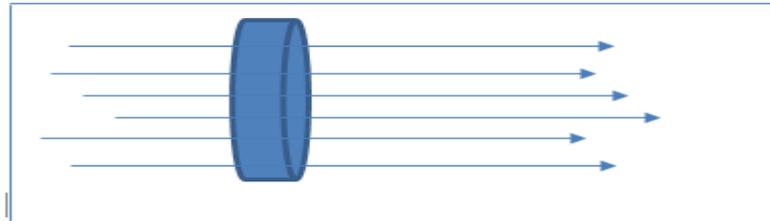
- f) A espira está se movendo e o ímã está em repouso;
- g) O ímã está se movendo e a espira está em repouso;
- h) A espira e o ímã se afastam;
- i) A espira e o ímã se aproximam;
- j) A espira e o ímã se movem com a mesma velocidade para a direita.

5- O fenômeno da indução magnética se faz presente em diversos equipamentos que utilizamos no nosso cotidiano. Ele é utilizado como forma de gerar energia elétrica e a base para sua explicação é, o aparecimento de uma *fem* (força eletromotriz) entre as extremidades de um

condutor. O que é necessário para que essa força surja?

- f) Temperatura
- g) Resistência elétrica
- h) Campo elétrico
- i) Fluxo magnético
- j) Carga elétrica

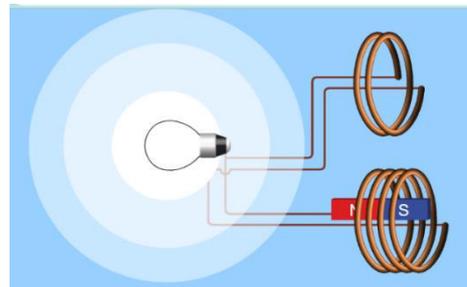
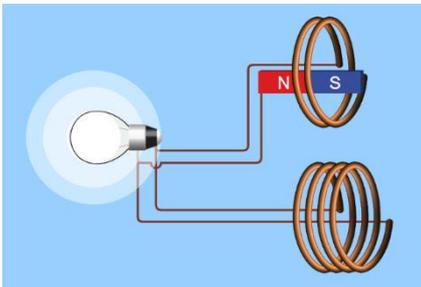
3- Objetivando encontrar o fluxo magnético sobre uma certa região, alguns fatores são determinantes. Diante da ilustração abaixo apresentada, relacione aquelas que influenciam diretamente no seu resultado.



Fonte: a autora (2022)

- a) Campo magnético e área.
- b) Campo magnético e ângulo.
- c) Campo magnético, ângulo e área.
- d) Área e ângulo.
- e) Apenas a intensidade do campo magnético.

4- A Lei de Faraday enuncia que a força eletromotriz é resultado de uma variação de fluxo magnético em um certo intervalo de tempo. Na imagem abaixo apresentada, o que foi necessário para que a lâmpada acendesse? Por que as lâmpadas tem luminosidades diferentes?



5- O assunto estudado, INDUÇÃO MAGNÉTICA, apresenta conexão com seu cotidiano? Onde?

6- Concluímos nessa etapa uma sequência de aulas que nos possibilitou estudar o fenômeno de indução magnética. Você compreendeu o fenômeno? Argumente.

7- Quais aulas ou método utilizado que você destacaria ter sido essencial para aprendizagem do conteúdo?

8- A sequência proposta se assemelha ao modelo de aprendizagem que costuma estudar?

() SIM

() NÃO

9- Faça um breve relato considerando pontos positivos e/ou negativos de todas as experiências que participarão da sequência.

10- Para você qual o grau de dificuldade para compreensão do fenômeno de indução magnética a partir do sequenciamento de atividades propostas.

() POUCA

() MÉDIA

() GRANDE

- **APÊNDICE C**

Modelo de relatório descritivo

Refletindo o conhecimento científico, alguns pontos principais devem ser levados em consideração. Para isso, segue modelo para implementação desses dados.

Um relatório deve ter uma estrutura. Inclua os seguintes itens:

- 1- Título**
- 2- Objetivos da atividade**
- 3- Introdução**
- 4- Descrição das atividades**
- 5- Resultados obtidos**
- 6- Conclusão**
- 7- Referências**

1- Título – Deve informar o assunto estudado.

Exemplo: Relatório das metodologias utilizadas para o ensino-aprendizagem do conteúdo de INDUÇÃO MAGNÉTICA

2- Objetivos – Indicar as finalidades com que o trabalho foi executado. Cada objetivo deve começar com um verbo.

Exemplo:

- Descrever o fenômeno de indução magnética;
- Relacionar o fenômeno de indução magnética em situações do dia-a-dia;
- Falar sobre a importância de aulas experimentais para absorção do conteúdo;
- Verificar se a implementação de uma UEPS foi essencial para o aprendizado;
- Expor contribuições e aprendizados adquiridos após conclusão das atividades.

3- Introdução – Deve conter de forma sucinta os aprendizados adquiridos. Não redija de forma mecânica, procure colocar principais ideias propostas durante as atividades. (Faça isso em 1 ou 2 parágrafos)

- 4- Descrição das atividades** – Contém a descrição dos procedimentos adotados por cada etapa do trabalho. Essa descrição deve ser completa e suficiente para entender o passo-a-passo das aulas. Fale sobre a importância e o que conseguiu assimilar de conhecimento em cada tópico e metodologia abordada. Caso queira poderá fazer desenhos esquemáticos e simplificados de situações apresentadas.

- 5- Resultados** – Relate fielmente o que foi observado. Procure utilizar os termos científicos corretamente. Procure fazer suas interpretações do fenômeno de indução magnética. Tente responder em sua conclusão, perguntas, como: a metodologia utilizada foi suficiente para sua compreensão? Deixou a desejar? Algo poderia ser mais bem esclarecido no momento da explanação de cada técnica desenvolvida? etc.

- 6- Conclusão** – Escreva as conclusões que você tirou das atividades realizadas para compreensão do assunto de indução magnética.

- 7- Referências** – De onde retirou os dados.

- **APÊNDICE D**

Alguns passos propostos para elaboração de mapas conceituais segundo Novak (2000)

- 1) Identificar e traçar uma questão a qual se propõe listar conceitos. Selecione de 10 a 20 conceitos de um tema global;
- 2) Organizar os conceitos de modo a ordená-los hierarquicamente, de forma que o conceito geral (mais abrangente) esteja disposto no topo do mapa;
- 3) Acrescente mais conceitos à medida que for necessário;
- 4) Vá construindo o mapa interligando um conceito geral a outros subconceitos;
- 5) Sempre que for necessário reveja a construção do mapa para que algo possa ser acrescentado, subtraído ou reorganizado;
- 6) Seja criativo no momento da ligação entre conceitos;
- 7) Sempre busque está interligando novos conceitos;
- 8) Se necessário faça uso de exemplos para determinados conceitos permitindo um maior entendimento;
- 9) Na elaboração dos mapas não existe uma forma correta ou errada, apenas disposições diferentes no momento de interligar os conceitos. É importante uma socialização para evidenciar pontos distintos entre os mapas elaborados.

- **APÊNDICE E**

Guia de elaboração de experimentos que nortearão etapa de implementação da UEPS

EXPERIMENTO 1 – INDUÇÃO USANDO BOBINA (MOTOR CASEIRO)

MATERIAIS:

- Base de madeira;
- 1 super ímã;
- 1 pilha;
- 2 alfinetes;
- Fita isolante;
- Fio de cobre;
- Pedaco de fio encapado.

- **OBJETIVO**

Construir um sistema simplificado de motor de corrente contínua.

- **PROCEDIMENTO E EXPLICAÇÃO**

Inicialmente confecciona-se uma bobina com o fio de cobre enrolando 10 voltas ao redor da pilha, deixando nas duas extremidades um comprimento aproximado de 3 cm (necessário raspar o cobre total de uma extremidade e um pouco da outra) fator importante para permitir o fluxo da corrente elétrica. Após isso prende-as no enrolamento. Na organização da base, fixa-se os alfinetes na madeira, servindo de suporte para a bobina, encaixa a bobina e abaixo coloca-se o ímã. Para alimentação da energia utiliza a pilha interligada com os fios encapados aos alfinetes presos à base. A explicação é que ao ligar uma extremidade da bobina na energia elétrica, a bobina se transforma em um ímã e ele vai ser atraído pelo ímã que está embaixo dele. Ela começa a girar e através das extremidades aumenta e diminui a atração, variando o fluxo da corrente, porém permitindo o movimento rotatório da espira.

EXPERIMENTO 2 – GERADOR ELÉTRICO

MATERIAIS:

- Fio de cobre bem fino;
- 2 super ímã;
- 1 seringa de 2,5 ml;
- 2 leds.

• **OBJETIVO**

Evidenciar a geração de energia elétrica através do fenômeno de indução magnética.

• **PROCEDIMENTO E EXPLICAÇÃO**

Montar uma bobina com 600 enrolamentos na seringa, deixando duas pontas de aproximadamente 50 cm cada, conectar os dois leds colocando o polo negativo com o positivo do outro, e posteriormente fazer a conexão das duas pontas do fio que fio passando com os leds. Coloca-se os super ímãs dentro da seringa e começa a sacudir.

Ao agitar um ímã próximo a um fio de cobre, proporciona que haja uma movimentação de elétrons, e essa movimentação permite a criação de corrente elétrica, corrente essa necessária para acender os leds (geração de corrente elétrica). Mas de onde vem essa energia? A movimentação mecânica do ímã será convertida em energia elétrica. É necessário que o ímã se movimentando próximo a bobina.

EXPERIEMENTO 3 – FREIO DE INDUÇÃO MAGNÉTICA

MATERIAIS:

- 1 tubo de pvc de 80 cm
- 1 tubo de cobre ou alumínio de 80 cm
- 2 super ímãs

• **OBJETIVOS**

Demonstrar a Lei de Lenz através do freio de indução magnética

• **PROCEDIMENTO E EXPLICAÇÃO**

Lançar o ímã dentro do tubo de pvc e ver o que ocorre. Depois repetir o procedimento, só que utilizando o tubo de cobre (ou alumínio). Ainda poderá ser feito o procedimento

simultaneamente para melhor análise de resultados.

Todo ímã gera à sua volta um campo magnético (lugar no espaço onde estará sujeito a ação de forças de atração ou repulsão). Ao jogar o ímã dentro do tubo ele cria um campo magnético e o campo magnético vai se movimentando a partir do momento que desce pelo tubo, e assim o campo vai mudando de lugar. A movimentação do campo magnético gera uma corrente elétrica (indução magnética) no tubo de cobre e a interação da corrente elétrica com o campo magnético freia o ímã quando está descendo, o que não ocorre no tubo de pvc, por ser um isolante e não produzir a corrente elétrica.

Esse fenômeno que está sendo explicitado no experimento é muito parecido com o que acontece dentro de um gerador de energia, que gera energia por causa da alteração do campo magnético. A energia é gerada pela alteração do fluxo magnético, que produzido pela movimentação do ímã.

EXPERIMENTO 4 – ORIENTAÇÃO DE CAMPO MAGNÉTICO

MATERIAIS

- Bandeja de plástico com apoio de madeira (para melhor visualização)
- Limalha de ferro feita de palha de aço amassada
- 2 ímãs em forma de barra

• OBJETIVO

Mostrar a orientação das linhas de campo magnético

• PROCEDIMENTO E EXPLICAÇÃO

Colocam-se dois ímãs embaixo da bandeja posicionando o norte dos dois ímãs para o lado de dentro. Distribui-se a limalha de ferro dentro da bandeja. Agita-se ligeiramente a bandeja para que a limalha de ferro se alinhe com o campo magnético formado pelos dois ímãs. Como os dois ímãs tendem a se repelir, então as linhas de campo criadas por eles tendem a se afastar. Depois repete-se o procedimento invertendo um dos polos dos ímãs, observando que as linhas de campo magnético tendem a se encontrar no centro da bandeja.

- APÊNDICE F

Campo magnético sobre o eixo de uma espira com corrente elétrica

O objetivo deste anexo é demonstrar em detalhes o cálculo do campo magnético gerado por uma espira com corrente elétrica. O resultado final está representado pela Equação (5) da Dissertação e na Equação (3) do Produto Educacional associado à ela.

A origem do cálculo é a lei de Biot-Savart adaptada para um pedacinho de fio no qual passa uma corrente I . Isto tem que ser assim porque esta lei só vale para um objeto carregado eletricamente que com dimensões muito pequenas, que denominamos de partícula. Ela está expressa na Equação (2) da Dissertação e do Produto Educacional. Na Dissertação usamos o símbolo ds para representar um pedaço muito pequeno do fio. Muito pequeno aqui quer dizer que o tamanho de ds é muito menor do que a distância entre o ds e o local onde estamos calculando o campo magnético, que na equação é representado pelo r , ou seja, $ds \ll r$. No Produto Educacional usamos o símbolo Δs para representar o pequeno pedaço do fio, porque os estudantes de Ensino Médio estão mais acostumados com ele, mas o significado é exatamente o mesmo.

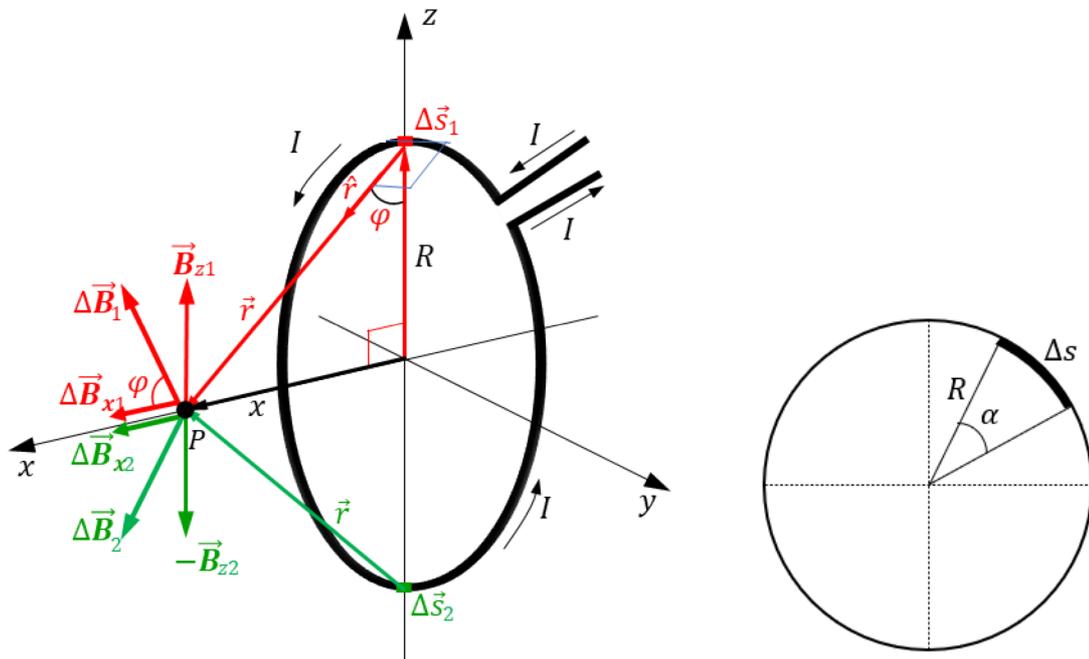
Para começar, estude com cuidado a Figura 1 (esquerda). Ela mostra uma espira com corrente I se movimentando no sentido mostrado. Queremos calcular o campo gerado pela corrente em toda a espira no ponto P que se encontra sobre o eixo x e está a uma distância r da espira. Como a lei de Biot-Savart só se aplica para partículas, vamos pegar um pequeno pedaço do fio de tamanho Δs . Veja na Figura que $\Delta s \ll r$ e assim a lei de Biot-Savart se aplica à corrente que está dentro desse pequeno Δs . A Equação (2) da Dissertação e do Produto Educacional mostram a lei de Biot-Savart adaptada para a pequena quantidade de corrente dentro de Δs :

$$\Delta B_I = \frac{\mu_0 I \Delta \vec{s} \times \hat{r}}{4\pi r^2} = \frac{\mu_0 I \Delta s \cdot \text{sen}(90^\circ)}{4\pi r^2} = \frac{\mu_0 I \Delta s}{4\pi r^2} \quad (1)$$

Certifique-se de perceber na Figura 1 que em todos os locais da espira a direção de $\Delta \vec{s}$ é perpendicular à direção de \vec{r} . É por isso que na Equação (1) aparece o $\text{sen}(90^\circ) = 1$, pois este é o ângulo entre esses dois vetores. Veja que a pequena quantidade de corrente dentro de Δs_1 na parte superior da espira gera um campo ΔB_1 no ponto P . Este campo está decomposto nas direções do eixo z e x , resultando em B_{z1} e B_{x1} , respectivamente. Como o ponto P está

sobre o eixo x , a projeção de ΔB_1 sobre o eixo y é nula. Da Figura temos $B_{z1} = B_1 \text{sen}\varphi$ e $B_{x1} = B_1 \text{cos}\varphi$. Agora peguemos a corrente elétrica dentro do pequeno pedaço de fio Δs_2 na parte inferior da espira, diametralmente oposto a Δs_1 . De igual modo ela vai gerar um campo ΔB_2 no ponto P . Este campo também está decomposto nas direções do eixo z e x , resultando em $-B_{z2}$ e B_{x2} , respectivamente. Como o ponto P está sobre o eixo x , a projeção de ΔB_2 sobre o eixo y é nula. Da Figura temos $B_{z2} = -B_2 \text{sen}\varphi$ e $B_{x2} = B_2 \text{cos}\varphi$.

Figura 1. Esquerda: campo magnético gerado por uma espira com corrente. As componentes na direção de z são canceladas (mostradas na Figura). De igual modo as componentes na direção de y se cancelam (não mostradas na Figura). Direita: ilustração para a medida do comprimento de um arco de círculo.



Fonte: os autores (2022).

Perceba que o valor de ΔB_1 é o mesmo de ΔB_2 . Então $B_{z1} = B_{z2}$ e duas componentes do campo diametralmente opostas na direção de z se anulam. Isto acontecerá para todos os pares de pontos diametralmente opostos, tanto na direção de z quanto na de y . Isso só ocorre porque estamos calculando o campo exatamente sobre o eixo x , que passa pelo centro da espira. Por outro lado, as duas componentes na direção de x se somam, sendo que $\Delta B_{1x} = 2B_1 \text{cos}\varphi = 2B_2 \text{cos}\varphi = 2B \text{cos}\varphi$. Aqui estamos afirmando que $B_1 = B_2 \equiv B$, porque os valores do campo de ΔB_1 de qualquer lugar da espira no ponto P é o mesmo, pois a distância r entre qualquer elemento Δs da espira e o ponto P é a mesma. Portanto, adaptando a equação (1) para o ponto P , temos:

$$\Delta B_{Ix} = \frac{\mu_0 I \Delta s}{4\pi r^2} \cos\varphi. \quad (2)$$

Da Figura 1 vemos que $r^2 = x^2 + R^2$, $r = \sqrt{x^2 + R^2}$ e $\cos\varphi = R/r$. Da Equação (2), temos:

$$\Delta B_{Ix} = \frac{\mu_0 I \Delta s}{4\pi x^2 + R^2} \frac{R}{\sqrt{x^2 + R^2}} = \frac{\mu_0 IR}{4\pi (x^2 + R^2)^{3/2}} \Delta s. \quad (3)$$

A Equação (3) fornece o valor do campo ao longo do eixo x apenas devido à corrente que passa pelo pedacinho de fio de comprimento Δs . A soma de todos os ΔB_{Ix} devido a corrente em cada Δs ao longo de toda a espira será descrito por B_{espira} . Agora basta somar o campo devido a toda corrente que passa em toda a espira. Sabemos que quando o ângulo α é dado em radiano, o comprimento de um arco de círculo Δs é dado pela relação $\Delta s = R\alpha$. A Figura 1 (à direita) ilustra o arco de círculo. Como o ângulo α varia de 0 a 2π , a soma de todos os Δs , que será descrito como s , corresponde ao comprimento da circunferência, ou seja, $s = 2\pi R$. Substituindo este resultado na Equação (3), temos:

$$\vec{B}_{espira} = \frac{\mu_0 IR}{4\pi (x^2 + R^2)^{3/2}} (2\pi R) = \frac{\mu_0 IR^2}{2 (x^2 + R^2)^{3/2}} \hat{x}. \quad (4)$$

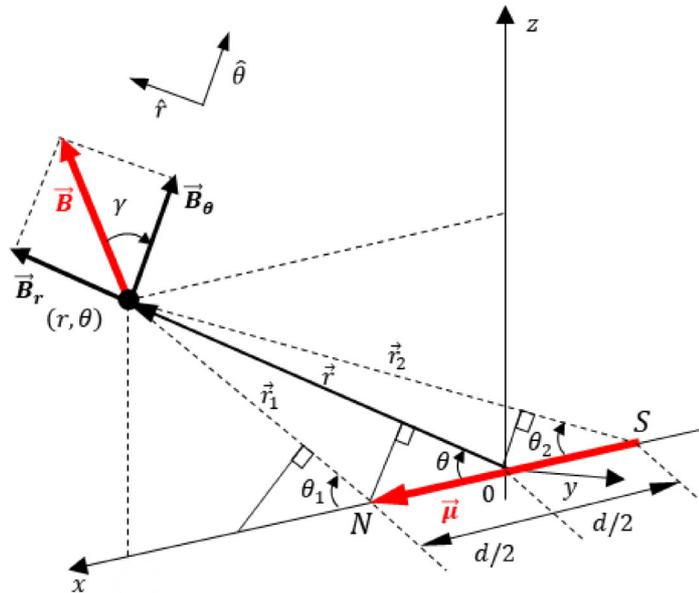
• APÊNDICE G

Cálculo do campo magnético de um dipolo magnético

O objetivo deste anexo é demonstrar em detalhes o cálculo do campo magnético gerado por dipolo magnético colocado na origem do sistema de coordenadas, conforme ilustrado na Figura 5 do texto da Dissertação e do Produto Educacional associado a ela. Esta figura está representada neste Anexo pela Figura 1. Os resultados a serem demonstrados estão representados na Equação (10) da Dissertação e Equação (8) do Produto Educacional e serão reproduzidos aqui.

$$\vec{B}_{total} = \vec{B}_r + \vec{B}_\theta, \quad \vec{B}_r = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi r^3} 2 \cos \theta \hat{r} \quad \text{e} \quad \vec{B}_\theta = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi r^3} \sin \theta \hat{\theta}. \quad (1)$$

Figura 1. Campo magnético de um dipolo magnético. O campo em qualquer ponto do plano (x, z) é dado pelas componentes \vec{B}_r e \vec{B}_θ . Sobre o eixo x $B_\theta = 0$ e sobre o eixo z $B_r = 0$.



Fonte: os autores (2022).

Inicialmente vamos observar com detalhes a Figura 1. Um dipolo magnético está colocado na origem do sistema de coordenadas, apontando para o sentido positivo do eixo x , do polo Sul para o Polo Norte. Com o objetivo de facilitar os cálculos, vamos encontrar uma expressão para o campo gerado pelo dipolo apenas sobre o plano formado pelos eixos x e z . Neste caso, a componente do campo magnético na direção do eixo y será sempre nula. Pela Figura 1 vemos que o campo \vec{B} a uma distância \vec{r} do centro do dipolo tem componentes \vec{B}_r e

\vec{B}_θ , nas direções dos versores \hat{r} e $\hat{\theta}$, respectivamente. Vamos traçar os vetores \vec{r}_1 e \vec{r}_2 a partir das duas extremidades do dipolo até o ponto onde o campo será calculado. Em relação ao eixo x cada um deles faz um ângulo que está designado na Figura 1 por θ_1 e θ_2 . Na prática, a dimensão física do dipolo, designada aqui por d , é muito menor do que a distância r de onde queremos calcular o campo magnético, de tal maneira que vamos considerar a aproximação $\theta_1 \cong \theta_2 = \theta$ quando ela for necessária.

Vamos usar o mesmo procedimento que é usado para calcular o campo de um dipolo elétrico a partir de sua energia potencial. Da mesma forma que o campo elétrico depende do valor da carga q e é inversamente proporcional à distância a partir dela, vamos considerar que o campo magnético de um polo de intensidade p de um ímã seja também inversamente proporcional à distância a partir dele:

$$B(r) = \frac{\mu_0 p}{4\pi r^2}. \quad (2)$$

Embora os polos magnéticos não existam isoladamente, este procedimento final se revelará compatível com os resultados experimentais. De forma semelhante à definição de potencial gravitacional e elétrico, podemos definir um potencial magnético de um polo, que depende do campo $B(r)$ da forma convencional:

$$V_m = - \int_r^\infty B(r) dr = - \int_r^\infty \frac{\mu_0 p}{4\pi r^2} dr \rightarrow V_m = \frac{\mu_0 p}{4\pi r}. \quad (3)$$

O potencial magnético a uma distância r do centro do dipolo é a soma dos potenciais dos dois polos, ou seja:

$$V_m = \frac{\mu_0 p}{4\pi} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) = \frac{\mu_0 p}{4\pi r} \left(\frac{r_2 - r_1}{r_1 r_2} \right). \quad (4)$$

Da Figura 1 vemos que a dimensão $d \ll r$ e podemos fazer as aproximações:

$$r_1 \cong r - \frac{d}{2} \cos\theta_1 \quad \text{e} \quad r_2 \cong r + \frac{d}{2} \cos\theta_2. \quad (5)$$

Usando a mesma aproximação $d \ll r$ vamos que $\theta_1 \approx \theta_2 \approx \theta$. Portanto, podemos escrever os termos $r_2 - r_1$ e $r_1 r_2$ da Equação (4) como:

$$r_2 - r_1 = \left(r + \frac{d}{2} \cos \theta_2 \right) - \left(r - \frac{d}{2} \cos \theta_1 \right) = d \cos \theta. \quad (6)$$

$$r_1 r_2 = \left(r - \frac{d}{2} \cos \theta_1 \right) \left(r + \frac{d}{2} \cos \theta_2 \right) = r^2. \quad (7)$$

Substituindo na Equação (4),

$$V_m = \frac{\mu_0 p}{4\pi} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) = \frac{\mu_0 p}{4\pi r} \left(\frac{d \cos \theta}{r^2} \right) = \frac{\mu_0 \mu \cos \theta}{4\pi r^2}. \quad (8)$$

A quantidade que aparece aqui $\mu = pd$ é exatamente o momento de dipolo magnético, escrito em uma forma diferente da que foi mostrada na Equação (8) da Dissertação e Equação (6) do Produto Educacional.

Agora estamos prontos para obter a Equação (1), usando a relação entre potencial e campo magnético:

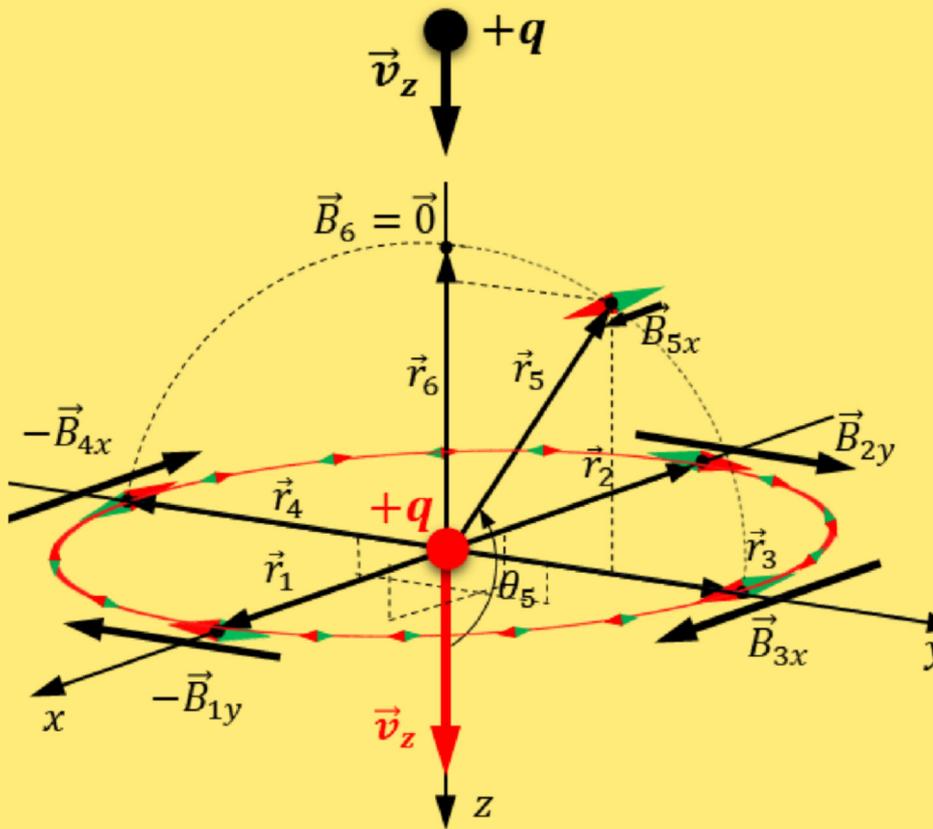
$$\vec{B}_r = -\frac{dV_m}{dr} = -\frac{d}{dr} \left(\frac{\mu_0 \mu \cos \theta}{4\pi r^2} \right) = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \frac{2 \cos \theta}{r^3} \hat{r}. \quad (9)$$

$$\vec{B}_\theta = -\frac{1}{r} \frac{dV_m}{d\theta} = -\frac{1}{r} \frac{d}{d\theta} \left(\frac{\mu_0 \mu \cos \theta}{4\pi r^2} \right) = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \frac{\sin \theta}{r^3} \hat{\theta}. \quad (10)$$

ANEXO I

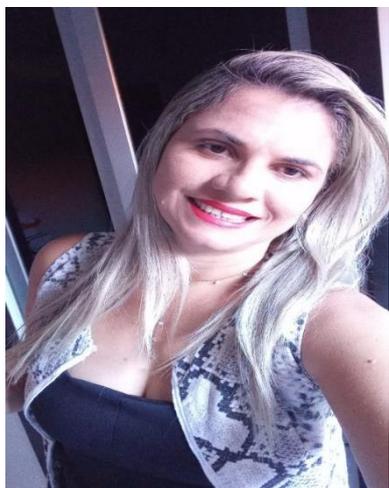
- LIVRO 1** – Física em Contextos – Editora do Brasil. 1ª edição/ São Paulo, 2016.
- LIVRO 2** – Conexões com a Física – Moderna. 3ª edição/ São Paulo, 2016.
- LIVRO 3** – Física 3 – FTD. 3ª edição/ São Paulo, 2016.
- LIVRO 4** – Física 3 – Saraiva. 3ª edição/ São Paulo, 2017.
- LIVRO 5** – Física Contextos e Aplicações – Scipione. 2ª edição/ São Paulo, 2017.
- LIVRO 6** – Física 3 – Ática. 2ª edição/ São Paulo, 2017.
- LIVRO 7** – Física – Ciência e Tecnologia – Moderna. 4ª edição/ São Paulo, 2016.
- LIVRO 8** – Ser Protagonista – Física – SM. 3ª edição/ São Paulo, 2016.
- LIVRO 9** – Compreendendo a Física – Ática. 3ª edição/ São Paulo, 2016.
- LIVRO 10** – Física para o Ensino Médio – Saraiva. 4ª edição/ São Paulo, 2016.
- LIVRO 11**- Interação e Tecnologia – Leya. 2ª edição/ São Paulo, 2016.
- LIVRO 12**- Física aula por aula – FTD. 3ª edição/ São Paulo, 2016.

INDUÇÃO MAGNÉTICA : proposta de UEPS



Handwritten text in the bottom left corner, partially obscured, appearing to be a grid or scribble.

Sobre os autores



Aline Cristine Gomes da Silveira

Graduada em Física Licenciatura pela Universidade Estadual do Piauí - UESPI (2004) e é Mestranda em Ensino de Física pela Universidade Federal do Maranhão - UFMA. Atualmente é professora nas redes estadual e municipal no município em que reside.



Professor Dr. Jerias Alves Batista

Graduado em Física pela Universidade Federal do Maranhão (1994), mestre em Física pela Universidade Estadual de Campinas (1996), doutor em Física pela Universidade Estadual de Campinas (2001). Tem pós-doutorado em Física pela Universidade de Toronto, Canadá (2002 a 2004) e pós-doutorado em Física pela Universidade Federal do Ceará (2008 e 2009). É professor associado da Universidade Federal do Maranhão e há 25 anos ministra aulas na graduação de programas de pós-graduação. Como pesquisador tem experiência na área de Física da Matéria Condensada, com ênfase em propriedades térmicas e eletrônicas de semicondutores. Tem experiência na área das espectroscopias Raman e de Fotoluminescência em nanotubos de carbono e grafeno.

Carta ao Leitor

O produto educacional desenvolvido neste trabalho oferece uma proposta de estudo do fenômeno de indução magnética associada a uma unidade de ensino potencialmente significativa – UEPS, preparada especialmente como material auxiliar para docentes e discentes, como alternativa para implementação dos livros didáticos para o ensino do fenômeno, através de uma sugestão de trabalho composta de várias etapas associadas a uso de ferramentas variadas para alunos do ensino médio. O formato deste trabalho contempla trabalhar o fenômeno de forma mais interativa e concreta, relacionando-o com sua imensa aplicabilidade, estimulando desenvolver nos alunos novas habilidades que os tornem agentes ativos no processo de ensino-aprendizagem.

Esta proposta surgiu para superar certas dificuldades de relacionar a Física com o cotidiano, buscando compreender o assunto de maneira mais clara e associável. A aplicação deste produto foi realizada em colaboração com uma turma de terceira série do ensino médio de uma escola estadual do Maranhão, localizada na cidade de São João dos Patos. As etapas desenvolvidas nesta sequência didática despertaram interesse e motivação por parte dos estudantes, fazendo-os se envolverem, tornando-se agentes ativos no processo de ensino-aprendizagem. Sendo assim, o produto educacional apresentou boa aceitação entre os participantes, possibilitando concluir que houve evidências de aprendizagem significativa.

Esperamos que este trabalho possa contribuir para seu conhecimento, sua melhor visão do fenômeno aqui abordado e seu senso crítico se ampliem em grande dimensão. Desejamos que você desfrute deste produto e que ele possa se tornar um instrumento útil para superação das dificuldades de professores e alunos.

SUMÁRIO

1	Concepções antigas: aspectos históricos	167
2	Concepções atuais: evolução conceitual.....	171
3	A origem do campo magnético e suas implicações	174
3.1	Uma aula diferente: brincando com ímãs e bússolas.....	174
3.2	Campo magnético gerado por uma carga em movimento.....	177
3.3	Campo magnético gerado por uma corrente elétrica	180
3.4	Campo magnético gerado por um dipolo e solenoide.....	184
3.5	O campo magnético à luz de uma força.....	190
3.6	Campo magnético de um ímã.....	197
3.7	A imantação dos materiais.....	202
4	Sobre o Fenômeno da Indução Magnética e suas Aplicações	205
4.1	Descrição Fenomenológica.....	205
4.2	Uma bateria carregada apenas pelo movimento	208
4.3	Corrente elétrica criada pelo movimento do condutor	211
4.4	A lei da indução magnética	215
4.5	Aplicações da lei da indução magnética.....	218
4.5.1	Gerador de corrente alternada.....	218
4.5.2	Transformador.....	220
4.5.3	Fogões à indução, frenagem magnética e detectores de metais.....	224
5	RECURSO PEDAGÓGICO	228
5.1	Definição da UEPS.....	228
5.2	Mapas conceituais	229
5.3	Filme.....	230
5.4	Experimentos	230

5.5 Estratégias da investigação	231
5.6 Sobre o tipo de pesquisa	234
5.7 Escolha da técnica de coleta de dados	234
5.8 Definição do universo e seleção amostral	235
5.9 Instrumento de pesquisa.....	235
5.10 Execução da UEPS	236
6 SEQUÊNCIA DIDÁTICA.....	238
6.1 Definição de sequência didática.....	238
6.2 Primeiro Encontro: apresentação da UEPS, mapas conceituais anteriores e questionário préteste.....	238
6.3 Segundo Encontro: ação motivacional sobre o tema	239
6.4 Terceiro Encontro: brincando com ímãs e bússolas	240
6.5 Quarto Encontro: aula expositiva com auxílio de simulações.....	241
6.6 Quinto Encontro: aula expositiva com auxílio de experiências.....	243
6.7 Sexto Encontro: avaliação da UEPS e os mapas conceituais posteriores	244
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	245
8 REFERÊNCIAS	246
APÊNDICES.....	249
□ APÊNDICE A: Questionário pré-teste idealizado e aplicado através do Google Forms.....	249
□ APÊNDICE B: Questionário pós-teste e avaliação da UEPS idealizado e aplicado através do Google Forms.	252
□ APÊNDICE C: Modelo de relatório descritivo.....	255
□ APÊNDICE D: Alguns passos propostos para elaboração de mapas conceituais segundo Novak (2000).....	257
□ APÊNDICE E: Guia de elaboração de experimentos que nortearão etapa de implementação da UEPS.....	258

- **APÊNDICE F: Campo magnético sobre o eixo de uma espira com corrente elétrica 261**
- **APÊNDICE G: Cálculo de campo magnético de um dipolo..... 264**

1 Concepções antigas: aspectos históricos

Segundo Halliday e Resnick, os primeiros registros sobre o magnetismo se devem a Tales de Mileto, cerca de 650 anos a.C. Segundo consta na história, teria mencionado que o mineral, magnetita era capaz de atrair ou repelir pequenos fragmentos de metais. Este efeito seria associado muito tempo depois com o fenômeno do magnetismo. Embora não se saiba quando e nem onde o uso desse fenômeno foi iniciado pelos povos antigos, há registros de que 1100 anos d.C. os chineses já usavam hastes metálicas magnetizadas para sua orientação no mar (precursor das bússolas modernas). Eles haviam descoberto que lâminas de ferro magnetizadas se alinhavam com a direção Norte-Sul da Terra. Os antigos povos não sabiam explicar a origem deste fenômeno, mas já sabiam fazer uso dele.

Em 1600, passados mais de 2 milênios, William Gilbert publicou uma obra (*De Magnete*) na qual relatou os avanços sobre eletricidade e magnetismo até então. A partir de experimentos próprios, observou que outras substâncias tinham a mesma propriedade do âmbar, o qual, quando atritado, era capaz de atrair pequenos objetos. Na década de 1680, Otto Von Guericke observou a repulsão entre partículas carregadas com cargas semelhantes e desenvolveu o primeiro gerador eletrostático utilizando o processo de eletrização por atrito. Em 1731, Stephen Gray demonstrou a condução elétrica nos corpos, as quais foram classificadas como condutores e não-condutores. Não demorou muito a descoberta de mecanismos pelos quais os corpos neutros podiam manifestar a propriedade carga elétrica de forma relativamente bem controlada. Entretanto, ainda demoraria um tempo até que o efeito magnético fosse associado às cargas elétricas dos corpos.

Embora não houvesse uma explicação no nível mais fundamental, porque não se sabia o que era a carga e nem como ela era armazenada dentro dos corpos, foram descobertos 3 mecanismos de produção da carga elétrica nos corpos neutros. O primeiro método foi mediante o atrito entre dois materiais não condutores, com transferência de carga entre eles. Neste processo, os corpos adquiriam cargas de sinais opostos, segundo a nomenclatura de Benjamim Franklin, dada em 1750. Se nada fosse feito os corpos continuavam carregados sempre. O segundo mecanismo foi o contato direto entre dois corpos condutores previamente carregados, também com transferência de cargas entre eles. Neste caso, como as cargas eram apenas compartilhadas entre os corpos condutores, elas tinham a mesma natureza (ou positiva ou negativa). De modo semelhante, se não houvesse contato com outros corpos estes continuavam carregados.

O terceiro mecanismo foi pela separação das cargas positivas e negativas dentro do

próprio corpo neutro, fosse condutor de eletricidade ou não. Neste processo, não havia remoção de carga do corpo e assim ele continuava neutro como antes. Porém, de um lado dele as cargas positivas predominavam enquanto que do outro lado as cargas negativas predominavam. Esta separação das cargas dentro do corpo neutro ocorria pela aproximação dele com um corpo previamente carregado por um dos métodos anteriores, sem que houvesse contato entre eles. Tão logo os corpos fossem afastados, as cargas se reorganizavam internamente e o processo de carregamento desaparecia. Este mecanismo foi denominado de indução, porque as cargas eram localmente produzidas à distância pela ação de outras (Halliday e Resnick, 2012).

Em 1785, Charles Coulomb realizou uma série de experiências com balança de torção e comprovou o modelo matemático sugerido por Daniel Bernoulli que ficaria conhecido como lei de Coulomb. Esta lei, de caráter experimental, passou a ter uso amplo, pois explicava vários fenômenos elétricos então conhecidos. Mas ela possuía algumas limitações, sendo a que merece destaque aqui o fato de que os objetos carregados tinham que estar em repouso e fossem muito pequenos. Se eles entrassem em movimento, outro tipo de força elétrica associada ao movimento do objeto carregado eletricamente se manifestava. Como será visto posteriormente, esta última força é denominada de força magnética (Young/Freedman, 2009).

O Século XIX foi de grandes descobertas relacionadas ao tema eletromagnetismo. Em 1820, Hans Oersted divulgou os resultados de suas pesquisas nas quais descobriu, de forma puramente empírica, que quando uma partícula com a propriedade q se movia (como uma corrente elétrica) nas proximidades de uma bússola, a direção na qual sua agulha apontava era alterada em relação à direção original. Quando as partículas estavam muito próximas da agulha, mas não se moviam, a sua direção não sofria qualquer modificação. Em outras palavras, ele descobriu que uma corrente elétrica produzia um campo magnético que agia sobre a agulha magnetizada da bússola. Isto de alguma forma mostrava que a presença da carga elétrica nas partículas poderia produzir outro tipo de força, além daquela descrita pela lei de Coulomb.

Esta foi uma das grandes descobertas da ciência, pois pela primeira vez foi possível observar uma conexão entre os fenômenos considerados “puramente elétricos” e aqueles considerados “puramente magnéticos”. Estas experiências contribuíram para o início da unificação de dois fenômenos até então considerados totalmente distintos quanto à sua origem. E não demoraria muito até que esta unificação abrangesse outra área da Física em pleno desenvolvimento à época – os fenômenos luminosos.

Com a descoberta de Oersted, abriu-se um campo de pesquisa que tinha como objetivo encontrar uma maneira de modelar matematicamente a influência da força magnética produzida pelo movimento da partícula sobre a agulha de uma bússola e, posteriormente, poder explicar

outros fenômenos observados na natureza. Isto, obviamente, passava pelo conhecimento da distribuição do campo magnético criado no entorno da carga em movimento. Este objetivo foi atingido no mesmo ano de 1820, por Jean-Baptiste Biot e Félix Savart. Eles encontraram uma relação matemática que descrevia o campo magnético gerado por cargas elétricas que se movem com velocidade constante (corrente constante), denominada lei de Biot-Savart. Como será visto nas próximas seções, esta lei, de caráter experimental, é o ponto de partida para o estudo do campo magnético e ela está para o estudo da Magnetostática assim como a lei de Coulomb está para o estudo da Eletrostática.

Poucos anos depois, em 1826, André-Marie Ampère, seguindo os trabalhos de Oersted, conseguiu elaborar um modelo matemático para calcular o campo magnético produzido por correntes que é muito mais fundamental do que o modelo de Biot-Savart, que só era aplicado a correntes constantes. A lei de Ampère é aplicada para todos os tipos de correntes. Em 1831 Michael Faraday fez uma das maiores descobertas da história da humanidade, um fenômeno inverso ao que Oersted havia descoberto, ou seja, que um campo magnético era capaz de produzir uma corrente elétrica. As discussões, aplicações e implicações desta descoberta são precisamente o foco deste trabalho de dissertação. Em 1835, Carl Friedrich Gauss encontrou um modo geral de relacionar o campo elétrico de um corpo carregado eletricamente com a quantidade de carga que ele possui. Embora este seja também o conteúdo da lei de Coulomb, a lei de Gauss é mais fundamental, uma vez que ela é aplicada a qualquer distribuição de cargas, enquanto a lei de Coulomb só é aplicada a cargas pontuais. As leis de Ampère, Faraday e Gauss são de caráter teórico, no sentido de que são relações matemáticas que descrevem os campos de forma muito mais abrangentes do que os resultados experimentais revelam (Young/Freedman, 2009)

Como foi mostrado nos parágrafos anteriores, os resultados experimentais estavam sendo encontrados de forma muito acelerada, porém faltavam explicações fundamentais que descrevessem as suas origens e conexões com outros fenômenos. Isto finalmente ocorreu no final da década de 1850 com os trabalhos de James Maxwell, o qual desenvolveu os conceitos matemáticos adequados para as linhas de força idealizadas por Michel Faraday para explicar o comportamento dos campos elétricos e magnéticos.

Em 1861, Maxwell conseguiu compilar todos os resultados experimentais obtidos até então sobre eletricidade e magnetismo e desenvolveu uma teoria que unificou definitivamente os fenômenos elétricos e magnéticos. E foi muito mais além, ao descobrir que sua teoria continha também os fenômenos ópticos. A partir deste ponto da história, passou a ser consenso

entre os cientistas que os fenômenos elétricos, magnéticos e luminosos eram manifestações diferentes de um mesmo fenômeno geral, denominado campo eletromagnético.

Embora a teoria de Maxwell tenha unificado os estudos da eletricidade, magnetismo e óptica, ela não continha explicações para muitos fatos importantes. Por exemplo, ela foi construída sobre a premissa de que existia um meio (o éter) para justificar a propagação da luz no vácuo. Entretanto, as propriedades apontadas para esse meio eram inconsistentes fisicamente. Também não dava explicações sobre a origem das cargas elétricas nos corpos. Devemos notar que até esta época o conceito de átomo era apenas uma ideia proveniente dos gregos antigos e não se sabia que de fato eles eram formados por unidades ainda menores. Isto só viria ser concretizado após a construção da teoria denominada Mecânica Quântica, na década de 1920 (Young/Freedman, 2009).

A descrição completa destes fenômenos e muitos outros ligados ao tema só viria a ser melhor entendida a partir da década de 1970, com o desenvolvimento da teoria denominada Modelo Padrão. Esta teoria descreve as partículas elementares e a forma como elas interagem entre si. Ela descreve todas as unidades fundamentais que formam tudo que encontramos na natureza. Em outras palavras, ela descreve adequadamente os verdadeiros “átomos”, segundo a concepção grega do indivisível. Para uma revisão mais pormenorizada, o leitor pode consultar algumas páginas dos Departamentos de Física de Universidades na internet, tais como www.ufrgs.br/eletromagnetismo e www.ifi.unicamp.br.

2 Concepções atuais: evolução conceitual

De acordo com a teoria Modelo Padrão, o Universo é preenchido por 17 entidades físicas denominadas “campos”, sendo que cada um deles oscila no espaço e no tempo com amplitude resultante nula. Entretanto, em determinados locais do espaço ou em certos instantes de tempo, essas oscilações se combinam e dão origem à flutuações com amplitude não nula, que permanecem por um curto intervalo de tempo ou duram um tempo infinito. Segundo esta teoria, assim são formadas as partículas fundamentais da natureza. Portanto, o que entendemos como partícula na escala macroscópica, como algo localizado que possui várias propriedades, na escala microscópica ela pode ser entendida como um modo de oscilação de um campo e suas propriedades advêm da interação entre os diversos campos presentes. Ao todo existem 17 tipos diferentes de partículas fundamentais, cada uma associada a seu campo, sendo apenas 3 delas importantes para este trabalho, porque formam tudo que se pode observar na natureza, desde uma gota de água até uma galáxia: elétron, *quark up* e *quark down* (Young/Freedman, 2009).

Os elétrons são partículas bem conhecidas no nosso cotidiano, seja por livros ou pela mídia. Termos tais como aparelho elétrico, corrente elétrica, carga elétrica etc., são bastante familiares ao leitor, sendo que todos fazem menção à esta partícula. Os *quarks*, entretanto, não têm a mesma exposição ao público geral. Isto ocorre porque estas partículas não são encontradas isoladas na natureza, mas geralmente em grupos de duas ou três delas.

Existem 6 tipos de *quarks*, porém será dado destaque a apenas 2 deles, por sua importância para este trabalho. O aglomerado formado por 3 *quarks* (2 *up* + 1 *down*) forma a partícula composta conhecida como próton, enquanto a combinação de 3 *quarks* (1 *up* + 2 *down*) forma a partícula composta conhecida como nêutron. Essas duas últimas partículas formam os núcleos dos átomos. Com exceção do átomo de hidrogênio, que é formado por apenas 1 próton e 1 elétron, todos os outros átomos são formados por elétrons, próton e nêutrons, assim como todas as moléculas e materiais. Em resumo, toda a matéria conhecida é formada por elétrons, *quarks up* e *quarks down*. Os elétrons e prótons podem ser estudados a partir da identificação de três propriedades fundamentais as quais, juntamente com as interações entre as partículas, dão origem a todas as outras propriedades conhecidas: a massa m , a carga elétrica q e o campo magnético intrínseco s (ou *spin*). Os nêutrons possuem massa e *spin*, mas não possuem carga elétrica.

É importante lembrar aqui que, enquanto a massa m pode assumir qualquer valor, a carga elétrica q não pode assumir infinitos valores, mas apenas múltiplos inteiros da quantidade e , que é igual à carga de um elétron ou de um próton. Assim, as cargas dos objetos são iguais à

$q = n(-e)$ ou $q = n(+e)$. A propriedade s só possui dois valores e para as partículas elétron, próton e nêutron eles são $-1/2$ e $+1/2$. Pelo fato das cargas elétricas e do *spin* apresentarem valores com sinais contrários, elas formam dois polos ou, como é mais familiar, formam dipolos.

Quanto aos campos associados às partículas, para os objetivos desta dissertação é suficiente dizer eles recebem os nomes de campo de Higgs H (associado a m), campo elétrico \vec{E} (associado a q) e campo magnético \vec{B}_s (associado a s). Como será visto, o movimento de uma partícula com as propriedades m e q também produz um campo magnético \vec{B}_q , que apresenta características semelhantes ao campo de *spin* \vec{B}_s , inclusive havendo superposição. Portanto, além do campo magnético \vec{B}_s associado ao *spin* s , temos o campo magnético \vec{B}_q associado à q e a \vec{v} . Será visto também que o movimento coletivo de cargas elétricas, denominado de corrente elétrica, também gera um campo magnético, que será descrito por \vec{B}_I . Embora tenham origens diferentes, pelo menos é o que as teorias têm dado a saber, quanto aos seus efeitos, estes campos magnéticos \vec{B}_s , \vec{B}_q e \vec{B}_I serão tratados de forma semelhante neste trabalho, sendo que as diferenças serão dadas a saber apenas pelas suas aplicações. São estes campos que estão intimamente ligados ao fenômeno da indução magnética, tema central desta dissertação.

Quanto às partículas que geram o campo magnético \vec{B}_q , elas podem tanto se mover em torno do núcleo de um átomo, como os elétrons o fazem, ou fora do próprio átomo, como os elétrons livres dentro de um condutor em um circuito elétrico ou qualquer outra partícula carregada eletricamente. O importante para gerar este tipo de campo magnético é que as partículas tenham carga elétrica e estejam em movimento. Enquanto a Eletrodinâmica Clássica estuda as consequências da presença q e v na formação de \vec{B}_q e \vec{B}_I , a Mecânica Quântica se encarrega da explicação do campo magnético \vec{B}_s devido ao *spin*, s . Em certos aspectos é possível entender a propriedade s a partir da Eletrodinâmica Clássica e esta será a ênfase neste trabalho.

Até hoje não se sabe exatamente qual a origem da carga elétrica. Entretanto, sabemos que ela está presente em mesma quantidade nas partículas prótons e elétrons que compõem os átomos, mas com efeitos opostos. Benjamim Franklin designou esses efeitos opostos de positivo e negativo. Devemos deixar claro, contudo, que os termos positivo e negativo usados por ele é apenas uma nomenclatura, não querendo dizer que existam cargas positivas e negativas na natureza. Franklin poderia ter usado qualquer par de palavras que tivessem a ideia de algo contrário, como direita e esquerda, preto e branco, acima e abaixo. Podemos verificar que a

carga elétrica possui este comportamento colocando-se dois prótons ou dois elétrons próximos – eles se afastam espontaneamente. Colocando-se um próton e um elétron próximos eles se aproximam espontaneamente.

Como será visto, estes efeitos possuem profundas implicações na natureza, haja vista que seu equilíbrio é determinante para a formação dos átomos, das moléculas e, finalmente, da existência dos corpos. Com efeito, as forças que atuam na escala macroscópica, responsáveis pela estrutura da matéria e por quase todos os fenômenos físicos e químicos que intervêm em nossa vida diária, são de natureza magnética. Além de sua importância quanto à formação dos corpos, o eletromagnetismo é o ramo da ciência que contribuiu significativamente para evolução tecnológica para o bem-estar humano. Para uma discussão mais detalhada sobre o assunto desta seção, o leitor é encorajado a ler o artigo “O Modelo Padrão da Física de partículas” do professor Marco Antonio Moreira. (Revista Brasileira de Física, v.31, n.1, p.1306, 2009)

3 A origem do campo magnético e suas implicações

Este trabalho tem como objetivo fornecer algumas explicações e implicações mais significativas sobre o fenômeno da indução magnética, além de descrever roteiros para a execução de experiências simples, visando facilitar o ensino de Física para o 3º ano do Ensino Médio. Para tanto, é necessário fazer uma breve revisão sobre os conteúdos discutidos anteriormente sobre campo magnético e força magnética. Segundo a visão dos autores, é importante que a matematização dos conceitos seja feita de forma concomitante às discussões dos mesmos por meio de demonstrações simples, evidenciando a manifestação de cada aspecto sob várias condições diferentes. Deste modo, o estudante pode entender melhor como as equações são formadas e qual o propósito de cada variável contida nelas. Esta é uma abordagem diferente das encontradas nos livros do PNL D, nos quais o professor e estudantes encontram “fórmulas lançadas no meio do texto sem muita contextualização”.

3.1 Uma aula diferente: brincando com ímãs e bússolas

Para o ensino de conceitos mais abstratos, como é o caso de campo magnético e força magnética, é sempre importante o professor iniciar suas atividades pedagógicas com demonstrações simples, porém concretas e bastante elucidativas. O professor deve preparar o cenário e estimular o estudante, consciente de que é este quem deve tomar a atitude de ir buscar novos saberes. No caso específico do ensino sobre o campo magnético e suas manifestações, o professor sugere solicitar na aula anterior que os estudantes instalem um aplicativo de bússola. Por questões de uniformidade, um único aplicativo deve ser indicado, de preferência um de boa qualidade e que seja disponibilizado gratuitamente nas lojas de aplicativos. O professor também sugere dispor de algumas bússolas físicas em sala de aula, além de dois ímãs cilíndricos e 1 m linha fina e resistente. Estes são materiais de baixo custo e cuja aquisição está ao alcance de todos os professores.

Antes do início das atividades de demonstração, o professor pede aos estudantes que identifiquem com suas bússolas eletrônicas a direção do Norte geográfico da Terra em relação à sala de aula. Pedimos aos estudantes que girem seus celulares na horizontal e observem a posição da agulha da bússola. A conclusão é que a posição da agulha não muda em relação à sala, embora os celulares estejam sendo girados. Uma vez identificada a direção Norte, o professor pode disponibilizar aos estudantes algumas bússolas, chamando a atenção para escala e a agulha de metal imantada no centro. Neste momento o professor pode aguçar a curiosidade

dos estudantes aproximando um dos ímãs dos celulares e pedindo aos estudantes que observem o que ocorre. A conclusão deles é que a posição do desenho da agulha não se altera com a presença do ímã. O professor faz a mesma experiência com a bússola portátil e os alunos verificarão que a posição da agulha é muito sensível com a presença do ímã. O professor informa que esse fenômeno será explicado posteriormente.

Com este novo conhecimento adquirido, o professor solicita aos estudantes que guardem seus celulares e deem atenção à próxima etapa. Ele prende a extremidade de uma porção de 50 cm da linha no centro de um dos ímãs de modo que ele fique pendurado na horizontal. Faz o mesmo com uma caneta. Fazemos uma marcação com pincel na face do ímã que fica apontada para o Norte geográfico, para facilitar a identificação durante a demonstração. O professor chama a atenção da turma para que observe, gira cuidadosamente o ímã pendurado até um certo ângulo pequeno e o solta. Pede para que os estudantes observem que no final de algumas oscilações o ímã retornará à posição original, ou seja, a face marcada retornará ao mesmo local. Isso significa que tem “algo” forçando o ímã a permanecer naquela posição privilegiada. Deve ser “a mesma coisa” que agiu sobre as agulhas das bússolas, impedindo que elas girassem junto com os celulares e que também agiu sobre a bússola portátil mudando drasticamente sua posição angular. O professor deve informar que a agulha na bússola de um celular é apenas um desenho e não um ímã. Mas dentro do aparelho tem dispositivos microscópicos que desempenham o mesmo papel do ímã que está em suas mãos e que serão melhor entendidos em outro momento da sequência didática. Devemos deixar claro que o desenho da agulha na tela é programado para seguir a orientação determinada pelos ímãs microscópicos.

O professor deve chamar a atenção para o fator localização do efeito: em toda a extensão da sala todas as bússolas e o ímã do professor apontaram para a mesma direção. Então, o que quer que esteja agindo sobre os celulares e sobre o ímã está agindo não apenas em um local, mas em todos os lugares. Não é necessário o estudante fazer a experiência em toda a superfície do planeta para se convencer de que esse fenômeno está em todos os locais nas proximidades da Terra.

Com a finalidade de aguçar ainda mais a curiosidade da turma para o assunto, o professor solicita auxílio a dois estudantes. Um segura a linha com o ímã e outro a linha amarrada no meio de uma caneta. Certifique-se de que eles estejam afastados um do outro para evitar choque entre ímã e caneta durante a movimentação. Chame a atenção da turma para que todos vejam para que lado o ímã está apontado (se não houver impedimentos a face do ímã marcada deve estar apontando para o polo Norte da Terra). Depois peça para cada estudante dar uma volta completa em torno de seu próprio corpo, de forma bem lenta para evitar que os

objetos oscilem. Enquanto eles estão girando lentamente, solicite ao restante da turma que observe atentamente a posição da caneta e da face marcada do ímã. Ao final da demonstração, estimule a classe para debater os resultados da observação com as seguintes questões: 1) Por que a caneta girou 360 graus em relação à sala, junto com o estudante que a segurou, enquanto o ímã continuou apontando sempre para o mesmo lado, ou seja, sem girar? 2) O que tem no ímã e não tem na caneta para ter acontecido isto? 3) Como é possível provar que o ímã permaneceu parado por causa de “alguma coisa” que veio da Terra? Isto certamente despertará a curiosidade dos estudantes para o que se seguirá.

Neste ponto é importante ter em mente que, embora se diga que é o campo magnético da Terra que está agindo sobre as bússolas e sobre o ímã, não se sabe ainda o que é um campo magnético e nem como ele é gerado, nem na Terra e nem nos ímãs. Mas é necessário partir de algum ponto e considerar que existe um campo magnético \vec{B}_q ou \vec{B}_l gerado pela Terra, analisar sua influência sobre determinados objetos (ímã e celulares) que se pode dizer serem também dotados de um campo magnético do tipo $\vec{B}_{q,l}$ ou \vec{B}_s . A partir da observação da interação entre o campo magnético da Terra e do objeto, podemos fazer medidas de algumas quantidades e, a partir dos padrões observados, podemos finalmente conhecer o que é o campo magnético.

Antes de iniciar a explicação sobre o que é um ímã, como ele influencia ou é influenciado pelo ambiente ao seu redor, o professor sugere fazer alguma experiência para convencer os alunos de que o ímã de fato está sendo influenciado pela Terra por meio de seu campo magnético, ou seja, que foi a Terra com seu $\vec{B}_{q,l}$ que forçou o ímã a ficar parado durante a rotação do estudante. Para isso, ele deve providenciar outro ímã, semelhante ao usado na primeira demonstração e então pedir auxílio a um terceiro estudante. A ideia aqui é provar que um ímã tem \vec{B}_s e que esse \vec{B}_s interage com o $\vec{B}_{q,l}$ da Terra e se alinha com ele. O professor instrui o estudante a aproximar os dois ímãs cuidadosamente, bem devagar e, sob seu comando, pede para ele descrever para os colegas da sala o que está sentindo: 1) uma força de atração ou de repulsão entre os ímãs? 2) A força é a mesma desde longe ou ela aumenta bruscamente quando os ímãs estão bem próximos? 3) Se a força for de repulsão (atração), o professor deve pedir ao estudante que gire um dos ímãs de 180 graus, repita a experiência e responda às mesmas perguntas.

Para dar mais credibilidade às respostas dos estudantes, o professor sugere solicitar o auxílio de um quarto estudante, de preferência um que esteja mais distraído ou alheio ao que está acontecendo. Isso pode motivá-lo a se interessar pelo aprendizado do conteúdo, uma vez que participa diretamente da ação. No final da demonstração, o professor sugere explicar que

cada ímã tem um campo \vec{B}_s , cuja origem será explicada posteriormente. O campo magnético \vec{B}_s se estende por toda a região externa do ímã, mas de maneira não uniforme, ou seja, ele é mais concentrado nas faces do ímã cilíndrico (e regiões próximas a estas) do que em suas laterais. Isto pode ser facilmente confirmado na experiência de aproximar os dois ímãs no qual do lado de dentro do ímã o campo é praticamente uniforme.

O professor pode provar este fato para os estudantes colocando o ímã sob uma folha de papel com limalha de ferro sobre ela. A limalha de ferro pode ser obtida a partir de palhas de aço facilmente encontradas em todas as cozinhas. Após estas demonstrações, o professor pode explicar que o ímã é uma porção de matéria que apresenta imantação produzida natural ou artificialmente. A imantação é fenômeno físico que resulta do alinhamento dos momentos de dipolo magnético. Um momento de dipolo magnético, por sua vez, é uma maneira bem prática de representar um campo magnético, porque ele é escrito em termos de propriedades mensuráveis do ímã e será mostrado mais adiante.

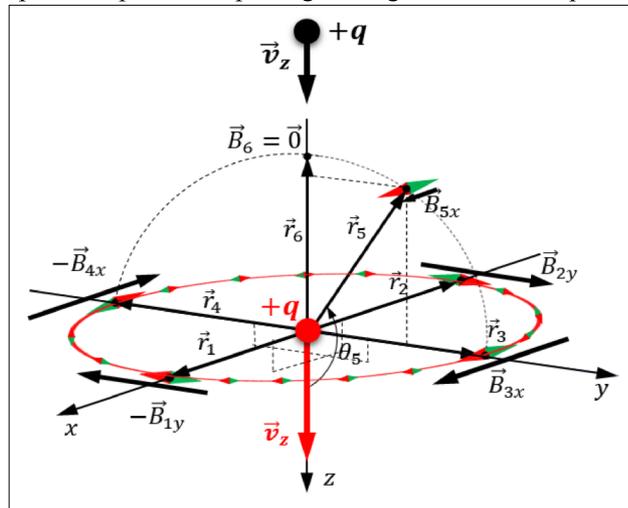
3.2 Campo magnético gerado por uma carga em movimento

Para construir um modelo matemático destas ideias, lembre-se que foi mencionado na seção anterior que o campo magnético $\vec{B}_{q,l}$ pode ser gerado a partir do movimento dos elétrons, em torno do núcleo ou não, ou do movimento de outras partículas carregadas eletricamente fora dos átomos, como em um circuito com corrente elétrica, trocas iônicas, movimento de convecção de fluidos carregados, etc., assim como o campo magnético \vec{B}_s é gerado pela propriedade *spin*. É melhor começar a construir o modelo por algo concreto e, a partir dele, estender as ideias para algo mais abstrato. O que se tem de concreto até aqui é que a Terra força o ímã a se alinhar sempre na direção dos polos Norte-Sul terrestre do planeta. Então, o que quer que haja dentro do ímã, este também deve apontar na mesma direção Norte-Sul do planeta, quando está na posição de repouso, como na demonstração feita anteriormente.

Conforme visto em aulas anteriores, uma partícula carregada eletricamente em movimento cria um campo magnético \vec{B} cuja descrição foi realizada experimentalmente pelos físicos franceses Jean-Batiste Biot e Félix Savart, em 1820. Após muitas experiências, usando bússolas e fios com corrente elétrica dispostos verticalmente, eles descobriram o valor e a direção do campo magnético produzido por partículas carregadas eletricamente em todas as regiões do espaço no entorno destas (Figura 2). Neste caso, em vez de uma corrente elétrica, mostramos uma única carga em movimento, criando um campo, porque o foco neste momento

é determinar o campo gerado por uma carga elétrica em movimento. Posteriormente será feita a extensão dos resultados para o caso de uma corrente elétrica (Tripler e Mosca, 2017).

Figura 2. Representação simplificada para o campo magnético gerado no vácuo por uma carga $+q$ em movimento.



Fonte: os autores (2020)

Legenda: verde- Norte, vermelho-Sul.

A Figura 2 ilustra uma possível maneira para identificar o campo magnético produzido por uma partícula que se move verticalmente na direção do eixo z . Colocamos o fio na vertical por causa da limitação do movimento da agulha da bússola, que é sempre no plano horizontal. A ideia é usar várias bússolas ao redor do eixo z e observar como as suas agulhas giram quando a partícula se aproxima delas. Será feita inicialmente uma análise do campo magnético no plano que contém a partícula (plano xy da Figura 2). Todas as agulhas das bússolas inicialmente estão paralelas e apontam no sentido do polo Norte da Terra. Quando a partícula passa pelo plano xy a agulha da bússola colocada no ponto 1 (sobre o eixo y e identificado pelo vetor posição \vec{r}_1) aponta no sentido negativo de y , conforme ilustrado pelo símbolo de uma agulha de bússola e pelo vetor $-\vec{B}_{1y}$ indicando o sentido do campo. Observando a bússola colocada à mesma distância no ponto 2, oposto ao ponto 1 sobre o eixo x (identificado pelo vetor posição \vec{r}_2), sua agulha se alinha também o eixo y , mas apontando no sentido positivo e o campo é \vec{B}_{2y} . De modo semelhante, as bússolas colocadas nas posições 3 e 4 (identificadas pelos vetores posição \vec{r}_3 e \vec{r}_4), tem suas agulhas apontadas nos sentidos positivo e negativo do eixo x , respectivamente, conforme ilustrado na figura pelos campos \vec{B}_{3x} e $-\vec{B}_{4x}$.

Observando as posições das agulhas chegamos à conclusão que, para quem olha de cima para baixo, o campo magnético pode ser imaginado como sendo formado por linhas circulares, com orientação bem definida no sentido horário. Isto está ilustrado pela linha circular contendo

pequenos símbolos de agulhas sobre ela. Observamos também que se o valor da carga elétrica da partícula for aumentado, a agulha se movimenta com maior facilidade, indicando que o valor do campo magnético aumenta neste local. Mantendo as bússolas nos mesmos locais e aumentando-se o valor da velocidade da partícula, percebemos que o valor do campo também aumenta. Isto indica que o campo magnético é diretamente proporcional à carga elétrica e também à velocidade da partícula, ou seja $B \propto qv$. Se as bússolas são afastadas do eixo z , ainda sobre o plano xy , observamos uma redução no valor do campo magnético. Então, o valor do campo gerado é inversamente proporcional à distância até a partícula em movimento. Fazendo-se muitas medidas em função da distância do eixo z é possível descobrir a dependência do campo com a distância, que vem a ser $B \propto 1/r^2$.

Outro fato que se observa é que se a bússola for colocada sobre o eixo z (ponto 6, identificado pelo vetor \vec{r}_6), sua agulha não será afetada pelo movimento da partícula. Isto indica que a partícula não produz campo magnético na direção do seu movimento (identificado como $-\vec{B}_6$), mesmo que a velocidade e a carga elétrica sejam grandes. Então tem mais alguma coisa que afeta o valor do campo magnético da partícula, além de q , v e r . Para descobrir o que é, colocamos uma bússola fora dos eixos, como exemplo no ponto 5, identificado pelo vetor \vec{r}_5 cujo módulo é igual aos outros vetores. Neste local, com a bússola sobre o plano yz , verificamos que o campo magnético aponta na direção positiva do eixo x , mas seu valor é menor. Mantidos os valores de q , v e r constantes e variando-se o local da bússola ao longo da linha circular do ponto 3 ao ponto 4, passando pelos pontos 5 e 6, descobrimos que o valor do campo magnético muda de máximo para zero de acordo com a função seno. Portanto, todas essas observações podem ser condensadas na seguinte equação matemática:

$$B_q = \frac{\mu_0 qv \text{sen}\theta}{4\pi r^2}. \quad (1)$$

O símbolo μ_0 , denominado constante magnética, representa a facilidade com que o vácuo é magnetizado. Seu valor é tabelado de forma exata e vale $\mu_0 = 4 \times 10^{-7} \text{ H/m}$. H é a unidade de indução magnética, dada em homenagem a Joseph Henry, um dos estudiosos do fenômeno da indução magnética, conforme será discutido mais adiante. A constante 4π é proveniente do uso do sistema internacional de unidades. Baseado na equação, vemos que o campo magnético é máximo na direção perpendicular à velocidade, sobre o plano xy que contém a partícula, no qual θ forma um ângulo de 90° em relação à velocidade, pois $\text{sen}\theta = 1$. Este é o cenário das posições 1 a 4 da Figura 2. Na direção do movimento da partícula ($\theta =$

0° ou $\theta = 180^\circ$) o campo magnético é nulo, pois $\text{sen}0^\circ = 0$ e $\text{sen}180^\circ = 0$. Em todas as outras direções o valor do campo é intermediário a esses. Se em vez de única partícula houvesse várias, o valor do campo seria máximo em toda a extensão do fio, perpendicular ao mesmo (Tripler e Mosca, 2017).

Para encerrar esta discussão inicial vale à pena ressaltar que, diferente do campo eletrostático de um dipolo elétrico, que é interpretado como saindo da carga positiva e se dirigindo para a carga negativa, o campo magnético não se inicia em um ponto específico do espaço e nem se dirige para outro, mas forma linhas circulares fechadas com a partícula no seu centro. Entretanto, uma maneira de facilitar o entendimento dessa propriedade campo magnético é observando seu comportamento em uma pequena região apenas, como exemplo no entorno do ponto 1. O campo $-\vec{B}_{1y}$ aí pode ser imaginado como sendo gerado por algo que esteja do lado positivo do eixo y e que se dirige para algo que esteja do lado do mesmo eixo.

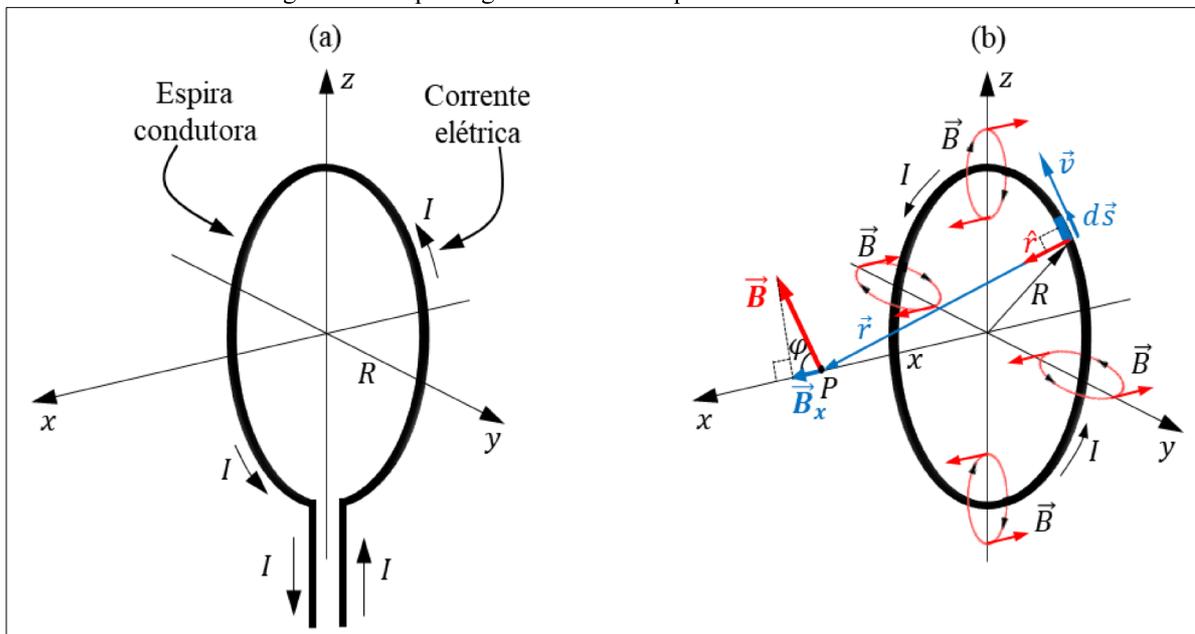
Na verdade, não existe “esse algo” que esteja criando este campo nessas regiões. Já foi visto que quem cria esse campo magnético é a partícula que está na origem dos eixos. Mas para facilitar seu entendimento e aplicações, é importante manter alguma analogia com algo mais concreto, como o dipolo elétrico formado por duas partículas eletricamente carregadas com sinais opostos. Nesse cenário, dizemos que existe um dipolo magnético e o seu campo magnético aponta em uma direção específica, assim como o dipolo elétrico. Por uma razão que será vista logo a seguir, os sentidos associados à essa direção são denominados de Norte e Sul magnético, e não positivo e negativo, como no dipolo elétrico. Quando existe campo magnético em uma determinada região dizemos que ela está imantada. O próprio termo ímã se refere a este fato, ou seja, uma porção de matéria que se comporta como os vetores que representam os campos da Figura 2.

3.3 Campo magnético gerado por uma corrente elétrica

Agora podemos estender as noções de campo magnético de várias cargas em movimento (movimento de um feixe de cargas) em condutores. Este é de longe o cenário mais importante, porque os circuitos sempre são alimentados com correntes, constantes ou não. Motivados pelo comportamento circular do campo no entorno da carga da Figura 2, formando localmente o que foi definido como dipolo magnético, será escolhido um circuito no formato circular de raio R para estudar o campo de uma corrente I e verificar seu comportamento para ser utilizado em futuras aplicações. Este tipo de circuito, denominado de espira, está representado pela Figura

3a. Todos os resultados obtidos para espiras circulares se aplicam para o caso de espiras com qualquer formato, desde que o condutor forme uma superfície fechada.

Figura 3. Campo magnético de uma espira com corrente elétrica.



Fonte: os autores (2020)

A Figura 3b é uma idealização de uma espira real. Usando a regra da mão direita é fácil descobrir como o campo magnético se distribui em torno do fio. Assim como no caso da carga única no plano xy da Figura 2, o campo magnético gerado pelo aglomerado de cargas em movimento (corrente elétrica) forma círculos concêntricos com o condutor, sendo mais intenso próximo ao fio. Entretanto, diferente do caso de uma carga apenas, esse tipo de geometria para o movimento das cargas resulta em um campo que aponta no sentido positivo do eixo x ao longo de toda a região do interior da espira e aponta para o sentido negativo de x em toda a região fora dela. Isto está ilustrado em quatro pontos da espira. Podemos adaptar a lei de Biot-Savart para determinar o campo magnético em qualquer local, fazendo aparecer a corrente explicitamente na equação. Para isso, basta considerar que uma quantidade de carga elétrica Δq em movimento ocupe um trecho muito pequeno de tamanho Δs da espira (ilustrado na parte superior direita da Figura 3b), sendo $\Delta \vec{s}$ um vetor deslocamento paralelo à velocidade \vec{v} das partículas e $\vec{v} = \Delta \vec{s}/dt$ (Young/Freedman, 2009). Sem entrar em detalhes da demonstração, o campo magnético gerado pela pequena corrente dentro do pequeno pedaço de fio Δs pode ser escrita como:

$$\Delta B_{ix} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I \Delta s}{r^2} \cos \varphi. \quad (2)$$

Observe na Figura 3b que o campo no ponto P aponta apenas na direção do eixo x . Com estamos calculando o campo sobre o eixo x , as componentes de B na direção do eixo y são canceladas, conforme ilustrado na Figura 3b. que esta fórmula fornece o campo magnético apenas para um pequeno segmento da corrente que se encontra dentro de $\Delta\vec{s}$. Para saber o campo magnético total é necessário somar o campo de todos os outros segmentos ao longo de todo o caminho fechado. Isso só pode ser feito quando se souber a geometria da espira. Para ilustrar como isso é feito, o campo magnético de um segmento de corrente está indicado na Figura 3b. Para facilitar os cálculos, apenas o campo sobre o eixo x será calculado, ou seja, ao longo do eixo da espira. Mas este cálculo pode ser generalizado para encontrar o campo em qualquer local e ângulo. O ângulo entre a direção da velocidade e os eixos y e z é 90 graus e assim todas as componentes do campo magnético na direção y e z são canceladas pelos campos produzidos pelas correntes dentro dos pedacinhos de fio $\Delta\vec{s}$ em lados opostos da espira. Podemos mostrar que o campo magnético no ponto P devido a toda corrente da espira a uma distância x da origem é escrita como:

$$\vec{B}_{\text{espira}} = \frac{\mu_0}{2} \frac{IR^2}{(x^2 + R^2)^{3/2}} \hat{x}. \quad (3)$$

Detalhes da demonstração deste resultado se encontram no Apêndice F. Segundo Young/Freedman (2009), este resultado revela como o campo magnético se distribui ao longo do eixo da espira (eixo x), seja do lado positivo ou negativo deste. O fato dele depender de x^2 mostra que o campo é sempre positivo, ou seja, aponta sempre no mesmo sentido, já que $(-x)^2 = (+x)^2$. Neste caso no sentido positivo do eixo x . Existem duas regiões de particular interesse para futuras aplicações, que são o campo no centro da espira e também muito longe desta. Para achar o campo no centro da espira basta fazer $x = 0$ na Equação (3). O resultado fica reduzido a:

$$\vec{B}_{\text{centro}} = \frac{\mu_0 I}{2R} \hat{x}. \quad (4)$$

Este é o maior valor possível para o campo magnético e depende da corrente I e do raio R da espira. No outro extremo, podemos encontrar o valor do campo fazendo $x \gg R$ na Equação 3. O resultado fica reduzido a:

$$\vec{B}_{\text{espira}} \approx \frac{\mu_0 IR^2}{2} \frac{1}{x^3} \hat{x} = \frac{\mu_0}{2} \frac{2\pi IR^2}{2\pi x^3} \hat{x} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2I(\pi R^2)}{x^3} \hat{x} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2IA}{x^3} \hat{x},$$

ou

$$\vec{B}_{\text{espira}} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2\vec{\mu}}{x^3}. \quad (5)$$

Aqui $A = \pi r^2$ é a área da espira e,

$$\vec{\mu} = IA\hat{x}. \quad (6)$$

O símbolo $\vec{\mu}$ é um vetor denominado momento do dipolo magnético, que aponta sempre na direção e sentido do campo magnético e, portanto, perpendicular ao plano da espira. Esta é uma propriedade muito importante do ponto de vista prático, porque quando se diz que um campo magnético se alinha com outro, como no caso dos campos da bússola e da Terra, queremos dizer que o momento de dipolo de um se alinha com o momento de dipolo do outro. O alinhamento aqui é sempre acompanhado de uma rotação do vetor $\vec{\mu}$ do dipolo magnético. Portanto, a força magnética de um dos campos produz um torque cujo valor é $\tau = rF_B \text{sen}\alpha$ sobre o vetor $\vec{\mu}$ do outro campo, fazendo-os se alinharem.

Antigamente, o torque de uma força era denominado de “momento de uma força”, de modo que o torque de uma força magnética passou a ser designado como “momento da força magnética”, ou momento magnético do dipolo, em alusão ao fato de que, em geral, sobre $\vec{\mu}$ existe um torque quando o dipolo é colocado em um campo externo. Isso porque os dipolos inicialmente estão distribuídos aleatoriamente. Se todos já tivessem orientados com o campo externo não haveria esse torque.

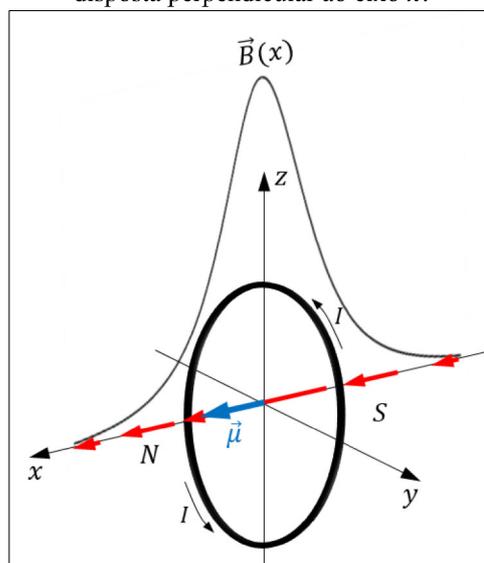
A medida direta do campo magnético (o lado esquerdo da Equação 5) é uma tarefa difícil, enquanto a medida de $\vec{\mu}$ é relativamente fácil, pois depende apenas de I e de A , conhecendo x . Portanto, tendo o lado direito da Equação 5 obtemos o campo \vec{B} .

Para facilitar a visualização e interpretação do campo das Equações 3 a 5, veja a Figura 4. O valor do campo magnético longe da espira tende a zero (Equação 5) e aumenta sempre apontando para o sentido positivo do eixo x . A curva acima da espira ilustra o valor do campo, enquanto os vetores sobre o eixo x ilustram seu comportamento global como um vetor. No centro da espira ele atinge o valor máximo (Equação 4). Concluimos que a espira se comporta como um dipolo magnético, como se o campo saísse do lado negativo de x e se dirigisse para o lado positivo. Isto está indicado pelo vetor momento de dipolo magnético $\vec{\mu}$. A espira

apresenta comportamento semelhante ao de um ímã. Essa associação será usada de agora em diante neste trabalho. O vetor $\vec{\mu}$ aponta do “polo Sul para o polo Norte” do ímã representado fisicamente aqui por uma espira condutora. Quando se estuda uma espira com corrente elétrica ou um ímã geralmente estes são representados por seus vetores $\vec{\mu}$, e não pela espira ou ímã enquanto objetos.

Antes de ir para a próxima seção, vale a pena chamar a atenção para o símbolo μ usado nesse texto. Em alguns lugares ele aparece como um subíndice 0, μ_0 , sem uma seta na parte superior. Esse símbolo representa a permeabilidade magnética do vácuo. Nesta seção μ aparece como com uma seta superior, $\vec{\mu}$, indicando que se trata do vetor momento de dipolo magnético. No contexto dessa seção, às vezes ele aparece sem a seta, μ , indicando que é apenas o módulo do vetor momento de dipolo magnético. Mas à frente ele vai aparecer como μ_{mat} , representando a permeabilidade magnética da matéria. Pelo contexto da discussão ficará claro a que propriedade o símbolo estará relacionado (Young/Freedman, 2009).

Figura 4. Perfil da intensidade do campo magnético na direção do eixo x para uma espira com corrente elétrica disposta perpendicular ao eixo x .



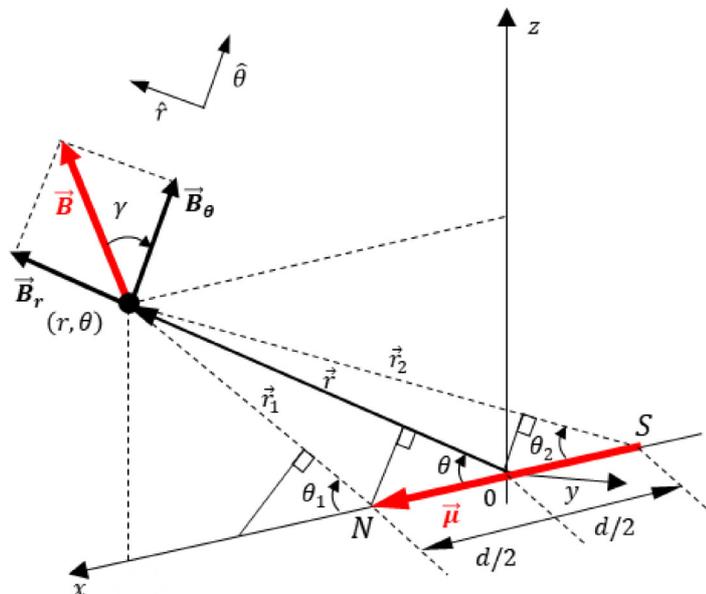
Fonte: os autores (2020)

3.4 Campo magnético gerado por um dipolo e solenoide

Conforme mostrado na Figura 4, o campo magnético da espira foi calculado apenas sobre o seu eixo (eixo x). Entretanto, algumas informações importantes ficaram de fora quando se toma um caso particular. Sem entrar em detalhes dos cálculos, será discutido brevemente o comportamento do campo ao longo de todo o plano xz perpendicular ao plano da espira da

Figura 4. A Figura 5 ilustra um dipolo magnético $\vec{\mu}$ na origem do sistema coordenadas. Observe atentamente que a espira com corrente foi substituída por um dipolo magnético. Lembre-se que no início havia uma espira circular com uma corrente elétrica. Após o cálculo do campo magnético, este foi escrito em função apenas do momento magnético $\vec{\mu}$ do dipolo formado (Equação 6). Na forma como a Equação 5 foi escrita, podemos interpretá-la dizendo que a fonte do campo magnético é a corrente elétrica I , aqui descrita pelo momento magnético ($\vec{\mu} = IA\hat{x}$). Este modelo facilita muito os cálculos dos campos magnéticos dos materiais e isso será usado de agora em diante. Observe que a corrente I e a área A são propriedades facilmente medidas, de modo que $\vec{\mu}$ é experimentalmente fácil de ser obtido.

Figura 5. Campo magnético de um dipolo magnético. O campo em qualquer ponto do plano (x, z) é dado pelas componentes \vec{B}_r e \vec{B}_θ . Sobre o eixo x $B_\theta = 0$ e sobre o eixo z $B_r = 0$.



Fonte: os autores (2020)

O campo magnético fora dos eixos x e z possui duas componentes: uma na direção do raio r (\vec{B}_r) e outra na direção do ângulo θ (\vec{B}_θ). Os cálculos serão feitos no sistema de coordenadas polares (r, θ) por serem mais simples. Eles sim, são relevantes para as discussões e aprendizado. O campo magnético total e suas componentes \vec{B}_r e \vec{B}_θ são, respectivamente iguais a (W. Lowrie, 2007):

$$\vec{B}_{dipolo} = \vec{B}_r + \vec{B}_\theta. \quad (7)$$

Sendo,

$$\vec{B}_r = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi r^3} 2\cos\theta \hat{r} \quad \text{e} \quad \vec{B}_\theta = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi r^3} \sin\theta \hat{\theta}. \quad (8)$$

Os detalhes das demonstrações da Equação (10) estão no apêndice G. Na região dos polos (sobre o eixo x), $\theta = 0$ e apenas a componente B_r sobrevive com valor igual a:

$$\vec{B}_r = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2\mu}{r^3} \hat{r}. \quad (9)$$

Observe que este é o mesmo resultado mostrado na Equação 5. Na região do equador do dipolo, sobre o eixo z ($\theta = 90^\circ$) apenas a componente B_θ sobrevive, e tem valor igual a:

$$\vec{B}_\theta = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{\mu}{r^3} \hat{\theta}. \quad (10)$$

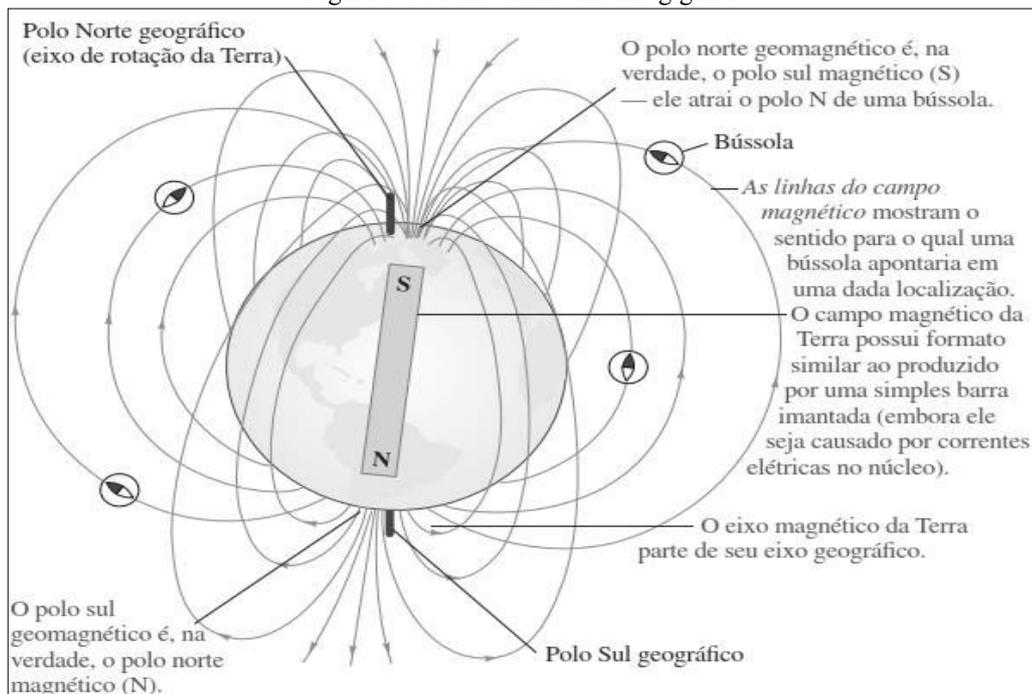
Estes resultados revelam que a intensidade do campo magnético na região dos polos é duas vezes maior do que na região do equador do dipolo magnético. Além disso, definindo a inclinação magnética γ como o ângulo formado pelo campo total \vec{B} em um ponto e a direção horizontal local ($\hat{\theta}$), temos:

$$\tan \gamma = \frac{B_r}{B_\theta} = \frac{\frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2\mu}{r^3}}{\frac{\mu_0}{4\pi} \frac{\mu}{r^3}} = 2 \cot \theta = 2 \tan(90^\circ - \theta). \quad (11)$$

Em sua obra “De Magnete”, de 1600, William Gilbert verificou que o campo magnético da Terra se comportava como um dipolo cuja direção era a mesma do raio da Terra e seu centro coincidia com o centro da Terra. A teoria mais aceita hoje é que o campo da Terra seja gerado por correntes de convecção de ferro fluido ionizado do núcleo da Terra em direção à sua crosta. Por causa da rotação do planeta de Oeste para Leste, forças laterais (de Coriolis) deslocam a massa carregada eletricamente na direção Leste-Oeste, formando espiras de correntes cujo eixo liga os polos Norte-Sul da Terra. Como a massa em movimento não é homogênea, o eixo do dipolo magnético formado não coincide com eixo Norte-Sul da Terra. A Figura 6 ilustra o campo da Terra. O eixo do dipolo magnético está ligeiramente inclinado em relação aos eixos dos polos geográficos, sendo que o polo sul magnético aponta para o polo norte geográfico. Esta é a direção em que as bússolas dos celulares e dos dispositivos aponta naturalmente, caso não haja outra fonte de campo magnético nas proximidades destes. Devido à concentração maior das linhas de campo nos polos, seu valor aí é maior, conforme análise das Equações 9 e 10.

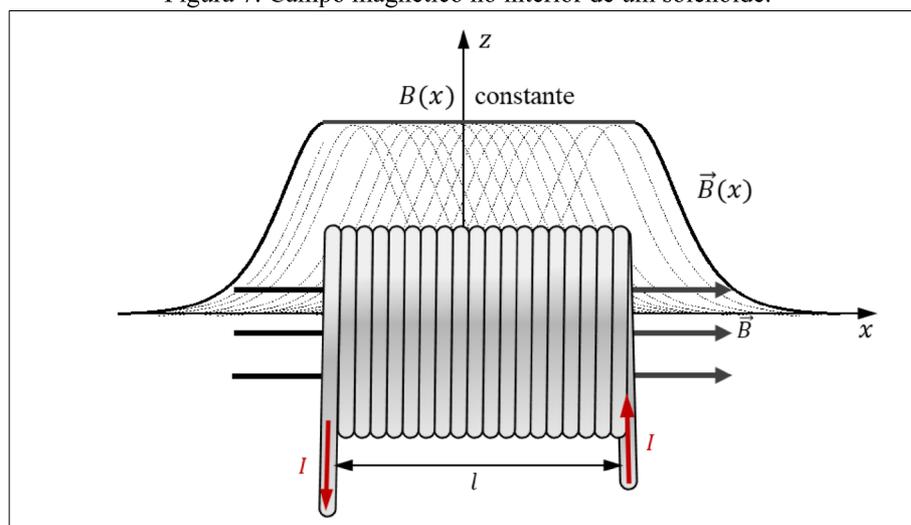
Devido ao tamanho do planeta, o campo magnético da Terra é aproximadamente constante nas aplicações em distâncias típicas do cotidiano. Entretanto, em muitas aplicações do fenômeno da indução magnética, é necessário que o campo magnético produzido por ímãs naturais ou artificiais também sejam constantes dentro de uma certa região do espaço. Com apenas uma espira isso não é possível, conforme mostrado na Figura 4. Entretanto, se forem colocadas muitas espiras bem próximas umas às outras, os campos de todas elas irão se superpor. No lado interno do conjunto de espiras o campo magnético aponta para o mesmo sentido e o resultado é a envoltória mostrada na Figura 7. A essa estrutura formada por várias espiras juntas damos o nome de solenoide ou bobina. Assim como uma espira serve como modelo para um dipolo magnético, um solenoide é uma representação para um campo magnético constante em uma região do espaço, bem como serve para representar um ímã. Um dos dispositivos mais importantes de um circuito eletrônico com corrente alternada é denominado de indutor, que nada mais é do que uma bobina construída com N espiras na forma de um solenoide de comprimento l . Dentro da bobina o campo magnético de cada espira aponta para o mesmo sentido e a soma de todos eles tem valor aproximadamente constante, sendo que o valor total depende do número de espiras. Fora da bobina o campo de cada espira aponta para direções diferentes e o valor total é praticamente nulo (Young/Freedman, 2009).

Figura 6. A Terra forma um ímã gigante.



Fonte: Young e Freedman (2009)

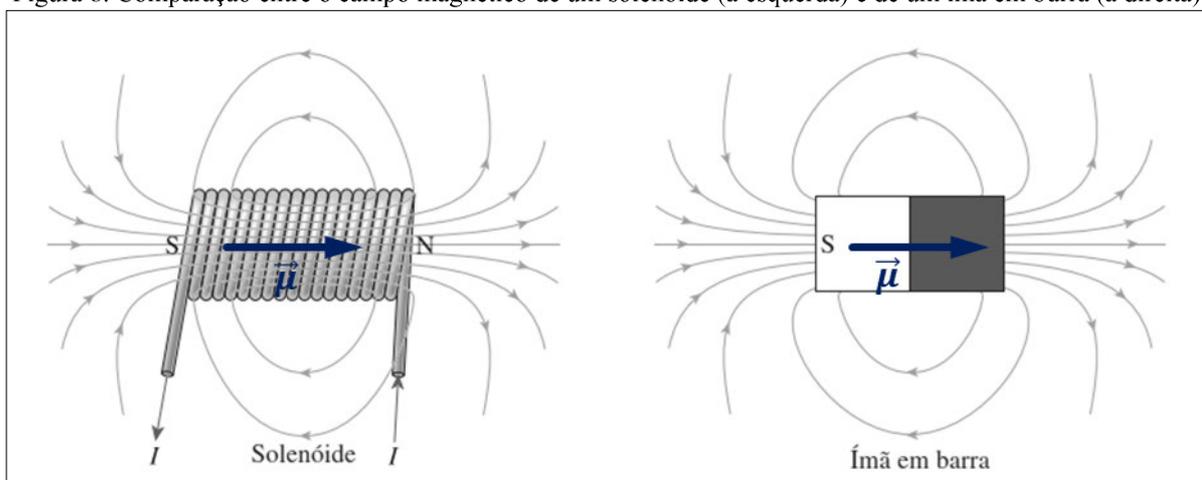
Figura 7. Campo magnético no interior de um solenoide.



Fonte: os autores (2020)

A Figura 8 ilustra a distribuição interna e externa das linhas de campo magnético de uma bobina e sua semelhança com o ímã de barra. Devemos ressaltar que, embora a distribuição do campo magnético seja semelhante para os dois objetos, a origem do campo da bobina e do ímã são diferentes. Enquanto o campo magnético da bobina é produzido pelo movimento de elétrons livre no condutor (corrente) devido à uma fonte de força externa, e por isso este dispositivo é às vezes denominado de eletroímã, o campo do ímã natural é produzido pelo movimento dos elétrons presos aos átomos (campo magnético orbital) e pelo campo de *spin*. Estes campos serão brevemente estudados mais à frente.

Figura 8. Comparação entre o campo magnético de um solenoide (à esquerda) e de um ímã em barra (à direita).

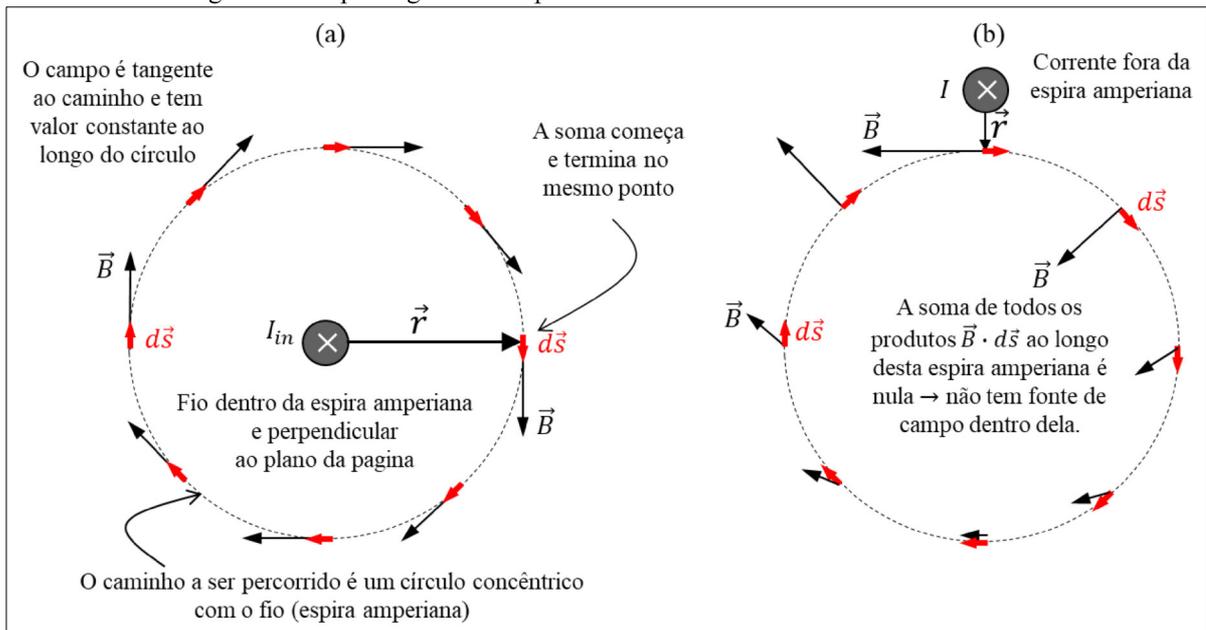


Fonte: adaptado de Randall D. Knight (2009)

Para calcular o campo magnético dentro do solenoide, em vez de usar a lei de Biot-Savart, que é mais complicada, podemos usar a lei de Ampère, que é escrita na forma de uma

relação matemática elegante e mais simples em alguns cenários. A lei de Ampère está para a magnetostática assim como a lei de Gauss está para a eletrostática e é mais fundamental do que a lei de Biot-Savart. Ela é muito útil para achar o campo magnético quando este permanece constante ao longo de um caminho fechado, como no caso das espiras já estudadas. Esta lei afirma que o produto do campo B que aponta ao longo da circunferência de um círculo de raio r com o comprimento da circunferência é igual a $\mu_0 I$. A Figura 9a ilustra o campo magnético no entorno de um fio que está perpendicular ao plano da página e a corrente elétrica está no sentido para dentro da página (representado pelo símbolo \times). A corrente I que passa no fio gera um campo \vec{B} dentro do pequeno trecho de comprimento $\Delta\vec{s}$ da linha circular pontilhada, denominado espira ou amperiana. Esta linha é apenas imaginária. Ela serve para indicar em que direção o campo magnético gerado pela corrente do fio está apontando. Escolhemos esse caminho porque o campo magnético sobre ele tem valor constante e sua direção é sempre tangente a ele.

Figura 9. Campo magnético nas proximidades de um fio com corrente elétrica.



Fonte: os autores (2020)

O objetivo é conectar o campo B com a corrente I no fio e para isso tomamos o produto escalar $\vec{B} \cdot \Delta\vec{s}$. Que o produto tem que ser do tipo escalar se justifica pelo que foi discutido no contexto da Figura 2. As bússolas colocadas ao redor da carga ou de uma corrente mostram que o campo gerado é circular em torno da partícula em movimento. Então, para garantir que somente as componentes do campo que sejam paralelas ao caminho amperiano sejam contadas,

tomamos o produto escalar com ele. O procedimento seguinte é percorrer toda a extensão da espira amperiana e somando $\vec{B} \cdot \Delta\vec{s}$ em cada $\Delta\vec{s}$. Expandindo o produto escalar temos $\vec{B} \cdot \Delta\vec{s} = B \Delta s \cos\alpha$. No presente caso $\alpha = 0$ e $\vec{B} \cdot \Delta\vec{s} = B \Delta s$. A soma de todos os Δs é igual ao comprimento da circunferência de raio r , ou seja, $2\pi r$. Portanto, $\vec{B} \cdot \Delta\vec{s} = 2\pi r B$. O campo B na equação $2\pi r B$ corresponde ao valor campo total gerado pela corrente no fio ao longo do círculo de raio r . Assim, podemos fazer a associação $2\pi r B = \mu_0 I$. Daqui,

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}. \quad (12)$$

O campo magnético no interior de uma bobina de raio R pode ser obtido diretamente deste último resultado para o caso de uma espira, simplesmente multiplicando-o pelo número N de espiras da bobina:

$$\vec{B}_{bobina} = N \frac{\mu_0 I}{2R} \hat{x}. \quad (13)$$

Este resultado é muito útil. Medir o campo magnético diretamente é uma tarefa difícil, sobretudo dentro de uma bobina ou em locais onde o aparelho de medir (magnetômetro) não pode ser utilizado por questões de espaço ou outros impedimentos. Neste ponto, a matemática vai muito além e mostra que se conhecemos o raio da bobina, a corrente elétrica que passa nela e o número de espiras, propriedades facilmente medidas, o campo no seu interior pode ser conhecido facilmente (Randall, D. Knight, 2009).

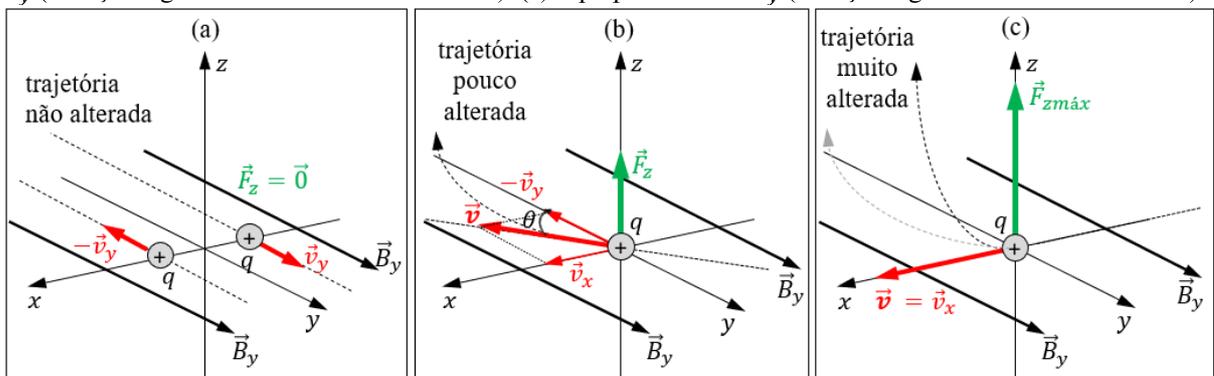
3.5 O campo magnético à luz de uma força

O estudo do campo magnético de uma carga ou várias cargas em movimento usando bússolas, conforme apresentado até aqui, é uma forma qualitativa de fazer as coisas. Uma maneira mais apropriada e quantitativa é pelo monitoramento da trajetória de partículas carregadas nos locais onde se quer medir o campo magnético. Os passos são os seguintes: i) determinamos a trajetória da partícula; ii) a partir dela determinamos a força sobre esta partícula e iii) a partir da força determinamos o campo magnético ao longo da trajetória. Em outras palavras, conhecendo-se a força que atua sobre uma partícula com carga elétrica q que se movimenta com velocidade \vec{v} , é possível obter o campo magnético \vec{B} de um ímã ou de outra fonte de campo que está nas proximidades.

Na prática isto é feito lançando-se uma partícula com carga elétrica e velocidade conhecidas na região que contém o campo a ser estudado. Na experiência ilustrada na Figura 10a, uma partícula é lançada na direção positiva e negativa do eixo y e nada acontece, ou seja, a direção do movimento da partícula não é alterada, e nem o valor de sua velocidade. Portanto, podemos concluir que a força resultante deve ser nula, mas não dá para concluir que não existe campo magnético. Mas se ele existe, não interage com a partícula. Na experiência da Figura 10b, a partícula é lançada numa direção formando um ângulo θ em relação ao eixo y negativo. Desta vez se observa claramente que a trajetória da partícula é alterada, conforme indicado pela trajetória pontilhada, no sentido positivo do eixo z , o que indica que deve existir uma força apontando na direção do eixo z .

Quando a partícula é lançada no sentido positivo do eixo x a sua trajetória se desvia mais ainda, conforme ilustrado na Figura 10c. Depois de muitos lançamentos com uma partícula com carga elétrica positiva em várias direções, fica fácil identificar que para a um campo magnético no sentido positivo do eixo y existe uma força apontada no sentido positivo do eixo z , cujo valor é máximo quando a partícula se move no sentido do eixo x positivo (perpendicular ao campo B). Se a partícula se move no sentido negativo do eixo x a força também será máxima e aponta no sentido negativo do eixo z . Após muitas experiências, notamos que o raio de curvatura fica menor (maior desvio da trajetória linear) quando os valores da carga elétrica, da velocidade e do campo magnético são maiores. Portanto, a força depende diretamente de q , v , B e de suas direções relativas.

Figura 10. Força magnética sobre uma partícula em movimento com velocidade \vec{v} dentro de um campo magnético na direção do eixo y , \vec{B}_y . (a) \vec{v} paralelo a \vec{B}_y (a força magnética tem valor zero). (b) \vec{v} formando um ângulo θ com \vec{B}_y (a força magnética tem valor intermediário). (c) \vec{v} perpendicular a \vec{B}_y (a força magnética tem valor máximo).



Fonte: os autores (2020)

Após catalogar todas as informações das experiências, descobrimos que o valor da força obedece a uma relação matemática do tipo:

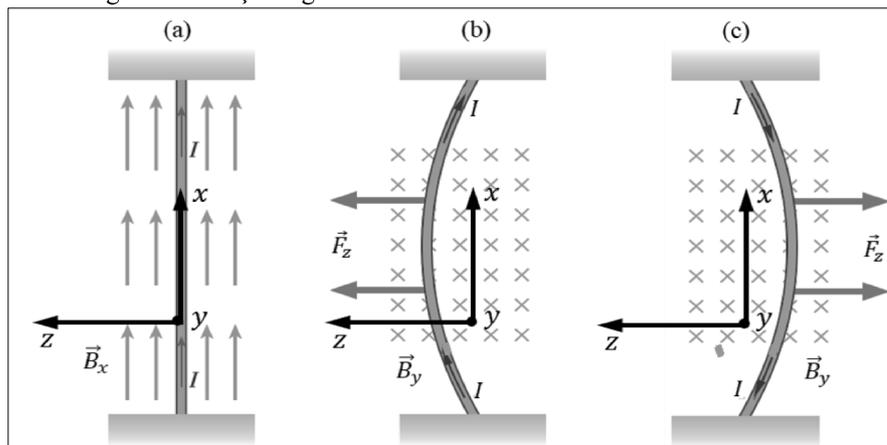
$$F = qvB\text{sen}\theta. \quad (14)$$

Este resultado condensa o comportamento da força de um campo magnético sobre uma carga em movimento. Mas muito mais importante, do ponto de vista deste trabalho, é a força que um campo magnético exerce sobre um condutor com corrente elétrica, porque os circuitos elétricos são formados por condutores nos quais existem correntes elétricas. Da definição de corrente elétrica, $q = I\Delta t = I(l/v)$, sendo l a distância percorrida pela carga q durante um intervalo de tempo Δt . Substituindo na Equação 14:

$$F = I\left(\frac{l}{v}\right)vB\text{sen}\theta = IlB\text{sen}\theta. \quad (15)$$

Este resultado é de fundamental importância para explicar porque a agulha da bússola ou qualquer material magnetizado, seja natural ou artificial, gira para se alinhar com um campo magnético externo. Além disso, ele é a base de uma das aplicações que serão exploradas no final deste trabalho, o canhão eletromagnético. A Figura 11 ilustra como a força magnética age sobre um fio com corrente. Na Figura 11a a corrente e o campo magnético estão orientados no sentido positivo do eixo x (são paralelos) e nenhuma força se manifesta. Mantenha em mente que o campo magnético aqui não é gerado pela corrente e sim por outra fonte que não está mostrada na Figura. Na Figura 11b a corrente continua no sentido de $+x$ e o campo está perpendicular, orientado na direção do eixo $+y$ (para dentro da página, representado pelo símbolo \times). Agora, a força magnética é máxima e puxa o fio para a esquerda, na direção do eixo $+z$. Na Figura 11c o sentido da corrente é invertido (se dirige para $-x$) e o campo continua no sentido de $+y$. Agora a força do campo sobre o fio aponta para a direita, no sentido de $-z$. A inversão no sentido da força magnética causada pela inversão no sentido da corrente elétrica tem muitas aplicações no cotidiano, como em autofalantes, osciladores eletromagnéticos, etc., conforme será visto na seção de indução magnética.

Figura 11. Força magnética sobre um condutor com corrente elétrica.



Fonte: os autores (2020)

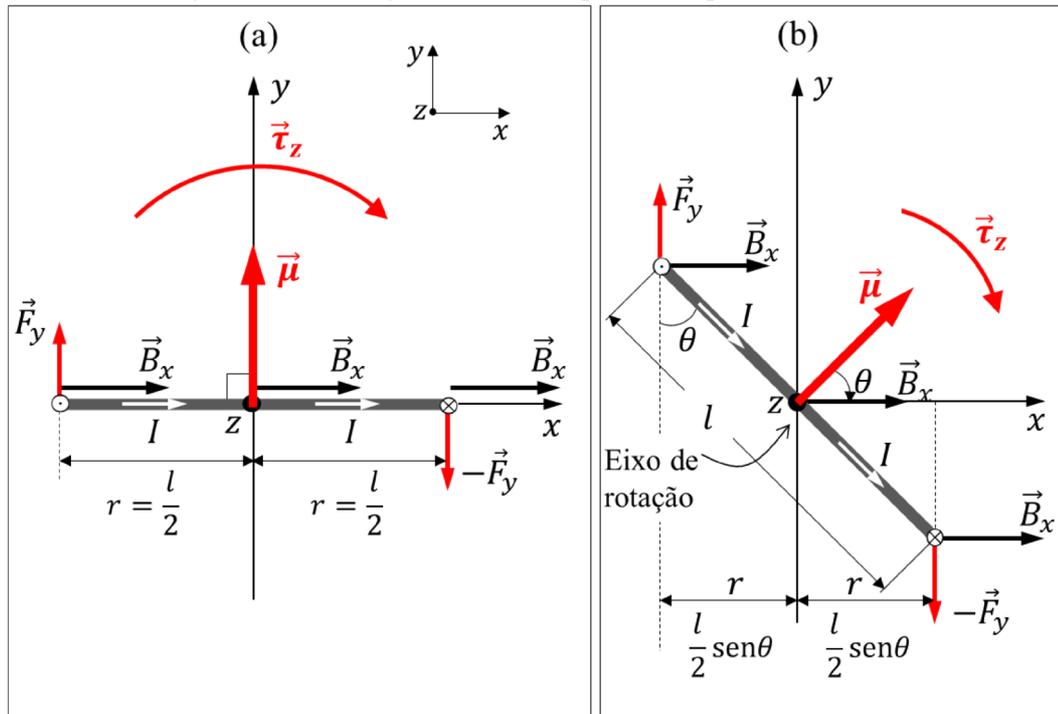
A existência do comportamento dipolar de algumas estruturas magnéticas e a sua descrição pela propriedade momento magnético do dipolo $\vec{\mu}$ foi a principal descoberta feita até aqui em termos dos objetivos deste trabalho. Entretanto, qual é exatamente a utilidade prática desta propriedade $\vec{\mu}$? Foi visto nas experiências em sala de aula que as agulhas das bússolas sempre tentavam se alinhar com o campo magnético da Terra ou com o eixo dos ímãs cilíndricos. Mas por que e como esse alinhamento acontece? A resposta à primeira pergunta é mais simples: o alinhamento ocorre porque a energia potencial compartilhada pelo ímã-Terra ou ímã-agulha da bússola deve ser a menor possível, como será mostrado mais à frente. Para responder à segunda pergunta, é necessário analisar o comportamento um dipolo magnético dentro de um campo magnético externo.

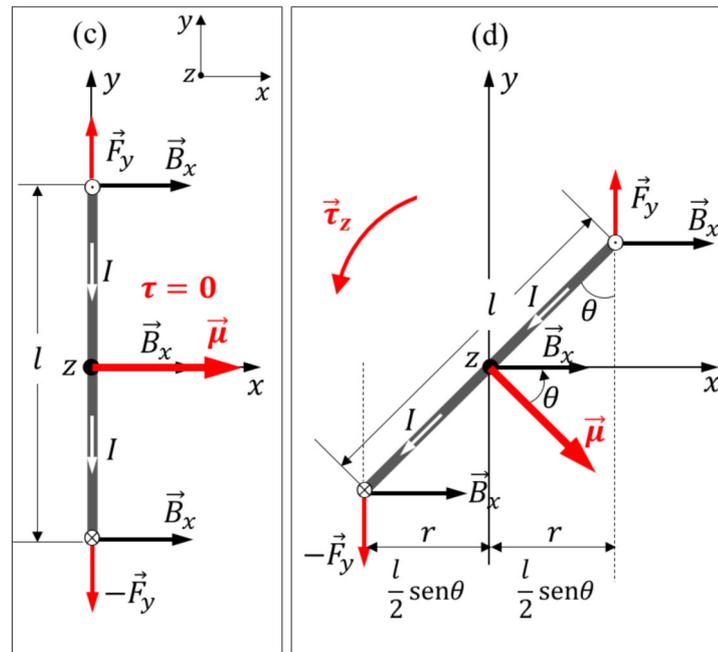
Em muitos cenários os fios condutores não são retos, como na Figura 11, mas formam espiras fechadas presas a um eixo que passa pelo centro, permitindo que elas girem em torno dele. Este é um modelo idealizado no qual muitas aplicações e explicações estão baseadas, como nos motores e geradores elétricos. O processo de alinhamento dos ímãs e agulhas será explicado a partir dele. A Figura 12a ilustra uma espira quadrada de lado l dentro de um campo magnético uniforme \vec{B} . Ela está livre para girar em torno do eixo de rotação, que coincide com o eixo z , perpendicular ao plano da página. O plano da espira está paralelo ao eixo z , de modo que apenas um de seus lados está mostrado. A corrente elétrica circula no sentido mostrado, saindo do plano da página no lado superior (indicado pelo símbolo \odot) e entrando no plano da página no lado inferior (indicado pelo símbolo \otimes).

Usando a Equação 15 verificamos que corrente em cada um dos quatro lados da espira experimenta uma força exercida pelo campo magnético. Como os valores da corrente e do

campo são os mesmos ao longo da espira, as forças na direção do eixo z (\vec{F}_z) são sempre iguais e opostas uma à outra e, portanto, se anulam. Estas forças não estão mostradas na Figura. De igual modo, as forças na direção do eixo y (\vec{F}_y) são iguais e se anulam. Entretanto, as linhas de ação de \vec{F}_y não coincidem, mas estão separadas pela distância $r = l/2$ em relação ao eixo de rotação. Em vez de enfatizar a espira com corrente, o foco estará no seu momento magnético de dipolo $\vec{\mu}$. Veja que na Figura 12a $\vec{\mu}$ é perpendicular ao campo \vec{B}_x ($\theta = 90^\circ$) e nessa posição a tendência de rotação no sentido horário é a maior possível. Em outras palavras, se deixada nesta posição, a aceleração angular teria seu maior valor.

Figura 12. Força magnética exerce torque sobre espira com corrente.





Fonte: os autores (2020)

A Figura 12b ilustra a espira deixada na posição com seu dipolo magnético $\vec{\mu}$ fazendo um ângulo θ com a direção do campo magnético. Neste caso, as distâncias entre as linhas de projeções de \vec{F}_y e o eixo de rotação são menores ($r = (l/2)\text{sen}\theta$) e, portanto, verificamos que a tendência de rotação ou a aceleração angular diminuem. A Figura 12c ilustra a situação em que a espira é solta na posição vertical, quando θ é nulo ($\vec{\mu}$ e \vec{B}_x são paralelos). Agora as linhas de ação das forças \vec{F}_y são coincidentes e ambas passam sobre o eixo de rotação. Experimentalmente, observamos que se a espira for deixada nesta posição ela não se move, ou seja, aquela tendência de girar desaparece. Se a espira for deixada na posição indicada pela Figura 12d, as forças tentarão girar a espira no sentido anti-horário. Existe uma razão para isto e deve ser a mesma que mantinha a agulha das bússolas apontadas para o Norte ou na direção de um ímã próximo à ela, nas experiências realizadas em sala de aula. Isto será discutido nos próximos parágrafos.

Existe uma propriedade física que mede a eficácia que uma força possui para girar um objeto em torno de um eixo, denominada de torque. Observamos que no caso da Figura 12a, o valor do torque é máximo e pode ser escrito como:

$$\tau = \left(\frac{l}{2}\right) F + \left(\frac{l}{2}\right) F = 2 \left(\frac{l}{2}\right) F = lF. \quad (16)$$

Veja que neste caso a distância $r = l/2$ é a máxima possível, razão pela qual a tendência

à rotação é também a máxima. No caso das Figuras 12b,d o ângulo entre a direção do momento de dipolo e o campo é menor que 90^0 e a tendência à rotação diminui, podendo ser escrita como:

$$\tau = lF\text{sen}\theta. \quad (17)$$

Observe a diferença entre as Figuras 12b e 12d. Para um mesmo ângulo θ positivo e negativo, a tendência de rotação é contrária. Isto é um bom indicativo de que a energia de interação do dipolo magnético $\vec{\mu}$ e o campo externo \vec{B}_x deve ser a menor possível para $\theta = 0$. Para facilitar a análise, em vez de descrever o torque sobre a espira em função de r , um parâmetro puramente geométrico, é muito mais adequado, para o interesse deste trabalho, descrevê-lo apenas em função das grandezas magnéticas. Para isso, fazemos uso das Equação 6, 15 e 17:

$$\tau = (F)(l\text{sen}\theta) = (IlB)(l\text{sen}\theta) = (Il^2)B\text{sen}\theta = (IA)B\text{sen}\theta,$$

$$\tau = \mu B\text{sen}\theta. \quad (18)$$

Agora ficou mais claro ver por que o torque na Figura 12a é máximo ($\text{sen}90^0 = 1$ e $\tau = \mu B$), enquanto na Figura 12c ele é nulo ($\text{sen}0^0 = 0$ e $\tau = 0$). Por este resultado se observa que o vetor torque é perpendicular ao plano formado pelos vetores $\vec{\mu}$ e \vec{B} , ou seja, o torque é perpendicular ao plano da página e apontado para dentro dela nas Figuras 12a,b e para fora na Figura 12d. Agora se sabe como e quando a espira gira dentro do campo magnético. Mas ainda não foi explicado o motivo pelo qual a tendência de rotação acontece. Foi dito acima que a energia de interação armazenada no sistema $\vec{\mu}$ e \vec{B} devia ser mínima no cenário da Figura 12c. Para ver isso melhor, é necessário que se conheça o comportamento da energia de interação em função do ângulo θ . Sem entrar nos detalhes da demonstração, o valor da energia de interação (ou energia potencial) de um dipolo dentro de um campo magnético externo é escrito como:

$$U = -\vec{\mu} \cdot \vec{B} = -\mu B\text{cos}\theta. \quad (19)$$

Agora fica fácil analisar os valores da energia de interação do dipolo com o campo magnético. Para $\theta = 180^0$, $\text{cos}\theta = -1$ e $U = +\mu B$. Neste caso, o dipolo está orientado contra o campo e o sistema tem a maior energia (não mostrado na Figura 12). Para $\theta = 0^0$, $\text{cos}\theta = 1$

e $U = -\mu B$ (Figura 12c) e a energia é a menor possível. Para $0^\circ < \theta < 90^\circ$, $\cos\theta < 1$ e $U > -\mu B$. Portanto, a razão para que um dipolo magnético gire quando colocada dentro de um campo externo é a busca pela posição de menor energia. Muitas aplicações são baseadas neste princípio, como os motores e geradores elétricos, a ressonância magnética nuclear, a magnetização de materiais ferrosos, o alinhamento das agulhas das bússolas com o campo magnético da Terra ou de um ímã, entre outros (Randall, D. Knight, 2009).

3.6 Campo magnético de um ímã

Diferente da espira condutora estudada anteriormente, que tem seu campo magnético atrelado à existência de uma fonte de força eletromotriz (*fem*) produzindo corrente nela, o ímã cria um campo magnético sem conexão com qualquer fonte de força motriz externa. Do ponto de vista da escala atômica, os elétrons na espira se movem em um movimento de translação através dela, impulsionados pela força da *fem* externa. Mas isto não ocorre com os elétrons em uma porção de matéria, como um ímã, que não possuem conexão com fontes de energia externas. Portanto, é coerente supor que o movimento que produz o campo magnético em um ímã deve ser, em princípio, proveniente da rotação dos elétrons em torno dos núcleos dos átomos.

Neste ponto, é didático introduzir um quarto tipo de campo, denominado campo magnético orbital, \vec{B}_o . Na verdade, não se trata de um novo tipo de campo e sim um campo magnético gerado pelo movimento de uma carga elétrica, tal como \vec{B}_q ou \vec{B}_I , mas sem a conexão com uma bateria externa, ou seja, o elétron possui seu movimento perpétuo alimentado pela energia interna do próprio átomo, que por sua vez é alimentado pelo campo térmico dentro do qual ele se encontra. De igual modo, associado ao campo orbital \vec{B}_o existe um dipolo magnético $\vec{\mu}_o$. Para entender como isto ocorre, é preciso analisar o movimento circular dos elétrons dentro dos átomos do material, descrever a corrente elétrica advinda desse movimento, modelar o campo magnético orbital \vec{B}_o gerado por ela e, finalmente, comparar as previsões do modelo com o campo magnético que se observa nas proximidades dos ímãs, usando bússolas ou outros detectores de campo, conforme feito em sala de aula.

Além disso, em 1922 foi descoberto que os elétrons possuem um dipolo magnético intrínseco e, conseqüentemente, os átomos deveriam também manifestar esta propriedade em certas circunstâncias, como quando possuem um número ímpar de elétrons em seus orbitais. Isto tem que ser assim porque os elétrons nos orbitais atômicos possuem as direções desses

dipolos apontados em sentidos opostos aos pares. Portanto, se existe um número par de elétrons em um átomo, a soma de todos os dipolos será nula. Observando as semelhanças de comportamentos na natureza, isso deveria ser esperado mesmo – o elétron tem massa, o que lhe permite interagir com o campo gravitacional; possui carga elétrica, o que lhe permite interagir com o campo elétrico. Então, de alguma forma, ele deveria interagir com o campo magnético e, para fazê-lo, ele deveria possuir um tipo de dipolo magnético intrínseco, denominado de dipolo do spin, $\vec{\mu}_s$.

Do ponto de vista clássico não existe uma explicação para a origem de um quarto tipo de campo magnético, \vec{B}_s , associado ao momento de dipolo magnético $\vec{\mu}_s$. O que se sabe é que ele está presente em elétrons, prótons e também nos nêutrons, mesmo que este último não tenha carga elétrica. As consequências da presença de \vec{B}_s são as mesmas dos campos \vec{B}_q , \vec{B}_I e \vec{B}_o , exceto pelos valores que \vec{B}_s pode assumir. Enquanto os campos \vec{B}_q e \vec{B}_I podem assumir todos os valores possíveis e mudar de um valor para outro continuamente, \vec{B}_s só tem 2 valores iguais e opostos em sinal. Vale à pena ressaltar que do ponto de vista macroscópico os valores de \vec{B}_s a serem considerados não são de apenas uma partícula, mas sim de uma quantidade enorme delas (tipicamente 10^{23} partículas para cada cm^3 de material). Quando o material manifesta campo magnético sem a presença de movimento de portadores produzido por uma fonte de força eletromotriz (*fem*), como em um circuito elétrico, ele é denominado de ímã natural. Por outro lado, quando o material não possui imantação natural, mas permite a passagem de corrente elétrica, gerando um campo magnético, ele é denominado de eletroímã ou ímã artificial. Neste trabalho serão exploradas aplicações dos dois tipos de ímãs.

Ímãs permanentes, fitas de gravação magnética, discos de computadores e uma grande quantidade de dispositivos dependem diretamente do magnetismo de alguns materiais especiais. Como exemplo, quando se grava uma informação em um disco rígido (HD) de computador, o que se faz, na verdade, é criar uma rede de ímãs microscópicos em uma finíssima camada de um material na superfície de um disco móvel no interior do HD. Logo, é importante examinar alguns aspectos das propriedades dos elétrons dentro dos átomos que formam estes materiais.

Quando estão nos átomos, os elétrons possuem movimento circular e, portanto, se comportam como se fossem espiras de correntes microscópicas que produzem seus próprios campos magnéticos \vec{B}_o , além do \vec{B}_s que os elétrons possuem naturalmente, independentemente de estarem dentro ou fora dos átomos. Em muitos materiais, os momentos magnéticos $\vec{\mu}_o$ e $\vec{\mu}_s$ destes campos apontam em todas as direções do espaço, tendo como resultado um momento magnético total nulo, ou seja, o campo magnético total é nulo. Isto ocorre sobretudo por causa

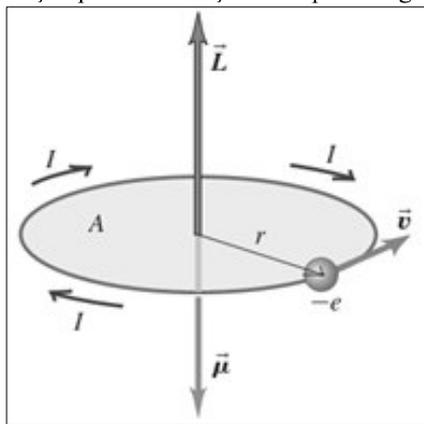
da agitação térmica dos átomos, que introduz uma energia maior do que a necessária para haver o alinhamento dos dipolos.

Contudo, quando se coloca este material dentro de uma região que tem campo magnético produzido por outras fontes (campo magnético externo), muitos momentos magnéticos $\vec{\mu}_o$ e $\vec{\mu}_s$ se orientam paralelamente ao campo externo e o resultado é que agora além do campo magnético externo, temos também um campo magnético gerado pelo alinhamento dos momentos magnéticos $\vec{\mu}_o + \vec{\mu}_s$. A esse fenômeno do alinhamento de $\vec{\mu}_o$, $\vec{\mu}_s$ e a consequente produção de um campo \vec{B}_o e \vec{B}_s damos o nome de magnetização, ou seja, o material fica magnetizado. Esta é a razão porque alguns materiais da natureza (ímãs) são capazes de atrair ou repelir outros materiais metálicos.

Para entender como as correntes microscópicas que geram \vec{B}_o surgem, veja a Figura 13. Ela ilustra de forma simplificado um elétron girando em torno do núcleo de um átomo. O elétron tem massa m , carga elétrica $-e$ e velocidade \vec{v} e se move em um círculo de raio r , formando uma espira circular. O objetivo é encontrar uma expressão para o momento de dipolo magnético do elétron, $\vec{\mu}_o$. Para isso, podemos imaginar o movimento da carga como uma corrente elétrica $I = q/T$, sendo T o tempo para uma volta completa em torno do núcleo atômico, denominado de período. Assim,

$$I = \frac{e}{T} = \frac{ev}{2\pi r}. \quad (20)$$

Figura 13. Ilustração para a formação do dipolo magnético orbital $\vec{\mu}_o$.



Fonte: adaptado de Randall D. Knight (2009, p.1028)

Da Equação 6, o momento de dipolo de uma espira é $\mu = IA$. Portanto, multiplicando os dois lados da Equação 22 por $A = \pi r^2$, a área da espira circular, temos:

$$IA = \frac{ev}{2\pi r} (\pi r^2) = \frac{evr}{2} \rightarrow \mu_o = \frac{e}{2} vr. \quad (21)$$

sendo μ_o o valor do momento de dipolo magnético orbital. Observe que do lado esquerdo desta equação a propriedade é magnética, enquanto do lado direito as propriedades todas mecânicas. Do ponto de vista experimental, é muito mais útil escrever o lado direito em termos de uma propriedade que se possa medir facilmente, o momento angular orbital L_o do elétron. Como o momento angular é definido por $L_o = mrv$, então basta multiplicar e dividir este resultado pela massa m_e do elétron. Assim,

$$\mu_o = \frac{e}{2m_e} m_e vr,$$

e

$$\mu_o = \frac{e}{2m_e} L_o. \quad (22)$$

É importante ressaltar neste ponto que os argumentos usados até aqui são fundamentados na Física Clássica. Isto significa que o momento L_o pode assumir todos os valores possíveis. Mas nas dimensões atômicas e nucleares isto não é mais verdade. Neste caso L_o só pode assumir valores que são múltiplos inteiros ($n = 1, 2, 3, \dots$) de um momento angular mínimo, \hbar . Esse momento angular mínimo ($\hbar = h/2\pi$) tem valor de $1,05 \times 10^{-34} J \cdot s$, sendo $h = 6,63 \times 10^{-34} J \cdot s$ uma constante fundamental da natureza, denominada constante de Planck. Com esta nova informação, o momento angular do elétron, fica:

$$L_o = m_e vr = \frac{nh}{2\pi}. \quad (23)$$

Das Equações 22 e 23 chegamos ao valor do momento magnético orbital do elétron:

$$\mu_o = n \left(\frac{he}{4\pi m_e} \right), \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (24)$$

Para $n = 1$

$$\mu_o = \frac{he}{4\pi m_e} \equiv \mu_B. \quad (25)$$

A Equação 27 mostra o menor valor para o momento magnético orbital de dipolo para um elétron com movimento orbital em torno de um núcleo do átomo é μ_B , denominado de magnéton de Bohr. Assim, o momento magnético do elétron dentro do átomo só pode ter os valores:

$$\mu_o = \mu_B, 2\mu_B, 3\mu_B, \dots \quad (26)$$

Mantenha em mente que ambos os dipolos, o clássico ou o quântico, estão associados a um campo magnético produzido por uma carga elétrica em movimento. A diferença é que o contexto da Equação 6 é de uma partícula, enquanto o da Equação 26, embora se fale de elétron como partícula, sua quantização provém de uma abordagem ondulatória. Os valores discretos do tratamento quântico surgem exatamente por causa da interferência construtiva e destrutiva das ondas que representam os elétrons.

Entretanto, além do dipolo causado pelo movimento orbital, os elétrons também possuem um momento angular intrínseco, que não está relacionado com o movimento orbital, mas que pode ser descrito classicamente como oriundo da “rotação do elétron em torno de seu próprio eixo”. Este é um fenômeno que não tem analogia clássica, de modo que o que for dito acerca dele aqui deve ser analisado com cuidado. Classicamente, podemos dizer que o elétron possui movimento no sentido horário ou no sentido anti-horário, o qual está associado a um momento angular s que possui apenas dois valores: $s = +1/2$ e $s = -1/2$, dependendo do sentido de sua rotação. Associado a esse momento angular mecânico temos um momento magnético intrínseco ou momento de spin (μ_s), mencionado anteriormente, o qual vale:

$$\mu_s = 2s\mu_B = 2\left(\frac{1}{2}\right)\mu_B = \mu_B. \quad (27)$$

Para Young/Freedman (2009), este resultado mostra que o valor do momento de dipolo de *spin* é igual ao valor do dipolo orbital de menor energia (magnéton de Bohr). Portanto, ambos contribuem significativamente para a imantação da matéria, haja vista que os materiais quase sempre se encontram no chamado estado fundamental ou de mais baixa energia e, portanto, com menor momento angular. Associado a este momento magnético de dipolo temos o campo magnético \vec{B}_s , já mencionado na seção 3.2. Diferente do campo \vec{B}_q , que é gerado por uma carga elétrica q em movimento, o campo \vec{B}_s só pode ser conhecido pelo seu dipolo s associado.

3.7 A imantação dos materiais

Até aqui falamos do comportamento de espiras e bobinas ligadas a fontes externas de energia (baterias) e de elétrons individuais dentro dos átomos. Entretanto, antes de passar para o conteúdo de indução magnética propriamente, é fundamental mostrar como os elétrons dentro dos átomos se comportam coletivamente quando bilhões de bilhões deles se juntam para formar os materiais. Isto é justificado pelo fato de que nas aplicações do fenômeno da indução magnética não se trabalha com elétrons individuais, mas com materiais de dimensões macroscópicas, como ímãs e circuitos elétricos.

Podemos fazer uma analogia não muito precisa, mas que serve para facilitar o entendimento daqueles que pretendem usar este trabalho em suas ações pedagógicas no Ensino Fundamental e Médio. Classicamente, podemos comparar um átomo ao sistema solar. Entretanto, enquanto todos os planetas se movem em torno do Sol em um mesmo sentido, os elétrons se movem em torno do núcleo em órbitas com sentidos contrários umas às outras. Para cada elétron que se move em sentido anti-horário existe outro elétron que se move em sentido horário. Desta maneira os dipolos magnéticos das órbitas individuais tendem a se cancelar e o momento magnético resultante $\vec{\mu}_o$ é essencialmente nulo. O cancelamento prossegue à medida que os átomos são unidos para formar moléculas ou sólidos. Portanto, somente a formação do dipolo orbital $\vec{\mu}_o$ (Equação 26) não explica os intensos efeitos magnéticos observados em alguns materiais, como o ferro, níquel, cobalto e suas ligas, assim como como aqueles que possuem a adição de neodímio e boro.

Uma explicação para o forte campo que se observa no entorno de um ímã pode ser dada a partir do momento magnético de *spin*, μ_s . Consideramos que os dipolos magnéticos de *spin* também se opõem uns aos outros à medida que os elétrons são distribuídos em uma camada (ou orbital) no interior do átomo, fazendo com que o momento magnético de uma camada completa seja nulo. Quando os átomos se juntam para formar os materiais, geralmente a direção dos *spins* dos elétrons é aleatória, ou seja, eles são totalmente desalinhados, conforme está ilustrado na Figura 14a. Nesta figura os pontinhos representam os elétrons e as setas orientadas representam o vetor momento magnético de *spin*. Neste cenário, os dipolos não interagem uns com os outros de forma que dentro de pequenas regiões do material, denominadas de domínios magnéticos, eles são independentes uns dos outros e assim não possuem um alinhamento preferencial. O resultado disto é que dentro destas regiões a soma de todos os momentos de dipolo magnético de *spin* é nula. É por esta razão que a grande maioria dos materiais não manifesta o magnetismo.

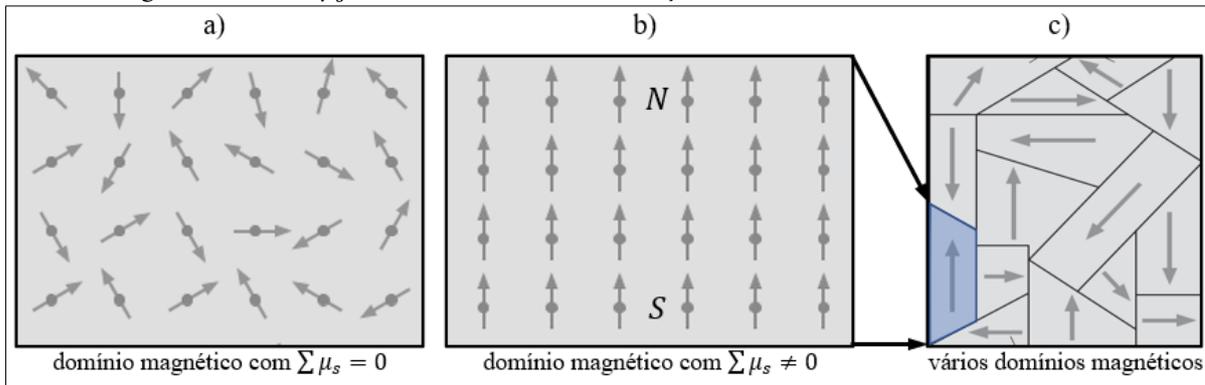
Quando este tipo de material é exposto à um campo magnético externo, B_{ext} , alguns dos

dipolos μ_s se alinham no mesmo sentido de B_{ext} . Neste caso, a soma dos μ_s alinhados dentro de um certo volume de material é diferente de zero, o que dá origem ao campo denominado de magnetização, \vec{M} da matéria. Assim, o material apresenta uma pequena magnetização e o objeto do qual ele é feito é atraído ou repelido por um ímã. Quando B_{ext} é retirado, os dipolos μ_s voltam a se desalinhar, levando \vec{M} a se anular. Materiais que apresentam este tipo de comportamento são denominados de paramagnéticos. Um exemplo clássico de um material paramagnético é o alumínio.

Até aqui foi explicado porque não há manifestação magnética em muitos materiais. Não obstante, existem vários deles que exibem fortes propriedades magnéticas. Nestes casos, como exemplo no ferro, os dipolos dos átomos interagem entre si de maneira que dentro de um domínio magnético eles se alinham em uma determinada direção do espaço controlada pela interação coletiva. Neste caso, dentro destas regiões temos uma soma dos momentos de dipolos magnéticos de spin não nula, e os dipolos μ_s são facilmente alinhados com B_{ext} . A consequência disto é que o material pode apresentar um grande campo de magnetização \vec{M} , se comportando como um ímã. De fato, os ímãs permanentes são produzidos aplicando-se um forte campo magnético sobre a uma porção de material deste tipo. Por causa da natureza da interação entre os dipolos μ_s , uma vez alinhados numa direção eles demoram muito a se desalinhar, resguardadas algumas condições, como a temperatura. Materiais que apresentam este comportamento, a exemplo do ferro, níquel e cobalto, são denominados de ferromagnéticos. A Figura 14b ilustra um dos domínios de um material ferromagnético. Por conta do alinhamento do μ_s de cada átomo, o material apresenta uma grande magnetização e assim age como um ímã que pode ser caracterizado pelos polos Norte e Sul.

A Figura 14c mostra um setor ampliado de um material formado por muitos domínios magnéticos. Dentro de cada domínio os momentos magnéticos se alinham em uma direção diferente, conforme ilustram as setas. Elas representam a magnetização dentro de cada domínio. Entretanto, com já foi dito, estes diferentes vetores magnetização podem se alinhar na mesma direção pela ação de um campo magnético externo. Diferente dos dois casos discutidos nos parágrafos anteriores, existem materiais nos quais o momento magnético total de cada domínio se alinha no sentido contrário ao campo magnético externo, resultando em um material que repele um ímã colocado nas suas proximidades. Estes são denominados materiais diamagnéticos, tendo como representantes mais comuns a água, o cobre, o chumbo e a prata. Assim como paramagnetismo, o diamagnetismo só pode ser devidamente explicado pela teoria quântica, o que não é foco deste trabalho.

Figura 14. Ilustração para os momentos magnéticos dos átomos. a) dentro de um domínio magnético com os μ_s aleatoriamente orientados e b) dentro de um domínio magnético com os μ_s orientados na mesma direção e c) vários domínios magnéticos com os μ_s orientados em diferentes direções.



Fonte: adaptado de Randall D. Knight (2009, p. 1029)

As discussões feitas até aqui capítulo tiveram como objetivo dar ao professor um subsídio conceitual para que este compreenda as aplicações que serão tratadas no próximo capítulo. Mantenha em mente o que foi estudado até agora: uma corrente elétrica I gerada por uma *fem* (bateria) em uma espira condutora produz um campo magnético \vec{B}_q , que se comporta como um dipolo magnético, melhor descrito pelo momento magnético $\vec{\mu}$ do dipolo. Foi estudado também que os ímãs podem ser explicados a partir dos mesmos conceitos de dipolo magnético estudados com as espiras condutoras, estando estes associados aos campos magnéticos orbital \vec{B}_o e de *spin* \vec{B}_s . Para a completeza deste trabalho, falta mostrar que o inverso acontece, ou seja, que um campo magnético, produzido por uma bobina ou ímã, é capaz de produzir uma corrente elétrica em um condutor, sem que este esteja conectado à uma bateria, fenômeno conhecido como indução magnética. Será mostrado que este é um dos fenômenos da natureza que contribuiu significativamente para o progresso da tecnologia associada ao desenvolvimento da humanidade, Randall D. Knight (2009, p. 1029).

4 Sobre o Fenômeno da Indução Magnética e suas Aplicações

4.1 Descrição Fenomenológica

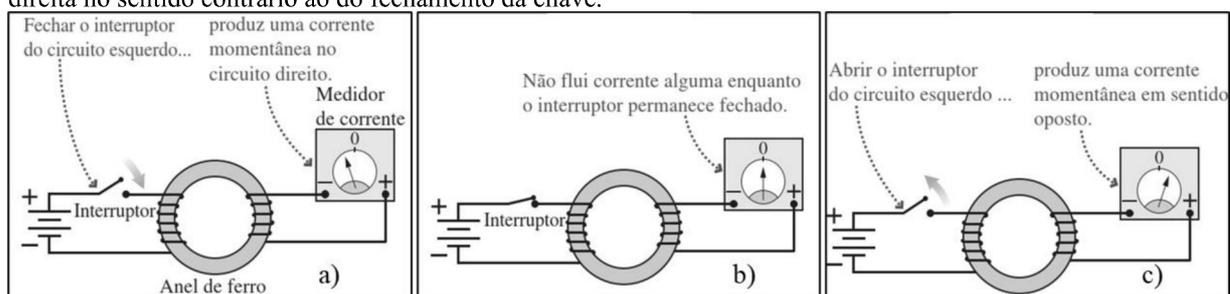
Conforme discutido na seção 1, em 1820 Hans Christian Oersted descobriu que quando um fio com corrente elétrica era colocado nas proximidades de uma bússola a direção na qual sua agulha apontava era alterada. Logo ficou claro que a agulha mudava de direção por causa da força magnética gerada pelo campo magnético criado pela corrente elétrica. Motivados por este fenômeno e conhecendo com certa profundidade as funcionalidades dos ímãs, logo surgiu a pergunta se o contrário seria possível e quais as possíveis implicações disso. Em outras palavras, buscamos respostas à questão se o campo magnético de um ímã permanente ou o campo magnético das correntes elétricas dos fios seria capaz de produzir uma corrente elétrica em outros condutores colocados dentro de tais campos. Em muitas experiências fios e bobinas foram colocados dentro de ímãs ou em volta deles, mas nenhuma foi capaz de produzir uma corrente mensurável

Onze anos após a descoberta de Oersted, o físico americano Joseph Henry, em 1831, descobriu como produzir uma corrente elétrica a partir do magnetismo. Entretanto, ele não divulgou seus resultados e acabou não levando os créditos pela brilhante descoberta. Paralelamente, ao longo de toda a década de 1820, o inglês Michael Faraday trabalhou como assistente técnico do famoso químico Humphrey Davy a passou a ter contato com equipamentos de laboratórios, o que o levaria a se tornar o experimentalista de maior influência de todos os tempos, embora não tivesse formação universitária.

No final do ano de 1831, Faraday anunciou a formulação original que levou à conhecida lei da indução eletromagnética. Mas essa lei não foi apresentada através de uma equação matemática, como usualmente a conhecemos. Faraday era autodidata em laboratório e não tinha uma boa base matemática, de modo que a lei da indução só foi escrita formalmente como um modelo matemático posteriormente por James Clerk Maxwell, no que viria a ser uma das quatro leis fundamentais do eletromagnetismo. Foi também Maxwell que deu sequência aos trabalhos de Faraday sobre o conceito de linhas de força, que está na origem do conceito de campo. Em ciência, o crédito geralmente é dado ao primeiro que publica seus resultados e é por isso que hoje estudamos a lei de Faraday em vez da lei de Henry. Embora Faraday não tivesse a prioridade da descoberta, foi ele quem estabeleceu as propriedades da indução eletromagnética e percebeu a grande importância da descoberta de uma nova lei da natureza, algo que Henry não fez.

A Figura 15 mostra um esquema simplificado para explicar a ideia central de Faraday. Ele fez experimentos com duas bobinas de fios enrolados em volta de um anel de ferro. Esperava-se que o campo magnético gerado pela bobina da esquerda induzisse um campo magnético dentro ferro e que este campo pudesse criar uma corrente no circuito do lado direito. Como em todas as suas tentativas anteriores, essa experiência não produziu resultado algum. Entretanto, Faraday percebeu que a agulha do medidor de corrente se movia rapidamente em sentidos contrários nos instantes em que ele fechava e abria o interruptor do circuito à esquerda, conforme ilustrado nas Figuras 15a e 15c. Enquanto o interruptor permanecesse fechado a agulha permanecia no zero da escala do medidor, como na Figura 15b. Faraday concluiu que o movimento da agulha indicava a existência de corrente no circuito à direita. Mas o efeito durava apenas um intervalo de tempo muito pequeno, enquanto a corrente à esquerda estava iniciando ou cessando e não enquanto estava estável (Randall, D. Knight, 2009).

Figura 15. Descoberta da lei da indução magnética. a) a chave é fechada e o campo magnético conduzido pelo ímã até a bobina do lado direito gera momentaneamente corrente em um sentido; b) logo após a chave ser fechada a corrente elétrica na bobina da direita desaparece; e c) quando a chave é aberta aparece uma corrente na bobina da direita no sentido contrário ao do fechamento da chave.



Fonte: Randall D. Knight (2009)

Antes e continuar a discussão vale um comentário sobre as correntes elétricas em circuitos que tenham apenas uma fonte de força eletromotriz cuja diferença de potencial entre seus terminais \mathcal{E} é contínua. Se a *fem* (ou bateria) for contínua, ela produzirá uma corrente constante (ou contínua) nos fios, cujo valor é $i_{m\acute{a}x} = \Delta V_{m\acute{a}x}/R = \mathcal{E}/R$, sendo $\Delta V_{m\acute{a}x}$ o valor da diferença de potencial através do circuito e R a resistência dos fios conectados a ela. Este é o modelo usado quando trabalhamos com circuitos de corrente contínua no terceiro ano do Ensino Médio. Entretanto, o efeito observado por Faraday não aconteceu quando a corrente no circuito já estava estabilizada em $\Delta V_{m\acute{a}x}$, mas sim enquanto ela ainda estava se estabilizando. Portanto, é necessário que o professor entenda estas nuances para não deixar de discutir conceitos cruciais para o entendimento do fenômeno da indução.

Por causa da inércia dos elétrons nos condutores e da criação do campo magnético

dentro da bobina, o valor $i_{m\acute{a}x}$ para a corrente n\~ao \e atingido imediatamente ap\~os a chave ser ligada, mas somente ap\~os um tempo τ durante o qual a diferen\~ca de potencial $\Delta V(t)$ nas extremidades do circuito ainda n\~ao \e igual a \mathcal{E} . At\~e isso acontecer, a corrente no circuito pode ser modelada como $i(t) = i_{m\acute{a}x}(1 - e^{-t/\tau})$. Deste modelo podemos inferir que para um tempo t muito longo ap\~os a chave ser fechada o termo $e^{-t/\tau}$ tende a zero e a corrente $i(t)$ atinge seu valor m\~aximo $i_{m\acute{a}x}$, e assim o ponteiro do medidor de corrente retorna a marcar zero, pois a corrente permanece est\~avel. De fato, para $t = 5\tau$, $i(t) = 0,99 i_{m\acute{a}x}$. Portanto, o movimento do ponteiro do medidor de corrente na experi\~encia de Faraday ocorria apenas dentro de um intervalo de tempo bem pequeno, tipicamente $t \approx \tau$, cujo valor pode ser alguns milissegundos ou muito menor, a depender do tipo de circuito e dos condutores utilizados.

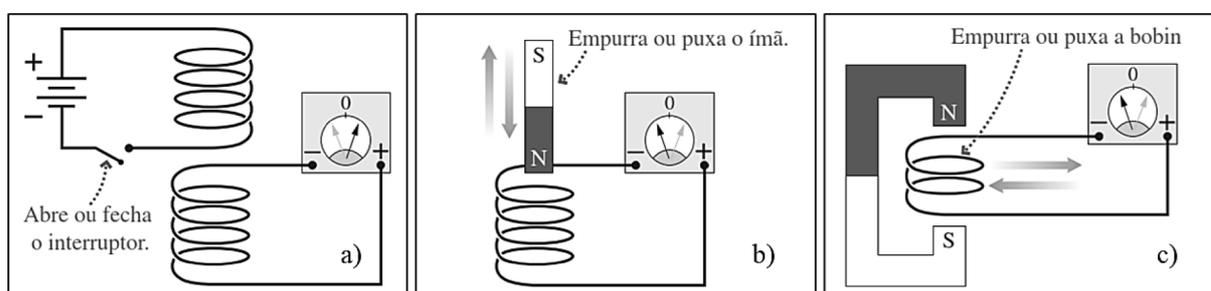
Para explicar o que estava ocorrendo, Faraday construiu a ideia de linhas de campo. Primeiro, a corrente da esquerda magnetiza o anel de ferro, cujo campo magn\~etico gerado alcan\~ca a bobina da direita. A observa\~ao de Faraday de que a agulha do medidor de corrente saltava apenas quando o interruptor era fechado ou aberto sugeriu-lhe que a corrente na bobina da direita era induzida somente durante o tempo no qual o campo magn\~etico estava variando atrav\~es desta, conforme j\~a foi discutido. Isso explicaria por que todas as experi\~encias anteriores foram malsucedidas, uma vez que em todas elas foram usadas apenas campos magn\~eticos constantes no tempo e no espa\~co.

Como grande experimentalista, Faraday suspeitou que a corrente na segunda bobina era causada pela mudan\~ca no valor do campo magn\~etico criado na primeira bobina, de modo que, em princ\~ipio, n\~ao seria necess\~aria a presen\~ca de um anel de ferro. Ele refez as experi\~encias de v\~arias maneiras diferentes. A Figura 16 ilustra umas das poss\~iveis experi\~encias, na qual disp\~os as duas bobinas bem pr\~oximas e sem o anel de ferro. N\~ao fluiu corrente no circuito inferior enquanto o interruptor era mantido fechado; entretanto aparecia uma corrente moment\~anea toda vez que o interruptor era aberto ou fechado. Ent\~ao o fen\~omeno definitivamente n\~ao era devido ao campo magn\~etico gerado pelo n\~ucleo de ferro. A Figura 16b ilustra outra experi\~encia na qual s\~ao usados apenas a segunda bobina e um \~ima permanente. Faraday movimentou um \~ima para dentro e para fora da bobina e percebeu o mesmo efeito das experi\~encias anteriores. Curiosamente, com o \~ima parado no interior da bobina n\~ao foi observado nenhuma corrente el\~etrica, mesmo que nesse cen\~ario o campo magn\~etico na bobina seja o maior poss\~ivel. Quando o \~ima era aproximado da bobina o ponteiro se movia em um sentido e quando ele era afastado o ponteiro se movia no sentido contr\~ario.

A Figura 16c mostra uma experi\~encia diferente, na qual em vez do \~ima, a bobina \e

movimentada para perto e para longe do ímã. Um efeito semelhante à experiência anterior foi observado. Em outras palavras, não faz diferença o que causa a variação do campo magnético: se é uma corrente variando em um circuito posicionado próximo, se é a movimentação de um ímã dentro de uma bobina ou se é o movimento de uma bobina nas proximidades de um ímã. O efeito será o mesmo em todos os casos. Se o campo que atravessa a bobina não variar, concluímos que não é o campo magnético em si o responsável pela corrente induzida, mas sua variação com o tempo, no mesmo ponto do espaço ou a sua mudança de valor em diferentes pontos do espaço no mesmo instante de tempo. Esta descoberta foi uma das mais importantes da história da humanidade, pois foi a primeira vez que se produziu corrente elétrica sem a necessidade de uma bateria, como era comum aos circuitos até essa época. Descrita em palavras, a lei descoberta por Faraday pode ser enunciada da seguinte forma: uma corrente elétrica é estabelecida em uma bobina desconectada de uma bateria se ela estiver sujeita a um campo magnético variável, Randall D. Knight (2009).

Figura 16. Descoberta da lei da indução magnética. a) uma bobina estacionária e outra em movimento produzindo corrente induzida; b) uma bobina estacionária e um ímã em movimento produzindo corrente induzida; e c) uma bobina em movimento e um ímã estacionário produzindo corrente induzida.



Fonte: Randall D. Knight (2009)

4.2 Uma bateria carregada apenas pelo movimento

Uma vez que o fenômeno da indução magnética foi devidamente explicado do ponto de vista fenomenológico, o professor pode passar a discutir os aspectos quantitativos do fenômeno. Como a essência da indução está na variação do campo magnético, isto pode ser feito por meio de duas abordagens diferentes:

- iii. variando o tamanho ou a orientação do circuito elétrico dentro de um campo magnético estacionário;
- iv. variando o valor ou a direção do campo magnético que atravessa um circuito elétrico estacionário.

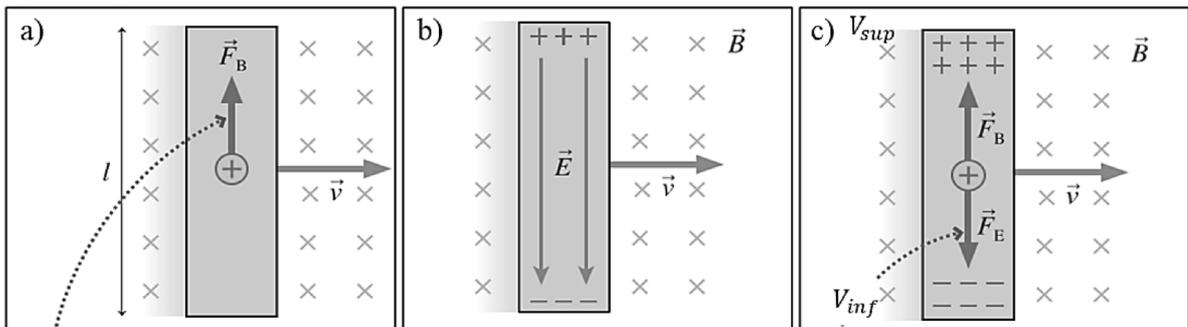
Embora os efeitos nos dois casos sejam os mesmos, as causas são diferentes. A Figura

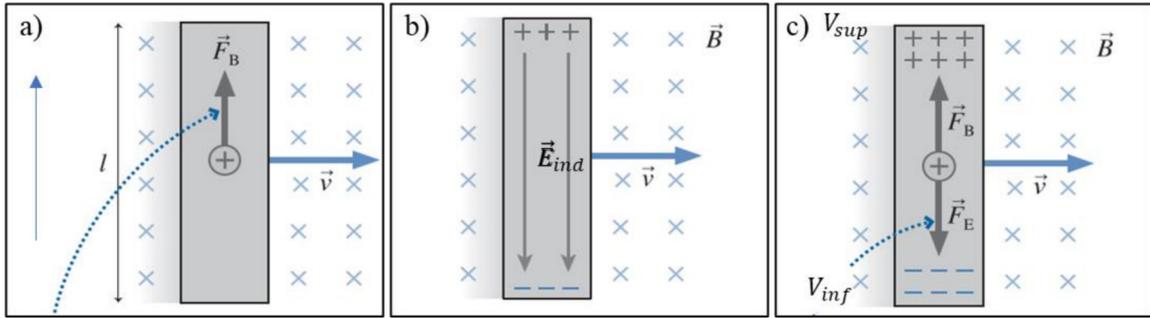
17a ilustra o movimento de um condutor elétrico de comprimento l com velocidade \vec{v} para a direita dentro de um campo magnético estacionário, \vec{B} , orientado para dentro da página e representado pelo símbolo \times . O movimento do condutor é causado por uma força externa não mostrada na figura. Como as cargas elétricas dentro do condutor também se movem com velocidade \vec{v} em relação ao campo, elas ficam sujeitas à uma força magnética dada pela Equação 14, $F_B = qvB\text{sen}\theta$. Como na Figura 17 v é perpendicular a B , a força é máxima e igual a $F_B = qvB$. Antes do início do movimento, as cargas positivas e negativas do condutor se encontram uniformemente distribuídas. Como consequência disto, o campo elétrico total em qualquer região do condutor é nulo. Existem campos gerados por prótons e elétrons dentro dos átomos. Mas por causa das cargas de sinais opostos, e devido à grande proximidade destas cargas dentro dos átomos, o efeito macroscópico destes campos é nulo.

Entretanto, por causa do movimento do condutor para a direita, a força F_B movimenta os portadores de cargas negativas (elétrons) para baixo, deixando cargas positivas (átomos ionizados) na parte superior do condutor. A separação de cargas cria um campo elétrico induzido \vec{E}_{ind} no interior do condutor apontado para baixo, como ilustrado na Figura 17b. Por causa deste campo elétrico, uma força F_E surge entre as cargas positivas e negativas. Esse movimento de separação das cargas acontece até que a condição de equilíbrio seja alcançada, ou seja, $F_E = F_B$, ilustrado na Figura 17c. Considerando a definição dessas forças, temos $qE_{ind} = qvB$ e o valor do campo elétrico induzido pela separação das cargas dentro do condutor móvel é:

$$E_{ind} = vB. \tag{28}$$

Figura 17. Condutor elétrico se movendo com velocidade \vec{v} dentro de um campo magnético estacionário. a) Os portadores de carga são puxados para cima pela força magnética \vec{F}_B ; b) a separação das cargas cria um campo elétrico \vec{E} apontado para baixo no circuito e c) as cargas se separam até que a força elétrica \vec{F}_E seja igual à força magnética \vec{F}_B .





Fonte: Randall D. Knight (2009)

A Equação 30 mostra que a força magnética sobre os portadores de carga dentro do condutor induz um campo elétrico no seu interior. O campo elétrico surge por causa do desbalanceamento na energia potencial dos portadores de carga, provocado pela ação da força magnética que, por sua vez, transmite a energia introduzida no condutor pela força externa para o campo elétrico. Por esta razão, surge uma força elétrica para tentar igualar a energia potencial ao longo de toda a extensão do condutor. Na parte inicial do estudo de eletrostática, o professor discutiu uma relação entre o potencial elétrico criado por uma fonte de força eletromotriz e o campo elétrico associado, $\mathcal{E} \equiv \Delta V_{bat} = Ed$, onde d é a distância entre dois pontos do espaço onde existe o campo elétrico de E . De forma semelhante, é importante associar a diferença de potencial criada entre as extremidades do condutor (energia potencial por unidade de carga elétrica) ΔV_{ind} com o campo magnético que a produz:

$$\Delta V_{ind} = V_{sup} - V_{inf} = -E_{ind}l = -(-vB)l = vBl. \quad (29)$$

A Equação 29 mostra que a diferença de potencial depende apenas da dimensão perpendicular do condutor em movimento e da sua velocidade em relação ao campo magnético presente. Como todas as grandezas do lado direito são conhecidas, podemos obter facilmente ΔV_{ind} . Vale à pena comentar aqui que a diferença de potencial \mathcal{E} de uma bateria convencional estática também é criada pela separação das cargas de sinais contrários no interior dela por uma força que não é elétrica, mas que provém de um gradiente de concentração dos portadores de cargas. Neste caso, \mathcal{E} é igual ao valor do trabalho por unidade de carga elétrica ($\mathcal{E} = W/q$) realizado pela força não elétrica que separa as cargas. No presente caso, a diferença de potencial ΔV_{ind} é induzida pelo trabalho das forças magnéticas para separar os portadores de cargas de sinais contrários. Assim, o condutor em movimento pode ser visto como uma “bateria em movimento” que se mantém carregada com uma *fem* igual a \mathcal{E} enquanto estiver se movendo, mas que se descarrega instantaneamente tão logo ele pare de se mover. Por esta razão, $\Delta V_{ind} \equiv$

\mathcal{E} é comumente denominada força eletromotriz de movimento, Young e Freedman (2009).

4.3 Corrente elétrica criada pelo movimento do condutor

O leitor deve ter em mente que a redistribuição das cargas dentro da barra condutora da Figura 17 ocorre durante um intervalo de tempo muito curto, enquanto V_{sup} for maior do que V_{inf} . Os portadores de carga se manterão afastados enquanto a barra estiver em movimento. Neste caso, como a barra não está conectada a um circuito externo, isso significa que os portadores de carga vão se separar até que $\Delta V(t) = \Delta V_{ind} = \Delta V_{máx}$. A partir desse ponto não haverá mais separação das cargas e a força de separação \vec{F}_B é igual à força de atração \vec{F}_E . A partir deste momento a diferença de potencial é máxima. Para dar utilidade a esse tipo de “bateria” é necessário conectá-la a um circuito externo, assim como ocorre com as baterias que funcionam por reações químicas e as de outro tipo. Quando isto ocorre, os portadores de carga de sinais contrários tendem a se unir através do circuito condutor externo, uma vez que dentro dele não existe a força de separação das cargas \vec{F}_B , uma vez que este não se encontra em movimento.

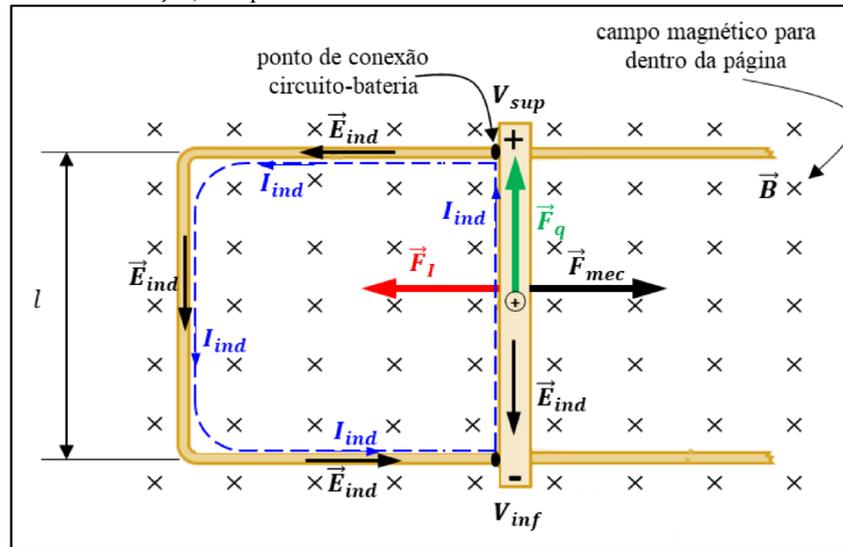
À medida que as cargas elétricas vão se movendo da extremidade da barra condutora para o circuito externo, por causa da força eletrostática, a força magnética \vec{F}_B as repõe na mesma taxa com que elas saem, de modo que o sistema não atinge o equilíbrio até que o circuito externo esteja desconectado da barra, ou a barra pare de se mover. A energia entra no circuito pela ação de uma força mecânica externa \vec{F}_{mec} que a transforma em energia cinética da barra, que se transforma em energia potencial elétrica das cargas dentro da barra via força magnética e, finalmente, se transforma em energia cinética dos elétrons no circuito externo via força eletrostática.

A Figura 18 mostra a mesma barra condutora agora conectada a um fio na forma de C, formando um circuito fechado dentro do mesmo campo magnético orientado para dentro da página. Como já foi discutido, a barra condutora em movimento perpendicular ao campo magnético forma uma bateria cujo potencial na parte superior V_{sup} é maior que o potencial na parte inferior V_{inf} . Quando a barra é conectada ao fio de resistência R , os pontos de conexão deste adquirem os mesmos potenciais das extremidades da barra. O campo elétrico induzido na barra \vec{E}_{ind} é estabelecido quase que instantaneamente dentro do fio, de modo que seus portadores de carga iniciam um movimento do local de maior potencial para o local de potencial menor em busca do equilíbrio energético, o qual ocorria quando $V_{sup} = V_{inf}$. Em outras

palavras, as cargas se redistribuem dentro do fio buscando o cenário no qual os potenciais nas suas extremidades tenham o mesmo valor. Entretanto, enquanto a barra condutora estiver em movimento, a condição $V_{sup} > V_{inf}$ será mantida pela força magnética, a condição de equilíbrio nas extremidades do fio não será atingida e, assim, a corrente induzida dentro dele (denotada por I_{ind} na figura) permanece não nula. O valor desta corrente no circuito pode ser encontrado a partir da lei de Ohm:

$$I_{ind} = \frac{\Delta V_{ind}}{R} = \frac{vBl}{R}. \quad (30)$$

Figura 18. Corrente induzida em um fio fixo na forma de C com um condutor móvel deslizando sobre ele. O conjunto inteiro forma uma espira fechada e está dentro de um campo magnético uniforme. As forças, campos e correntes também estão indicadas.



Fonte: os autores (2021)

A Figura 18 também mostra as três forças envolvidas no evento. A força mecânica \vec{F}_{mec} (seta preta) para a direita é a força externa responsável pelo movimento da barra condutora sobre o circuito. Como já foi discutido, os portadores de carga livres dentro da barra se movem junto com ela, dando origem à uma força magnética $F_q = qvB$, conforme mostrada na Equação 14, apontada perpendicularmente à velocidade da barra. Use a regra da mão direita e certifique-se que a força magnética \vec{F}_q está apontada para cima (seta verde). Por causa de ΔV_{ind} , agora existe corrente no circuito externo conectado à barra condutora. Veja que a corrente possui continuidade ao longo de todo o circuito em questão. Mas tenha claro em mente que, embora os valores das correntes no circuito e na bateria sejam os mesmos, as causas destas correntes são diferentes. A origem da corrente na “bateria móvel” é a força magnética, enquanto a origem

da corrente no circuito é a força elétrica devido ao campo elétrico dentro do fio.

Como já foi estudado na Equação 15, um fio com corrente elétrica dentro de um campo magnético também fica sujeito à uma força magnética $F_I = I l \sin \theta$. Novamente, usando a regra da mão direita, descobre-se que existe outra força magnética sobre a barra condutora, apontada para a esquerda (seta vermelha). A força magnética F_I sempre se opõe à força mecânica no circuito. Quando $F_I = F_{mec}$ a barra passa a se mover com velocidade constante. Assim, quando o circuito se encontra em equilíbrio, a força mecânica F_{mec} fornece energia para o circuito enquanto a força magnética sobre a corrente F_I retira energia à mesma taxa, de modo que a energia do circuito permanece constante, cujo valor é obtido usando as Equações 15 e 30:

$$F_{mec} = F_I = \left(\frac{vBl}{R} \right) lB = \frac{v l^2 B^2}{R}. \quad (31)$$

A energia cinética que entra no circuito pode ser modelada a partir do conceito de trabalho da força mecânica:

$$E_{entra} = F \cdot v = \frac{v^2 l^2 B^2}{R}. \quad (32)$$

Esta energia elétrica é transformada em energia térmica e é dissipada nas partes internas do circuito, cujo valor é obtido usando a Equação 32:

$$E_{sai} = I_{ind}^2 R = \left(\frac{vBl}{R} \right)^2 R = \frac{v^2 l^2 B^2}{R}. \quad (33)$$

As Equações 32 e 33 mostram que a energia do circuito permanece constante o tempo inteiro. Deve-se deixar claro que, embora o valor da energia seja o mesmo, não se trata da mesma energia. O princípio de conservação da energia só impõe que o valor da energia no circuito seja o mesmo, mas não significa que a porção de energia que entrou no circuito é a mesma que sai dele. Trata-se de um equilíbrio dinâmico – o valor de energia que entra é igual ao que sai, sendo este um processo instantâneo. Entretanto, a energia mecânica que entra no circuito precisa ser convertida na forma térmica e isso toma um certo tempo para ocorrer, por causa da inércia do sistema. A Figura 18 também mostra o campo elétrico \vec{E} dentro dos condutores do circuito. Este campo elétrico é igual ao campo elétrico induzido \vec{E}_{ind} dentro da bateria móvel devido à redistribuição das cargas desta.

Para concluir esta discussão, é importante destacar um ponto interessante sobre a energia em um circuito elétrico. Pelas discussões feitas até aqui, ficou claro que a energia disponibilizada em todo o circuito elétrico vem da bateria móvel, que por sua vez entra na bateria por meio da força mecânica externa. Esta é a explicação encontrada em todos os livros textos, do Ensino Médio até o Ensino Superior. Entretanto, como explicar a rapidez com que a energia elétrica é disponibilizada em determinadas partes no circuito quando a bateria móvel está distante deles, como é o caso das cidades e das hidroelétricas que as alimentam com energia? Como exemplo, parte da energia elétrica usada em São Luís, no Maranhão, vem da hidroelétrica de Tucuruí, no Pará, a cerca de 1000 km de distância. A velocidade típica dos portadores de carga dentro do circuito elétrico é apenas de 20 cm/h ou 0,020 km/h. Se a energia fosse transportada pelo “movimento ordenado das cargas elétricas”, como explicar que ela possa cruzar toda essa distância em apenas 3 milissegundos?

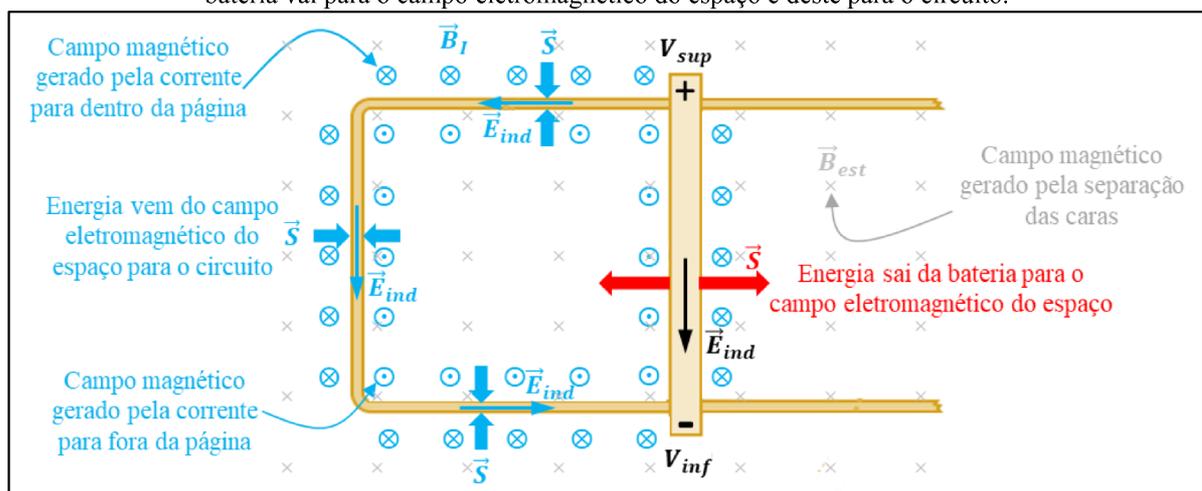
Quando se trata do transporte de energia via campo eletromagnético, que é o que de fato ocorre com o circuito elétrico, a relação que mostra a direção de seu fluxo em função dos campos E_{ind} e B_I é dada pela equação:

$$S = \frac{E_{ind} B_I \text{sen}90^0}{\mu_0}. \quad (34)$$

O símbolo S representa o fluxo de energia (quantidade de energia que atravessa uma certa área) e é denominado de vetor de Poynting. O símbolo μ_0 já foi definido como constante magnética do vácuo. A direção de propagação da energia S é perpendicular ao campo elétrico induzido E_{ind} e ao campo magnético gerado pela corrente no circuito B_I em qualquer local do espaço, conforme ilustrado na Figura 19. Esta Figura mostra os campos E_{ind} e B_I e a direção do fluxo de energia S . Da Equação 34 e desta figura fica claro de onde vem a energia que é usada para alimentar o circuito – vem do campo eletromagnético do espaço ao redor dele. De forma semelhante, a energia da bateria móvel vai para o campo eletromagnético no espaço ao seu redor. Isso parece estranho, haja vista que este assunto não nunca é abordado desta forma nos livros textos, mas é o que realmente acontece. A conservação da energia descrita pelas Equações 32 e 33 afirma que a quantidade de energia que entra no circuito é igual à quantidade de energia que sai dele, mas não afirma que estas energias têm que ser as mesmas. Como a redistribuição de energia no campo eletromagnético ocorre à velocidade causal c (que coincide com a velocidade da luz no vácuo), isso explica a rapidez com que a energia que sai da fonte chega até os usuários no circuito elétrico externo.

Somente a partir dessa abordagem fica resolvida uma questão que antes não era respondida pela explicação tradicional na qual a energia é transportada pelos elétrons da bateria para o circuito, que era a rapidez com que uma lâmpada acende quando o interruptor é ligado, ou como cidades distantes sofrem *blackout* imediatamente após a queda de uma torre das linhas de transmissão. O modelo matemático que descreve a energia usada por um equipamento sendo diretamente proveniente da bateria está quantitativamente correto, mas ele apresenta várias dificuldades em alguns cenários. É necessário entender que o que a fonte *fem* de fato faz é criar as condições necessárias para que o circuito use a energia que está armazenada no campo eletromagnético, e não fornecer sua energia diretamente via movimento de elétrons com massa m_e (Bauer, Westfall e Dias, 2012).

Figura 19. Ilustração para a energia fluindo em um circuito elétrico estático e uma bateria móvel. A energia da bateria vai para o campo eletromagnético do espaço e deste para o circuito.



Fonte: os autores (2021)

4.4 A lei da indução magnética

Após essa explanação sobre os princípios de operação de uma fonte de força eletromotriz móvel, agora é a hora de tratar a indução magnética com mais detalhes. Observando com cuidado a Figura 19, percebemos que a quantidade de linhas de campo magnético (representado pelos símbolos \times) dentro do circuito aumenta à medida em que a barra condutora se move para a direita. Isso pode ser interpretado como um aumento da área efetiva do circuito que está dentro do campo magnético. Na seção 3.2 foi dito que a essência da indução está na variação do campo magnético. Mas agora podemos deduzir que a indução também ocorre quando existe um campo constante e a área efetiva do circuito é variável. Estas informações podem ser colecionadas sob um único conceito, o de fluxo magnético, ϕ_B , que

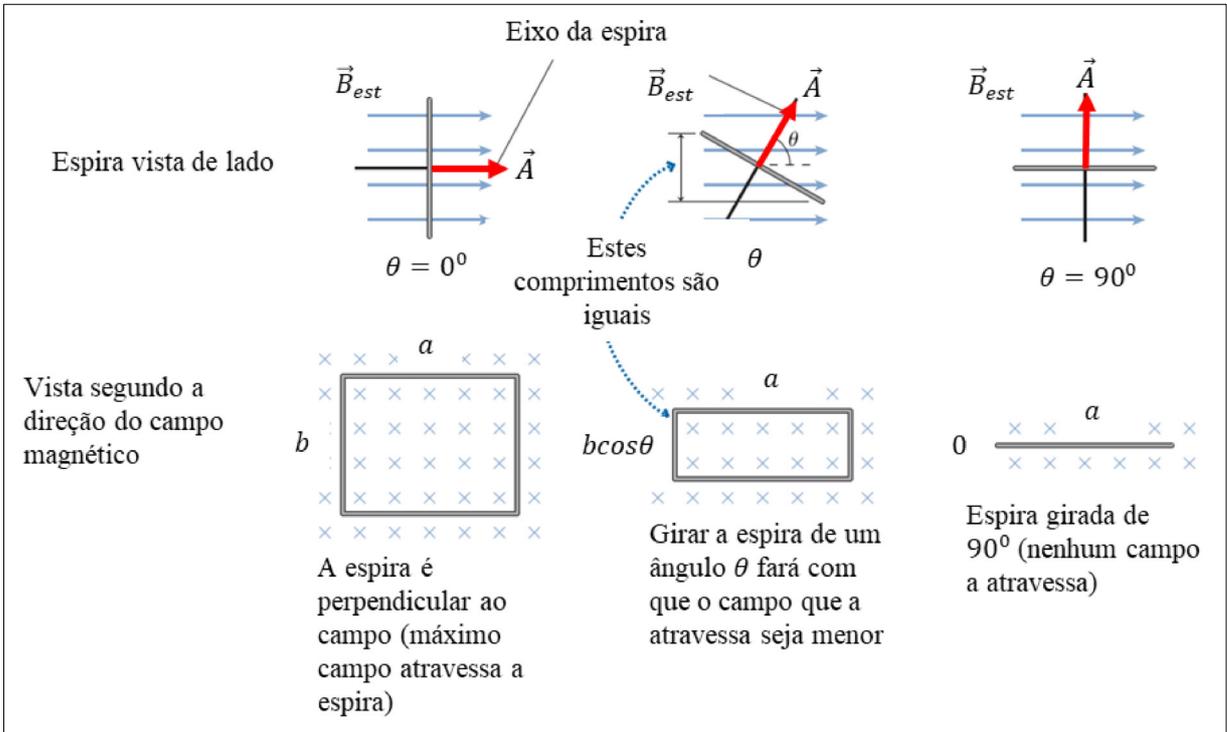
mede a quantidade de campo dentro de um circuito de área A .

A Figura 20 ilustra o conceito de fluxo magnético através de uma espira de área fixa ($A = ab$), disposta em vários ângulos dentro de um campo magnético estático, \vec{B}_{est} . A direção do vetor \vec{A} serve para indicar a direção do plano da espira, enquanto seu módulo indica o valor da área da espira. As figuras superiores indicam a visão lateral, enquanto as inferiores são o equivalente para quem observa da direção do campo magnético. Na figura da esquerda a espira é perpendicular ao campo \vec{B}_{est} e o máximo número de linhas desse campo a atravessa, porque a área efetiva A_{ef} (área da espira projetada na direção do campo) coincide com a área da própria espira, de modo que $A_{ef} = A$. Na figura do meio, a espira foi girada de um ângulo θ e a quantidade de linhas de campo que a atravessa diminui. Veja que a área da espira é a mesma, mas sua projeção na direção do campo diminui $A_{ef} < A$. Finalmente, quando a espira está paralela ao \vec{B}_{est} (seu plano é perpendicular) a área projetada A_{ef} é nula e por isso nenhuma linha de campo a atravessa. Portanto, a quantidade de linhas de campo que atravessa a espira depende do valor de \vec{B}_{est} , de A e da inclinação θ da espira em relação do campo. A partir desses achados podemos montar uma equação para o fluxo de campo da seguinte forma:

$$\phi_B = AB\cos\theta = A_{ef}B, \quad (35)$$

sendo $A_{ef} = A\cos\theta$. A unidade de fluxo magnético no Sistema Internacional é Wb (weber), sendo $1 Wb = 1 Tm^2$ (sendo T o Tesla).

Figura 20. Ilustração para fluxo de campo magnético através de uma espira em vários ângulos.



Fonte: adaptado de Randall D. Knight (2009)

Na Equação 30 foi mostrado que a corrente induzida depende da força eletromotriz da bateria móvel, $I_{ind} = \Delta V_{ind}/R = vBl/R$. Após muitas experiências, Faraday percebeu que o valor da corrente induzida dependia da intensidade do campo magnético para um circuito fixo, da área fixa do circuito utilizado e também da orientação do circuito em relação à direção de um campo magnético constante. Portanto, devia haver uma correlação entre a corrente observada e as propriedades geométricas do circuito, bem como do valor do campo magnético. Se qualquer uma dessas propriedades variasse no tempo uma corrente induzida seria observada. A partir destas informações, podemos montar uma relação que explicita a dependência da corrente com tais propriedades. Da Equação 35 e da Figura 18 temos:

$$\phi_B = A_{ef}B = lxB = lvtB = (vBl)t = \mathcal{E}t. \tag{36}$$

Para um certo intervalo de tempo Δt o fluxo varia de uma quantidade $\Delta\phi_B$. Portanto, da Equação (36) temos a lei da indução de Faraday:

$$\mathcal{E}_{ind} = -\frac{\Delta\phi_B}{\Delta t}. \tag{37}$$

Em palavras, uma *fem* será induzida ao longo de uma espira fechada se o fluxo magnético através da mesma sofrer variação. Finalmente, a corrente induzida por ser escrita da lei de Ohm ($i = \mathcal{E}/R$):

$$I_{ind} = -\frac{\mathcal{E}_{ind}}{R}. \quad (38)$$

Esta equação mostra que uma corrente é induzida no circuito sempre que o fluxo magnético variar com o tempo. O sinal negativo é acrescentado na Equação (38) porque a corrente induzida produz um campo magnético que se opõe ao campo externo. Este efeito é conhecido como lei de Lenz. Como o fluxo depende da área efetiva e do valor do campo magnético, qualquer um dos dois pode variar no tempo. Então temos uma *fem* gerada pela variação de A_{ef} e outra gerada pela variação de B :

$$\mathcal{E}_{total} = \mathcal{E}_{\Delta A, B} + \mathcal{E}_{\Delta B, A}, \quad (39)$$

onde o símbolo \mathcal{E}_{total} representa a *fem* total induzida. $\mathcal{E}_{\Delta A, B}$ e $\mathcal{E}_{\Delta B, A}$ são as *fems* produzidas pelas variações da área da espira e do campo magnético, respectivamente. Em geral, a criação de uma *fem* pela variação da área efetiva $\mathcal{E}_{\Delta B, A}$ é mais fácil para a produção de grandes valores de voltagens. Para isto, grandes ímãs giram presos ao eixo de uma turbina e muito próximos a eles estão condutores fixos. Este é o princípio de funcionamento de um gerador de corrente alternada, como será visto na próxima seção.

4.5 Aplicações da lei da indução magnética

Depois de apresentar os conceitos relacionados ao campo magnético e suas implicações, estamos prontos para discutirmos algumas aplicações para o fenômeno da indução magnética. De todos os fenômenos físicos, este certamente é um dos que contribuíram para o maior desenvolvimento tecnológico e para a melhoria da qualidade de vida da humanidade, através de muitos equipamentos que operam baseado em seus princípios. Vejamos alguns deles a seguir.

4.5.1 Gerador de corrente alternada

A primeira aplicação da indução magnética que será discutida é responsável pela produção de cerca de 97% de toda a energia elétrica consumida no mundo. Isso por si só já mostra o tamanho do impacto que ela gerou para o desenvolvimento da humanidade. Sem a energia na forma elétrica não haveriam carros, aviões, TVs, celulares, ou equipamentos elétricos de quaisquer tipos. Além disso, praticamente não existiriam muitos bens de consumo disponíveis atualmente, uma vez que todos eles utilizam a energia elétrica na sua produção. De forma simples, um gerador pode ser explicado a partir das discussões da Figura 18, na qual um fio deslizante é puxado sobre um trilho em forma de U na presença de um campo magnético. Este circuito é um gerador elétrico porque ele transforma energia mecânica em energia elétrica.

A Figura 21 ilustra um gerador elétrico de forma mais prática. Uma bobina, acionada por uma força externa (não mostrada na figura), gira na presença de um campo magnético. As forças externas geralmente vêm da queda de água líquida em uma hidroelétrica, do vapor de água em alta pressão em usinas termelétricas e nucleares, do vento em usinas eólicas e do movimento das marés em usinas maremotrizes. O campo magnético e a área real da espira são constantes, mas o fluxo magnético através da espira varia continuamente à medida que ela gira, porque a área efetiva (seção transversal) muda com o movimento rotacional. Na Figura 21 o campo magnético está orientado na direção do eixo y , o eixo da espira está na direção do eixo x e seu plano, descrito pelo vetor \vec{A} , está em um ângulo θ em relação ao campo magnético.

Devemos deixar claro que \vec{A} não é o vetor área, já que área não é vetor. Mas ele pode ser interpretado como um vetor cuja magnitude é igual à área A da espira e cuja direção é perpendicular ao seu plano. Veja que quando $\theta = 0$, o plano da espira é perpendicular ao eixo y , e o máximo de linhas de campo magnético atravessam a espira. Assim o fluxo magnético ϕ_B é o máximo possível. Quando $\theta = 90^\circ$, o plano da espira é paralelo ao campo magnético, de modo que nenhuma de suas linhas pode atravessá-la. Assim o fluxo magnético ϕ_B através dela é nulo. A corrente induzida sai da espira girante por meio de escovas pressionadas contra anéis deslizantes, que também giram. O fluxo magnético através da bobina é:

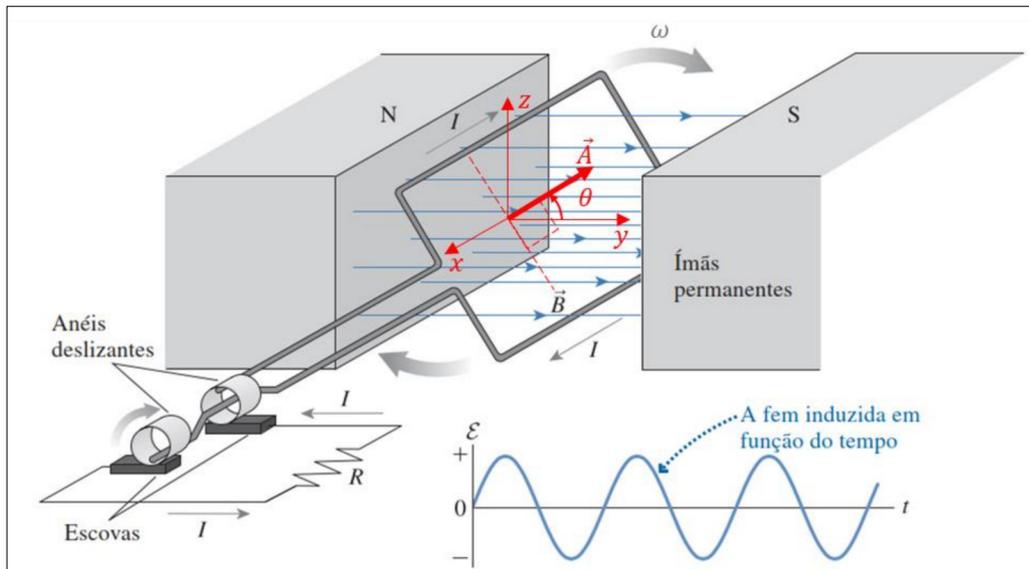
$$\phi_B = \vec{A} \cdot \vec{B} = AB\cos\theta = AB\cos\omega t, \quad (40)$$

onde ω é a frequência angular de rotação da bobina (número de rotações para cada unidade de radiano ($\omega = 2\pi f$), sendo f a frequência linear (número de rotações por cada unidade de tempo). Usando a lei de Faraday (Equação 37), a força eletromotriz induzida em uma bobina composta por N espiras é:

$$\mathcal{E}_{bobina} = -N \frac{\Delta\phi_B}{\Delta t} = \omega ABN \text{sen}\omega t. \quad (41)$$

É importante notar que para $0^\circ < \omega t < 90^\circ$, $\text{sen}\omega t > 0$ e o sinal de \mathcal{E}_{bobina} é positivo. Para $90^\circ < \omega t < 180^\circ$, $\text{sen}\omega t < 0$ e o sinal de \mathcal{E}_{bobina} é negativo. O gráfico da função seno foi inserido na Figura 21 para tornar este conceito mais claro. Portanto, o sinal da *fem* é alternado e a corrente através do resistor R também tem seu sentido alternado para trás e para a frente. É assim que opera um gerador de corrente alternada. Este é o método usado por todos os sistemas de produção de energia elétrica em grande escala. Uma turbina é girada por um potente fluxo de água líquida ou vaporizada, no eixo da qual são fixados grandes ímãs que giram com ela. Ao redor e muito próximo dos ímãs, ficam as bobinas condutoras estáticas.

Figura 21. Ilustração para o gerador de corrente alternada.



Fonte: adaptado de Randall D. Knight (2009)

Os motores elétricos funcionam exatamente com as mesmas partes do gerador elétrico. A única diferença entre estes dois dispositivos é que, em vez de uma força externa girar a turbina, ligamos as extremidades das bobinas a uma fonte força eletromotriz externa com o objetivo de gerar força mecânica. O gerador transforma energia mecânica em energia elétrica, enquanto o motor transforma energia elétrica em energia mecânica. Tanto gerador quanto o motor elétrico estão na base do desenvolvimento humano. Virtualmente todos os itens de consumo nos dias atuais utiliza um motor elétrico para a sua construção.

4.5.2 Transformador

A energia produzida nos geradores elétricos precisa ser transportada até os

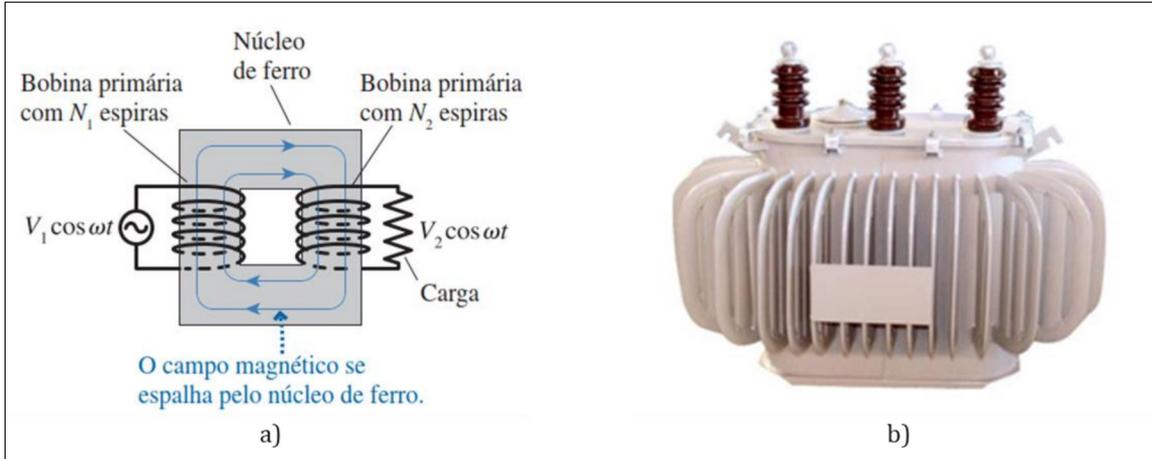
consumidores que, em geral, estão longe das estações geradoras. Para otimizar os custos de transmissão, é conveniente que a *fem* gerada em 18 *kV* seja elevada tipicamente para 500 *kV* ou 700 *kV* e a energia transmitida por meio de torres com até 30 m de altura por razões de segurança. Quando a energia chega aos consumidores por meio de uma *fem* tão elevada, é necessário que esta seja reduzida em uma subestação, a fim de ser redistribuída entre os vários tipos de consumidores, de pequenas residências até grandes indústrias. Em geral, ela é reduzida para cerca de 75 *kV* (como é o caso da rede com cabos grossos e enormes postes de concreto com cerca de 15 m entre subestações), para 13 *kV* nas redes de alta tensão das ruas (postes de altura de até 8 m com três fios geralmente na horizontal), e para 220 V nas redes comuns, contendo geralmente 5 fios instalados verticalmente a uma altura mínima 5 m do solo.

Como o método de produção mais eficiente de energia elétrica é o que usa a indução magnética, a *fem* produzida é necessariamente alternada e possui valores muito mais elevados do que o consumidor precisa. Por isso, o único dispositivo que pode reduzi-la é o transformador. Transformador é o nome dado ao dispositivo que tem como objetivo reduzir ou aumentar uma diferença de potencial alternada. Portanto, pelo exposto acima, podemos concluir que sem os transformadores não seria possível o uso direto da energia elétrica produzida em usinas hidroelétricas, termoeletricas, eólicas ou nucleares. Em resumo, seria impossível ter a energia elétrica como ela é disponibilizada atualmente. Além disso, todos os dispositivos eletrônicos usam energia em baixíssimas tensões, tipicamente entre 1,5 V e 20 V. Em geral as pessoas não refletem sobre o impacto que as descobertas científicas têm nas suas vidas. Daqui fica óbvio que sem a descoberta de Faraday e os produtos dela decorrentes, a vida humana atualmente seria equivalente à de séculos atrás, sem iluminação por lâmpadas, sem computadores, celulares, TVs, carros, aviões, equipamentos hospitalares de todos os tipos e centenas de outros bens de uso generalizado pela sociedade. Já imaginou como o mundo sem tudo isso?

O princípio de funcionamento do transformador pode ser explicado a partir da Figura 15 e das discussões dela decorrentes. A lei de Faraday foca no surgimento da *fem* alternada em uma bobina (secundária) quando uma corrente elétrica varia em outra bobina próxima (primária). Mas o foco agora estará no valor da *fem* na bobina secundária, que pode ser maior ou menor do que a *fem* da bobina primária, a depender do número de espiras em cada uma delas. A Figura 22a ilustra duas bobinas enroladas em um mesmo núcleo de ferro. A bobina da esquerda é a bobina primária. Ela tem N_1 espiras e é alimentada por uma *fem* oscilatória $V_1 \cos \omega t$ produzida por um gerador, conforme foi explicado na seção anterior. O campo magnético da bobina primária é conduzido pelo núcleo de ferro e atravessa a bobina da direita, a secundária, que possui N_2 espiras. A Figura 22b mostra um transformador de três fases

tipicamente encontrado em postes urbanos. As hastes externas são para melhor troca de calor entre o óleo e o meio externo. O óleo é usado para o resfriamento das espiras, que aquecem por causa da grande corrente nas espiras.

Figura 22. Ilustração das partes de um transformador. (b) Fotografia de um transformador real.



Fonte: (a) Randall D. Knight (2009) (b) <https://webautomacaoindustrial.blogspot.com/>

Antes de continuar a discussão sobre o transformador é necessário explicar em poucas linhas o papel do núcleo de ferro entre as bobinas. O espaço vazio (vácuo) oferece uma reação quando se tenta estabelecer um campo magnético não nulo nele. Em outras palavras, o campo magnético intrínseco do espaço vazio, \vec{H} , discutido anteriormente, tem seu valor no vácuo alterado por uma das quatro fontes: carga em movimento, corrente elétrica, campo elétrico oscilante ou *spin* de alguma partícula. Não se sabe exatamente como se dá esse processo, mas ele pode ser quantificado por meio de uma quantidade, que representa o valor da alteração do campo \vec{H} .

De forma geral, podemos escrever $\vec{B} = \mu_0 \vec{H}$, sendo \vec{B} o campo magnético gerado por uma das quatro fontes mencionadas. μ_0 é a constante magnética ou permeabilidade magnética do vácuo. Ela informa o quanto o campo \vec{H} em uma região do vácuo é alterado por uma das quatro fontes. Se na região onde o campo produzido por uma das fontes anteriores houver matéria, esta será magnetizada pelo campo \vec{H} , produzindo um campo denominado de magnetização \vec{M} , também discutido anteriormente, que também pode ser escrito em termos do campo do vácuo como $\vec{M} = \chi \vec{H}$. O símbolo χ , denominado de susceptibilidade magnética, informa o quanto a matéria pode ser magnetizada pelo campo \vec{H} . Assim, o campo magnético total dentro uma região do espaço com matéria pode ser escrito como:

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M}) = \mu_0(\vec{H} + \chi\vec{H}) = \mu_0(1 + \chi)\vec{H}. \quad (42)$$

Materiais diamagnéticos possuem χ negativo e da ordem de 10^{-5} . Quando um material diamagnético é colocado dentro de uma região com campo magnético ele “repele” as linhas do campo de modo que poucas passarão dentro dele, o que significa que este tipo de material ao ser magnetizado por um ímã será levemente repellido por ele. Materiais paramagnéticos possuem χ positivo e da ordem de 10^{-4} . Um material paramagnético colocado na região de um campo externo “atrai” algumas linhas de campo para dentro dele, o que significa que serão levemente atraídos pelo ímã. Materiais ferromagnéticos, como o ferro do núcleo do transformador, possuem χ positivos e muito grandes, alguns atingindo a ordem de 10^6 . Na prática isso quer dizer que um material ferromagnético “atrai” fortemente as linhas de campo magnético que estão ao seu redor, de modo a concentrar o máximo delas dentro de si. Este tipo de material, de forma figurativa, age como uma lente de biconvexa, que concentra a luz em um ponto focal. É por essa razão que se coloca ferro entre as bobinas do transformador para que o campo alternado gerado na espira primária se concentre ao máximo na região da espira secundária, sendo que esse campo é canalizado pelo núcleo de ferro. Pela lei de Ampère, quanto maior a variação do fluxo na região da bobina secundária, maior será a *fem* gerada lá. Sem o núcleo de ferro haverá um campo muito pequeno na região da segunda bobina, o que torna a geração da *fem* um efeito insignificante.

Após essas explicações sobre o papel do núcleo de ferro, a discussão sobre o princípio de funcionamento do transformador pode ser retomada. A corrente alternada através da bobina primária com N_1 espiras produz um campo magnético oscilante que é conduzido pelo núcleo de ferro até a bobina secundária com N_2 espiras. A *fem* induzida nesta bobina é transferida para o circuito externo como a voltagem oscilatória $V_2 \cos \omega t$. É precisamente esta a voltagem utilizada nas nossas casas e indústrias. Existe uma relação simples entre a voltagem da espira 1 e da espira 2, que pode ser escrita como:

$$V_2 = \frac{N_2}{N_1} V_1. \quad (43)$$

Observe que a magnitude de V_2 depende da relação entre N_2 e N_1 . Se N_2 for maior que N_1 o transformador aumenta a voltagem inicial. Este é o caso da transformação nas usinas geradoras, que eleva a voltagem para a transmissão de energia a grandes distâncias. Se N_2 for menor que N_1 o transformador reduz a voltagem. Este é o caso dos transformadores de subestações, dos que se encontram nos postes de ruas e aqueles que se encontram em todos os

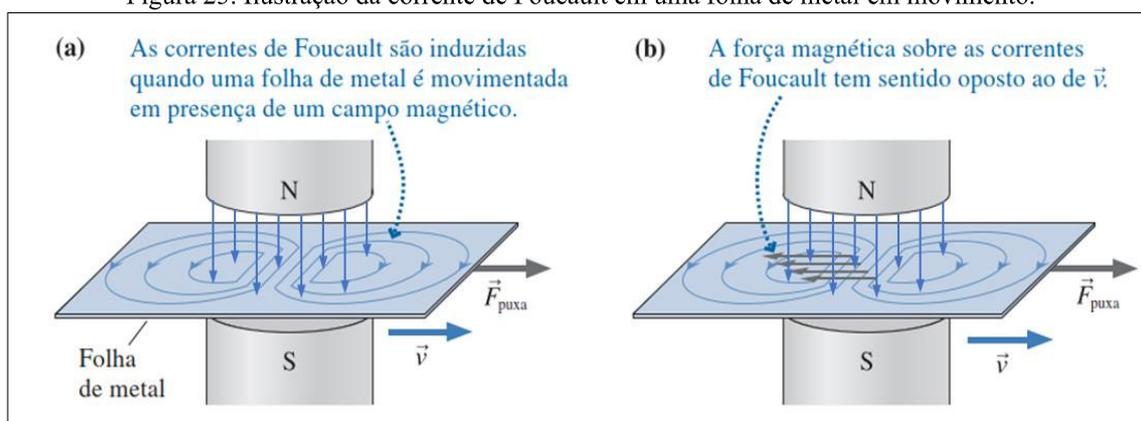
equipamentos elétricos e eletrônicos.

4.5.3 Fogões à indução, frenagem magnética e detectores de metais

Antes de explicar como funciona um fogão à indução, os freios magnéticos e os detectores de metais, é necessário fazer uma rápida discussão sobre um dos fenômenos decorrentes da lei da indução magnética. Nas discussões sobre indução magnética, as correntes induzidas estavam sempre confinadas em percursos bem definidos nos condutores que formavam os circuitos. Contudo, existem casos nos quais em vez de um fio condutor temos grandes placas metálicas se deslocando no interior de um campo magnético ou placas metálicas localizadas em uma região onde existe um campo magnético variável. Nessas circunstâncias, surgem correntes induzidas que circulam no material condutor, denominadas de correntes de Foucault.

Imagine uma folha de metal não magnético colocada entre dois ímãs próximos, conforme ilustrado na Figura 23. Quando em repouso, a folha não sofre a ação de forças magnéticas. Entretanto, se ela for puxada para a direita, como mostrado na Figura 23a, os portadores de carga estarão em movimento para a direita com velocidade \vec{v} , e uma força magnética desaceleradora aparece sobre a corrente e , portanto, sobre a folha. Estas forças estão ilustradas na Figura 23b. Este tipo de força aponta no sentido contrário ao movimento mecânico, conforme foi discutido na seção 4.3 e seus detalhes também foram discutidos no contexto da Figura 18. Veja que o padrão de corrente é o mesmo que se estabelece em um fio, formando caminhos fechados. É necessário exercer uma força externa para puxar um pedaço de metal para fora do campo magnético, assim como é necessária uma força para empurrá-lo para dentro do campo. Se a força que puxa a folha cessar, a força magnética rapidamente desacelerará o pedaço de metal até que ele pare. A corrente de Foucault e suas consequências possuem várias implicações importantes, conforme serão discutidas nos próximos parágrafos.

Figura 23. Ilustração da corrente de Foucault em uma folha de metal em movimento.



Fonte: Randall D. Knight (2009)

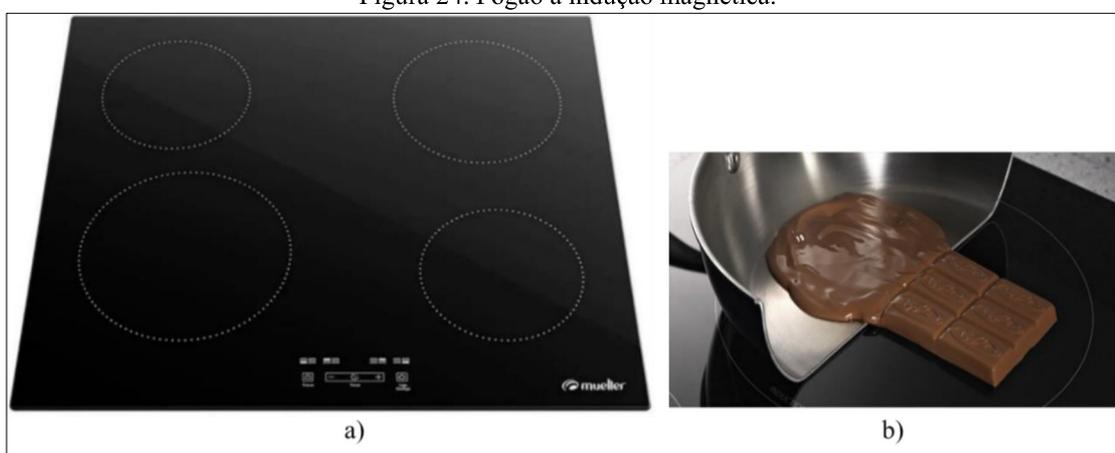
As correntes de Foucault possuem aspectos mais positivos que negativos, sendo que em cada um deles podemos encontrar aplicações importantes. Quanto ao aspecto negativo, elas são chamadas de correntes parasitas, porque elas dissipam parte da energia que poderia ser usada para outras finalidades. Isto ocorre porque os materiais por onde estas correntes passam possuem resistência elétrica, sendo que a taxa com que a energia é retirada do campo magnético depende do quadrado da corrente, segundo a fórmula estudada em eletricidade $P = Ri^2$. A potência dissipada pelas correntes de Foucault pode causar um aquecimento imprevisto, e as forças magnéticas sobre elas indicam que energia extra deve ser gasta para mover metais em presença de campos magnéticos. Um exemplo é o caso do transformador. Quando o campo magnético se estabelece dentro do núcleo de ferro, correntes de Foucault aparecem dentro dele, resultando em aquecimento do mesmo. Por isso é necessário adicionar um sistema de resfriamento aos transformadores. Isso pode ser visto pelas aletas externas do transformador da Figura 22b, que são instaladas objetivando a trocar energia via calor com o meio externo ao transformador.

O aquecimento nos transformadores é um aspecto negativo das correntes de Foucault. Mas existem vários cenários nos quais a presença da corrente é um fator muito positivo. Neste caso não se deve dar um aspecto negativo para a energia dissipada pelas correntes de Foucault, porque ela é justamente a causa de outro efeito que se deseja ocorrer. Um exemplo é o fogão à indução magnética. A Figura 24 mostra a parte superior de um fogão que aquece os alimentos via indução magnética. A Figura 24a destaca com círculos na tampa do fogão as regiões que são magneticamente ativas. Debaxo destas se encontram bobinas metálicas que transportam corrente alternada, gerando um campo magnético variável na região acima do tampo. Uma panela metálica colocada dentro do círculo desempenha o mesmo papel da placa metálica da Figura 23. Correntes de Foucault serão formadas no fundo da panela e a energia dissipada pela corrente, ou retirada pela resistência elétrica do metal da panela, é usada para aquecer o

alimento.

Uma grande vantagem deste tipo de fogão em relação ao fogão elétrico ou à gás é que apenas partes metálicas aquecem, gerando uma grande segurança para quem o operador. Uma prova disso é mostrada na Figura 24b, na qual uma barra de chocolate, que é programada para derreter em temperatura de 45°C , recebe energia térmica apenas pela parte metálica da panela. O tampo do fogão não se aquece, mas apenas partes metálicas colocadas sobre ele dentro da região demarcada. Não há perigo em colocar as mãos sobre a “boca do fogão”, uma vez que estas não retiram a energia do campo magnético.

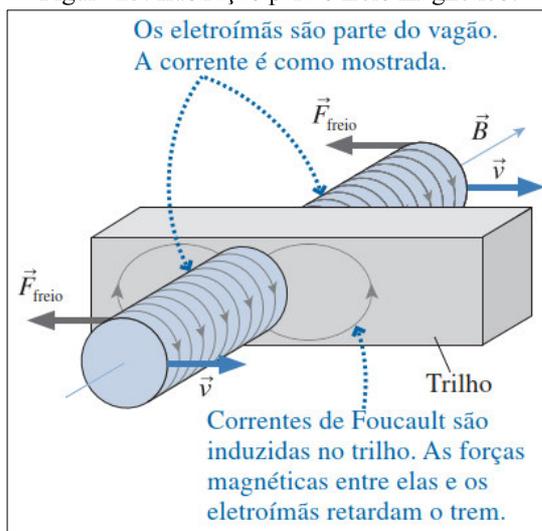
Figura 24. Fogão à indução magnética.



Fonte: <https://muellerhome.us/>

A Figura 23b mostra que a força magnética exerce um papel de desacelerar o movimento provocado pela força mecânica. Ou seja, qualquer que seja a tendência do movimento a força magnética se oporá à ela. Este fenômeno tem aplicações muito úteis em vários setores da indústria. A Figura 25 ilustra um vagão de trem fixo e duas bobinas bem próximas aos seus dois lados. Quando uma corrente elétrica alternada passa nas bobinas, o seu campo induz corrente de Foucault no metal do trilho. Se as bobinas se movem para a direita, as forças magnéticas sobre as correntes no trilho apontarão para a esquerda, e agirão como freio para as bobinas. Este é o mecanismo usado para frear trens modernos, montanhas-russas, e muitos outros sistemas girantes eletrificados. Os sistemas magnéticos de frenagem são muito eficientes e possuem a vantagem adicional de aquecer o trilho, e não os freios.

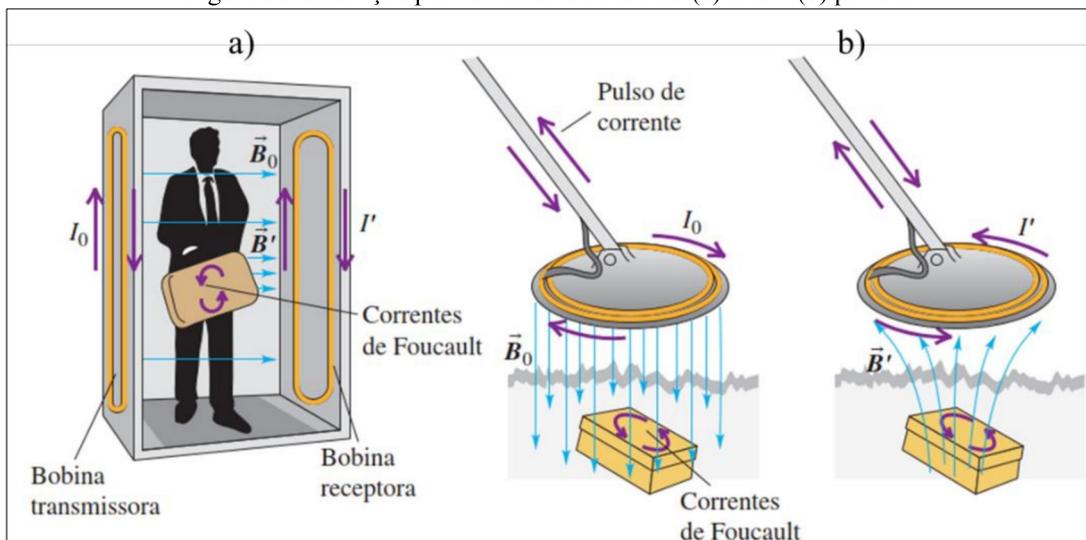
Figura 25. Ilustração para o freio magnético.



Fonte: Randall D. Knight (2009)

Para encerrar as discussões sobre algumas aplicações da indução magnética, os detectores de metais serão discutidos em poucas linhas. A Figura 26a ilustra um arranjo típico para os detectores de metal usados em pontos de segurança de embarque e desembarque de aeroportos. Uma bobina gera um campo magnético alternado \vec{B}_0 . Este campo induz correntes de Foucault no objeto condutor transportado pelo passageiro que passa através do detector. As correntes induzidas produzem um campo magnético alternado B' , que por sua vez induz uma corrente na bobina receptora do detector. A Figura 26b ilustra um detector de metais portátil, usados para detectar minas ou qualquer peça de metal enterrados e que funciona sob o mesmo princípio, Randall (2009) e Young e Freedman (2009).

Figura 26. Ilustração para detectores de metais (a) fixo e (b) portátil.



Fonte: Young e Freedman (2009)

5 RECURSO PEDAGÓGICO

5.1 Definição da UEPS

De acordo com Moreira (2011), uma Unidade de Ensino Potencialmente Significativa (UEPS) é uma sequência de ensino fundamentada teoricamente, voltada para a aprendizagem significativa de tópicos específicos do conhecimento. Somente há ensino quando há aprendizagem significativa, sendo o ensino o meio e a aprendizagem significativa o fim. Este autor propõe as UEPS como sequências de ensino capazes de estimular a pesquisa aplicada em ensino, voltadas diretamente para sala de aula. Trata-se de unidades de ensino facilitadoras da aprendizagem significativa de tópicos específicos de conhecimento. Uma organização de atividades interligadas, pré-estabelecidas com uma única finalidade. Moreira (2011), ainda destaca que os passos para se construir uma UEPS são:

- 1) Definir o tópico a ser abordado;
- 2) Criar ou propor uma ou mais situações que levem o aluno a expressar seu conhecimento prévio (levantamento dos subsunçores);
- 3) Propor situações-problema, em nível introdutório, levando em conta o conhecimento prévio do aluno (organizadores prévios);
- 4) Após exploradas as situações iniciais, devemos apresentar o conhecimento a ser ensinado e aprendido, levando em conta a diferenciação progressiva, abordando dos pontos mais gerais aos específicos;
- 5) Em continuidade, retomar os aspectos gerais do conteúdo da unidade de ensino, em nova apresentação, porém em nível mais alto de complexidade em relação à primeira apresentação e promover a reconciliação integradora;
- 6) Concluindo a unidade, retomar características mais relevantes (diferenciação progressiva) com uma perspectiva integradora, ou seja, buscando a reconciliação integrativa. Nessas novas situações, o problema deve ser proposto e trabalhado questões com nível mais alto de complexidade em relação as situações anteriores;
- 7) A avaliação da aprendizagem através da UEPS deve ser feita ao longo de sua implementação, registrando tudo que possa ser considerado evidência de aprendizagem significativa do conteúdo trabalhado;
- 8) A UEPS somente será considerada exitosa se a avaliação do desempenho dos alunos fornecer evidências de aprendizagem significativa, havendo evidências progressiva no comportamento do campo conceitual.

A utilização da UEPS para o ensino da Física deve proporcionar uma maior dinâmica e

desenvolvimento do conteúdo, permitindo ao estudante aguçar sua curiosidade e promoção de sua ação-reflexão, tornando um ser atuante, mediador de seu conhecimento, permitindo-o que seja potencialmente significativo. Na construção de uma UEPS, segundo Moreira (2011, p. 2), devem ser considerados os seguintes pontos:

“OBJETIVO: desenvolver unidades de ensino potencialmente facilitadoras da aprendizagem significativa de tópicos específicos de conhecimento declarativo e/ou procedimental.

FILOSOFIA: só há ensino quando há aprendizagem e esta deve ser significativa; ensino é o meio, aprendizagem significativa é o fim, materiais de ensino que busquem essa aprendizagem devem ser potencialmente significativos.

MARCO TEÓRICO: a teoria da aprendizagem significativa de David Ausubel (1968, 2000), em visões clássicas e contemporâneas (Moreira, 2000, 2005, 2006; Moreira e Masini, 1982, 2006; Masini e Moreira, 2008; Valadares e Moreira, 2009), as teorias de educação de Joseph D. Novak (1977) e de D. B. Gowin (1981), a teoria interacionista social de Lev Vygotsky (1987), a teoria dos campos conceituais de Gérard Vergnaud (1990; Moreira, 2004), a teoria dos modelos mentais de Philip Johnson-Laird (1983) e a teoria da aprendizagem crítica de M. A. Moreira (2005)”.

5.2 Mapas conceituais

Os conceitos visam a compreensão que, algo ou alguém, tem de uma palavra ou ideia. Relaciona-se ao ato de qualificar, caracterizar ou classificar. São representações determinadas por seus significados, possibilitando que as palavras reproduzam a interação entre tópicos ou acontecimentos.

Os mapas conceituais apresentam uma relação hierárquica mostrando a organização e conexões entre conceitos, sendo apresentados de tal forma que as ideias mais gerais e inclusivas do tópico a ser estudado seja explicado antes e posteriormente introduzido detalhes específicos necessários. A teoria a respeito dos mapas conceituais foi desenvolvida por Novak baseada nas teorias da Aprendizagem Significativa de Ausubel, podem ser utilizados como estratégias pedagógicas de grande importância para estabelecimento de conhecimentos específicos, uma vez que, ajudam a relacionar informações de maneira organizada integrando conceitos. A finalidade dos mapas conceituais é representar um recurso pedagógico de alinhamento e facilidade de apropriação de conceitos por parte dos estudantes.

Um mapa conceitual é um diagrama, uma estrutura gráfica, utilizado para organizar conceitos, podendo ser uma excelente ferramenta didática, principalmente por trabalhar com recursos visuais.

Mapas conceituais foram propostos por Novak (2009) tendo como referência a diferenciação progressiva e reconciliação integrativa. Sendo assim, representam instrumentos que visam facilitar a aprendizagem, tornando-a mais significativa.

Os organizadores prévios são materiais que o professor deve apresentar a seus estudantes antes das discussões do assunto principal de sua aula. Ele deve conter informações mais generalizadas acerca do conteúdo a ser ministrado, com o objetivo de estimular o estudante a pensar e buscar conhecimentos já adquiridos que possam se conectar com os novos conceitos a serem aprendidos. A maneira eficiente de implementar os organizadores prévios em sala de aula é através de mapas conceituais, uma representação em forma de diagramas que indicam o máximo de relações possíveis entre os diferentes conceitos presentes nas mentes dos estudantes ou entre palavras que usamos para representar os conceitos.

5.3 Filme

O cinema em sala de aula busca motivar os estudantes e envolve-los nesta tecnologia. Os docentes fazem uso da exibição de filmes procurando uma estratégia integradora e articulada como forma ilustrativa do conteúdo. Para tanto, o cinema necessita ser um recurso que funcione como suporte pedagógico, podendo ser apresentado antes, durante ou finalizando a explanação de um conteúdo, permitindo uma reflexão sobre a relação entre cinema, tecnologia e educação.

A projeção de um filme é um recurso que tem grande aceitação por parte dos estudantes, sendo utilizado no ambiente escolar durante o período das aulas. Ele busca, quando aplicado introdutoriamente ao conteúdo, estabelecer um organizador prévio determinando assim, um vínculo com o conteúdo que será ministrado.

Utilizar filmes em sala de aula contribui para ampliação dos horizontes da escola, e do ensino de forma geral. Conforme declarações de Fischer, “talvez um dos trabalhos pedagógicos mais revolucionários seja o que se refere a uma ampliação do repertório do professor , crianças e adolescentes, em matéria de cinema, televisão, literatura, teatro, artes plásticas e música” (2007, p.298), Fischer ainda acrescenta algumas considerações sobre a importância em investir na ampliação de repertório dizendo “ampliar as possibilidades de estabelecer relações” permitindo-lhe “pensar de outro modo o presente que vivemos” (2007, p.298).

5.4 Experimentos

O ato de desenvolver atividades experimentais, quando bem trabalhadas, visa proporcionar a percepção dos aprendizados de maneira atrativa e lúdica, aproximando os alunos do conhecimento científico. Tais atividades têm potencial para enriquecer a abordagem dos assuntos, podendo ser utilizadas logo no início do estudo de determinado fenômeno e seus

respectivos conteúdos, no sentido de problematizar e até mesmo buscar a resolução de uma situação-problema. Ainda podem ser realizadas após o desenvolvimento de um assunto, como complementação, ilustração ou reforço.

A aula experimental leva o aluno a questionar ações, servindo como estratégia facilitadora da aprendizagem no ensino de Ciências. Embasado nessa importância, as Diretrizes Curriculares da Educação Básica, na qual o plano de trabalho docente dos professores do Estado do Paraná se baseia, diz que “as atividades experimentais possibilitam ao professor gerar dúvidas, problematizar o conteúdo que pretende ensinar e contribuem para que o estudante construa suas hipóteses” (PARANÁ, 2008, p. 72). Nesse ponto de vista, Poletti (2001) destaca que a realização de atividades práticas é de fundamental importância no processo de ensino-aprendizagem, permitindo que o aluno fortaleça o conhecimento adquirido, aprendendo e sendo capaz de intervir diante de situações desafiadoras. Já Santos (2005, p. 61), enfatiza que:

“O ensino por meio da experimentação é quase uma necessidade no âmbito das ciências naturais. Ocorre que podemos perder o sentido da construção científica se não relacionarmos experimentação, construção de teorias e realidade socioeconômica e se não valorizarmos a relação entre teoria e experimentação, pois ela é o próprio cerne do processo científico”.

Os benefícios da utilização de demonstrações experimentais correlacionadas aos conteúdos ensinados em sala de aula são inúmeros. Dentre eles, destacamos a possibilidade de dinamização dos conteúdos indicados pelos livros didáticos, o que favorece a aprendizagem. Neste ambiente, torna-se possível estabelecer as relações entre teoria e prática, tornando os conteúdos estudados mais realistas para os estudantes. Por isso, aliar a teoria estudada dentro de sala de aula à prática demonstrativa remove os alunos de um estado de passividade, tornando-os agentes ativos de seus próprios saberes (BOMBONATO, 2011).

Dentro deste contexto, a Base Nacional Curricular Comum (BNCC), na área das Ciências da Natureza, expõe que os conhecimentos conceituais são sistematizados em leis, teorias e modelos. Cabe ao professor, juntamente com o aluno, despertar o interesse pela elaboração, a interpretação e a aplicação dos modelos explicativos para fenômenos naturais e sistemas tecnológicos, aspectos fundamentais do fazer científico. Os processos e práticas de investigação devem propor aos estudantes do Ensino Médio a ampliação dos conhecimentos introduzidos no Ensino Fundamental, explorando experimentações e análises qualitativas e quantitativas de situações-problemas (BRASIL, 2017).

5.5 Estratégias da investigação

As dificuldades e problemas encontrados no ensino da Física no Ensino Médio são

diversos. Entretanto, tem sido intensa a busca por estratégias que viabilizem o ensino de forma a alcançar uma aprendizagem significativa. Quando se trata especificamente do ensino de ciências, as estratégias que envolvem experimentação, seja real ou virtual, tem se mostrado muito mais eficientes do que a simples exposição dos conteúdos na forma discursiva. Os experimentos potencializam a interação social entre os alunos, tornando-os seres ativos no processo intelectual, uma vez que geram maior concentração durante as aulas e estimulam a busca de novos conhecimentos. Borges e Moraes (1998) evidencia cinco atitudes ou valores que o experimento construtivista oportuniza:

- 1) Valorizar a compreensão;
- 2) Incentivar as atitudes questionadoras;
- 3) Promover autonomia dos alunos;
- 4) Reconhecer a cooperação e o trabalho em grupo;
- 5) Favorecer a atitude de pesquisa.

Desse modo, as atividades experimentais são uma maneira de aproximar os estudantes da Física de uma forma mais concreta. É uma maneira de preparar o aluno no ato da observação e responsabilidade de construção do saber científico e, a partir daí, levá-los a utilizar-se da metodologia científica para chegar à solução e as implicações por ele adquiridas.

Lorencini (1995), destaca que o uso de questionários na área das Ciências da Natureza, torna o estudante participativo durante o processo, ao mesmo tempo em que destaca a importância do professor como agente questionador no momento da experimentação, pois permite ao aluno estimular sua mente, proporcionando uma maior reflexão e tomada do conhecimento. Utilizando as palavras de Lorencini (1995, p. 106): “A busca expositiva dialogada é uma possível alternativa para substituir a aula expositiva tradicional, transformando a sala de aula em um ambiente propício à reelaboração e produção de conhecimento”.

Dentre os objetivos da aplicação de técnicas laboratoriais, está a de tornar as aulas de Física mais motivadoras e facilitar a aprendizagem do conteúdo, fugindo da simples memorização de conceitos e fórmulas, objetivando que o ensino aconteça de forma significativa. (ROSA, 2003). Segundo Andrade e Massabni (2011), as aulas teóricas ministradas pelos professores no ambiente de sala de aula são insuficientes para proporcionar ao aluno o melhor conhecimento, impossibilitando ao docente estabelecer uma maior relação entre teoria-prática, permitindo o aprendizado significativo do conteúdo, estimulando assim, os alunos.

A Base Nacional Comum Curricular (BNCC), com relação à competência específica 2,

na área das Ciências da Natureza, assegura ao aluno a habilidade do reconhecimento de limites explicativos das ciências, através de atividades experimentais, possibilitando-o interpretar resultados e realizar previsões. Nessa competência específica, buscamos estimular situações de provocação, entusiasmo, capaz de relacionar conhecimentos conceituais a situações cotidianas. Ainda com base na BNCC, em relação a competência 3, as atividades experimentais mostraram-se interessantes, a utilização de laboratórios didáticos é um mecanismo que habilita ao aluno, ao empregar instrumentos de medição, analisar funcionamento de equipamentos para compreensão das tecnologias, interpretar resultados que o levarão a avaliar e justificar conclusões diante de situações problemas.

A UEPS aqui proposta tem a finalidade de averiguar indícios no ato do ensino aprendido, aferindo o nível de aprendizado do estudante referente ao ensino da Física, ao mesmo tempo que busca uma forma facilitadora para a compreensão dos conceitos sobre o fenômeno da indução magnética, por meio de aulas expositivas, simulações e experimentações. A sequência de ensino será composta por:

- Apresentação do projeto aos estudantes;
- Aplicação de questionário diagnóstico para identificação de subsunçores;
- Apresentação do filme “O menino que descobriu o vento”, de Chiwetel Ejiofor;
- Aula expositiva sobre o fenômeno da indução magnética;
- Instalação e apresentação do aplicativo para celular Phet – interactive simulations, e estudo das simulações:
 - ✓ Balões e eletricidade estática (estudar o efeito da indução na produção de cargas elétricas);
 - ✓ Cargas e campos (estudar a distribuição de campo elétrico em torno de cargas);
 - ✓ Lei de Faraday (estudar o fenômeno de indução magnética).
- Planejamento, montagem e execução de experimentos simples para evidenciar o fenômeno na prática.

Devemos ressaltar que os estudantes serão instruídos a tomarem nota de todas as etapas da UEPS e elaborarem relatório no formato científico com os principais achados. O professor deve deixar claro que o relatório será avaliado e a nota será utilizada para compor a nota geral referente à esta unidade pedagógica na escola.

5.6 Sobre o tipo de pesquisa

Segundo Creswell (2009), uma pesquisa pode ser do tipo qualitativa, quantitativa ou mista. Nesta UEPS optamos pela pesquisa de natureza mista, por ser mais abrangente e adequada para as necessidades em questão. O Quadro 4, foi elaborada por Dicker (2009), a partir de textos de vários autores. A justificativa para a escolha do tipo da pesquisa concernente a esta UEPS é clara. Ela envolve tanto a criação do espírito motivacional do estudante quanto a determinação das causas de fenômenos, assim como a sua quantificação e generalização. Ela é observacional e de natureza experimental; envolve a natureza interacional entre os estudantes assim como fatos a serem mensuráveis. Nesta abordagem o professor não pode ser neutro, mas participar ativamente do processo. A pesquisa envolve coleta de informações de forma estruturada, com posterior análise não-estatística e interpretativa. Por fim, pelo nível da pesquisa e de seu público alvo, os resultados terão um nível de compreensão inicial e com generalização limitada. Entretanto, acreditamos que este seja um ensaio adequado para futuras pesquisas mais aprofundadas por parte dos estudantes que optarem por estudar e fazer ciência em níveis mais elevados.

Quadro 10. Pesquisa qualitativa e pesquisa quantitativa.

Dimensão	Qualitativa	Quantitativa
Objetivo	Compreender razões, valores, motivações e fenômenos	Determinar causas. Quantificar dados e generalizar resultados
Abordagem	Observacional	Experimental
Pressuposição básica	Realidade construída a partir de fenômenos socialmente construídos	Realidade construída a partir de fatos mensuráveis
Pesquisador	Participante do fenômeno	Neutro, imparcial
Amostra	Pequena, poucos casos	Grande
Coleta de dados	Não estruturada	Estruturada
Análise dos dados	Análise não-estatística, subjetiva e interpretativa	Análise estatística, sumarização
Resultados	Compreensão inicial, baixa generalização e replicação	Determinantes, com alto grau de generalização e replicação

Fonte: Dicker (2009)

5.7 Escolha da técnica de coleta de dados

A fim de mensurar a eficácia da UEPS e o consequente nível de aprendizado dos estudantes envolvidos, será necessário fazer a coleta de informações. Para isto será utilizado a

técnica de questionários com perguntas elaboradas especificamente para esta UEPS, além de relatório de experiências. O primeiro questionário será elaborado com questões que permitam ao professor descobrir o nível de conhecimento prévio dos estudantes acerca do assunto em pauta. O relatório, individual ou em grupos pequenos, tem como objetivo gerar no estudante a capacidade de relatar experiências científicas e fazer análise crítica dos resultados, além de possíveis generalizações de seus achados.

Após a realização de todas as etapas da UEPS, será aplicado questionário para aferir os conhecimentos técnicos sobre o tema em estudo adquiridos em todas as etapas. Por fim, será aplicado questionário para que os estudantes envolvidos façam sua avaliação da própria UEPS, fornecendo sugestões de como esta poderia ser melhorada ou readaptada para melhorar sua eficácia. Esta abordagem possui a vantagem de permitir a liberdade de expressão dos estudantes, além de manter o foco do professor no assunto de interesse a partir da elaboração de questões específicas a respeito do tema.

5.8 Definição do universo e seleção amostral

O universo, ou população, é o conjunto de participantes que possuem qualidades e particularidades que serão objeto do estudo e a amostra é uma desse universo escolhido para representação (VERGARA, 1997).

Diante disso, o universo dessa pesquisa é composto por alunos de uma escola Estadual do Maranhão, sediada na cidade de São João dos Patos, escola que oferece o ensino médio integral para jovens de 14 a 18 anos do local e cidades vizinhas. O critério de representatividade atribuído para determinação da amostra foi de uma turma de terceira série (diurna) a qual a pesquisadora trabalha e está enquadrada no conteúdo curricular base da pesquisa.

A forma inicial é reunir um conjunto de estudantes que possuem características afins. Nesse caso, estudam na terceira série do ensino médio da escola. A quantidade de alunos matriculados e frequentando a turma somam um total de 42 alunos.

5.9 Instrumento de pesquisa

Os questionários são instrumentos de coleta de informações utilizadas numa sondagem, cujo foco é reunir dados necessários para verificar se os objetivos da pesquisa foram alcançados. As questões aqui elaboradas serão mistas (qualitativas e quantitativas) buscando levantar, tanto opiniões dos alunos quanto medir as variáveis estudadas para apresentar as estatísticas, como

forma de comparar grupos e estabelecer associações.

Nesse sentido, os questionários serão aplicados individualmente aos alunos, através de um estudo transversal, o qual apanhará os dados num período específico durante a pesquisa. Ainda, para efeito desse trabalho, realizar-se-á dois tipos de questionários (pré e pós-teste) que nortearão a evolução do aprendizado durante a pesquisa e auxiliará como referência de comparação do ensino aprendido, para tanto, esperamos que os resultados sejam satisfatórios.

Diante do que foi apresentado, a utilização do pré-teste é um instrumento de fundamental importância para a fase inicial da pesquisa. Seu objetivo é levantar conhecimento prévio dos estudantes sobre os conceitos de eletricidade e magnetismo, os quais servirão de ancoragem para integração de novos conceitos propostos na sequência didática.

Assim sendo, com a aplicação do pós-teste é possível averiguar se houve uma aprendizagem significativa, medir o nível de satisfação e entrosamento dos alunos durante as aulas, permitindo à pesquisadora a observação do processo de ensino aprendizagem.

5.10 Execução da UEPS

Este planejamento descreve ações para implementação de uma UEPS em 6 encontros. Para trabalhar o conteúdo de indução magnética dentro da estrutura da UEPS, na perspectiva de promover o ensino-aprendizagem através de um sequenciamento de atividades, pensamos estratégias didáticas variadas e mecanismos eficazes pela busca de uma aprendizagem realmente significativa.

Essa UEPS contará com a sequência de ensino das 12 aulas de duração de 50 minutos (cada aula) distribuída conforme Quadro 5.

Quadro 11. Planejamento da UEPS

ENCONTRO	DESCRIÇÃO	RECURSO
1º (2 aulas)	Apresentação da UEPS, questionário diagnóstico de subsunçores e confecção de mapas conceituais	Google forms/ Papel e caneta para confecção do mapa conceitual
2º (2 aulas)	Situação problema e apresentação de organizador prévio	Filme da Netflix/ Computador/ projetor de mídia/ celular
3º (2 aulas)	Brincando com ímãs e bússolas. Aula expositiva com tópicos relevantes sobre o campo magnético	Aplicativo de bússola em celular, bússola física, ímãs cilíndricos, linha fina e

		resistente
4° (2 aulas)	Aula expositiva com tópicos relevantes sobre campo magnético. Simulador Phet para demonstração do fenômeno da indução magnética (variação de campo induzindo a fem, Lei de Faraday em espira, sentido da fem). Experiências simples em sala de aula	Projeção do conteúdo através de slides sobre o conteúdo, explanação oral e kit experimental
5° (2 aulas)	Aula expositiva com tópicos relevantes com maior abrangência, utilização de experimento qualitativo sobre indução em bobina, gerador de energia caseiro, freio de indução, utilização de limalha de ferro para mostrar orientação do campo	Projeção do conteúdo através de slides sobre o conteúdo, explanação oral e kit experimental
6° (2 aulas)	Questionário diagnóstico pós-teste e avaliação da UEPS por parte dos alunos e elaboração de mapas conceituais posteriores	Google forms / papel e caneta para confecção de mapas conceituais

Fonte: os autores (2020)

6 SEQUÊNCIA DIDÁTICA

6.1 Definição de sequência didática

A sequência didática é uma estratégia educacional que busca ajudar alunos a desenvolverem habilidades relacionadas a um tema específico ao qual se vai estudar. Seu resultado é adquirido ao longo de um período, a partir da execução, por meio de um planejamento de várias atividades conectadas entre si. Com essa estratégia esperamos um aprendizado mais significativo e maior engajamento por parte dos estudantes.

Para que o resultado ao término da implementação da sequência seja efetivo é necessário inicialmente apresentar a proposta aos alunos, justificando sua importância e relevância para estudos presente e futuro. Posteriormente, definir objetivos, sequenciamento que será tomado e resultado final esperado.

Objetivando tornar a sequência exitosa, faz-se necessário criar situações didáticas variadas, em que seja possível retornar os conteúdos abordados em diversos momentos. Para tanto, pressupõe que sejam planejados momentos diferenciados e organizações sequencias.

Sendo a UEPS uma sequência didática fundamentada na teoria da aprendizagem significativa, proposta por Marco Antônio Moreira, elas buscam estimular a pesquisa aplicada na área da educação e incentivar a prática do uso de suas teorias.

6.2 Primeiro Encontro: apresentação da UEPS, mapas conceituais anteriores e questionário pré-teste

Neste primeiro encontro será apresentado a estrutura da UEPS e seus objetivos. Inicialmente o professor falará brevemente sobre o assunto, trazendo exemplos do cotidiano dos estudantes para averiguar seus subsunçores acerca do tema central. Posteriormente, deve expor brevemente o conceito de mapa conceitual, informar que irão construir mapas conceituais (individuais ou em grupos) e que após a criação dos mapas conceituais os estudantes responderão o primeiro questionário, que estão presente no apêndice A / apêndice D, desta pesquisa.

Objetivo geral:

Investigar se os alunos possuem os subsunçores necessários para aprender o novo

conteúdo sobre indução magnética.

Objetivos específicos:

- Revisar conteúdos pré-requisitos: corrente elétrica e campo magnético;
- Utilizar questionário que leve o aluno a registrar conhecimentos já existentes;
- Proporcionar debate para sistematizar a produção de mapas conceituais;
- Construir os mapas conceituais prévios;
- Avaliar se os subsunçores apresentados são suficientes para apresentação do conteúdo indução magnética.

Consideramos que antes desta parte da UEPS o estudante já tenha estudado em sala de aula os conteúdos carga elétrica, força elétrica, campo elétrico, corrente elétrica, resistência elétrica, diferença de potencial, campo magnético e força magnética. O questionário terá a função de registrar se esses conteúdos foram bem incorporados e investigar se tais conhecimentos conseguem ser incorporados à novas situações práticas de exposição a novos conteúdos. Ao final do primeiro encontro o professor deverá informar aos estudantes as atividades do segundo encontro.

6.3 Segundo Encontro: ação motivacional sobre o tema

O segundo encontro foi destinado à projeção do filme “O menino que descobriu o vento”, de Chiwetel Ejiofor (SUFYAN ZAHID, 2019). Esse filme aborda a história real de um menino de 14 anos de idade que conseguiu, depois de frequentar clandestinamente a biblioteca da escola que o expulsara por falta de pagamento, com ajuda do livro “*Using Energy*”, fazer um moinho de vento que acionou uma bomba para captar água do solo ressequido da região onde morava. A engenhoca permitiu que o pai de Kamkwamba, junto com toda a família, conseguisse superar as agruras de uma violenta seca pós inundação que submetia os moradores de Malawi à fome e miséria, sem nenhuma ajuda do governo local. Existe uma mensagem de conscientização pela preservação da natureza. Empresas predatórias destruíram a vegetação local em busca de progresso, o que provocou enchentes que destruíram as plantações dos aldeões.

O jovem decidiu mudar sua realidade e a da sua comunidade construindo um moinho de cinco metros de altura utilizando uma bicicleta quebrada, uma pá de ventilador de trator, um

velho amortecedor e árvores de eucalipto. Depois de ligar o moinho de vento a uma bateria de carro para armazenamento, o menino William foi capaz de alimentar quatro lâmpadas e carregar os telefones celulares dos vizinhos. Este sistema foi ainda equipado com interruptores de luz caseiros e um disjuntor feito de pregos, fios e ímãs. O moinho foi posteriormente estendido: passou a ter doze metros para melhor captar o vento acima das árvores. Um terceiro moinho bombeava água para irrigação.

Ao término do encontro o professor deve solicitar aos estudantes que baixem o aplicativo gratuito de bússola para trabalhar o fator localização, cuja finalidade é explorar a curiosidade da turma sobre o assunto.

Objetivo geral:

Propor situação problema que atue como organizador prévio.

Objetivos específicos:

- Apresentar o filme “O menino que descobriu o vento” sobre a produção de energia elétrica a partir da utilização do dínamo, aparelho conversor de energia mecânica em elétrica através do processo de indução magnética;
- Realizar debate sobre objetivo principal do filme. Identificar o papel da indução magnética na realização das conquistas do menino William;
- Registrar todos os comentários para posterior avaliação.

6.4 Terceiro Encontro: brincando com ímãs e bússolas

O terceiro encontro será destinado à aula expositiva formal, visando aprofundamento e apropriação dos conceitos de força magnética e campo magnético, uma vez que tais conceitos são bastante abstratos, permitir aos alunos através de atividade prática em sala de aula que essa ideia fique bem ancorada servindo de subsunçores para compreensão do efeito de indução magnética.

Objetivo geral:

Despertar a curiosidade e entendimento sobre os conceitos de força magnética e campo magnético.

Objetivos específicos:

- Manusear o aplicativo de bússola no celular;
- Realizar experimento em sala de aula utilizando bússolas físicas e ímãs para servir como forma de orientação;
- Compreender qual a base para o funcionamento de uma bússola;
- Estimular debate dos resultados das observações com alguns questionamentos, pré-sugeridos.

No final do encontro o professor sugere aos estudantes que façam leitura no livro texto (ou material fornecido à parte) sobre o conteúdo indução magnética que será ministrado no encontro seguinte. Além disso, ele deve solicitar aos estudantes a instalação do aplicativo de celular *Phet Simulations* e explicar sua finalidade.

6.5 Quarto Encontro: aula expositiva com auxílio de simulações

O quarto encontro será dedicado à aula expositiva formal sobre o conteúdo indução magnética. Como o tempo da aula é restrito e o assunto já foi debatido superficialmente nos três primeiros encontros, o professor deve ter atenção e focar nos pontos mais fundamentais do assunto (indução magnética e sua representação matemática pelas leis de Faraday e Lenz). Durante a exposição o professor usará o aplicativo *Phet Simulations* para consolidar os conceitos abordados. Ao final da aula o professor deverá fornecer roteiros simples das experiências que serão realizadas na aula seguinte. Dependendo da realidade dos estudantes, o professor poderá solicitar os materiais aos estudantes ou deve providenciar para que estes manipulem durante a execução das experiências no encontro seguinte. Além disso, deverá estimular os estudantes para a leitura do assunto a ser discutido na próxima aula.

O PhET interactive simulation é um projeto da Universidade de Colorado Boulder, uma organização educacional para fins educacionais, criada em 2002 pelo ganhador do prêmio Nobel de Física (1995) Carl Wieman. A ideia inicial do *PhET*, na perspectiva de Wieman, seria melhorar a forma como a ciência é ensinada e aprendida. Sua intenção era contribuir para o avanço da ciência e educação em todo o mundo através de simulações interativas livres (WIEMAN; PERKINS; ADAMS, 2008).

Um programa de simulações visa facilitar a compreensão de um determinado fenômeno. O ensino da Física possui características específicas que devem ser levadas em consideração ao

utilizar a informática pedagógica. Uma simulação favorece uma animação, sendo mais abrangente, pois permite ao aluno não somente manipular o evento, como conhecer a relação entre as grandezas físicas presentes. Permite ao aluno compreender conceitos, especialmente abstratos, tais como linhas de campo (elétrico e magnético), contribuindo para sua visualização e compreensão.

No portal do PhET (https://phet.colorado.edu/pt_BR/) existe diversos softwares educacionais de Biologia, Física, Matemática e Química, de domínio público e que proporciona uma melhor visibilidade e maior compreensão dos conteúdos. O objetivo desse programa no ensino de Física é proporcionar aos alunos a possibilidade de simular interação entre campo elétrico e magnético estabelecendo a relação indução magnética. Com isso, esperamos que o aluno possa desenvolver uma lógica intuitiva e promova de uma forma lúdica, uma maneira de evidenciar o conceito de indução magnética.

A utilização de tecnologias educacionais em sala de aula vem servindo de instrumento facilitador do processo de ensino, mesmo ainda não fazendo parte da realidade de muitas escolas (professores). O uso dessa ferramenta surge como uma forma de tornar a aula mais envolvente e criativa, levando o aluno a interagir e perceber fenômenos abstratos da situação. É perceptível o nível de satisfação e interesse dos alunos quando as aulas deixam de ser meramente tradicionais, quadro e giz e o professor utiliza de um dispositivo que visa facilitar o aprendizado do aluno.

A esse respeito, a Base Nacional Comum Curricular (2016, p. 558), na competência específica 3 da Ciência da Natureza e suas tecnologias, diz:

“[...] é fundamental que possam experimentar diálogos com diversos públicos, em contextos variados, utilizando diferentes mídias, dispositivos e tecnologias digitais de informação e comunicação (TDIC), e construindo narrativas variadas sobre processos e fenômenos analisados”.

Sob outra perspectiva, encontramos o professor, diante de realidades de escolas desestruturadas, sem um mínimo de assistência tecnológica para implementação de suas aulas, ou mesmo, facilidade de manusear equipamentos e programas. As simulações podem ser utilizadas ao introduzir um determinado conceito, como forma de se obter um diagnóstico prévio dos pré-conceitos dos estudantes, ou finalizar um tema, evidenciando possíveis falhas, procurando assim, se estabelecer uma possível reestruturação do conhecimento. A utilização das simulações pode provocar uma mudança de atitude por parte dos alunos, oportunizando-os organizar grupos de estudos e uma maior socialização.

Objetivo geral

Estudar a indução magnética de maneira mais formal do que as discussões feitas nos três primeiros encontros, evidenciando os aspectos matemáticos das leis. Alguns experimentos com ímãs, espiras e bobinas serão realizados para dar credibilidade aos conceitos físicos embutidos nas equações matemáticas.

Objetivos específicos

- Mostrar evidências empíricas de que a variação de um campo magnético induz uma fem.
- Mostrar como a lei de Faraday relaciona com a fem induzida em uma espira à variação no fluxo magnético através da espira.
- Como determinar o sentido de uma *fem* induzida.

6.6 Quinto Encontro: aula expositiva com auxílio de experiências

O quinto encontro será dedicado à continuação da aula expositiva formal sobre o conteúdo indução magnética. O professor deve ter atenção e focar nos pontos mais fundamentais do assunto (força eletromotriz do movimento, correntes de Foucault e aplicações) e nos aspectos matemáticos que realmente sejam relevantes. Durante a exposição o professor fará demonstrações de experiências simples em sala de aula (indução usando bobinas, gerador elétrico, freio de indução usando ímã e cano de alumínio) com a participação dos estudantes, com a finalidade de consolidar os conceitos abordados. Os estudantes construirão relatórios (individuais) que devem ser entregues no encontro seguinte. O modelo do relatório com as devidas instruções deverá ser entregue pelo professor. Ao final da aula o professor deverá fornecer informações sobre o encontro seguinte. Tal relatório tem por finalidade expor informações sobre o desenvolvimento da pesquisa, a fim de observar se o conhecimento proposto foi realmente alcançado. Tal estratégia busca avaliar de maneira particular os pontos fortes, fracos e desafios individuais de cada aluno, como da turma em geral.

Objetivo geral

Estudar a indução magnética de maneira mais formal do que as discussões feitas nos dois primeiros encontros (continuação da aula anterior), evidenciando os aspectos matemáticos das leis.

Objetivos específicos

- Como calcular a *fem* induzida em um condutor que se move através de um campo magnético;
- Como uma variação no fluxo magnético gera um campo elétrico circulante;
- Como surgem as correntes de Foucault em um metal que se move em um campo magnético.

Os experimentos escolhidos para demonstração do fenômeno de indução são apenas de cunho qualitativo, visando permitir a ancoragem do conteúdo de uma maneira mais clara e objetiva. Os equipamentos são: construção de bobinas com fio de cobre e o uso de ímã para mostrar a indução (motor elétrico simples), gerador elétrico caseiro, freio de indução usando ímã e demonstração de campo magnético com limalha de ferro. O guia de materiais, objetivo, procedimentos e estratégias encontrar-se-ão no Apêndice E.

3.7 Sexto Encontro: avaliação da UEPS e os mapas conceituais posteriores

O sexto e último encontro da UEPS será dedicado à avaliação final pelos estudantes de todas as etapas aplicadas. Os alunos terão a oportunidade de responder a um questionário previamente elaborado para esta finalidade. Além disso, construirão mapas conceituais acerca do assunto, sendo os mesmos discutidos em sala de aula, a fim de consolidar conceitos ainda não devidamente ancorados, se encontram no Apêndice B.

Objetivo geral

Avaliar a eficácia da UEPS sobre o tema proposto.

Objetivos específicos

- Revisar os principais pontos de todos os conteúdos abordados;
- Proporcionar debate para sistematizar a produção de mapas conceituais;
- Construir os mapas conceituais posteriores;
- Avaliar a eficácia da metodologia aplicada através de pós –teste.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo principal do trabalho foi ensinar o tópico sobre Indução Magnética através de uma Unidade de Ensino Potencialmente Significativa (UEPS) apresentando um sequência de atividades conectadas e inter-relacionadas para desenvolvimento e absorção do tópico. Para tanto procuramos elencar metodologias variadas a fim de que as importantes aplicações do fenômeno da indução magnética em relação, principalmente, a geração de energia elétrica, transformações de energia, pudessem ser incorporado significativamente no cognitivo do aluno.

Em síntese, de acordo com a descrição e observação dos resultados relacionados ao desempenho dos alunos durante a aplicação do produto educacional, observamos, em análise comparativa entre os questionários utilizados para avaliação diagnóstica e os relatórios pós aplicação do produto que, houve um aumento no desempenho da turma em relação à média de acertos e relação dos conhecimentos associados. Além do aspecto quantitativo foi observado também o envolvimento e boa aceitação em cada uma das etapas da aplicação do trabalho, conseqüentemente, podemos constatar que os objetivos foram alcançados, levando a crer que houve vestígios de aprendizagem significativa.

REFERÊNCIAS

- ANDRADE, M. L. F.; MASSABNI, V. G. O desenvolvimento de atividades práticas na escola: um desafio para os professores de ciências. **Ciência & Educação (Bauru)**, v. 17, n. 4, p. 835-854, 2011.
- BAUER, W.; WESTFALL, G. D.; DIAS, H. **Física para Universitários**. Vol 3. 2ª ed. São Paulo: AMGH, 2012.
- _____. Lei. 9394, de 20 de dezembro de 1996. Estabelece as diretrizes e bases da Educação Nacional. **Diário Oficial da União**: Brasília, DF, 20 de dez. 1996. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/CCIVIL_03/Leis/L9394.htm. Acesso em: 25 maio de 2020.
- _____. Ministério da Educação. **Base Nacional Comum Curricular**. Brasília, 2017. Disponível em: <http://basenacionalcomum.mec.gov.br/abase/#estrutura>. Acesso em: 25 maio de 2020.
- BISCUOLA, G.J.; BÔAS, N.V.; DOCA, R.H. **Física 3: eletricidade: física moderna**. 3.ed. São Paulo: Saraiva, 2016.
- BOMBONATO, L. G. G. **A importância do uso do laboratório nas aulas de ciências**. 2009. 49 f. Monografia (Especialização em Ensino de Ciências) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Paraná, 2011.
- BONJORNO, J.R.; RAMOS, C.M.; PRADO, E.P.; BONJORNO, V.; BONJORNO, M.A.; CASEMIRO, R.; BONJORNO, R.F.S.A. **Física: eletromagnetismo, física moderna, 3º ano**. 3.ed. São Paulo: FTD, 2016.
- BORGES, R. M. R.; MORAES, R. **Educação em Ciências nas séries iniciais**. Porto Alegre: Sagra Luzatto, 1998.
- CRESWELL, J. W. **Research Design: Qualitative, Quantitative, and Mixed Methods Approaches**. 3. ed. United States of America: SAGE, 2009.
- DICKER, L. **Percepção de valor em sistemas de informação orientados para o pequeno e médio varejo brasileiro**. 2009. Dissertação (Mestrado em Administração) - Faculdade de Ciências Empresariais, Universidade Fumec, Belo Horizonte, 2009.
- FISCHER, R.M.B. Mídia, máquinas de imagens e práticas pedagógicas. **Revista Brasileira de Educação**, v.12, n.35 maio/ago, 2007.
- FÍSICA AMAPÁ. **O ensino da Física na perspectiva da aprendizagem significativa crítica – Prof. Antônio Moreira**. Porto Alegre: Física Amapá, 2020. 1 vídeo (1 hora 50 min 11 seg). Disponível em: https://www.youtube.com/watch?v=_9UychHXue8A. Acesso em: 22 de outubro de 2020.
- HALLIDAY, D.; RESNICK, R. **Fundamentos da Física**. Vol 3. 8ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

KNIGHT, R. D. **Física 3 – Uma abordagem estratégica**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2009.

LORENCINI, A. J. O ensino de Ciências e a formulação de perguntas e respostas em sala de aula. In: TRIVELATO, S. L. F. (Org.) **Coletânea Escola de Verão para professores de prática de ensino de Física, Química e Biologia**. Serra Negra, SP: FEUSP, 1995. p. 105-114.

LOWRIE, W. **Fundamentals of Geophysics**. Second edição. São Paulo, 2007.

MOREIRA, M. A. **Aprendizagem significativa crítica**. Lisboa: Atas do III Encontro Internacional sobre Aprendizagem Significativa, 2000.

MOREIRA, M. A. Aprendizagem significativa: um conceito subjacente. **Aprendizagem Significativa em Revista**. v. 1, n. 3, p. 25-46, 2011.

MOREIRA, M. A. **Mapas conceituais e aprendizagem significativa**. São Paulo: Centauro, 2010.

MOREIRA, M. A.; MASINI, E. F. S. **Aprendizagem significativa: a teoria de David Ausubel**. São Paulo: Moraes, 1982.

MOREIRA, M. A. **Unidade de Ensino Potencialmente Significativas – UEPS**. Porto Alegre: Instituto de Física UFRGS, 2011. p. 1-22.

NOVAK, J. D. **Aprender, criar e utilizar conhecimentos**. 1. ed. Lisboa: Plátano-Edições Técnicas, 2000.

NOVAK, J. D. **Aprender, criar e utilizar conhecimentos**. Mapas conceituais como ferramentas que facilitarão nas escolas e empresas. Lisboa: Plátano. Edições Técnicas, 2009.

PARANÁ. Secretaria de Estado da Educação. **Diretrizes Curriculares da Educação Básica**. Curitiba: SEED, 2008.

PHET INTERACTIVE SIMULATION. **Simulações Interativas para Ciência e Matemática**. 2002. Disponível em: https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulations/filter?subjects=physics&type=html,prototype. Acesso em: 04 de novembro de 2020.

POLETTI, N. **Estrutura e Funcionamento do Ensino Fundamental**. 26 ed. São Paulo: Ática, 2001.

Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 31, n. 1, 1306 (2009).

ROSA, C. T. W. Concepções teórico-metodológicas no Laboratório didático de Física na Universidade de Passo Fundo. **Revista Ensaio**, v. 5. n. 2. p. 94-108, 2003.

SANTOS, C. S. **Ensino de ciências: abordagem histórico-crítica**. 1. ed. Campinas Autores Associados, 2005.

SUFYAN ZAHID. The boy Who harnessed the wind 2019 Netflix Series with English Subtitles. Sufyan Zahid, 2019. 1 vídeo (1h 53 min 59 seg). Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=fCZt9QpDXuU>. Acesso em: 04 de agosto de 2020.

TIPLER, P. A.; MOSCA, G. **Física para Cientistas e Engenheiros**. Vol 2. 6ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017.

VERGARA, S. C. **Métodos de pesquisa em administração**. São Paulo: Atlas, 1997.

WIEMAN, C. E.; PERKINS, K. K.; ADAMS, W. K. Oersted Medal Lecture 2007: Interactive simulations for teaching physics: What works, what doesn't, and why. **American Journal of Physics**, v. 76, n. 4 e 5, p. 393-399, 2008.

YOUNG, H. D.; FREEDMAN, R. A. **Física III: Eletromagnetismo**. 12. ed. São Paulo: Pearson, 2009.

APÊNDICES

• APÊNDICE A

Questionário pré-teste idealizado e aplicado através do Google Forms.

Link

de

acesso:

https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLScFGgFc4dKa4ylAqeGtrB9TBcYTqPXXjIIWimnXYC3k2fxiJw/viewform?usp=sf_link

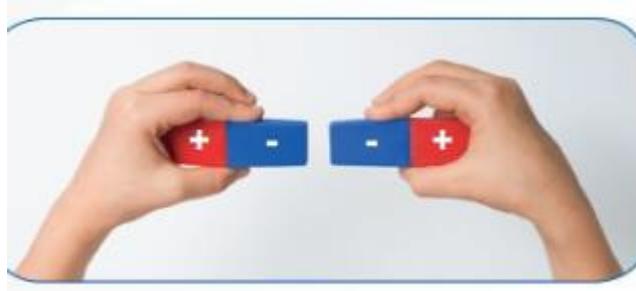
Pré-teste de Eletromagnetismo

Questionário de avaliação sobre os conceitos básicos de eletricidade e magnetismo.

Nome completo: _____

3ª série

1- O que acontece se aproximarmos dois ímãs de acordo com as especificações abaixo?



2-Dentro de um condutor elétrico, seja ele sólido ou soluções iônicas, entende-se que o fluxo ordenado de cargas elétricas é denominado:

- a) () Potencial elétrico
- b) () Corrente elétrica
- c) () Força elétrica
- d) () Campo elétrico

3- O movimento de cargas elétricas, de acordo com o estudo de Eletromagnetismo, surge pela influência de:

- a) Campos gravitacionais
- b) Campos magnéticos
- c) Diferença de potencial

- d) Fenômenos relativísticos
- e) Campos elétricos

4- Qual a definição de CIRCUITO ELÉTRICO?

5- Segundo a Física Quântica, a matéria é constituída de átomos, e estes possuem prótons, nêutrons e elétrons, que apresentam uma organização estrutural que permite que os elétrons fiquem em órbita sendo atraídos pelo núcleo (prótons+nêutrons) do átomo. Que agente permite essa atração?

- a) () Força elétrica
- b) () Campo elétrico
- c) () Carga elétrica
- d) () Potencial elétrico

6- O que diferencia materiais isolantes de condutores?

7- O que acontece com dois corpos que apresentam cargas elétricas de mesmo sinal? E cargas elétricas de sinais diferentes?

8- Qual sua definição para CAMPO MAGNÉTICO?

9- Assim como nosso corpo necessita de energia para realização de atividades, e essa energia, em certa quantidade, provém dos alimentos, as cargas, dentro de um condutor elétrico, para se movimentarem, precisa que exista energia para movê-las entre dois pontos distintos de um campo. Essa energia é denominada:

- a) () Corrente elétrica
- b) () Força elétrica

- c) () Diferença de potencial
- d) () Resistência elétrica

10- Quando dois corpos conseguem ser atraídos ou repelidos, sem a necessidade de um contato, apenas através de uma força de campo que possa existir, devido à natureza do material o qual é formado, essa força recebe o nome de:

- a) () Elétrica
- b) () Magnética
- c) () Gravitacional
- d) () Condutora

• **APÊNDICE B**

Questionário pós-teste e avaliação da UEPS idealizado e aplicado através do Google Forms.

Link de acesso:

https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLSe6naVwBu9S6huR5iTRD1swhA0Y0dfZPjXwH29IHWOUy0J8g/viewform?usp=sf_link

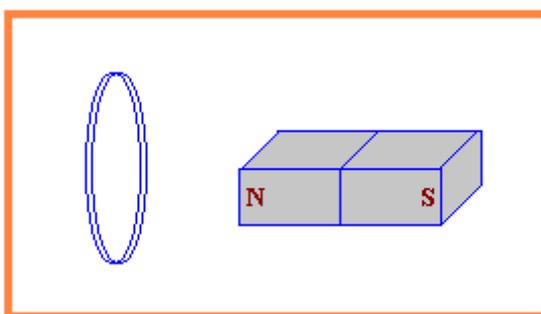
Pós-teste de Indução magnética

Questionário de avaliação sobre o conteúdo estudado INDUÇÃO MAGNÉTICA, baseado nos conhecimentos prévios de eletricidade e magnetismo.

Nome completo: _____

3ª série

1- As figuras abaixo representam uma espira e um ímã próximos.



Fonte: coladaweb (2020)

Das situações seguintes, indique a que não corresponde à indução de corrente em espira.

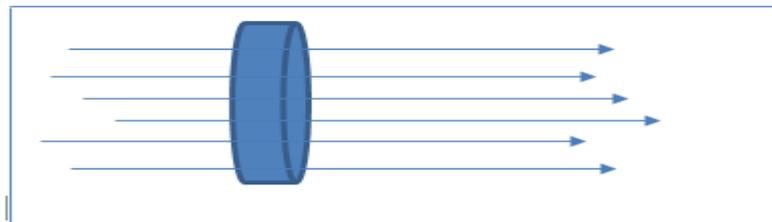
- a) () A espira está se movendo e o ímã está em repouso;
- b) () O ímã está se movendo e a espira está em repouso;
- c) () A espira e o ímã se afastam;
- d) () A espira e o ímã se aproximam;
- e) () A espira e o ímã se movem com a mesma velocidade para a direita.

2- O fenômeno da indução magnética se faz presente em diversos equipamentos que utilizamos no nosso cotidiano. Ele é utilizado como forma de gerar energia elétrica e a base para sua explicação é, o aparecimento de uma *fem* (força eletromotriz) entre as extremidades de um

condutor. O que é necessário para que essa força surja?

- a) () Temperatura
- b) () Resistencia elétrica
- c) () Campo elétrico
- d) () Fluxo magnético
- e) () Carga elétrica

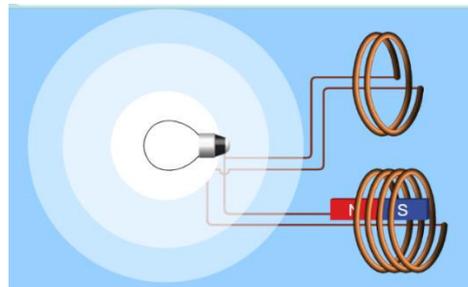
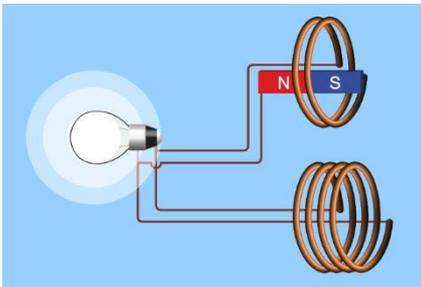
3- Objetivando encontrar o fluxo magnético sobre uma certa região, alguns fatores são determinantes. Diante da ilustração abaixo apresentada, relacione aquelas que influenciam diretamente no seu resultado.



Fonte: a autora (2022)

- a) Campo magnético e área.
- b) Campo magnético e ângulo.
- c) Campo magnético, ângulo e área.
- d) Área e ângulo.
- e) Apenas a intensidade do campo magnético.

4- A Lei de Faraday enuncia que a força eletromotriz é resultado de uma variação de fluxo magnético em um certo intervalo de tempo. Na imagem abaixo apresentada, o que foi necessário para que a lâmpada acendesse? Por que as lâmpadas tem luminosidades diferentes?



5- O assunto estudado, INDUÇÃO MAGNÉTICA, apresenta conexão com seu cotidiano? Onde?

6- Concluímos nessa etapa uma sequência de aulas que nos possibilitou estudar o fenômeno de indução magnética. Você compreendeu o fenômeno? Argumente.

7- Quais aulas ou método utilizado que você destacaria ter sido essencial para aprendizagem do conteúdo?

8- A sequência proposta se assemelha ao modelo de aprendizagem que costuma estudar?

- SIM
 NÃO

9- Faça um breve relato considerando pontos positivos e/ou negativos de todas as experiências que participarão da sequência.

10- Para você qual o grau de dificuldade para compreensão do fenômeno de indução magnética a partir do sequenciamento de atividades propostas.

- POUCA
 MÉDIA
 GRANDE

- **APÊNDICE C**

Modelo de relatório descritivo

Refletindo o conhecimento científico, alguns pontos principais devem ser levados em consideração. Para isso, segue modelo para implementação desses dados.

Um relatório deve ter uma estrutura. Inclua os seguintes itens:

- 1- **Título**
- 2- **Objetivos da atividade**
- 3- **Introdução**
- 4- **Descrição das atividades**
- 5- **Resultados obtidos**
- 6- **Conclusão**
- 7- **Referências**

1- Título – Deve informar o assunto estudado.

Exemplo: Relatório das metodologias utilizadas para o ensino-aprendizagem do conteúdo de INDUÇÃO MAGNÉTICA

2- Objetivos – Indicar as finalidades com que o trabalho foi executado. Cada objetivo deve começar com um verbo.

Exemplo:

- Descrever o fenômeno de indução magnética;
- Relacionar o fenômeno de indução magnética em situações do dia-a-dia;
- Falar sobre a importância de aulas experimentais para absorção do conteúdo;
- Verificar se a implementação de uma UEPS foi essencial para o aprendizado;
- Expor contribuições e aprendizados adquiridos após conclusão das atividades.

3- Introdução – Deve conter de forma sucinta os aprendizados adquiridos. Não redija de forma mecânica, procure colocar principais ideias propostas durante as atividades. (Faça isso em 1 ou 2 parágrafos)

4- Descrição das atividades – Contém a descrição dos procedimentos adotados por cada etapa do trabalho. Essa descrição deve ser completa e suficiente para entender o passo-a-passo das aulas. Fale sobre a importância e o que conseguiu assimilar de conhecimento em cada tópico e metodologia abordada. Caso queira poderá fazer desenhos esquemáticos e simplificados de situações apresentadas.

5- Resultados – Relate fielmente o que foi observado. Procure utilizar os termos científicos corretamente. Procure fazer suas interpretações do fenômeno de indução magnética. Tente responder em sua conclusão, perguntas, como: a metodologia utilizada foi suficiente para sua compreensão? Deixou a desejar? Algo poderia ser mais bem esclarecido no momento da explanação de cada técnica desenvolvida? etc.

6- Conclusão – Escreva as conclusões que você tirou das atividades realizadas para compreensão do assunto de indução magnética.

7- Referências – De onde retirou os dados.

- **APÊNDICE D**

Alguns passos propostos para elaboração de mapas conceituais segundo Novak (2000)

- 1- Identificar e traçar uma questão a qual se propõe listar conceitos. Selecione de 10 a 20 conceitos de um tema global;
- 2- Organizar os conceitos de modo a ordená-los hierarquicamente, de forma que o conceito geral (mais abrangente) esteja disposto no topo do mapa;
- 3- Acrescente mais conceitos à medida que for necessário;
- 4- Vá construindo o mapa interligando um conceito geral a outros subconceitos;
- 5- Sempre que for necessário reveja a construção do mapa para que algo possa ser acrescentado, subtraído ou reorganizado;
- 6- Seja criativo no momento da ligação entre conceitos;
- 7- Sempre busque está interligando novos conceitos;
- 8- Se necessário faça uso de exemplos para determinados conceitos permitindo um maior entendimento;
- 9- Na elaboração dos mapas não existe uma forma correta ou errada, apenas disposições diferentes no momento de interligar os conceitos. É importante uma socialização para evidenciar pontos distintos entre os mapas elaborados.

- **APÊNDICE E**

Guia de elaboração de experimentos que nortearão etapa de implementação da UEPS

EXPERIMENTO 1 – INDUÇÃO USANDO BOBINA (MOTOR CASEIRO)

MATERIAIS:

- Base de madeira;
- 1 super ímã;
- 1 pilha;
- 2 alfinetes;
- Fita isolante;
- Fio de cobre;
- Pedaco de fio encapado.

- **OBJETIVO**

Construir um sistema simplificado de motor de corrente contínua.

- **PROCEDIMENTO E EXPLICAÇÃO**

Inicialmente confecciona-se uma bobina com o fio de cobre enrolando 10 voltas ao redor da pilha, deixando nas duas extremidades um comprimento aproximado de 3 cm (necessário raspar o cobre total de uma extremidade e um pouco da outra) fator importante para permitir o fluxo da corrente elétrica. Após isso prende-as no enrolamento. Na organização da base, fixa-se os alfinetes na madeira, servindo de suporte para a bobina, encaixa a bobina e abaixo coloca-se o ímã. Para alimentação da energia utiliza a pilha interligada com os fios encapados aos alfinetes presos à base. A explicação é que ao ligar uma extremidade da bobina na energia elétrica, a bobina se transforma em um ímã e ele vai ser atraído pelo ímã que está embaixo dele. Ela começa a girar e através das extremidades aumenta e diminui a atração, variando o fluxo da corrente, porém permitindo o movimento rotatório da espira.

EXPERIMENTO 2 – GERADOR ELÉTRICO

MATERIAIS:

- Fio de cobre bem fino;
- 2 super ímã;
- 1 seringa de 2,5 ml;
- 2 leds.

• OBJETIVO

Evidenciar a geração de energia elétrica através do fenômeno de indução magnética.

• PROCEDIMENTO E EXPLICAÇÃO

Montar uma bobina com 600 enrolamentos na seringa, deixando duas pontas de aproximadamente 50 cm cada, conectar os dois leds colocando o polo negativo com o positivo do outro, e posteriormente fazer a conexão das duas pontas do fio que fio passando com os leds. Coloca-se os super ímãs dentro da seringa e começa a sacudir.

Ao agitar um ímã próximo a um fio de cobre, proporciona que haja uma movimentação de elétrons, e essa movimentação permite a criação de corrente elétrica, corrente essa necessária para acender os leds (geração de corrente elétrica). Mas de onde vem essa energia? A movimentação mecânica do ímã será convertida em energia elétrica. É necessário que o ímã se movimentando próximo a bobina.

EXPERIEMENTO 3 – FREIO DE INDUÇÃO MAGNÉTICA

MATERIAIS:

- 1 tubo de pvc de 80 cm
- 1 tubo de cobre ou alumínio de 80 cm
- 2 super ímãs

• OBJETIVOS

Demonstrar a Lei de Lenz através do freio de indução magnética

• PROCEDIMENTO E EXPLICAÇÃO

Lançar o ímã dentro do tubo de pvc e ver o que ocorre. Depois repetir o procedimento, só que utilizando o tubo de cobre (ou alumínio). Ainda poderá ser feito o procedimento

simultaneamente para melhor análise de resultados.

Todo ímã gera à sua volta um campo magnético (lugar no espaço onde estará sujeito a ação de forças de atração ou repulsão). Ao jogar o ímã dentro do tubo ele cria um campo magnético e o campo magnético vai se movimentando a partir do momento que desce pelo tubo, e assim o campo vai mudando de lugar. A movimentação do campo magnético gera uma corrente elétrica (indução magnética) no tubo de cobre e a interação da corrente elétrica com o campo magnético freia o ímã quando está descendo, o que não ocorre no tubo de pvc, por ser um isolante e não produzir a corrente elétrica.

Esse fenômeno que está sendo explicitado no experimento é muito parecido com o que acontece dentro de um gerador de energia, que gera energia por causa da alteração do campo magnético. A energia é gerada pela alteração do fluxo magnético, que produzido pela movimentação do ímã.

EXPERIMENTO 4 – ORIENTAÇÃO DE CAMPO MAGNÉTICO

MATERIAIS

- Bandeja de plástico com apoio de madeira (para melhor visualização)
- Limalha de ferro feita de palha de aço amassada
- 2 ímãs em forma de barra

• OBJETIVO

Mostrar a orientação das linhas de campo magnético

• PROCEDIMENTO E EXPLICAÇÃO

Colocam-se dois ímãs embaixo da bandeja posicionando o norte dos dois ímãs para o lado de dentro. Distribui-se a limalha de ferro dentro da bandeja. Agita-se ligeiramente a bandeja para que a limalha de ferro se alinhe com o campo magnético formado pelos dois ímãs. Como os dois ímãs tendem a se repelir, então as linhas de campo criadas por eles tendem a se afastar. Depois repete-se o procedimento invertendo um dos polos dos ímãs, observando que as linhas de campo magnético tendem a se encontrar no centro da bandeja.

- APÊNDICE F

Campo magnético sobre o eixo de uma espira com corrente elétrica

O objetivo deste anexo é demonstrar em detalhes o cálculo do campo magnético gerado por uma espira com corrente elétrica. O resultado final está representado pela Equação (5) da Dissertação e na Equação (3) do Produto Educacional associado à ela.

A origem do cálculo é a lei de Biot-Savart adaptada para um pedacinho de fio no qual passa uma corrente I . Isto tem que ser assim porque esta lei só vale para um objeto carregado eletricamente que com dimensões muito pequenas, que denominamos de partícula. Ela está expressa na Equação (2) da Dissertação e do Produto Educacional. Na Dissertação usamos o símbolo ds para representar um pedaço muito pequeno do fio. Muito pequeno aqui quer dizer que o tamanho de ds é muito menor do que a distância entre o ds e o local onde estamos calculando o campo magnético, que na equação é representado pelo r , ou seja, $ds \ll r$. No Produto Educacional usamos o símbolo Δs para representar o pequeno pedaço do fio, porque os estudantes de Ensino Médio estão mais acostumados com ele, mas o significado é exatamente o mesmo.

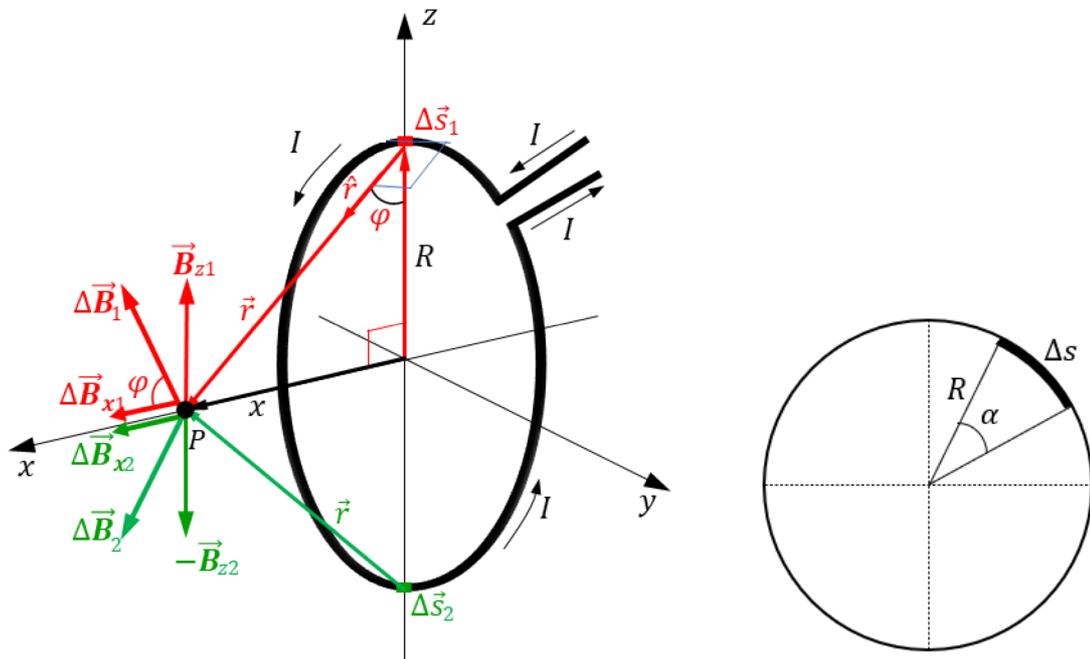
Para começar, estude com cuidado a Figura 1 (esquerda). Ela mostra uma espira com corrente I se movimentando no sentido mostrado. Queremos calcular o campo gerado pela corrente em toda a espira no ponto P que se encontra sobre o eixo x e está a uma distância r da espira. Como a lei de Biot-Savart só se aplica para partículas, vamos pegar um pequeno pedaço do fio de tamanho Δs . Veja na Figura que $\Delta s \ll r$ e assim a lei de Biot-Savart se aplica à corrente que está dentro desse pequeno Δs . A Equação (2) da Dissertação e do Produto Educacional mostram a lei de Biot-Savart adaptada para a pequena quantidade de corrente dentro de Δs :

$$\Delta B_I = \frac{\mu_0 I \Delta \vec{s} \times \hat{r}}{4\pi r^2} = \frac{\mu_0 I \Delta s \cdot \text{sen}(90^\circ)}{4\pi r^2} = \frac{\mu_0 I \Delta s}{4\pi r^2} \quad (1)$$

Certifique-se de perceber na Figura 1 que em todos os locais da espira a direção de $\Delta \vec{s}$ é perpendicular à direção de \vec{r} . É por isso que na Equação (1) aparece o $\text{sen}(90^\circ) = 1$, pois este é o ângulo entre esses dois vetores. Veja que a pequena quantidade de corrente dentro de Δs_1 na parte superior da espira gera um campo ΔB_1 no ponto P . Este campo está decomposto nas direções do eixo z e x , resultando em B_{z1} e B_{x1} , respectivamente. Como o ponto P está

sobre o eixo x , a projeção de ΔB_1 sobre o eixo y é nula. Da Figura temos $B_{z1} = B_1 \sin\varphi$ e $B_{x1} = B_1 \cos\varphi$. Agora peguemos a corrente elétrica dentro do pequeno pedaço de fio Δs_2 na parte inferior da espira, diametralmente oposto a Δs_1 . De igual modo ela vai gerar um campo ΔB_2 no ponto P . Este campo também está decomposto nas direções do eixo z e x , resultando em $-B_{z2}$ e B_{x2} , respectivamente. Como o ponto P está sobre o eixo x , a projeção de ΔB_2 sobre o eixo y é nula. Da Figura temos $B_{z2} = -B_2 \sin\varphi$ e $B_{x2} = B_2 \cos\varphi$.

Figura 1. Esquerda: campo magnético gerado por uma espira com corrente. As componentes na direção de z são canceladas (mostradas na Figura). De igual modo as componentes na direção de y se cancelam (não mostradas na Figura). Direita: ilustração para a medida do comprimento de um arco de círculo.



Fonte: os autores (2022).

Perceba que o valor de ΔB_1 é o mesmo de ΔB_2 . Então $B_{z1} = B_{z2}$ e duas componentes do campo diametralmente opostas na direção de z se anulam. Isto acontecerá para todos os pares de pontos diametralmente opostos, tanto na direção de z quanto na de y . Isso só ocorre porque estamos calculando o campo exatamente sobre o eixo x , que passa pelo centro da espira. Por outro lado, as duas componentes na direção de x se somam, sendo que $\Delta B_{1x} = 2B_1 \cos\varphi = 2B_2 \cos\varphi = 2B \cos\varphi$. Aqui estamos afirmando que $B_1 = B_2 \equiv B$, porque os valores do campo de ΔB_1 de qualquer lugar da espira no ponto P é o mesmo, pois a distância r entre qualquer elemento Δs da espira e o ponto P é a mesma. Portanto, adaptando a equação (1) para o ponto P , temos:

$$\Delta B_{Ix} = \frac{\mu_0 I \Delta s}{4\pi r^2} \cos\varphi. \quad (2)$$

Da Figura 1 vemos que $r^2 = x^2 + R^2$, $r = \sqrt{x^2 + R^2}$ e $\cos\varphi = R/r$. Da Equação (2), temos:

$$\Delta B_{Ix} = \frac{\mu_0 I \Delta s}{4\pi x^2 + R^2} \frac{R}{\sqrt{x^2 + R^2}} = \frac{\mu_0 IR}{4\pi (x^2 + R^2)^{3/2}} \Delta s. \quad (3)$$

A Equação (3) fornece o valor do campo ao longo do eixo x apenas devido à corrente que passa pelo pedacinho de fio de comprimento Δs . A soma de todos os ΔB_{Ix} devido a corrente em cada Δs ao longo de toda a espira será descrito por B_{espira} . Agora basta somar o campo devido a toda corrente que passa em toda a espira. Sabemos que quando o ângulo α é dado em radiano, o comprimento de um arco de círculo Δs é dado pela relação $\Delta s = R\alpha$. A Figura 1 (à direita) ilustra o arco de círculo. Como o ângulo α varia de 0 a 2π , a soma de todos os Δs , que será descrito como s , corresponde ao comprimento da circunferência, ou seja, $s = 2\pi R$. Substituindo este resultado na Equação (3), temos:

$$\vec{B}_{espira} = \frac{\mu_0 IR}{4\pi (x^2 + R^2)^{3/2}} (2\pi R) = \frac{\mu_0 IR^2}{2 (x^2 + R^2)^{3/2}} \hat{x}. \quad (4)$$

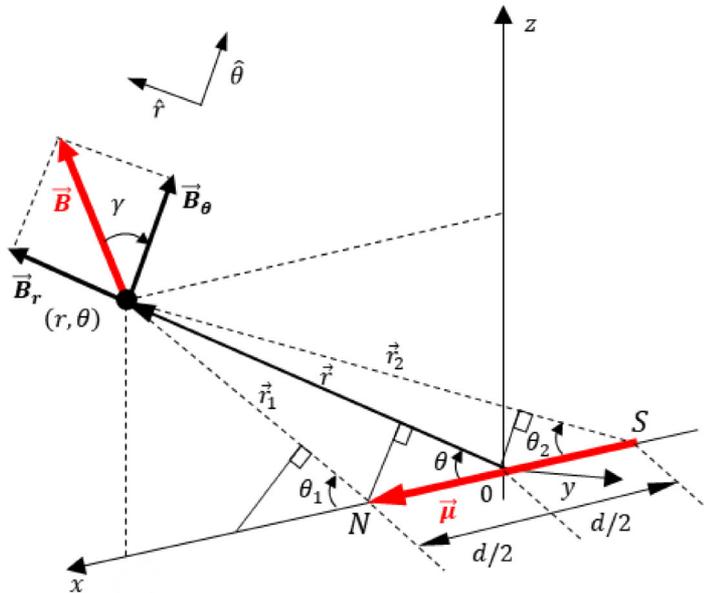
• APÊNDICE G

Cálculo do campo magnético de um dipolo magnético

O objetivo deste anexo é demonstrar em detalhes o cálculo do campo magnético gerado por dipolo magnético colocado na origem do sistema de coordenadas, conforme ilustrado na Figura 5 do texto da Dissertação e do Produto Educacional associado a ela. Esta figura está representada neste Anexo pela Figura 1. Os resultados a serem demonstrados estão representados na Equação (10) da Dissertação e Equação (8) do Produto Educacional e serão reproduzidos aqui.

$$\vec{B}_{total} = \vec{B}_r + \vec{B}_\theta, \quad \vec{B}_r = \frac{\mu_0\mu}{4\pi r^3} 2\cos\theta\hat{r} \quad \text{e} \quad \vec{B}_\theta = \frac{\mu_0\mu}{4\pi r^3} \text{sen}\theta\hat{\theta}. \quad (1)$$

Figura 1. Campo magnético de um dipolo magnético. O campo em qualquer ponto do plano (x, z) é dado pelas componentes \vec{B}_r e \vec{B}_θ . Sobre o eixo x $B_\theta = 0$ e sobre o eixo z $B_r = 0$.



Fonte: os autores (2022).

Inicialmente vamos observar com detalhes a Figura 1. Um dipolo magnético está colocado na origem do sistema de coordenadas, apontando para o sentido positivo do eixo x, do polo Sul para o Polo Norte. Com o objetivo de facilitar os cálculos, vamos encontrar uma expressão para o campo gerado pelo dipolo apenas sobre o plano formado pelos eixos x e z. Neste caso, a componente do campo magnético na direção do eixo y será sempre nula. Pela Figura 1 vemos que o campo \vec{B} a uma distância \vec{r} do centro do dipolo tem componentes \vec{B}_r e

\vec{B}_θ , nas direções dos versores \hat{r} e $\hat{\theta}$, respectivamente. Vamos traçar os vetores \vec{r}_1 e \vec{r}_2 a partir das duas extremidades do dipolo até o ponto onde o campo será calculado. Em relação ao eixo x cada um deles faz um ângulo que está designado na Figura 1 por θ_1 e θ_2 . Na prática, a dimensão física do dipolo, designada aqui por d , é muito menor do que a distância r de onde queremos calcular o campo magnético, de tal maneira que vamos considerar a aproximação $\theta_1 \cong \theta_2 = \theta$ quando ela for necessária.

Vamos usar o mesmo procedimento que é usado para calcular o campo de um dipolo elétrico a partir de sua energia potencial. Da mesma forma que o campo elétrico depende do valor da carga q e é inversamente proporcional à distância a partir dela, vamos considerar que o campo magnético de um polo de intensidade p de um ímã seja também inversamente proporcional à distância a partir dele:

$$B(r) = \frac{\mu_0 p}{4\pi r^2}. \quad (2)$$

Embora os polos magnéticos não existam isoladamente, este procedimento final se revelará compatível com os resultados experimentais. De forma semelhante à definição de potencial gravitacional e elétrico, podemos definir um potencial magnético de um polo, que depende do campo $B(r)$ da forma convencional:

$$V_m = - \int_r^\infty B(r) dr = - \int_r^\infty \frac{\mu_0 p}{4\pi r^2} dr \rightarrow V_m = \frac{\mu_0 p}{4\pi r}. \quad (3)$$

O potencial magnético a uma distância r do centro do dipolo é a soma dos potenciais dos dois polos, ou seja:

$$V_m = \frac{\mu_0 p}{4\pi} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) = \frac{\mu_0 p}{4\pi r} \left(\frac{r_2 - r_1}{r_1 r_2} \right). \quad (4)$$

Da Figura 1 vemos que a dimensão $d \ll r$ e podemos fazer as aproximações:

$$r_1 \cong r - \frac{d}{2} \cos\theta_1 \quad \text{e} \quad r_2 \cong r + \frac{d}{2} \cos\theta_2. \quad (5)$$

Usando a mesma aproximação $d \ll r$ vamos que $\theta_1 \approx \theta_2 \approx \theta$. Portanto, podemos escrever os termos $r_2 - r_1$ e $r_1 r_2$ da Equação (4) como:

$$r_2 - r_1 = \left(r + \frac{d}{2} \cos \theta_2 \right) - \left(r - \frac{d}{2} \cos \theta_1 \right) = d \cos \theta. \quad (6)$$

$$r_1 r_2 = \left(r - \frac{d}{2} \cos \theta_1 \right) \left(r + \frac{d}{2} \cos \theta_2 \right) = r^2. \quad (7)$$

Substituindo na Equação (4),

$$V_m = \frac{\mu_0 p}{4\pi} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) = \frac{\mu_0 p}{4\pi r} \left(\frac{d \cos \theta}{r^2} \right) = \frac{\mu_0 \mu \cos \theta}{4\pi r^2}. \quad (8)$$

A quantidade que aparece aqui $\mu = pd$ é exatamente o momento de dipolo magnético, escrito em uma forma diferente da que foi mostrada na Equação (8) da Dissertação e Equação (6) do Produto Educacional.

Agora estamos prontos para obter a Equação (1), usando a relação entre potencial e campo magnético:

$$\vec{B}_r = -\frac{dV_m}{dr} = -\frac{d}{dr} \left(\frac{\mu_0 \mu \cos \theta}{4\pi r^2} \right) = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \frac{2 \cos \theta}{r^3} \hat{r}. \quad (9)$$

$$\vec{B}_\theta = -\frac{1}{r} \frac{dV_m}{d\theta} = -\frac{1}{r} \frac{d}{d\theta} \left(\frac{\mu_0 \mu \cos \theta}{4\pi r^2} \right) = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \frac{\sin \theta}{r^3} \hat{\theta}. \quad (10)$$