CONFLUÊNCIA TEÓRICA-EXPERIMENTAL NO ESTUDO DO MAGNETISMO: UMA PROPOSTA DE ENSINO POR ABORDAGEM COM BASE NA CONSTRUÇÃO DE MOTORES ELÉTRICOS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Jailton dos Santos Filho

São Cristóvão/SE

Fevereiro 2025

CONFLUÊNCIA TEÓRICA-EXPERIMENTAL NO ESTUDO DO MAGNETISMO: UMA PROPOSTA DE ENSINO POR ABORDAGEM COM BASE NA CONSTRUÇÃO DE MOTORES ELÉTRICOS.

Jailton dos Santos Filho

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação Profissional em Ensino de Física - PPGPF no Curso de Mestrado Profissional de Ensino de Física (MNPEF), da Universidade Federal de Sergipe para a obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.
Orientador: Prof. Dr. Edvaldo Alves de Souza Júnior

São Cristóvão/SE

Fevereiro 2025

CONFLUÊNCIA TEÓRICA-EXPERIMENTAL NO ESTUDO DO MAGNETISMO: UMA PROPOSTA DE ENSINO POR ABORDAGEM COM BASE NA CONSTRUÇÃO DE MOTORES ELÉTRICOS

Jailton dos Santos Filho
Orientador:
Prof. Dr. Edvaldo Alves de Souza Júnior

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação Profissional em Ensino de Física (PPGPF) da Universidade Federal de Sergipe (UFS) no curso de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Aprovada por:

Prof. Dr. Edvaldo Alves de Souza Júnior
Universidade Federal de Sergipe

Prof. Dr. Celso José Viana Barbosa
Universidade Federal de Sergipe

Prof. Dr. José Gerivaldo dos Santos Duque
Universidade Federal de Sergipe

São Cristóvão, Fevereiro, 2025.

Dedico esta dissertação ao meu amado sobrinho Raul Lorenzo, meu grande amigão.

Agradecimentos

À Santíssima Virgem Maria Mãe de Deus – para sempre venerada sob o título de Nossa Senhora das Graças – e a São José Operário, seu castíssimo esposo, por estarem ao meu lado nos caminhos que me conduzem a Nosso Senhor Jesus Cristo, O qual me concedeu o dom da vida e as oportunidades para ser um semeador enquanto continuo sendo uma semente. À Patrícia Lima dos Anjos, minha mãe, minha heroína, minha melhor amiga e incentivadora – causa maior do meu desejo de vencer. À Universidade Federal de Sergipe (UFS), por me acolher como aluno e me oportunizar o crescimento profissional, em mais esse degrau do conhecimento. Ao Departamento de Física (DFI) que, por meio da Sociedade Brasileira de Física (SBF), consolidou-se como um dos polos de aplicação do Programa de Pós-Graduação Profissional em Ensino de Física (PPGPF), mostrando-me, assim, como aperfeiçoar minhas práticas docentes, ofertando-me o lapidar da aprendizagem na condição de educador-educando. Ao meu orientador, Prof. Dr. Edvaldo Alves de Souza Júnior, pela amizade e presteza, sobretudo pela disponibilidade em me aceitar como orientando, concedendo-me não somente uma vaga em seu grupo de pesquisa e extensão "Física na Escola" (FnEsc), mas especialmente, por me inserir como bolsista – condição fundamental à manutenção dos meus estudos. À Fundação de Apoio à Pesquisa e Inovação Tecnológica de Sergipe (FAPITEC/SE), pelo financiamento das minhas atividades através do pagamento mensal da bolsa de mestrado, bem como pelo acompanhamento das minhas atividades enquanto discente de pós-graduação. Aos demais professores do PPGPF, em nome do Prof. Dr. Tiago Nery Ribeiro, o qual primeiro me acolheu como aluno bolsista sob sua orientação e que, depois, por força do destino, passou a me acompanhar como amigo e irmão em Cristo. Especial agradecimento também a todo quadro docente do DFI, na pessoa do Prof. Dr. Marcos Antônio Couto, amigo e referência como profissional e ser humano. Ao meu amigo e colega de curso, Lucas Freitas Calheiros, pelos frutuosos debates sobre os mais variados temas, mas acima de tudo pelo companheirismo no desenvolvimento nas atividades das disciplinas curriculares e na logística atrelada à minha estadia na UFS. Aos técnicos do laboratório do DFI, os quais sempre me foram prestativos, solícitos e acolhedores, demonstrando um enorme profissionalismo na colaboração para com minhas eventuais atividades de pesquisa experimental. Aos servidores terceirizados do DFI, por zelar pelas instalações, propiciando um ambiente em conformidade com estrutura do departamento. Ao Colégio Universo Santa Maria (CUSM), instituição que reconheceu meus méritos como docente, concedo-me o primeiro contrato profissional como Professor de Física – condição indispensável para o meu ingresso como aluno do PPGPF. Às equipes pedagógicas e gestoras do Centro Estadual de Educação Profissional Berila Alves de Almeida (CEEPBAA), do Colégio Estadual Professor

Fernando Azevedo (CEPFA) e do Colégio de Aplicação da Universidade Federal de Sergipe (CODAP/UFS), unidades escolares de Nossa Senhora das Dores/SE, cujos professores regentes abraçaram a implementação do Produto Educacional, ora elaborado, como parte indispensável para a validação do meu projeto de pesquisa. Aos colegas de trabalho na Coordenação de Licenciatura em Física (CLF) do Instituto Federal de Sergipe (IFS)/ Campus Lagarto, os quais, apesar do curto período de atuação profissional, me receberam em virtude da admissão no cargo de professor substituto temporário, proporcionando-me o acolhimento profissional necessário à lapidação e à implementação das minhas atividades docentes desenvolvidas junto ao MNPEF. Aos confrades e confreiras da Academia Dorense de Letras (ADL), pela tão aguardada efetivação como membro imortal desse honroso sodalício, cuja nomeação como neoacadêmico se deu no processo de consolidação da escrita desta dissertação. Aos meus amigos/irmãos e conterrâneos da *Tapera dos Enforcados* que torceram (e torcem) pelo meu êxito, emanando sinceros e esperançosos votos de sucesso, cruciais para o continuar da caminhada. Sintam-se todos abraçados pela minha gratidão.

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

"Os homens, desafiados pela dramaticidade da hora atual, se propõem a si mesmos como problema. Descobrem que pouco sabem de si, de seu 'posto no cosmo', e se inquietam por saber mais. Estará, aliás, no reconhecimento do seu pouco saber de si uma das razões desta procura. Ao se instalarem na quase, senão trágica, descoberta do seu pouco saber de si, se fazem problema para eles mesmos. Indagam. Respondem, e suas respostas os levam a novas perguntas."

Paulo Freire,
Pedagogia do oprimido
(1968)

Resumo

CONFLUÊNCIA TEÓRICA-EXPERIMENTAL NO ESTUDO DO MAGNETISMO: UMA PROPOSTA DE ENSINO POR ABORDAGEM COM BASE NA CONSTRUÇÃO DE MOTORES ELÉTRICOS

Jailton dos Santos Filho

Orientador: Prof. Dr. Edvaldo Alves de Souza Júnior

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal de Sergipe no Curso de Mestrado Profissional de Ensino de Física (MNPEF), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Esta dissertação faz parte de um projeto de pesquisa que busca uma estratégia de ensino baseada na exposição compartilhada de ideias, visando correlacionar o domínio conceitual e as atividades práticas – pautadas na criação de experimentos. O cerne deste trabalho está refletido na elaboração de um produto educacional cujo fim é impulsionar o ensino do magnetismo em cursos do ensino médio, ao mesmo tempo em que sublinha suas implicações na tecnologia moderna, evidenciando seu uso na construção de motores elétricos. Essa tarefa se deu com base na escrita de um livro didático, em face à preocupação em subsidiar alternativas instrucionais que possam destacar a posição do aluno no processo de validação e justificação do conhecimento. Fundamentamos esta pesquisa sob a perspectiva libertadora e problematizadora da educação freireana e, no tratar da aplicação e preparação do material instrucional, usamos a concepção vygostskyana como referencial teórico, uma vez que a contrapartida pedagógica resultante da utilização de quaisquer metodologias de ensino no ambiente escolar deve considerar o contexto social vivenciado pelos estudantes, possibilitando que o seu recorte da realidade os permita assimilar as definições técnicas e científicas necessárias ao entendimento do conteúdo ao qual eles estão sendo expostos. Obtivemos como resultado a real percepção de que é possível criar um instrumento didático que permita uma simbiose entre os experimentos e o conteúdo abordado, bem como elaborar materiais complementares pertinentes ao desenvolvimento da aplicação. Observamos de igual modo a força da estratégia utilizada, por meio do interesse e engajamento dos alunos frente às atividades propostas tendo em vista a forma rápida e precisa de suas interações com as definições quando abordadas em uma interação mútua entre a teoria e a prática experimental.

Palavras-chave: Exposição compartilhada. Motores Elétricos. Material Didático. Ensino de Física.

Abstract

THE THEORETICAL-EXPERIMENTAL CONFLUENCE IN THE STUDY OF THE MAGNETISM: A TEACHING PROPOSAL BY APPROACH BASED ON THE CONSTRUCTION OF ELECTRIC MOTORS

Jailton dos Santos Filho

Orientador: Prof. Dr. Edvaldo Alves de Souza Júnior

Master's Dissertation presented to the Graduate Program of the Federal University of Sergipe in the Professional Master's Degree in Physics Teaching (MNPEF), as part of the necessary requirements to obtain the title of Master in Physics Teaching.

This dissertation is part of a research project that seeks a teaching strategy based on the shared exposition of ideas, aiming to correlate the conceptual domain and practical activities – grounded on the creation of experiments. The core of this work is reflected in the development of an educational product whose purpose is to boost the teaching of magnetism in high school courses, while also highlighting its implications in modern technology, highlighting its use in the construction of electric motors. That task was based on the writing of a textbook, given the concern to subsidize instructional alternatives that can highlight the student's position in the validation process and justification of knowledge. We based this research from the liberating and problematizing Freirean education and, when dealing with the application and preparation of material instructional, we used the Vygostskyan conception as a theoretical reference, since the pedagogical counterpart resulting from the use of any teaching methodologies in the school environment must consider the social context experienced by students, enabling ensuring that their view of reality allows them to assimilate technical and scientific definitions necessary to understand the content to which they are being exposed. We got as a result the real perception that it is possible to create a teaching instrument that allows a symbiosis between the experiments and the content covered, as well as developing complementary materials relevant to the development of the application. We observed equally the strength of the strategy used, through the interest and engagement of students in relation to the proposed activities, taking into account the quick and precise form of their interactions with definitions when approached in a mutual interaction between theory and experimental practice.

Keywords: Shared Exposition. Electric Motors. Didactic Material. Physic's Teaching.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Ilustração do emprego braçal do homem pré-histórico. Destaque para o uso das mãos como principal ferramenta de trabalho. Fonte: Científico, 2023. 4

Figura 2 – Fabricação de tecidos, século 18. Aplicação industrial das máquinas de fiar idealizadas por Hargreaves. Fonte: Neves; Souza, sem data. 5

Figura 3 – Máquina de Newcomen com a adaptação feita por Watt. Neste esboço ilustrativo podemos ver a estrutura do maquinário, com destaque para o condensador de água, que atua de modo a resfriar constantemente o reservatório do vapor. Fonte: Imagem do autor, 2025. 7

Figura 4 – Máquina a vapor nos moldes da invenção de Watt, construída em 1832. Este maquinário (inativo) se encontra exposto na *Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales*, localizada na capital espanhola. Fonte: Pérez, 2004. 8

Figura 5 – Variação da quantidade de movimento de um corpo. Acima, o corpo de massa (m), inicialmente em repouso ($v_i = 0$) adquire movimento ($v_f > 0$) após sobre ele agir uma força ($\vec{F}$). Abaixo, percebemos o contrário, ou seja, o mesmo corpo tem seu movimento cessado após sofrer a ação de uma força ($\vec{F}$). Fonte: Imagem do autor, 2025. 11

Figura 6 – Linhas da campo magnético originalmente observadas por Faraday. Nota-se claramente uma região em destaque, oriunda da interação magnética em virtude da disposição das limalhas de ferro ao redor do ímã. Fonte: Carvalho, 2024. 12

Figura 7 – Ilustração do experimento de Oersted. A corrente elétrica (i) que passa pelo fio condutor afeta a orientação da bússola colocada em sua proximidade. Fonte: Imagem do autor, 2025. 13

Figura 8 – Simulação experimental da Lei de Faraday. Neste conjunto formato por quatro imagens há um retrato da simulação do fenômeno de indução eletromagnética. No quadros “A” e “B” não há geração de corrente elétrica, pois o ímã está em repouso. Por outro lado, nos quadros “C” e “D”, a manifestação da corrente elétrica é verificada pelo acendimento da lâmpada (em substituição ao galvanômetro originalmente utilizado por Faraday) após o ímã ser aproximado e/ou afastado do fio de cobre a ela conectado. Fonte: Adaptado de Phet, 2024. 16

Figura 9 – Interpretação gráfica do fluxo magnético ϕ. Esta grandeza está associada à intensidade do campo magnético B. A quantidade de linhas de força que cruza uma determinada área fechada (A) está diretamente relacionada com o valor de ϕ, cujo módulo também possui dependência com o ângulo θ, medido entre as mesmas linhas e a reta normal à superfície considerada. Fonte: Imagem do autor, 2025. 18
Figura 10 – Ilustração da Lei de Lenz. Quadro superior: o ímã se aproxima das espiras. Quadro inferior: o ímã se afasta da bobina. Em ambas as situações, atentemo-nos ao sentido de oposição entre o fluxo magnético variado pela movimentação (v) do ímã e o campo magnético gerado no interior da espira. Notemos também que para cada situação há um sentido adotado para a corrente elétrica (i). Fonte: Adaptado de Helerbrock, 2024b. 21
Figura 11 – Campo magnético de um ímã "U". Representação gráfica da existência do campo magnético $\vec{B}$ – região ilustrada pelas linhas de campo orientadas – gerado pela oposição dos polos de um ímã em formato de U. Fonte: Imagem do autor, 2025. 22
Figura 12 – Estruturação de um motor elétrico. Os polos opostos (N e S) dos ímãs produzem um campo magnético ($\vec{B}$) que interage com a corrente elétrica, acionando o movimento de giro, percebido pelo funcionamento do equipamento. Fonte: Adaptado de SimuFísica, 2023. 24
Figura 13 – Estrutura de funcionamento de um gerador elétrico CA. Processo de conversão de energia mecânica em energia elétrica. Destaque para a existência de duas escovas condutoras, as quais possibilitam a existência de uma corrente elétrica alternada que passa pelo fio. Fonte: Adaptado de Helerbrock, 2024a. 25
Figura 14 – Primeira usina geradora de eletricidade, 1882. Sistema de geradores elétricos construído pelo inventor estadunidense Thomas Alva Edison (1847-1931) com o fim de fornecer eletricidade à cidade norte-americana de Nova Iorque. Fonte: Mattede, sem data. 26
Figura 15 – Mapa Conceitual: As Pedagogias Freireanas. Compêndio do pensamento problematizador de Paulo Freire, apresentado em forma de uma sequência organizacional que contempla os principais pontos abordados em sua teoria educacional. Fonte: Imagem do autor, 2025. 30
Figura 16 – Conceitos físicos presentes nas dissertações do MNPEF. Análise estatística realizada englobando todos os trabalhos publicados entre 2013 e 2020. Destacamos o percentual referente ao tema Eletromagnetismo (cerca de 10%). Fonte: Pereira; Erthal, 2022. 37

Figura 17 – Respostas Binárias. Percentuais referentes à quantidade de alunos que limitaram suas resoluções à apenas “sim” e “não”, em relação às questões aplicadas no decorrer das Aulas 1, 2, 3 e 4. Fonte: Imagem do autor, 2025. 48

Lista de abreviaturas e siglas

UFS: Universidade Federal de Sergipe

CCET: Centro de Ciências Exatas e Tecnologia

DFI: Departamento de Física

CAPES: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior

SBF: Sociedade Brasileira de Física

MNPEF: Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física

PPGPF: Programa de Pós-Graduação Profissional em Ensino de Física

FAPITEC/SE: Fundação de Apoio à Pesquisa e Inovação Tecnológica de Sergipe

FnEsc: Física na Escola

IFS: Instituto Federal de Sergipe

CLF: Coordenação de Licenciatura em Física - IFS/Lagarto

ADL: Academia Dorense de Letras

CUSM: Colégio Universo Santa Maria - Capela/SE

CODAP: Colégio de Aplicação/UFS

CEEPBAA: Centro Estatual de Educação Profissional Berila Alves de Almeida - Nossa Senhora das Dores/SE

CEPFA: Colégio Estadual Professor Fernando Azevedo - Nossa Senhora das Dores/SE

CTS: Ciência, Tecnologia e Sociedade

BNCC: Base Nacional Comum Curricular

ZDP: Zona de Desenvolvimento Proximal

Sumário

1 INTRODUÇÃO 1

2 PRESSUPOSTOS TEÓRICOS 3
2.1 Fundamentos de Física 3
2.1.1 Os Motores e a Física: contexto histórico e aplicações tecnológicas 3
2.1.1.1 O homem e a ação do movimento como potência de seu trabalho 3
2.1.1.2 Motores: Primeira Revolução Industrial 5
2.1.1.3 Eletromagnetismo: Segunda Revolução Industrial 8
2.1.2 Motores e Geradores Elétricos 21
2.1.2.1 Motores Elétricos 21
2.1.2.2 Geradores Elétricos 23
2.2 Fundamentos de Ensino 26
2.2.1 Cerne das teorias sócios-libertadoras por meio da organização de conceitos . 26
2.2.1.1 O pensamento mediador de Lev Vygotsky 27
2.2.1.2 A metodologia problematizadora de Paulo Freire 30

3 REVISÃO DA LITERATURA 31
3.1 A pedagogia escolar como expressão da linguagem sócio-libertadora 31
3.2 O estado da arte do ensino do eletromagnetismo como proposta de intervenção didática para a educação básica 34

4 METODOLOGIA DE ENSINO 39
4.1 Elaboração e Desenvolvimento do Produto Educacional 39

5 METODOLOGIA DA INVESTIGAÇÃO 44
5.1 Aplicação do Produto Educacional 44

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES 46

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS 52

REFERÊNCIAS 54

APÊNDICE A – PRODUTO EDUCACIONAL 58

APÊNDICE B – DECLARAÇÕES EMITIDAS PELAS UNIDADES DE ENSINO VISITADAS 127

APÊNDICE C – PARECERES AVALIATIVOS ASSINADOS PELOS PROFESSORES REGENTES 131

APÊNDICE D – DEMONSTRAÇÃO DAS EQUAÇÕES DE MAXWELL POR DERIVAÇÃO E INTEGRAÇÃO 140

D.1 Operadores Diferenciais Vetoriais 140

D.2 Equações de Maxwell na forma diferencial 142

D.2.1 Obtenção do coeficiente da velocidade da luz no vácuo 145

D.2.2 Obtenção do coeficiente de penetração da luz em meio materiais 148

D.3 Equações de Maxwell na forma integral 153

1 Introdução

A edificação de um ambiente educacional no qual há a reciprocidade no ato contínuo de (re)formar os protagonistas da sala de aula, requer do professor uma atuação como ser que aprende para ensinar. Esta percepção é fruto de uma pedagogia que enxerga o seio escolar como sendo uma via de mão dupla, em que não há espaço para uma cultura de ensino e aprendizagem que não recorra às práticas elucidativas e recriadoras de saberes e fazeres próprios de uma formação humanizadora. Para que haja respaldo técnico na construção de uma aula libertadora, deve-se priorizar além de práticas problematizadoras, o uso de materiais didáticos e instrucionais produzidos de acordo com o contexto científico-social do público requerente, os quais possam espelhar de forma contextualizada a ligação entre aquilo que se pretende ensinar com o produto que se deseja aprender.

A realidade vivenciada o seio escolar nos condiciona a perceber a ausência de tais práticas educadoras, além da falta de materiais didáticos que prezam por uma dialogicidade entre a teoria conceitual e a prática experimental. De igual modo, a tradicional insistência em elencar os conteúdos estudados e os ministrar de forma mecanicista, desprezando uma fiel contextualização com as situações do cotidiano, corrobora com a falta de aptidão dos estudantes em se debruçar e desenvolver as habilidades cognitivas pertinentes à sua formação básica, sobretudo àquelas necessárias à compreensão dos fenômenos físicos e suas relações com a sociedade contemporânea.

A fim de contornarmos essa problemática, dentro de um recorte específico pautado no ensino do magnetismo, notamos a necessidade de discorrer sobre esse conteúdo enfatizando algumas de suas utilidades sociais e tecnológicas dentro das devidas etapas curriculares da formação básica. Neste sentido, produzimos um material instrucional exclusivamente modelado com a pretensão de atender às exigências contextuais, pedagógicas e exploratórias, presentes na (re)aplicabilidade das definições estudadas, correlacionando-o a uma transposição didática que possa ser implementada na educação de jovens e adultos, como também no ensino médio regular. Neste trabalho, pretendemos instigar o professor a ter um novo olhar para as suas práticas educacionais sob a ótica de uma orientação que enfatiza a troca de conhecimento, considerando a realidade cognitiva do aluno, bem como sua estrutura psicossocial de assimilação, buscando alternativas didáticas que proporcionem condições ao estudante de aprimorar ao máximo suas capacidades investigativas. Uma vez que o aprendizado se percebe mediante a capacidade com a qual se formula o pensamento sobre a instrução a ser recebida, sendo essa atividade fruto do desenvolvimento que corrobora com a edificação dos saberes na formação social e educacional da mente (Vygotsky, 1991).

Endossamos esta tarefa de acordo com as condições de educabilidade discernidas no comportamento ético de cada educador-educando[1], mediante sua aptidão de ensinar e necessidade de aprender, no sentido de proporcionar uma relação epistêmica, enfatizando a cognoscibilidade[2] tanto do ser que instrui, quanto daquele que é instruído. O material pedagógico produzido almeja ser útil e necessário à sociedade, evidenciando seu sentido existencial, sendo apresentado como um documento com potencial de aplicabilidade no ambiente escolar (Rezende; Ostermann 2015).

Oferecemos, portanto, o nosso produto educacional em forma de livro didático como alicerce para sustentar a orientação pedagógica que defendemos, a fim de sanar a problemática discutida e ressalvando a inerência do seio escolar estudado. Durante a implementação do nosso produto instrucional, vivenciamos diversas realidades sócio-educacionais, as quais foram determinantes para obtermos parâmetros de verificação do processo de justificação e validação do resultado que delineamos ao longo da formulação desta pesquisa educacional. Com isso, pudemos notar o respaldo da nossa proposta pedagógica mediante a aceitação e assimilação do público-alvo –isto é, dos educadores e dos educandos –, destacando o empenho e desenvolvimento cognitivo dos alunos frente à maneira com a qual o conteúdo foi apresentado. Isso porque fizemos um detalhado levantamento investigativo que aferiu o impacto do nosso material mediante análise avaliativa do desempenho dos estudantes no decorrer das nossas aulas expositivas e experimentais, bem como nos submetemos ao crivo dos professores/pesquisadores responsáveis pelas turmas/séries abrangidas, com os quais compartilhamos o nosso livro e que prontamente avaliaram nossa proposta contribuindo com valorosos pareceres técnicos. Tanto a aplicação quanto a abrangência revisional nos permitem apresentar nossa ideia – isto é, nosso fazer pedagógico –, como uma prática exitosa revelando-se, portanto, como uma proposta válida para a atividade docente que defendemos nesta dissertação.

[1] Na visão educacional libertadora de Paulo Freire, o termo "educador-educando" foi cunhado para estabelecer um espelhamento de ideias entre o professor e o aluno, de tal modo que a prática de ensinar do docente encontra seu real sentido somente quando coadunada com o desejo de aprender do estudante. (N. A.)

[2] Capacidade inata que cada indivíduo possui de aprender algo novo. (N. A.)

2 Pressupostos Teóricos

2.1 Fundamentos de Física

2.1.1 Os Motores e a Física: contexto histórico e aplicações tecnológicas

2.1.1.1 O homem e a ação do movimento como potência de seu trabalho

Na história da evolução do *homo sapiens* é fato destacado que sua hegemonia frente às demais espécies se consolidou quando os hominídeos passaram a ter o domínio de suas ações de sobrevivência utilizando a mão como primeira ferramenta de trabalho. "Lutamos pelo inacessível, e é por isso que o homem deixou de ser um animal" (Kazantitzakis, 1965, p. 65). O ser humano, ao se deparar com sua habilidade em manusear e produzir ferramentas, pôde se diferenciar dos outros animais, ampliando e aperfeiçoando suas técnicas de produção laboral.

> O que é o homem? Ora, o que define a existência humana, o que caracteriza a natureza humana é exatamente o seu trabalho. O homem se constituiu como tal à medida que necessita produzir continuamente sua própria existência. É que diferencia o homem dos animais: os animais têm sua existência garantida pela natureza e, por consequência, eles se adaptam à natureza. O homem tem de fazer o contrário: ele se constitui no momento em que deseja adaptar a natureza a si, não sendo mais suficiente adaptar-se à natureza. Ajustar a natureza às necessidades, às finalidades humanas, é o que se faz pelo trabalho. Trabalhar não é outra coisa senão agir sobre a natureza e transformá-la (Saviane, 2003, p. 132-133).

A ideia de *manufatura* nasce como uma das maneiras fundamentais do ser humano explorar sua potência de trabalho. "A especialização da mão – que implica o instrumento, e o instrumento implica a atividade humana específica, a reação transformadora do homem sobre a natureza" (Vygotsky, 1991, p. 11). Paulatinamente, sua capacidade de movimentar-se e gerar movimento, em termos de dispêndio de energia, foi sendo melhorada em função do quão produtivo ele desejava ser. Cada ação de trabalho realizada pelo homem estava totalmente veiculada à quantidade de energia que ele depositava para a realização da tarefa a qual se propunha a fazer.[1]

Com o passar dos anos, a relação do indivíduo e seu trabalho de objetivação artesanal foi tomando contornos mais eficazes. Isso foi possível graças ao desenvolvimento de novas ferramentas e tecnologias que visaram facilitar o emprego da potência de energia humana na execução das atividades próprias de sua sobrevivência.

[1] O termo *trabalho* citado em repetição ao longo desse parágrafo (e sustentado durante esta seção) diz respeito às atividades empregadas pelo ser humano com o fim de atingir um objetivo específico. Por ora, não estamos fazendo alusão à grandeza física de igual nome, que tem sua definição expressada de forma totalmente distinta da abordagem aqui exemplificada. (N. A.)

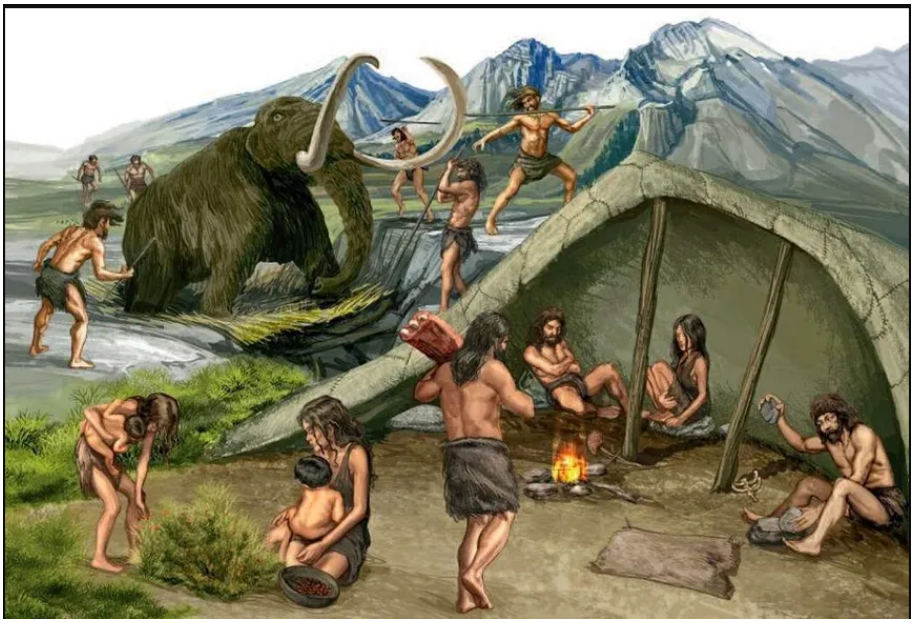


Figura 1 – Ilustração do emprego braçal do homem pré-histórico. Destaque para o uso das mãos como principal ferramenta de trabalho. Fonte: Científico, 2023.

> Os trabalhadores contratados perderam o domínio da compreensão da totalidade do processo,[2] mas permaneceram operando as ferramentas com suas próprias mãos e, quando necessário, utilizavam o auxílio de outros membros do corpo humano. Mesmo convivendo no interior de um novo processo de trabalho, suas ações eram coordenadas de forma indireta por atividades que ainda dependiam, em todo o processo, da habilidade individual de cada trabalhador (Batista, 2014, p. 221, meu grifo).

A necessidade de se estabelecer meios de produções industriais mais eficazes e eficientes acarretou na melhoria dos instrumentos utilizados pelos trabalhadores nos interiores das fábricas e indústrias. O homem, com destaque ao recorte histórico a partir do século 18, via-se empenhado na tarefa de construir maquinários que elevassem o nível da manufatura em prol do avanço da sociedade.

> Colocado em movimento por meio do instrumento máquina, movido a vapor, pela presença da matéria-prima e pelo principal elemento do processo de trabalho – a força de trabalho humana – nascia, no interior do velho processo de trabalho (pautado na manufatura), a maquinaria, um processo que se estendeu para além do simples atos de rituais de passagem, manifestando-se nas fissuras da base de produção manufatureira (Batista, 2014, p. 225).

A produção de ferramentas, a capacidade de comunicação (oral e escrita), são exemplos de inovações tecnológicas que contribuíram para o progresso da humanidade – considerando os primórdios da civilização. Em um período mais recente, permeando os últimos duzentos anos, podemos afirmar que a construção dos *motores* também está no rol

[2] No contexto abordado, entendemos por "totalidade do processo", como sendo uma referência as condições trabalhistas na relação empregador-empregado. (N. A.)

de tecnologias fundamentais para a acensão do homem corroborando com o processo de desenvolvimento científico e social. É interessante destacar que encontramos em comum consenso de definição nos dicionários que o substantivo *motor* possui significação atrelada à capacidade de realizar movimento. Se pensarmos em um escopo mais abrangente sobre as raízes etimológicas da palavra *motor* vemos que ela melhor se relaciona com a Ciência da Engenharia, pois o equivalente dessa palavra em Língua Inglesa é *engine*, podendo então a Engenharia ser interpretada como a área do conhecimento destinada ao estudo dos motores (Oliveira, 2016, p. 11). De fato, como veremos no decorrer das próximas seções, foram os engenheiros os grandes responsáveis por construir os primeiros motores, modelando essa tecnologia de tal maneira que ela se apresentasse mecanicamente como uma ferramente destinada à elevar o nível de produção de trabalho do homem, fazendo uso da transformação da energia como capacidade de produzir movimento.

2.1.1.2 Motores: Primeira Revolução Industrial

Os anos que abriram o século 18 foram marcados pelo surgimento da Primeira Revolução Industrial, a qual deu luz a uma sociedade que emergia para outro patamar de progresso. No que concerne à fabricação de equipamentos mecânicos e industriais que visavam alavancar a produção nas grandes fábricas da época, podemos destacar o pioneirismo do carpinteiro inglês James Hargreaves (1720-1778) na invenção da primeira *máquina destinada a fiar* – construção que modificou a forma de produção de tecidos, uma vez que esse maquinário tecia até oitenta fios de lã ao mesmo tempo.

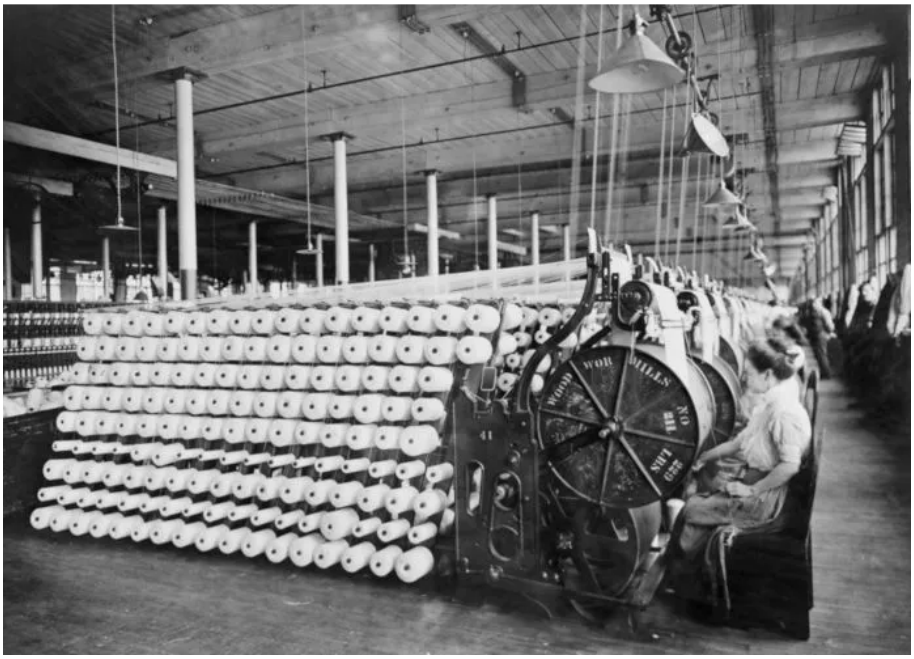


Figura 2 – Fabricação de tecidos, século 18. Aplicação industrial das máquinas de fiar idealizadas por Hargreaves. Fonte: Neves; Souza, sem data.

> É na cidade que ocorre, num primeiro momento, o desenvolvimento do processo de trabalho que tem como instrumento principal a máquina movida a vapor. As barreiras orgânicas que impediam os homens de revolucionarem suas formas de ser e de existir são superadas. A vitória da técnica e da ciência transferida para a máquina colocou, abertamente, o limite que a força de trabalho trazia em sua totalidade, não conseguindo produzir movimentos uniformes e contínuos em alta velocidade (Batista, 2014, p. 227).

A implementação de uma tecnologia mais sofisticada, isto é, indo além da função mecânica braçal em substituição ao esforço humano, veio à tona em 1712, com as aplicações das ideias do ferreiro britânico Thomas Newcomen (1664-1729) que construiu a *máquina de vapor atmosférica*, com o fim de extrair água das minas de carvão e estanho (Silva, 2019). Por se manter viável mediante as condições mecânicas permitidas pela engenharia da época, esse equipamento foi amplamente utilizado nos anos que seguiram o período de sua invenção.

> As atividades de mineração eram severamente limitadas por problemas de inundação. Não é surpreendente, portanto, que algumas das primeiras tentativas de empregar o vapor fossem voltadas para a drenagem das minas. Nesse contexto, em 1712, depois de um prolongado período de experimentação, Newcomen desenvolveu uma máquina a vapor para bombeamento (Tavares, 2008, p. 40, grifo nosso).

A máquina de Newcomen funcionava com base na combustão do carvão (ou queima de madeira), sendo o calor produzido o responsável por gerar o vapor d'água. Nesse processo havia uma grande perda energética devido ao constante aquecimento e resfriamento do reservatório no qual a água atingia o ponto de ebulição. Em virtude dos problemas vinculados aos custos operacionais desses maquinários, foi necessário buscar alternativas para contornar a desproporcionalidade no uso de muito carvão para gerar uma quantidade insuficiente de energia mecânica. Imbuído por força dessa missão, o engenheiro – e também britânico – James Watt (1736-1819) tratou de aperfeiçoar tal equipamento acoplando condensadores aos motores a vapor, tendo logrado êxito em 1765, quando percebeu a necessidade usar a condensação como mecanismo para aumentar a eficiência das máquinas (Cardoso, 2017, p. 14).

> Watt foi além dos aspectos puramente mecânicos do problema; o modelo tornou-se ciência em suas mãos. O que mais impressionou Watt quando examinou a máquina a vapor de Newcomen foi a grande quantidade de combustível que ela consumia. Estudando a causa disso, chegou à conclusão de que os problemas eram os sucessivos aquecimentos e resfriamentos do cilindro (*reservatório*). Então idealizou uma nova máquina cujo cilindro se manteria sempre aquecido, o que significava uma grande economia de combustível. Os grandes motores do cilindro eram feitos de ferro fundido; o modelo de Watt era de bronze, um melhor condutor de calor (Tavares, 2008, p. 13-14, grifo nosso).

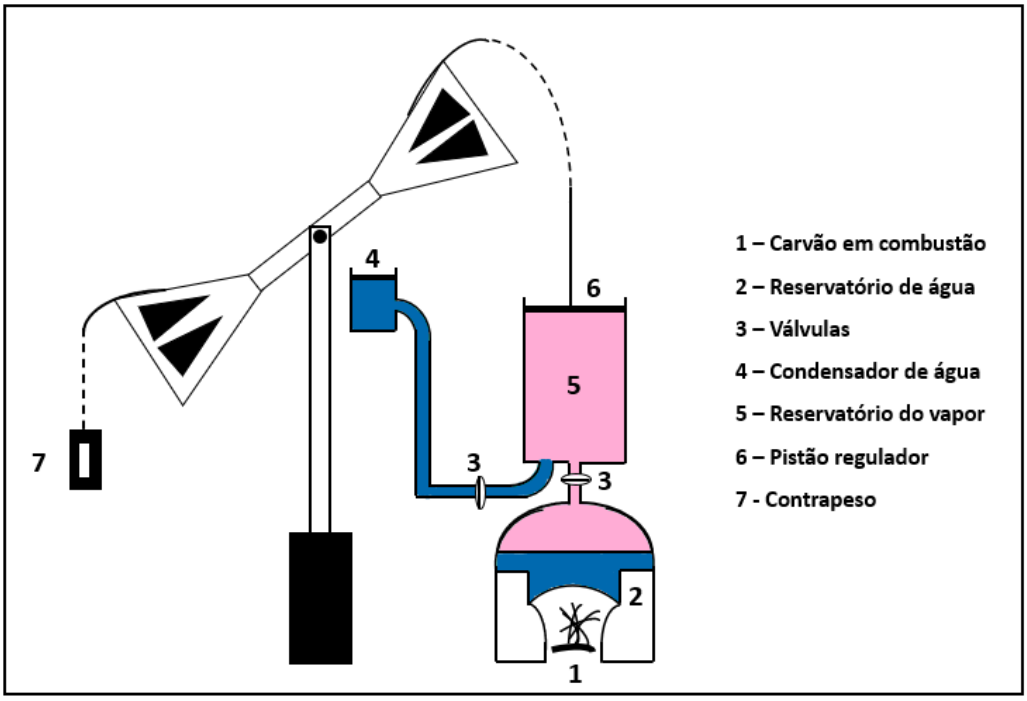


Figura 3 – Máquina de Newcomen com a adaptação feita por Watt. Neste esboço ilustrativo podemos ver a estrutura do maquinário, com destaque para o condensador de água, que atua de modo a resfriar constantemente o reservatório do vapor. Fonte: Imagem do autor, 2025.

A abordagem experimental de Watt teve como principal objetivo aumentar a produção de energia reduzindo a quantidade de combustível utilizado. Dentre as suas expertises nessa tarefa, podemos destacar o fato de ele passar a utilizar o bronze como matéria-prima para a construção dos motores, visando aproveitar as características de condução de calor[3] desse novo material – uma vez que a facilidade de um material (sistema) em conduzir calor tem relação direta com aumento de energia do meio.

> Watt introduziu uma nova era para a máquina a vapor ao fazê-la funcionar de forma mais eficaz. Ele soube aliar um "cérebro mecânico" a mãos hábeis: suas invenções são numerosas. Estava tanto interessado em ciência pura como em tecnologia. Para ele, *ciência e prática passaram a ter uma relação mais próxima* (Tavares, 2008, p. 66, grifo nosso).

As fábricas passaram a ter à disposição uma nova máquina de vapor, que superava em todas as frentes àquela construída por Newcomen. A destreza de Watt em se debruçar no estudo da natureza do calor a fim de aperfeiçoar o funcionamento dos motores, rendeu a ele um novo campo de atuação para novas invenções, bem como ampliou as bases do sistema fabril que expandiu em larga escala o uso e aplicação das máquinas a vapor por todo o velho continente. Uma nova geração de trabalhadores e inventores surgiu em função

[3] A capacidade que um material possui para aumentar a sua temperatura em função da energia térmica recebida é conhecida como *calor específico*. Fenômeno já conhecido por Watt, por conta dos estudos do químico escocês Joseph Black (1728-1799), que houvera estabelecido a conceituação desse termo em meados do século 18. (N. A.)

do novo *modus operandis* da produção industrial, vindo a resultar na modernização de uma sociedade em constante evolução.

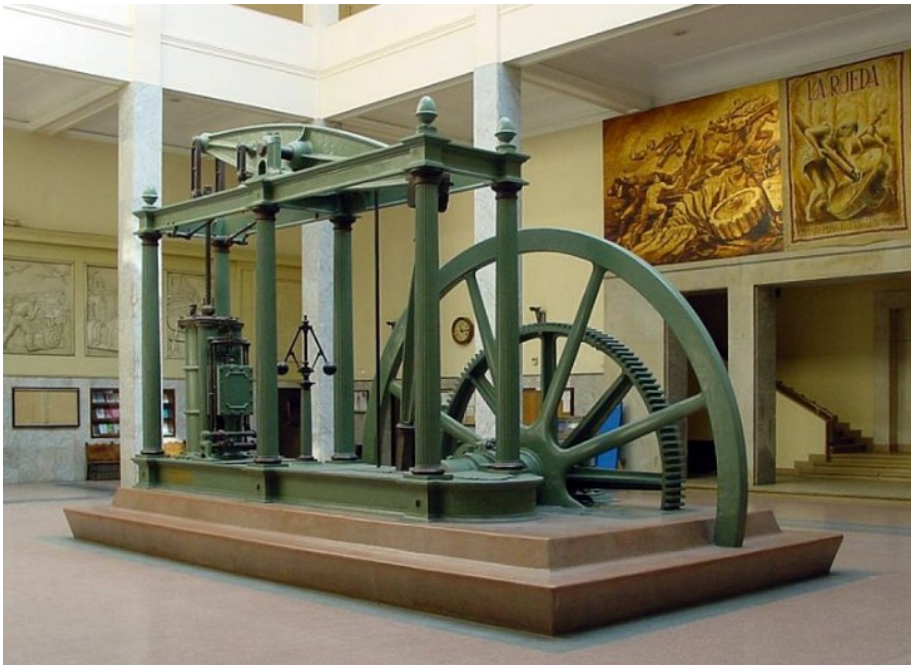


Figura 4 – Máquina a vapor nos moldes da invenção de Watt, construída em 1832. Este maquinário (inativo) se encontra exposto na *Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales*, localizada na capital espanhola. Fonte: Pérez, 2004.

2.1.1.3 Eletromagnetismo: Segunda Revolução Industrial

A Segunda Revolução industrial diz respeito ao recorte temporal subsequente ao aperfeiçoamento das máquinas a vapor. Nesse período histórico pôde-se notar uma gradual evolução na pirâmide evolutiva referente à potência de trabalho do homem, destacando-se uma modificação em sua base de sustentação. Isto é, uma sociedade que antes apoiava toda a sua estrutura no trabalho braçal do homem (com objetivação artesanal), passou a ser sustentada por um trabalho industrial automatizado. O homem, anteriormente sendo um "trabalhador-peça" no sistema fabril, passa a ser um operário – no sentido literal, ou seja, aquele que opera as máquinas. O avanço no entendimento referente ao funcionamento dos maquinários – e sua eventual escalada, conhecida por maquinismo – trouxe modernização à sociedade que buscava cada vez mais investir no aprimoramento das tecnologias destinadas no fortalecimento das indústrias.

> Nas Revoluções Industriais dos séculos XVIII e XIX ocorreu a ampliação da substituição da energia humana e animal pela inanimada, com eficiência multiplicada; a aceleração da troca da capacidade humana por instrumentos mecânicos; e a descoberta e/ou melhoria de métodos de obtenção e elaboração de matérias primas (Dathien, 2003, p. 1).

O século 19 consolidou-se como um período de transição social, no que concerne ao desenvolvimento de uma sociedade mais moderna. A remodelagem do sistema fabril mediante alternativas de produção ocasionadas pelo uso e melhoramento das máquinas

com motores a vapor se verificava em vários setores industriais (e. g. metalúrgico, têxtil, transporte). Esses progressos tornaram-se possíveis graças ao investimento na Ciência, em especial nas áreas da Física, da Química e da Engenharia, sendo possível realizar relevantes pesquisas que ampararam o surgimento de novas tecnologias. Essas tecnologias puderam ser cada vez mais aprimoradas em função da descoberta de uma nova manifestação da natureza, a *energia elétrica*.

> O desenvolvimento da eletricidade, por outro lado, mudou radicalmente não só a economia, as indústrias, mas a vida cotidiana de toda a população. Esta energia possui muitas vantagens, como a transmissibilidade, sem perda de muita energia, e a flexibilidade, podendo ser facilmente convertida em movimento, luz, calor e som. A energia a vapor exige que os geradores estejam situados na própria fábrica, e mesmo dentro desta a transmissão consome muita energia. A energia elétrica permitiu que os motores fossem acoplados aos instrumentos, diminuindo o uso de eixos e correias de transmissão. A facilidade de transmissão deu à energia elétrica um caráter onipresente e colocou-a ao alcance de uma parcela muito mais ampla da população, dado seu baixo custo. Facilitou também o desenvolvimento de pequenas indústrias, que podiam agora utilizar a mesma fonte geradora de energia das grandes e pagar de acordo com o seu consumo (Dathien, 2003, p. 5-6).

A propensão que a natureza possui em transmitir informações baseadas nos fenômenos elétricos e magnéticos instiga a curiosidade humana desde os primeiros séculos anteriores à era Cristã. As implicações e percepções dessas manifestações foram paulatinamente investigadas durante cerca de dois milênios, sendo de consenso científico comum que ambas as formas de energia (elétrica e magnética) existiam de maneira independente, representando ocorrências de percepções distintas, em determinadas situações. No entanto, a partir de diversos trabalhos teóricos-experimentais de notórios cientistas do século 19, especialmente os do dinamarquês Hans Christian Oersted (1777-1851), do britânico Michael Faraday (1791-1867) e do escocês James Clerk Maxwell (1831-1879),[4] a Física passou a compreender a eletricidade e magnetismo como sendo manifestações essencialmente complementares. Desde então, as observações relacionadas aos fenômenos elétricos e magnéticos passaram a ser estudadas sob a ótica de um novo ramo da Ciência, chamado de *Eletromagnetismo*.

O passo determinante rumo à sofisticação foi a aplicação dos conceitos elétricos e magnéticos na tecnologia de construção de motores. Tal avanço pôde ser implementado mediante o progresso no conhecimento teórico-conceitual, oriundo de diversas investigações experimentais que foram postas em prática no decorrer dos anos 1800. De acordo com a narrativa histórica, registra-se como pioneira a tarefa realizada por Oersted a fim de verificar uma possível relação entre eletricidade e magnetismo. Em seu laboratório, ele passou a investigar as implicações dos fenômenos atrelados à geração de corrente elétrica,

[4] Se faz justo e necessário citar mais um nome a este seleto grupo de pesquisadores. Trata-se de Joseph Henry (1797-1878), cientista estadunidense que, na década de 1830, obteve de forma paralela e independente, aos mesmos resultados publicados por Faraday (Halliday; Resnick; Krane, 2014). (N. A.)

recém-elucidados pelo físico italiano Alessandro Volta (1745-1827) nos anos finais do século 18.

> Após uma série de construções voltadas à de que a eletricidade poderia ser gerada por metais (e. g. prata, zinco, cobre), Volta construiu em 1799, o primeiro provimento de corrente elétrica da história da humanidade. Seu aparato experimental conhecido como "Pilha de Volta", era capaz de armazenar e suprir a corrente necessária para alimentar circuitos elétricos (Filho, 2023, p. 31, grifo no original).

É importante frisar que o brilhante trabalho de Volta pôde, entre outras contribuições, estabelecer a diferença fundamental entre os estudos das interações de cargas elétricas na fronteira do que hoje conhecemos por *eletrostática*, desse novo tipo de comportamento da eletricidade proveniente da existência da corrente elétrica – o que mais tarde passaria a compor estudo da *eletrodinâmica*. Diante desse cenário investigativo acerca de como se dava, efetivamente, o movimento das cargas elétricas ao longo de um condutor, Oersted se embrenhou com afinco em elucidar um questionamento sobre uma melhor descrição teórica para esse novo tipo de manifestação elétrica (Guerra; Reis; Braga, 2004). Para tanto, ele se amparou na mecânica newtoniana como um incentivo para montar seu aparato experimental com o fim de deduzir se havia alguma ligação de reciprocidade entre a eletricidade e o magnetismo.

> Oersted e alguns de seus contemporâneos defendiam existir uma relação entre eletricidade e magnetismo. Por suas concepções teóricas a respeito das "forças da natureza", era considerado, por seus parceiros, um personagem importante para o desenvolvimento daqueles estudos. Assim, ele sempre recebia notícias dos experimentos e análises teóricas que buscavam explorar aquela relação. Porém, diferente de alguns desses estudiosos, investigou o assunto através da corrente elétrica e não da ação eletrostática. Essa escolha não foi sem propósito, afinal experiências haviam mostrado que era a passagem de corrente elétrica em um fio condutor fino que provocava aquecimento e emissão de luz nesse mesmo fio, e não qualquer ação eletrostática (Guerra; Reis; Braga, 2004, p. 230).

Considerando o formalismo matemático da época, em consonância com as ideias estabelecidas pela Mecânica Clássica, já havia um consentimento sobre a significação do conceito de *força*, isto é, a capacidade que um corpo adquire para abandonar o seu estado inercial. A consequência dessa ação sobre o determinado objeto é a alteração na sua quantidade de movimento (p) – produto da massa pela velocidade do corpo em questão. Isto é, seja (m) a massa do corpo (sua quantidade de inércia), então chamamos de força (F), o agente físico que age sobre tal corpo perturbando seu estado inicial, em virtude da aceleração[5] (a) que lhe é empregada como consequência imediata da referida ação.

Associada à definição de força proposta do Newton, a ideia de interação à distância ainda carecia de uma melhor sustentação e respaldo entre os cientistas. O termo *campo* passou a ser empregado para designar a região na qual se percebia a comunicação entre os diferentes entes de um determinado fenômeno observado. Em se tratando das

[5] Chamamos de *aceleração* toda e qualquer variação na velocidade de um corpo (ou sistema). (N. A.)

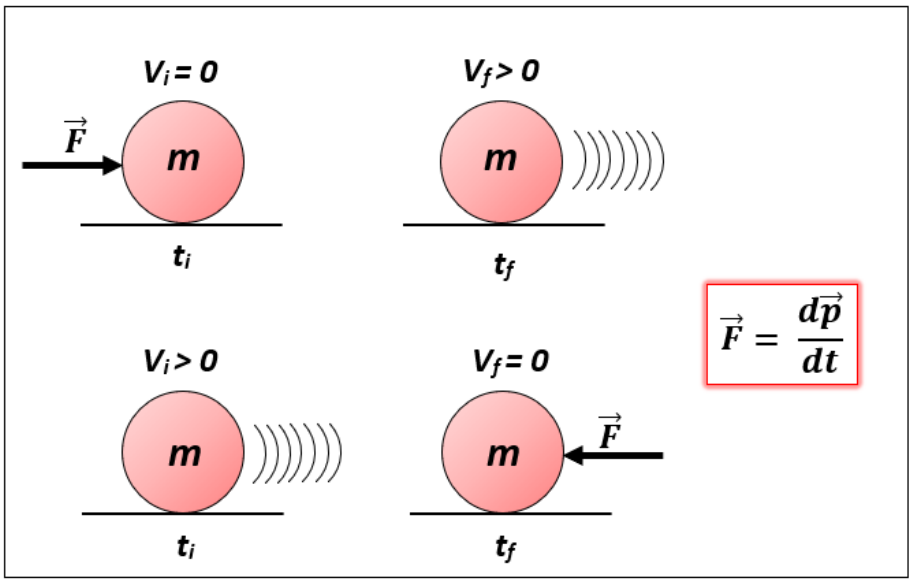


Figura 5 – Variação da quantidade de movimento de um corpo. Acima, o corpo de massa (m), inicialmente em repouso ($v_i = 0$) adquire movimento ($v_f > 0$) após sobre ele agir uma força ($\vec{F}$). Abaixo, percebemos o contrário, ou seja, o mesmo corpo tem seu movimento cessado após sofrer a ação de uma força ($\vec{F}$). Fonte: Imagem do autor, 2025.

interações elétricas e magnéticas, buscava-se uma melhor descrição sobre a ocorrência de tais fenômenos. Por exemplo, uma vez que se percebe o movimento dos portadores de cargas elétricas, é natural estabelecer sua causa como sendo influenciada pela existência de um tipo de força, nesse caso, chamada de *força elétrica* (F_e). Mas então, sobre qual região? Através de qual meio? De posse da teoria newtoniana, não foi difícil estabelecer uma analogia entre o campo gravitacional – responsável pela atração entre as massas dos objetos – com um novo conceito, chamado de *campo elétrico*, para designar a região na qual seria permitida a interação entre as cargas elétricas. De modo análogo, em se tratando das concepções do magnetismo, pôde-se conceituar a definição de *campo magnético* como sendo a fronteira onde ocorrem as interações influenciadas pela existência da chamada *força magnética* (F_m) – interação responsável pelos movimentos de atração e repulsão observados pela aproximação dos polos (inseparáveis) de uma rocha peculiar chamada *magnetita* (ou ímã)[6] e sua tendência natural de atrair outros objetos que continham o

[6] A palavra *magnetismo* tem sua origem etimológica atrelada à região da Magnésia (antiga província de Tessália, na Grécia setentrional, no século V a. C.) local de onde a história registra os primórdios das investigações com os ímãs (ou magnetitas). Conforme vemos nos trabalhos de (Rocha, 2002) e de (Júnior, 2010), os historiadores da ciência, com base em evidências arqueológicas da ciência também convergem para uma narrativa sobre o conhecimento atrelado ao magnetismo tendo existido, de maneira independente e concomitante, em duas outras regiões da globo: a Ásia (China); Ásia Menor (outra província grega chamada Lydia); e a América Central (entre o sul do México e o Oeste da Guatemala). Ainda sim, a nomenclatura *ímã* – *Tetróxido de Triferro* (Fe_3O_4), de acordo com a sua composição química – passou a ser usada por analogia à expressão francesa *aimant*, que significa "amante", justamente pelo fato de essas pedras serem atraídas, isto é, eram "amantes", de outros

elemento Ferro (Fe) em sua composição.

Convém destacar que o conceito formal de *campo*, sublinhando uma região na qual são percebidas as linhas de força (também chamada de *linhas de fluxo* e *linhas de campo*), referente aos estudos dos fenômenos elétricos e/ou magnéticos, foi consolidado por Faraday em suas investigações contidas nos apontamentos publicados no título *Pesquisas Experimentais em Eletricidade* (1852).

> Havia, por um lado, a vaga noção de linha de força, surgida da intuição de Michael Faraday (1791-1867) de que o espaço é a morada de forças que estão distribuídas através dele, em linhas curvas. Forças que são comunicadas de um ponto a outro de forma contígua. Sua expressão mais tangível são os padrões exibidos por limalhas de ferro no entorno de um ímã. Esta linha de força física se aproxima, tanto quanto possível, da noção atual de campo clássico (Lima, 2019, p. 1).

Faraday pôde demonstrar a existência do campo magnético ao dispor limalhas de ferro ao redor de um ímã e observando sua direção notoriamente orientada em relação aos polos, evidenciando uma clara interação magnética. Conforme verificamos diretamente do excerto original, em nota traduzida por (Assis; Haruna, 2011, p. 193):

> Entendo por linhas magnéticas, as linhas das forças magnéticas, modificadas de qualquer maneira pela justaposição de polos, que seriam representadas por limalha de ferro; ou aquelas linhas em relação às quais seria tangente uma pequena agulha magnética.

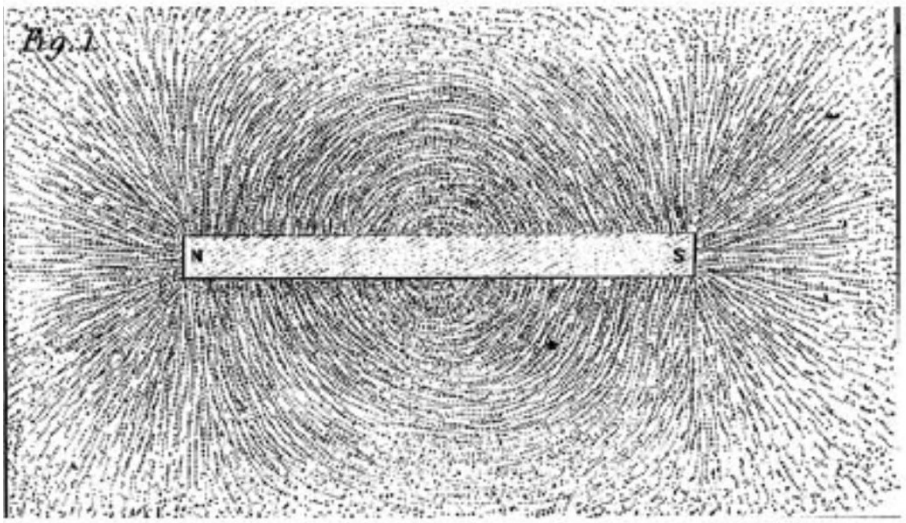


Figura 6 – Linhas da campo magnético originalmente observadas por Faraday. Nota-se claramente uma região em destaque, oriunda da interação magnética em virtude da disposição das limalhas de ferro ao redor do ímã. Fonte: Carvalho, 2024.

Mediante esse cenário de percepções das forças elétricas e magnéticas atuando com base em seus respectivos campos de interações, buscou-se consolidar uma eventual correlação mútua, de causa e efeito, para ambos os fenômenos. Na primeira quadra do

materiais compostos de Ferro (Fe). (N. A.)

século 19, Oersted elaborou seu experimento montando um circuito com um fio condutor por onde passava corrente elétrica. Nas proximidades desse fio, inseriu uma bússola – cuja agulha imantada só podia ser defletida mediante a influência de um campo magnético. Pois então, ao ligar o circuito, Oersted observou o movimento da agulha, sem qualquer tipo de interação com outro componente externo. O efeito era simplesmente causado por passagem da corrente elétrica no fio, quando a bússola estava próxima a ele (Gardelli; Neves, 2012). Entusiasmado, porém não satisfeito, decidiu inverter o sentido da corrente elétrica – isso pode ser feito alterando os polos negativo e positivo da bateria – e novamente observar o efeito na agulha. Eis que, para o seu espanto e admiração, ao se inverter o sentido da corrente elétrica, se inverteu também o sentido de deflexão da agulha. Estava constatado, portanto que fenômenos elétricos implicam em fenômenos magnéticos. Tal verificação, isto é, o fato de que *o campo elétrico proveniente do movimento das cargas elétricas em um fio condutor produziu um campo magnético capaz de defletir a agulha imantada de uma bússola*, não se deu de forma linear. A formulação consensual que viria a descrever essa análise experimental, causou enorme impacto na comunidade científica – embora nos pareça óbvio, sob os olhares de hoje. Foi preciso várias investigações e diversas ponderações para que houvesse o entendimento de que, de fato, a humanidade presenciava o nascimento de uma nova ramificação da ciência: o *Eletromagnetismo*, pois houvera sido comprovada experimentalmente a relação de dependência entre os campos elétrico e magnético.

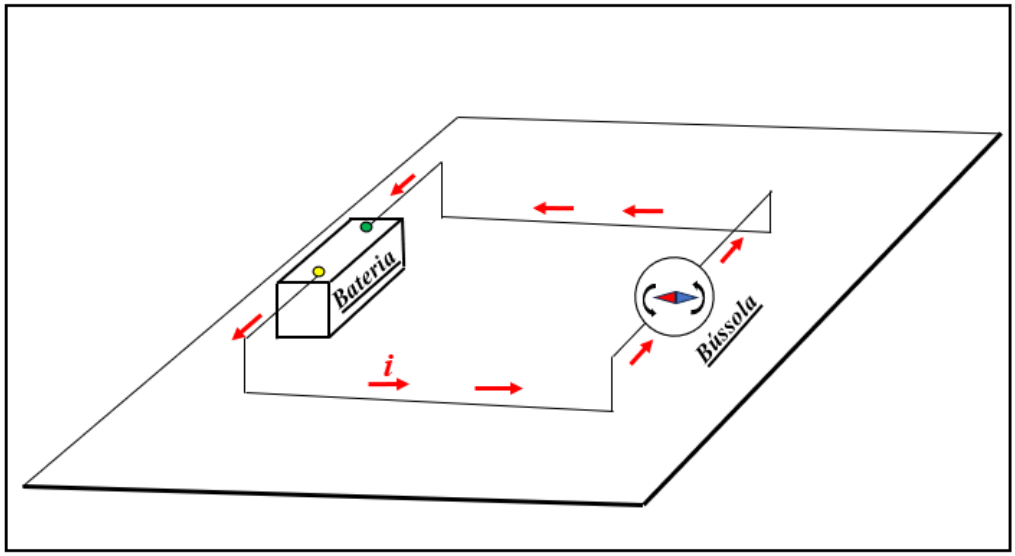


Figura 7 – Ilustração do experimento de Oersted. A corrente elétrica (i) que passa pelo fio condutor afeta a orientação da bússola colocada em sua proximidade. Fonte: Imagem do autor, 2025.

> Em 21 de julho de 1820, Hans Christian Oersted (1777-1851) anunciou à comunidade científica a deflexão sofrida pela agulha imantada de uma bússola ao ser colocada inicialmente paralela a um fio condutor de corrente elétrica. Esta evidência da interação entre magnetismo e eletricidade [...] foi apresentada na Academia Real de Ciências da França pelo então presidente Dominique François Jean Arago (1786-1853) em 4 de setembro de 1820. [...] A plateia de cientistas que assistia à demonstração ficou tão

> surpresa com o que observara, que Arago teve de repeti-la uma semana depois, em 11 de setembro de 1820 (Gardelli; Neves, 2012, p. 19-20).

Após a comprovação experimental da interação entre o campo elétrico e o campo magnético, como uma relação de causa e efeito, se fazia necessário deduzir algebricamente a existência desses fenômenos através de uma expressão que pudesse descrever as grandezas físicas envolvidas como consequência da investigação de Oersted. Além do já citado Arago, outro notório pesquisador que se debruçou nessa tarefa físico-matemática foi o físico francês André-Marie Ampère (1775-1836), – apesar dele defender "que o magnetismo era simplesmente um efeito decorrente da interação a distância entre elementos de corrente" (Gardelli; Neves, 2012, p. 31). Neste enredo de proposições e averiguações, coube a outros dois franceses, Jean-Baptiste Biot (1774-1862) e Félix Savart (1791-1841), o crédito da apresentação heurística referente à equação desejada – a chamada *Lei de Biot-Savart* – dada por:

$$B = \frac{\mu}{2\,\pi\,R} i\,, \tag{2.1}$$

em que B é o valor absoluto do campo magnético, i é a intensidade da corrente elétrica que passa pelo fio condutor, R é a menor distância entre e o fio o ponto no que se mede o módulo do campo magnético e μ é a permeabilidade magnética – constante de proporcionalidade própria da interação magnética que permite verificar a relação entre as grandezas aferidas.[7]

A experiência de Oersted veio a comprovar que os campos magnético e elétrico existem um em consequência do outro, sendo, em sua investigação, aquele gerado por este. Pois bem, será que essa correlação poderia ser influenciada de forma inversa? Isto é, será que a ação de um campo magnético poderia instigar o movimento de cargas elétricas? Foi exatamente essa linha de raciocínio que levou Faraday a inciar seus estudos na busca por encontrar o complementar do fenômeno descrito e observado por Oersted, isto é, a possibilidade de gerar campo elétrico em função do campo magnético (gerados por ímãs) – tal investigação viria a ser consolidada e enunciada como a *Lei da Indução Magnética*.

> Faraday direcionou seu olhar crítico para a ação eletromagnética. A questão central do trabalho foi a defesa de que o efeito primitivo do eletromagnetismo era o aspecto rotacional, evidenciado pelo aparato experimental que construíra. Buscando apoiar sempre suas conclusões em investigações experimentais, descreveu todos os passos que seguira para obter rotação de fio condutor linear em torno de um ímã e vice-versa, chamando atenção para os fatores que prejudicavam a observação do efeito. Mostrou, ainda, que em muitos experimentos não se observava o movimento rotacional, pois este ficava escondido por fatores externos ao eletromagnetismo, como o atrito entre agulhas imantadas e fios condutores (Guerra; Reis; Braga, 2004, p. 237).

[7] No Sistema Internacional (SI), a unidade de medida para o campo magnético é o Tesla (T), em homenagem ao eminente físico e engenheiro sérvio Nikola Tesla (1856-1943). (N. A.)

Poucos anos após as publicações de Oersted, Faraday apresentou a versão final de seu trabalho. Sua busca baseou-se em encontrar eletricidade a partir do magnetismo (Dias; Mastins, 2004). As etapas que motivaram a sua investigação foram sendo gradativamente realizadas conforme os avanços nas pesquisas oriundas do recém-descoberto Eletromagnetismo. Uma visão experimentalista contundente o fez elaborar um aparato para demonstrar que um fio condutor poderia girar livremente ao redor de um ímã fixo. Seu enfoque abrangeu os possíveis movimentos sofridos por uma agulha magnética estando próxima a um fio condutor – mais especificamente, tratando de verificar as posições de aproximação entre os eixos do fio e da agulha, combinando-os perpendicularmente.

> Faraday se convenceu, primeiramente, de que os pólos da agulha magnética não estavam exatamente nas suas pontas, mas a uma certa distância das extremidades, no eixo da agulha. Porém, o resultado mais importante dos experimentos foi que, repetindo-os e observando os movimentos, Faraday se convenceu de que, ao invés de sofrer atração e repulsão, o pólo magnético da agulha tendia a girar em torno do fio condutor (Dias; Martins, 2004, p. 522).

O sucesso de suas atividades foi alcançado em 1831. A fim de observar como uma corrente elétrica poderia ser induzida, isto é, produzida sem contato direto com fonte geradora de energia elétrica (bateria), Faraday construiu um anel de aço, com duas partes distintas e devidamente isoladas entre si. Em cada uma delas, enrolou fios em formas espirais, diferenciando-os pela espessura (enrolamentos) – sendo um dos lados do anel mais espesso que o outro. Designando por "B" o lado mais espesso, fez com que a ele fosse conectado um fio de cobre, colocado próximo a uma agulha magnética. O outro lado, "A", teve um de seus enrolamentos ligado a uma bateria. Conforme passou-se corrente por essa espira do lado "A", este ficou eletrizado. Nesse momento, observou-se a movimentação da agulha magnética. Essa deflexão foi possível graças à existência da corrente elétrica que passou a ser induzida no lado "B". Desta feita, como já era de se esperar, a agulha só poderia ser movimentada por influência da eletricidade percorrida nesse lado do anel. Eis que o fenômeno da *corrente elétrica induzida* foi verificado, o que acarretou em um aprofundamento e aperfeiçoamento dos aparatos experimentais, dando início a uma série de investigações mais profundas acerca de tal constatação.

Estando convencido da existência de uma *corrente de indução*, Faraday se preocupou em obtê-la diretamente de efeitos magnéticos. Sabendo das propriedades atrativas e repulsivas dos ímãs em função de sua polaridade, tratou de montar uma pinça com dois ímãs separados, de modo a juntar cada polo distinto – Norte (N) e Sul (S) – em uma das extremidades da pinça. No outro extremo, inseriu entre os outros dois polos, um pequeno cilindro enrolado por um fio de cobre. O arranjo foi feito de modo que o pequeno cilindro condutor pudesse estar em contato com os polos "soltos"de cada ímã. Percebe-que, com isso que, na outra extremidade, "unida" há a formação de um ímã permanente. Sem que houvesse qualquer tipo de ligação com uma bateria externa, notou-se a passagem de corrente elétrica através do fio envolto ao cilindro. Em outras palavras, a ação do ímã

permanente fez induzir a eletricidade no fio. Esse efeito foi notado sempre que havia contato entre os polos distintos dos ímãs, em uma das extremidades da pinça. Percebeu-se, assim, a geração de corrente elétrica por meio da indução magnética. Esta verificação experimental foi melhor demonstrada quando Faraday elaborou um experimento mais didático, usando um cilindro oco de papel, envolto por um fio de cobre cujas extremidades estavam ligadas a um galvanômetro (aparelho que afere a corrente elétrica por meio do movimento da agulha imantada). Ao aproximar, inserir e/ou afastar o ímã no espaço opaco do cilindro, uma corrente elétrica era detectada no medidor – a Figura 8 ilustra esse conceito.

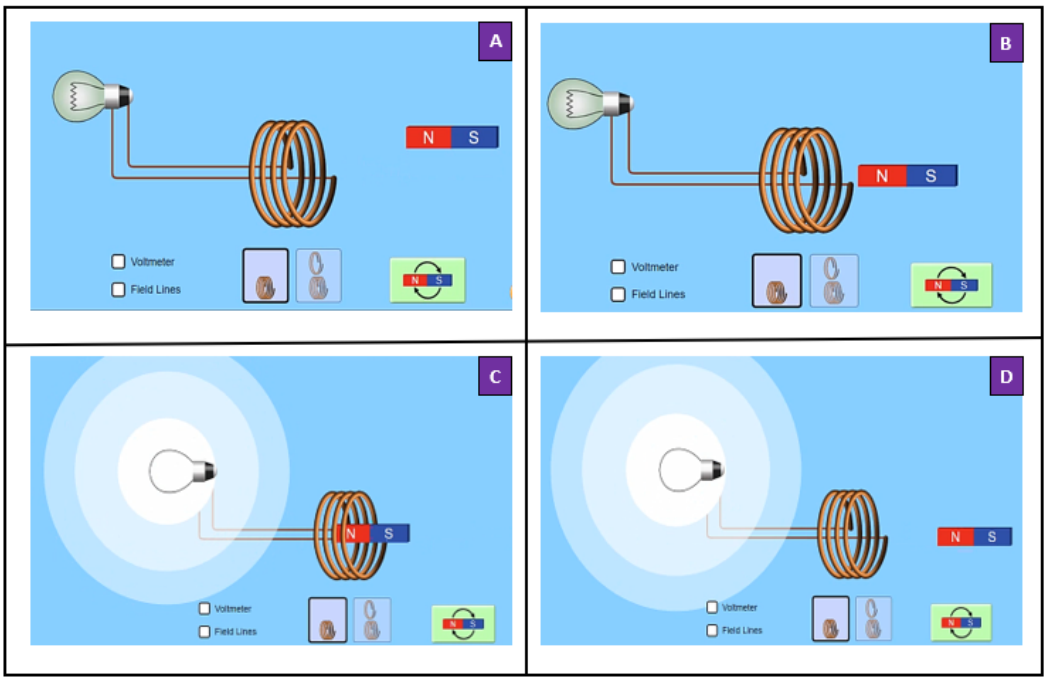


Figura 8 – Simulação experimental da Lei de Faraday. Neste conjunto formato por quatro imagens há um retrato da simulação do fenômeno de indução eletromagnética. No quadros "A" e "B" não há geração de corrente elétrica, pois o ímã está em repouso. Por outro lado, nos quadros "C" e "D", a manifestação da corrente elétrica é verificada pelo acendimento da lâmpada (em substituição ao galvanômetro originalmente utilizado por Faraday) após o ímã ser aproximado e/ou afastado do fio de cobre a ela conectado. Fonte: Adaptado de Phet, 2024.

Faraday formalizou a *Lei de Indução Magnética* (também chamada de *Lei de Faraday*), tendo comprovado o complementar do efeito descoberto por Oersted, isto é, ele mostrou que a eletricidade pode ser obtida através do magnetismo.

> Faraday já estava ciente de que era possível produzir correntes elétricas tanto a partir de uma outra corrente elétrica (a indução volta-elétrica) como pela variação magnética brusca (no experimento com a "pinça" formada por dois ímãs). Embora ele já tivesse tentado obter efeitos pela aproximação e afastamento de ímãs, não tinha obtido resultados, mas tais efeitos deviam existir. Por isso ele insistiu e no dia 17 de outubro

> de 1831 Faraday realizou o seu experimento mais conhecido, a indução de corrente pela movimentação de uma barra magnética dentro de uma bobina (Dias; Martins, 2004, p. 527).

A descrição da experiência destacada na Figura 8 requer uma replicabilidade prática baseada em certos detalhes que são observados durante a demonstração. Por exemplo, a intensidade com que corrente elétrica será manifestada na bobina depende diretamente de quão abrupta seja a forma de aproximação e/ou afastamento do ímã até o enrolamento condutor. Esse enredo fenomenológico pode ser melhor entendido com base na verificação matemática da Lei de Faraday – cuja formulação algébrica foi elaborada por Franz Ernst Neumann (1798-1895),[8] na segunda quadra do século 19 – que pode ser dada por:

$$\epsilon = \frac{d\phi}{dt}. \tag{2.2}$$

A Eq. (2.2) representa o equivalente matemático do fenômeno de indução eletromagnética. Para tanto, convém destacar cada termo da expressão e sua correlação com as respectivas grandezas físicas a ela associadas.

A ideia primaz da Lei de Faraday é mostrar como se obtém corrente elétrica por meio da variação do fluxo magnético. Essa corrente, naturalmente, está associada a manifestação da energia em forma de eletricidade, que por sua vez é alcançada mediante pertubação na linhas de campo magnético da região observada. A grandeza que caracteriza o *potencial elétrico* existente em função da variação do fluxo magnético na equação considerada está simbolizada por ϵ. Por convenção histórica ela ficou conhecida como *Força Eletromotriz* – embora não seja fiel à real definição de força, como vimos no início desta seção.

Embora já tenhamos conhecença do conceito de fluxo magnético (simbolizado por ϕ), se faz justo enfatizar que sua medida possui dependência com a intensidade do campo magnético (B) aferido em uma determinada área delimitada (A), através da quantidade de linhas de força observada nessa região. O mesmo fluxo magnético ainda depende do ângulo (θ) medido entre a reta normal à superfície considerada e as linhas de campo. Matematicamente[9],

$$\phi = B \cdot A \cdot \cos\theta\,. \tag{2.3}$$

A Figura (9) representa a interpretação gráfica de Eq. (2.3), que é válida para campos magnéticos uniformes e quando o ângulo (θ) entre B e A, permanece constante. No fenômeno de indução magnética, estamos interessados no fator variante do fluxo magnético em um dado intervalo de tempo, justificando o uso da derivada total como forma de aferir

[8] O alemão F. E. Newmann é considerado um dos mais brilhantes físicos teóricos da história. Suas inúmeras contribuições matemáticas corroboraram com o aperfeiçoamento de diversos experimentos, dentre eles, os relacionados ao fenômeno de indução magnética. (N. A.)

[9] No SI, o fluxo magnético é medido em unidades de Weber (Wb) – equivalente a $T \cdot m^2$ – em homenagem ao físico alemão Wilhelm Eduard Weber (1804-1891), como forma de perpetuar suas importantes contribuições ao estudo do magnetismo. (N. A)

essa taxa de variação, conforme imposto pela Eq. (2.2).

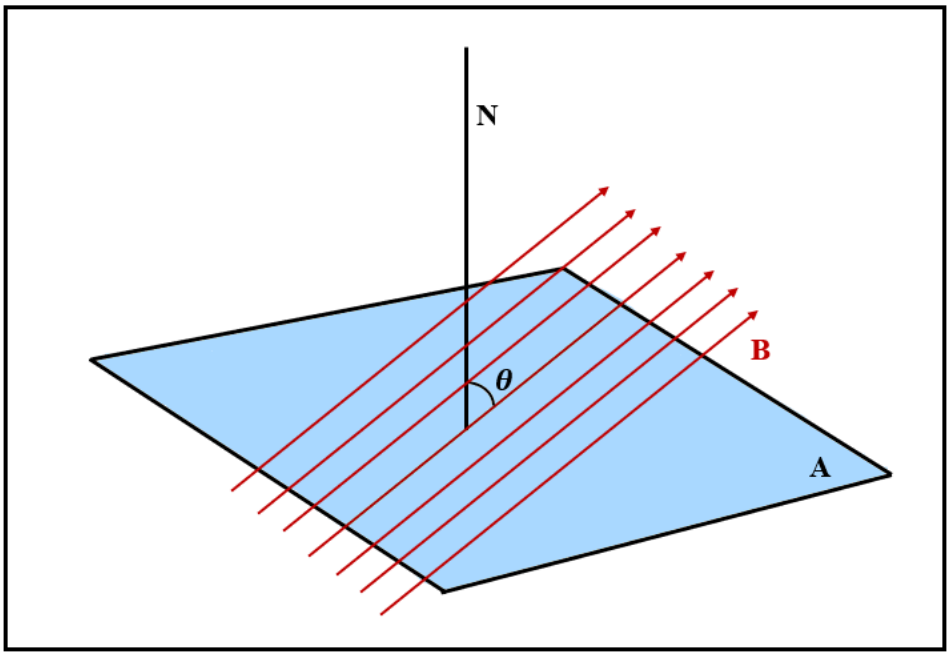


Figura 9 – Interpretação gráfica do fluxo magnético ϕ. Esta grandeza está associada à intensidade do campo magnético B. A quantidade de linhas de força que cruza uma determinada área fechada (A) está diretamente relacionada com o valor de ϕ, cujo módulo também possui dependência com o ângulo θ, medido entre as mesmas linhas e a reta normal à superfície considerada. Fonte: Imagem do autor, 2025.

Uma análise mais profunda acerca da Eq. (2.2) pode nos levar ao seguinte questionamento: uma vez que há a geração de energia elétrica, ela não deveria seguir o preceito elementar de sua conservação? Ou seja, a energia, como manifestação da natureza não é criada, mas sim transformada. Outrossim, sabendo que em todo processo de transformação há dissipação da energia associada para o sistema considerado, como então estabelecer uma lei que rege o fenômeno de indução magnética considerando esses efeitos fundamentais?

Com o fim de responder a essas e outras indagações, o brilhante físico estoniano Heinrich Friedrich Emil Lenz (1804-1865) propôs, na segunda quadra do século 19, uma releitura da Lei de Faraday com base na necessidade de se considerar a impossibilidade de gerar energia elétrica *ad aeternum*. Assim, ele adicionou um sinal negativo ($-$) ao lado direito da Eq. (2.2). Esta solução, simples em termos algébricos, garante uma fiel interpretação do fenômeno estudado. O sinal imposto está diretamente relacionado com o sentido de propagação das grandezas associadas. De modo que, o negativo ante à taxa de variação do fluxo magnético tem o fim de descrevê-lo como consequência do sentido da corrente elétrica gerada no condutor, em virtude da oposição entre o sentido do campo

magnético e a variação do fluxo magnético na região considerada (vide Figura 10). Assim,

$$\epsilon = -\frac{d\phi}{dt}, \tag{2.4}$$

a qual, em face de sua aplicabilidade e em consonância com os resultados experimentais, passou a ser chamada de *Lei de Lenz.*

Diante das notórias investigações que vinham sendo discutidas pela comunidade acadêmica que se debruçava em lapidar as bases conceituais do eletromagnetismo, por meio das suas implicações fenomenológicas e aplicações fabris, surge a genialidade de Maxwell para consolidar a fundamentação teórica necessária ao pleno entendimento das manifestações estudas nesse recém-formado ramo do conhecimento científico. O seu trabalho possui uma importância incomensurável na Física, uma vez que contém o arcabouço matemático suficiente para a explicação da coexistência mútua entre a eletricidade e o magnetismo. Seus apontamentos, organizados em forma de publicação no ano de 1873, consistem de um amplo formalismo algébrico que, de modo especial, comprovou a natureza ondulatória da luz, tendo sua propagação entendida como um entrelaçamento de informações sobre como os campos elétrico e magnético se revelam como face distintas do mesmo fenômeno.

Em virtude do sutil e denso tratamento matemático empregado para a obtenção das suas quatro equações, conhecidas como *Equações de Maxwell para o Eletromagnetismo*, optamos por simplesmente apresentá-las aqui sob a forma de integração.[10] Ei-las:

$$\begin{aligned}
\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{a} &= \frac{Q}{\epsilon_0} \\
\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{a} &= 0 \\
\oint_p \vec{E} \cdot d\vec{l} &= -\frac{d\,\Phi_B}{dt} \\
\oint_p \vec{B} \cdot d\vec{l} &= \mu_0 \left(I + \epsilon_0 \frac{d\,\Phi_E}{dt} \right)
\end{aligned} \tag{2.5}$$

Notemos que as equações supracitadas contém especialmente os símbolos: $\vec{B}$ e $\vec{E}$ que são usados para representar, respectivamente, os vetores campo magnético e campo elétrico. Em cada uma das expressões, a existência dessas grandezas ora se relaciona mutuamente, e/ou possui dependência com outras grandezas – tais como a corrente elétrica total I e a quantidade de carga elétrica Q, ou ainda com certas constantes próprias do meio em consideração – a exemplo de μ e ϵ, que foram definidas como permeabilidade magnética e permissividade elétrica, nessa ordem.

Todas essas relações matemáticas eram estudadas em separado, antes da teoria de Maxwell. A sua notória contribuição, contudo, surgiu visando corroborar com as obervações

[10] Convém destacar que o formalismo atual dessas equações foi elaborado pelo físico e matemático britânico Oliver Heaviside (1850-1925) (Halliday; Resnick; Krane, 2014). Convidamos o leitor à apreciar a demonstração completa, que se encontra no Apêndice D. (N.A.)

experimentais que buscavam descrever com cada vez mais precisão os fenômenos de natureza elétrica e magnética. A grandiosidade das equações (2.5) está justamente na faculdade de compilar os conceitos previamente estabelecidos e interpretá-los sob o olhar de uma só linguagem matemática, além de predizer que as ondas eletromagnéticas se propagam na velocidade da luz, culminando na edificação do Eletromagnetismo como um dos ramos mais importantes de toda a ciência.

> As quatro equações individuais eram conhecidas antes da época de Maxwell, e além da corrente de deslocamento (*termo associado ao valor total da corrente elétrica*) nenhuma outra predição surgiu de nenhuma outra das equações individuais. (...) quando as equações são combinadas surge uma nova predição – a existência de ondas eletromagnéticas e um valor para a sua velocidade (a velocidade da luz). Estas ondas foram previstas por Maxwell e descobertas por Heinrich Hertz em 1888, 15 anos após a teoria de Maxwell ser publicada (Halliday; Resnick; Krane, 2014, p. 322, grifo nosso).

Uma vez consolidada a fundamentação teórico-experimental da coexistência fenomenológica dos campos elétrico e magnético, a sociedade em modernização urgia por ser agraciada com aplicações tecnológicas industriais oriundas desse novo ramo de investigação científica. Essas evidências experimentais permitiram o aprimoramento dos equipamentos industrias amplamente utilizados pelo sistema fabril em plena produção no século 19. Desse modo, a indústria passou a destinar um amplo investimento nas atividades científicas, a fim de obter um crescimento em produtividade em conformidade com os avanços das descobertas nos laboratórios – em especial, nos estudos voltados ao eletromagnetismo.

Neste cenário extremamente favorável, surgiram os *motores elétricos*, tecnologia que visava impulsionar, melhorar e otimizar o trabalho das máquinas fabris fazendo uso dos conceitos elétricos e magnéticos em seu funcionamento. Um motor elétrico é um equipamento que produz trabalho mecânico através da energia elétrica. Esse novo aparato veio a substituir o motor de Watt, que como vimos, produzia movimento (energia mecânica), por meio da combustão do carvão. Tendo sido justamente essa substituição em termos da fonte energética utilizada para alavancar a produção, a principal melhoria trazida pelos motores elétricos, que têm consideráveis vantagens e aplicações, as quais serão explanadas ao longo deste documento.

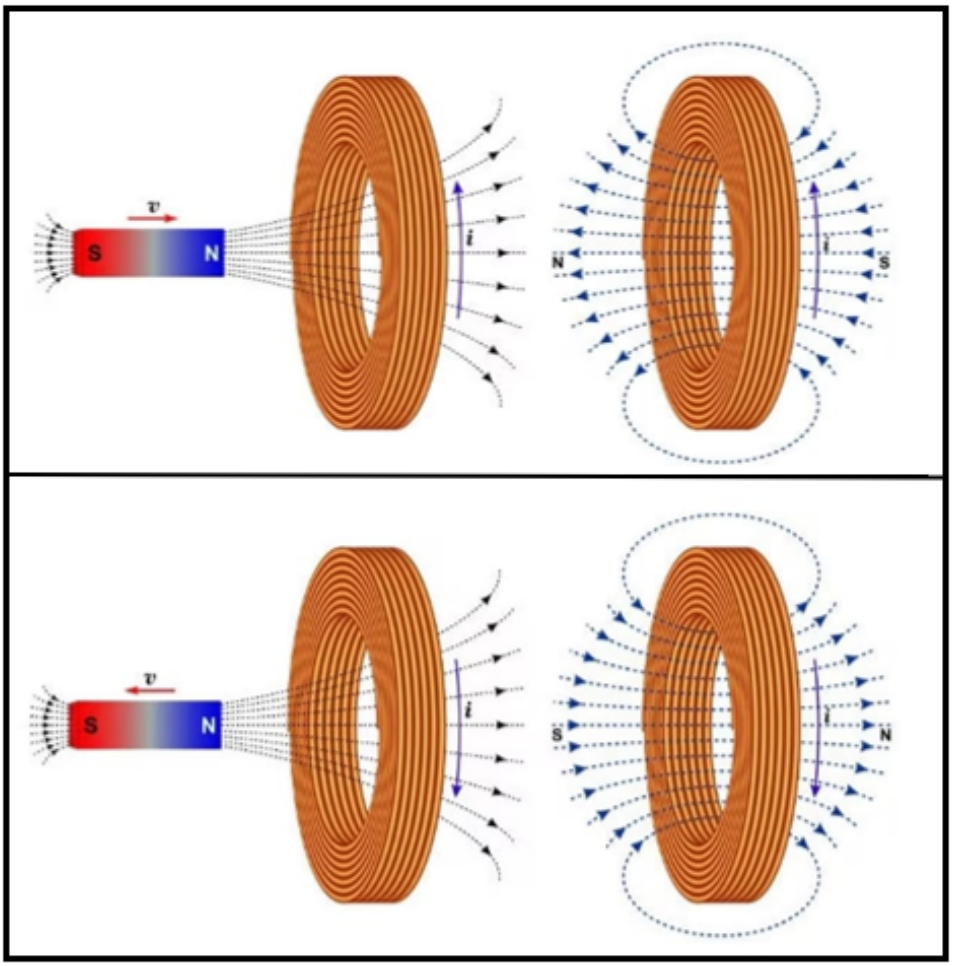


Figura 10 – Ilustração da Lei de Lenz. Quadro superior: o ímã se aproxima das espiras. Quadro inferior: o ímã se afasta da bobina. Em ambas as situações, atentemo-nos ao sentido de oposição entre o fluxo magnético variado pela movimentação (v) do ímã e o campo magnético gerado no interior da espira. Notemos também que para cada situação há um sentido adotado para a corrente elétrica (i). Fonte: Adaptado de Helerbrock, 2024b.

2.1.2 Motores e Geradores Elétricos

2.1.2.1 Motores Elétricos

Os motores foram criados com o fim de capacitar os equipamentos a produzirem movimento mecânico. A eficácia com que tais maquinários geravam movimento – isto é, facilitavam a tarefa braçal do homem na execução do trabalho – dependia do combustível utilizado. A restrição natural imposta pelo uso de materiais orgânicos para o funcionamento dos motores, a exemplo do carvão vegetal, se apresentava como limitação a ser sanada pelo sistema fabril da época. Com o avanço dos estudos do eletromagnetismo foi possível sofisticar essa tecnologia, fazendo uso da eletricidade como fonte de energia para o funcionamento dos motores. Assim, em consequência do emprego dos conceitos eletromagnéticos nesses equipamentos, a industria passou a ser impulsionada por esses

novos equipamentos, conhecidos por *motores elétricos*.

A natureza reservou para a energia um papel determinante na descrição dos fenômenos físicos. Esse tipo de manifestação pode ser observada sob variadas formas conforme os processos de transformação permitidos pelo sistema no qual ela está inserida. Para a tecnologia utilizada no motor elétrico, vemos que sua eficácia está embasada na possibilidade de se obter energia mecânica como resultado da produção de energia elétrica. O procedimento realizado, que culmina no pleno funcionamento desse maquinário, pode ser compreendido quando analisamos as etapas de conversão da energia, iniciado através da geração de energia elétrica por meio da sua correlação com o campo magnético induzido no interior do equipamento. Veremos mais adiante como o giro, isto é, o movimento de rotação, pode ser obtido em consequência da transformação da energia elétrica em energia mecânica.

A energia elétrica é resultado do movimento de portadores de cargas elétricas em um determinado condutor. Esse movimento, dito orientado, é conhecido por *corrente elétrica*. Desse modo, se há um meio que permite a passagem de corrente elétrica, há a geração de energia elétrica. Como vimos, a mais importante descoberta do eletromagnetismo foi a constatação da existência mútua entre os campos elétrico e magnético. Mais precisamente, sabemos que cargas elétricas geram campo magnético e que o campo magnético induz o movimento de cargas elétricas. A tecnologia usada para acionar o funcionamento dos motores elétricos parte da geração de corrente elétrica em virtude da existência de um campo magnético.

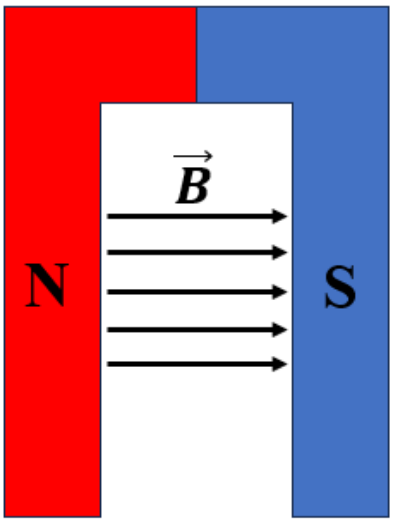


Figura 11 – Campo magnético de um ímã "U". Representação gráfica da existência do campo magnético $\vec{B}$ – região ilustrada pelas linhas de campo orientadas – gerado pela oposição dos polos de um ímã em formato de U. Fonte: Imagem do autor, 2025.

Baseado nesse conceito, a estrutura de um motor elétrico provê uma montagem inicial tal que nela haja um componente que produza campo magnético que interaja com a energia elétrica gerada por uma fonte externa - necessária para acionar o dispositivo. Esse arranjo pode ser feito utilizando ímãs – mais especificamente, os fabricados em formato de "U" – conforme ilustrado pela Figura 11. Essa ilustração nos ajuda a compreender de que forma o campo magnético $\vec{B}$ é gerado por esse tipo de ímã. Esse campo passará a interagir com a corrente elétrica que flui por um condutor inserido nessa região, de tal maneira a ser possível obter, por consequência da ação do torque magnético induzido, o movimento de giro desejado.

A Figura 12 está apresentada com o fim de observarmos os componentes e as ligações existentes para o funcionamento de um motor elétrico. Notamos as linhas de força na fronteira na qual há campo magnético $\vec{B}$ induzido pela presença dos ímãs, dispostos com os polos opostos. Nessa região há uma armadura (espira condutora) acoplada a um comutador – peça em formato de anel, que pode girar, conforme sentido indicado. Esse comutador, ligado ao fio condutor por meio das escovas de grafite, está conectado a uma fonte de energia externa (bateria) que provê o fluxo de corrente elétrica que passa pela espira. Essas cargas elétricas em movimento induzem a existência de um campo magnético externo, que interage com o campo magnético dos ímãs, fazendo girar a armadura, de tal maneira que o comutador direcione essa rotação conforme o torque magnético resultante. O movimento de giro do comutador, posteriormente, pode ser acoplado a outro mecanismo de rotação – isto é, um motor no sentindo literal – sendo possível estabelecer a correlação da geração de energia mecânica através da energia elétrica.

2.1.2.2 Geradores Elétricos

Uma vez que se dominou a tecnologia própria para o funcionamento dos motores elétricos, a comunidade científica se empenhou em melhorar os aspectos estruturais desses equipamentos. Como vimos, os motores elétricos convertem energia elétrica em energia mecânica. Diante disso, por que não pensar em um maquinário que pudesse operar de forma inversa? Isto é, como seria construída uma máquina que gerasse energia elétrica a partir do movimento mecânico? A busca por responder satisfatoriamente tais questionamentos culminou no surgimento os geradores elétricos – equipamentos que convertem energia mecânica em energia elétrica.

Os geradores elétricos são motores que produzem eletricidade. Isto nos leva a pensar que o funcionamento daqueles possui dependência com a estrutura básica destes. De fato, o arranjo mecânico de um gerador elétrico é formado majoritariamente com os componentes presentes na montagem de um motor elétrico. No entanto, a fim de obter o resultado energético próprio de sua construção, as ligações internas desse maquinário são

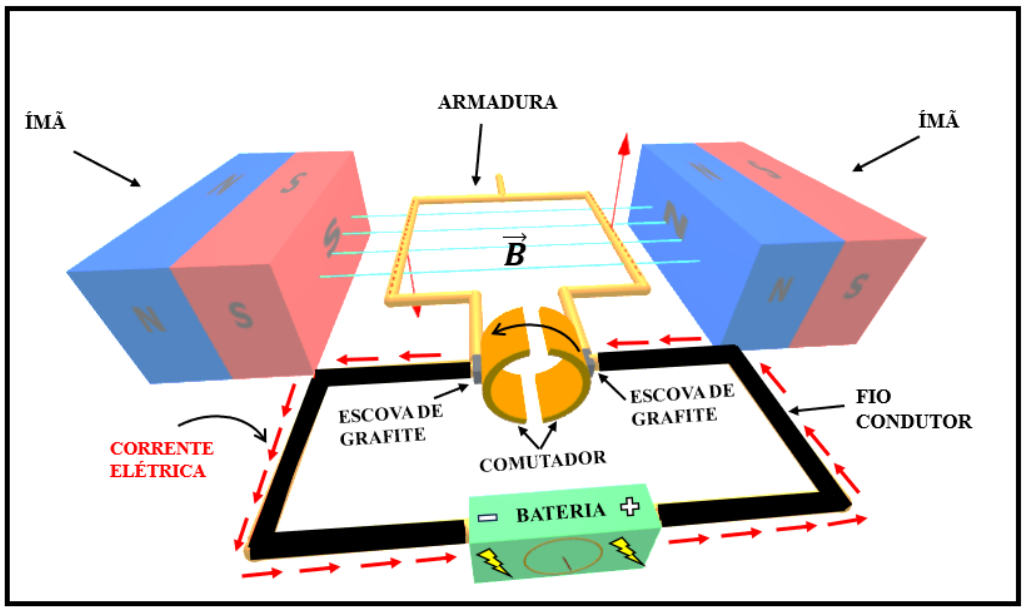


Figura 12 – Estruturação de um motor elétrico. Os polos opostos (N e S) dos ímãs produzem um campo magnético ($\vec{B}$) que interage com a corrente elétrica, acionando o movimento de giro, percebido pelo funcionamento do equipamento. Fonte: Adaptado de SimuFísica, 2023.

conectadas de maneira tal que seja permitida a conversão da energia mecânica em energia elétrica.

Podemos fazer uma analogia, sem perda de generalidade, com a motivação experimental que culminou na elaboração da lei de indução magnética. Dito de outro modo, tão logo a comunidade científica percebeu que a variação do campo elétrico proporcionava a geração de um campo magnético, foi possível trabalhar no processo contrário, isto é, investigou-se como o campo magnético poderia gerar campo elétrico. Partindo desse comparativo histórico-conceitual, queremos estabelecer uma relação de causa e efeito entre o funcionamento de um motor elétrico e de um gerador elétrico. Portanto, como é possível obter energia elétrica a partir da energia mecânica? A resposta desta pergunta nos condiciona a investigar um pouco mais sobre a estruturação de um gerador elétrico.

O gerador elétrico começa a funcionar por conta de uma ação que provém da manifestação da energia mecânica, que se caracteriza como a energia de entrada, isto é, aquela que aciona o equipamento. Essa condição é observada através de um sistema que permite o giro com o qual um determinado componente produzirá o movimento de rotação no interior do maquinário. Isso pode ser obtido de forma motora (fiel ao sentido literal), girando uma manivela, por exemplo – ou até mesmo utilizando um motor elétrico, visto que essa é a funcionalidade principal deste dispositivo. A ideia neste primeiro momento é fazer com que o giro obtido forneça energia magnética e, para tanto, é preciso que o componente a ser rotacionado (chamado de armadura) interaja com os ímãs. Tal peça

é inserida entre dois ímãs, estrategicamente acoplados de forma que seus polos estejam em sentidos opostos – de modo a haver uma convergência nas linhas de campo magnético surgida entre eles. A variação desse fluxo magnético induzirá um campo elétrico, cuja manifestação será observada no movimento das cargas elétricas existentes na peça metálica que chamamos de armadura. Dessa maneira, se torna apropriada a utilização de um componente (chamado de escovas condutoras/coletoras) que possibilite a orientação desse fluxo elétrico em um sentido específico. Essa corrente – que pode ser contínua (CC) ou alternada (CA)[11], a depender do tipo de escovas – percorre os fios conectados, produzindo assim um circuito elétrico. Notemos que nesse momento já houve a transformação da energia mecânica em energia elétrica (responsável pelo movimento das cargas no fio). A ilustração contida na Figura 13, traz uma representação pictórica do funcionamento acima descrito.

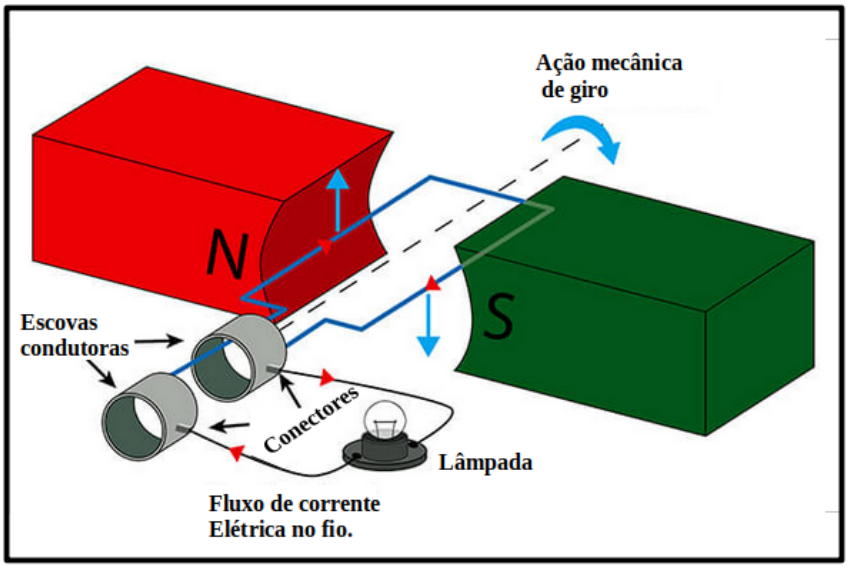


Figura 13 – Estrutura de funcionamento de um gerador elétrico CA. Processo de conversão de energia mecânica em energia elétrica. Destaque para a existência de duas escovas condutoras, as quais possibilitam a existência de uma corrente elétrica alternada que passa pelo fio. Fonte: Adaptado de Helerbrock, 2024a.

Temos, portanto, que o funcionamento de um gerador elétrico está condicionado à ação de diferentes tipos de energia: energia mecânica e energia potencial elétrica. A primeira se manifesta em função da existência do torque que rotaciona a armadura. A segunda, é constatada pela variação do fluxo magnético na espira, induzindo um campo elétrico, o qual possibilita o movimento das cargas elétricas através dos componentes condutores, permitindo assim a geração da energia elétrica – manifestada pelo acendimento da lâmpada.

[11] Ou ainda, AC/DC, caso sigamos o acrônimo em inglês para corrente alternada e corrente contínua, respectivamente. (N. A.)

Afinal, como seria viver em um mundo sem geradores elétricos? Certamente, um retrocesso de mais de duzentos anos de evolução. Isto é, seria como retornar à realidade vivida antes da segunda revolução industrial. Atos corriqueiros do nosso cotidiano seriam drasticamente alterados. Um mundo sem televisões, celulares, computadores e similares. Nenhum, absolutamente nenhum equipamento elétrico. Um retorno à escuridão. Um cenário inimaginável para o padrão digital imposto pela sociedade que presencia um avanço diário de novas tecnologias, permitido pelo constante desenvolvimento científico.

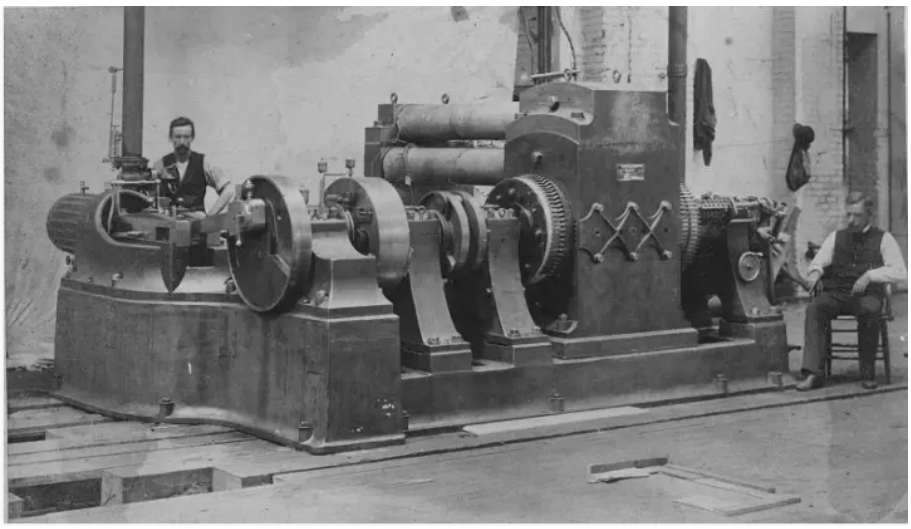


Figura 14 – Primeira usina geradora de eletricidade, 1882. Sistema de geradores elétricos construído pelo inventor estadunidense Thomas Alva Edison (1847-1931) com o fim de fornecer eletricidade à cidade norte-americana de Nova Iorque. Fonte: Mattede, sem data.

2.2 Fundamentos de Ensino

2.2.1 Cerne das teorias sócios-libertadoras por meio da organização de conceitos

Tendo em vista a necessidade de uma comunicação dialógica entre o ser que educa e aquele que é educado, fundamentamos nossa pesquisa educacional no pensamento libertador de Paulo Freire, que condiciona os professores e alunos em uma só missão, buscando validar o processo de ensino e aprendizagem em uma via de mão dupla na aquisição do conhecimento compartilhado (Freire, 2021). Correlacionamos essa dimensão pedagógica com a formação social de Lev Vygotsky por entender que a realidade do indivíduo exposto à erudição modela sua cognição e faz com que a percepção daquilo que se pretende ensinar passe a fazer parte do seu universo sensorial (Vygotsky, 1991). Afinal, "o conhecimento é uma visão total e instantânea da realidade" (Paz, 1984, p. 127). Desse

modo, considerar o seio escolar como esse ambiente contextual do aluno, fará com o que o professor se debruce em lapidar sua pedagogia em prol da difusão da sua instrução.

Iremos utilizar a ferramenta pedagógica conhecida por *Mapa Conceitual* com o intuito de destacar os principais conceitos que embasam as teorias educacionais que fundamentam nossa pesquisa. Esse tipo de linguagem conduz, por meio de uma interpretação gráfica, a compreensão dos pressupostos teóricos e a representação dos conhecimentos (dos mais variados temas), com base em uma organização conceitual (Novak; Cañas, 2010).

Notamos que tal alternativa didática tem respaldo como práxis educacional que corrobora com o lapidar do quefazer docente, dentro de uma perspectiva de ensino inovador. Nesse sentido, entendemos que ela condiz com a nossa pretensão instrucional, uma vez que os mapas conceituais são elaborados com o objetivo de explanar as principais ideias de um determinado conhecimento a ser compartilhado. Nosso intuito, portanto, é fazer com que os leitores tenham acesso à essa linguagem pedagógica como forma de apresentação dos fundamentos educacionais que permeiam a escrita do nosso material didático. Desse modo, aqueles que se debruçarem sobre o nosso produto educacional poderão analisar o quanto do conceitos norteadores que buscamos seguir estão presentes na linguagem e na metodologia utilizadas para a escrita do nosso livro.

2.2.1.1 O pensamento mediador de Lev Vygotsky

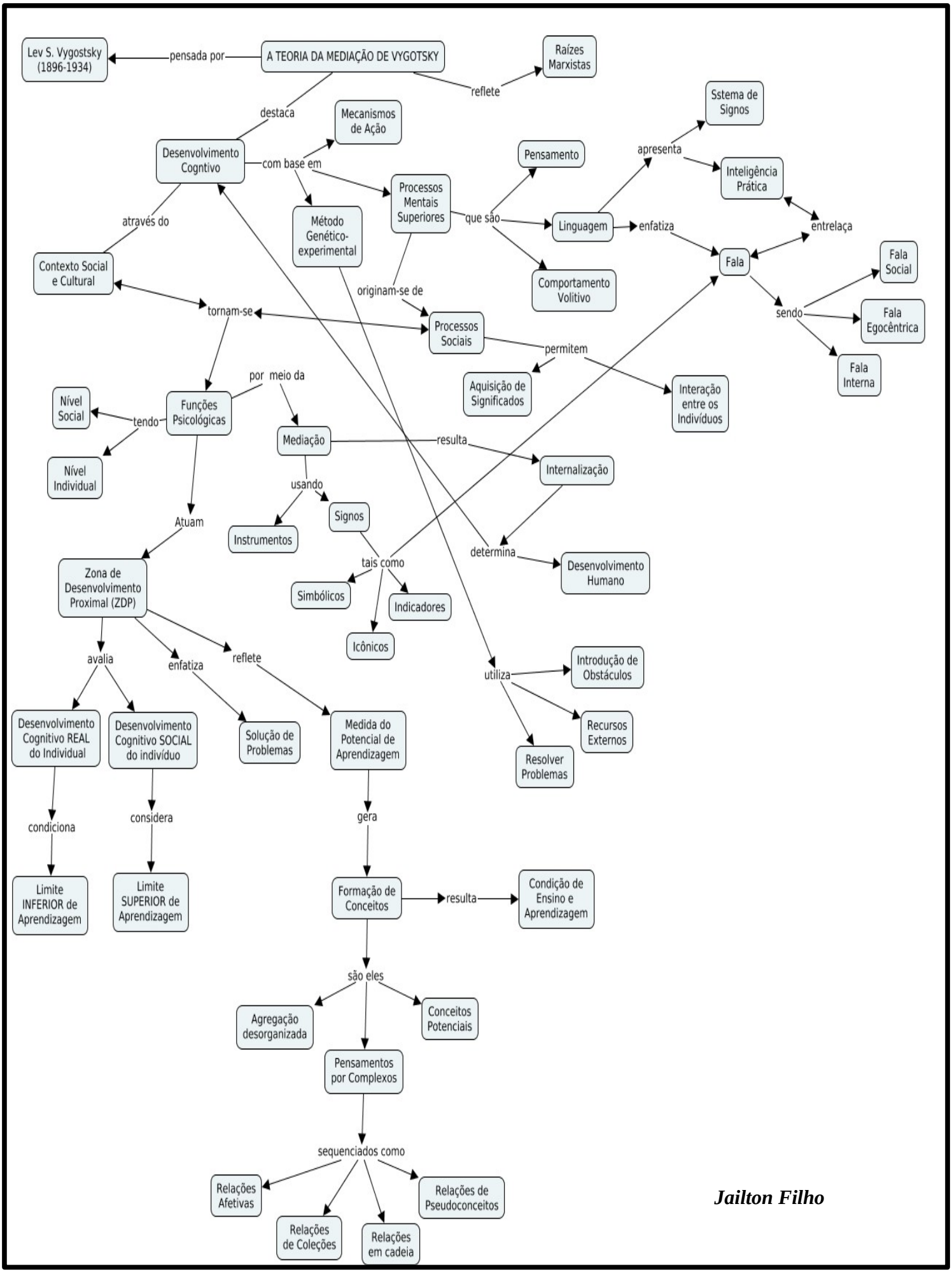
Conhecer a realidade do aluno, sua condição social e a forma com que ele enxerga o mundo ao seu redor, se apresentam como elo indispensável para alcançar o desenvolvimento cognitivo necessário à assimilação do conteúdo ao qual o estudante está sendo submetido. É preciso salientar que existe um caminho pelo qual a instrução deve percorrer para que ela seja compreendida pelo instruído de forma a contemplar fielmente aquilo que o instrutor compartilhou. Essa vereda engloba aspectos peculiares típicas das diferentes percepções e estruturas cognitivas de cada estudante. Afinal, "não é por meio do desenvolvimento cognitivo que o indivíduo se torna capaz de socializar, é na socialização que se dá os processos mentais superiores" (Driscoll, 1995, p. 229).

Por isso, a preocupação em apresentar um novo conceito deve considerar a região de conciliação entre o aprendiz e o professor. Essa atuação se (re)faz por meio da Zona de Desenvolvimento Proximal (ZDP) que contextualiza e socializa o novo conhecimento a partir de uma nova abordagem conceitual fincada na assimilação previamente existente na cognição do aluno.

> A zona de desenvolvimento proximal é a distância distância entre o nível de desenvolvimento real, que se costuma determinar através da solução independente de problemas, e o nível de desenvolvimento potencial, determinado através da solução de problemas sob a orientação de um adulto ou em colaboração com companheiros mais capazes.[...] A zona de desenvolvimento proximal define aquelas funções que ainda não amadureceram, mas que estão em processo de maturação, funções que amadurecerão, mas que estão presentemente em estado embrionário. Essas funções

> poderiam ser chamadas de “brotos” ou “flores” do desenvolvimento, ao invés de “frutos” do desenvolvimento. O nível de desenvolvimento real caracteriza o desenvolvimento mental retrospectivamente, enquanto a zona de desenvolvimento proximal caracteriza o desenvolvimento mental prospectivamente (Vygostky, 1991, p. 58).

A seguir apresentamos os principais elementos da metodologia mediadora de Vygostky em forma de um mapa conceitual.



Jailton Filho

2.2.1.2 A metodologia problematizadora de Paulo Freire

O educando que recebe a instrução por meio de um educador libertador, está condicionado a ser, junto com este, um agente transformador social. A educação recebida, portanto, passa ser incorporada como sinônimo de identificação, tendo seu compartilhamento dado em função da troca de conhecimento em uma ciclicidade evolutiva. Desse modo, o aprendizado se reflete como um ato contínuo do ensinar, que modifica tanto o professor, quanto o aluno, em forma de ações concretas que refletem um pensamento crítico e problematizador. A Figura 15 ilustra um mapa conceitual que sintetiza esse pensar freireano, uma vez que "o medo vem do sonho que você tem sobre a sociedade que você quer fazer e desfazer através do ensino e de outras políticas"(Shor; Freire, 1986, p. 70).

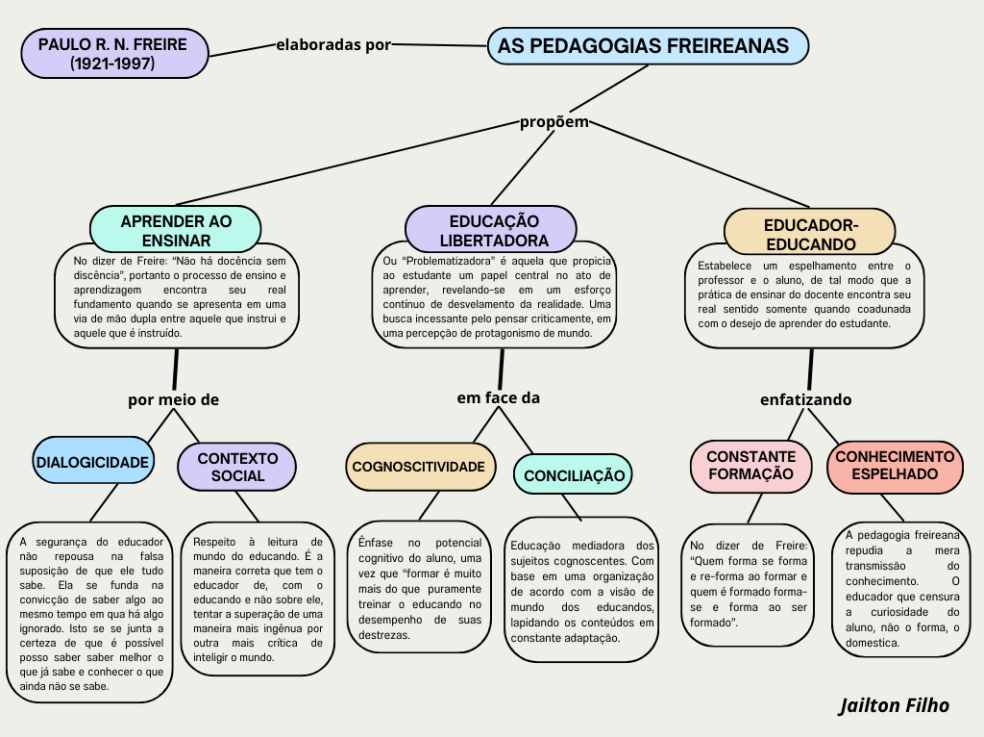


Figura 15 – Mapa Conceitual: As Pedagogias Freireanas. Compêndio do pensamento problematizador de Paulo Freire, apresentado em forma de uma sequência organizacional que contempla os principais pontos abordados em sua teoria educacional. Fonte: Imagem do autor, 2025.

3 Revisão da Literatura

3.1 A pedagogia escolar como expressão da linguagem sócio-libertadora

Uma das características mais importantes que um educador precisa manifestar na desafiadora tarefa de exercer a docência – sobretudo no âmbito da educação básica – se revela no cuidado e sutileza ao apresentar o seu trabalho como atividade capaz de modificar a visão de mundo de seus educandos. Isso significa que a práxis instrucional que almeja uma verdadeira transformação social não pode se limitar à exposição de um determinado assunto durante certo período cronometrado. Por isso, o lapidar do quefazer diário do professor – antes, durante e depois das aulas – é fator determinante para que suas práticas pedagógicas dialoguem para uma real assimilação daquilo que ele está se propondo a ensinar. Isso implica diretamente na maneira com a qual sua transposição didática está delineada, considerando a metodologia utilizada e os recursos investigativos (e. g. demonstrações experimentais e simulações computacionais) escolhidos, de tal modo a buscar uma fina sintonia com o olhar aguçado do alunado, que urge por alternativas instrucionais palpáveis e condizentes com sua rotina de aprendizagem.

> A prática pedagógica envolvendo a utilização dos projetos didáticos é uma alternativa que favorece a criação de estratégias de integração dos conhecimentos de vida e da escola em alunos jovens e adultos. [...] Com essa prática, os alunos jovens e adultos podem melhorar seus conhecimentos científicos, pois, partindo de seus interesses e conhecimentos construídos na vida e no trabalho, é possível que consigam relacionar esses conhecimentos prévios com conhecimentos científicos abordados na disciplina de Física, aumentando a possibilidade de aprendizagem significativa (Espíndola; Moreira, 2006, p. 55).

Ao ambientar os alunos na temática proposta, considerando os anseios e particularidades de cada indivíduo, passamos a considerá-los como agentes transformadores do saber a ser compartilhado, fazendo com que as trocas de experiências por eles vivenciadas, convirjam para o mesmo fim educacional, contribuindo para realização desse trabalho como a atividade modificadora almejada. Esta atividade, que é a manifestação do desejo por meio de uma atitude, se torna eficaz no processo de validação e justificação do conhecimento quando provém da aplicação de pedagogias inovadoras, corroborando para a melhoria do desempenho dos estudantes. Estes, influenciados pela real possibilidade de modificar o mundo ao seu redor, agem amparados por ações pedagógicas que não se limitam à obtenção de respostas com padrões superficiais. Para tanto é preciso que as asserções de valores sobre o estudo da natureza, suas transformações e implicações científico-sociais, revelem-se como fonte oportunizadoras de mecanismos de ensino e aprendizagem que coadunem com os avanços tecnológicos percebidos pela mundo contemporâneo.

> Professores e alunos passam a descobrir, a pesquisar juntos, a construir e/ou produzir o conhecimento científico, que deixa de ser considerado algo

> sagrado e inviolável. Ao contrário, está sujeito a críticas e a reformulações, como mostra a própria história de sua produção. Dessa forma, aluno e professor reconstróem a estrutura do conhecimento. Em nível de prática pedagógica, isso significa romper com a concepção tradicional que predomina na escola e promover uma nova forma de entender a produção do saber. É desmitificar o espírito da neutralidade da ciência e da tecnologia e encarar a responsabilidade política das mesmas. Isso supera a mera repetição do ensino das leis que regem o fenômeno e possibilita refletir sobre o uso político e social que se faz desse saber. Os alunos recebem subsídios para questionar, desenvolver a imaginação e a fantasia, abandonando o estado de subserviência diante do professor e do conhecimento apresentado em sala de aula (Pinheiro; Bazzo, 2007, p. 77).

A aproximação do professor e aluno unidos em prol de uma conexão pedagógica que espelhe o compartilhamento do conhecimento pode ser consolidada quando aplicamos as frentes de pensamento de Freire e Vygostky como esteios de pensamento para a interatividade própria do ambiente escolar. Entendemos ser coerente utilizarmos os fundamentos de ambas as teorias buscando o entrelaçamento cognitivo, uma vez que precisamos entender e compreender as relações humanas do estudante e como a sua percepção de mundo pode ser utilizada como base norteadora para que a atividade externa – isto é, a realização da tarefa – possa dialogar com a sua cosmovisão social a fim de que o saber seja compartilhado. Deseja-se entender o aluno para que este possa ser o centro da exposição compartilhada de ideias, por meio da ação do professor que age em razão de elaborar alternativas pedagógicas – como o desenvolvimento e aplicação de um material didáticos – que visam nortear o ensino do qual se propõe a apresentar aos seus discentes.

> Para o educador-educando (*elo inquebrantável na educação libertadora*) o conteúdo programático da educação não é uma doação ou uma imposição — um conjunto de informes a ser depositado nos educando – mas a devolução organizada, sistematizada e acrescentada ao povo daqueles elementos que este lhe entregou de forma desestruturada (Freire, 2021, p. 116, grifo nosso).

Neste cenário, almeja-se que elo educacional – isto é, a altivez do pensar libertador – seja impulsionado mediante a produção e aplicação de projetos pedagógicos que reflitam a identidade dos educadores em face da realidade sócio-cognitiva dos educandos. Essa prática se apresenta como ferramenta instrucional basilar na aplicação pedagógica sob a visão de uma constante preocupação e contextualização social dos conteúdos propostos. Considerando que o próprio docente acumulou experiência consonante com a intervenção proposta, se faz indispensável que a abordagem instrucional por ele sugerida seja compatível com a sua formação sócio-científica, de forma a encontrar subsídios de aplicação na vivência dos estudantes.

A aquisição de uma consciência sócio-libertadora não se verifica na adaptação do pensamento mediante uma imposição de ideias. Somente com a dialogicidade pode haver o compartilhamento do conhecimento, que resulta na recíproca esperada entre o ensino e a aprendizagem. Dessa forma, o saber vai sendo construindo em comunhão, mediante troca

de experiências entre o professor, o qual orienta seus educandos a perceber que, juntos, eles sabem muito mais do que julgam saber. “Só existe saber na invenção, na reinvenção, na busca inquieta, impaciente, permanente, que os homens fazem do mundo, com o mundo e com os outros. Busca esperançosa também” (Freire, 2021, p. 81).

Em outras palavras, o educador libertador guia o seu educando a fim de lhe mostrar que o conhecimento oferecido tem aplicabilidade na sua própria construção da realidade. Com isso, o indivíduo, já no ato do recebimento da instrução, passa a se enxergar como elo entre o “pensar” e o “agir”, condição dialógica, necessária e suficiente para que ocorra o aprendizado libertador. Pensar certo induz o fazer certo.

> Só, na verdade, quem pensa certo, mesmo que, às vezes, pense errado, é quem pode ensinar a pensar certo. [...] Pensar certo, demanda profundidade e não superficialidade na compreensão e na interpretação dos fatos. Supõe a disponibilidade à revisão dos achados, reconhece não apenas a possibilidade de mudar de opção, de apreciação, mas o direito de fazê-lo. [...] Do ponto de vista do pensar certo não é possível mudar e fazer de conta que não mudou. Todo pensar certo é radicalmente coerente (Freire, 1996, p. 27-34).

A literatura revisada sob a perspectiva de reflexão inquiridora defende uma implementação curricular contrária ao padrão binário tradicional — isto é, aquele que remete ao questionamento frio, com perguntas cujas elaborações das respostas se resumem friamente a “certo” e “errado”. Desse modo, em um contexto que engloba educação problematizadora em sua face de interação científica, tecnológica e social, os alunos são provocados a encarar as situações problemas não como espectadores ou emissores de opinião, mas como agentes modificadores da realidade a qual estão inseridos, expondo-os a uma gama de possibilidades à elaboração das resoluções.

A linguagem social própria do indivíduo que está sendo instruído precisa ser compreendida como uma fiel expressão do seu pensamento. Para tanto, precisamos estabelecer um elo dialógico tal que seu comportamento cognitivo passe a ser vinculado ao pensamento e à ação. Nesta perspectiva, a educação libertadora pede que busquemos auxílio na visão pedagógica vygostskyana, a qual nos propõem que exploremos determinada região cognitiva da mente para que a instrução seja disseminada de modo a obter o novo, isto é, o aprendizado refletido sob a ótica de quem está aprendendo. A essa fronteira do conhecimento com a qual precisamos – enquanto agentes do processo educativo –, permanecer inseridos, Vygostsky chama de *Zona de Desenvolvimento Proximal (ZDP).* Ela nos revela a necessidade de conhecer o ambiente ao qual os estudantes estão condicionados a viver para que seja possível alcançar êxito na troca de conhecimento no decorrer do processo de instrução.[1] Quanto mais imbuídos estiverem os educadores na tentativa de entender a realidade social dos educandos, maior será o êxito de aplicabilidade das respectivas metodologias didáticas sugeridas.

[1] Lev Semyonovitch Vygotsky (1896-1934), pensador bielorrusso, um dos mais influentes teóricos da aprendizagem do século 20. Sua obra teve a pretensão de apresentar a mediação simbólica como elo entre o desenvolvimento cognitivo e a aprendizagem contextualizada, dentro e fora da escola. (N. A.)

> No processo de ensino e aprendizagem em Física vemos como essenciais tanto a mediação do outro quanto a mediação semiótica, uma vez que as ações realizadas com a colaboração de alguém mais capaz,no âmbito da Zona de Desenvolvimento Proximal (ZDP) – isto é, dentro dos limites da capacidade de entendimento dos estudantes, considerando o seu nível de desenvolvimento real e projetando atividades que o levem para além deste – podem potencializar a aprendizagem. Além disso, ao se utilizar das palavras adequadas nas interações e considerando que vários são os sentidos (compreensões dos estudantes) que interferem no processo, o professor poderá traçar suas estratégias para que os significados em constituição como conceitos, princípios e modelos da Física, possam ocorrer sistematicamente. No tratamento dos conteúdos escolares, o papel da palavra enquanto instrumento material e psicológico, isto é, um signo que tanto pode indicar o objeto em estudo quanto representá-lo como conceito (um instrumento do pensamento), constitui fator essencial na formação do pensamento teórico e na composição da linguagem escrita (como um sistema simbólico). Assim, os estudantes estarão realizando internalizações dos conhecimentos de Física que lhes permitirão novas compreensões da situação em foco e a tomada de consciência (Gehlen et al., 2012, p. 78-79).

3.2 O estado da arte do ensino do eletromagnetismo como proposta de intervenção didática para a educação básica

Um ambiente escolar que prioriza a educação como fonte libertadora provê a inserção do aluno em uma posição de questionador frente às concepções pré-estabelecidas, tanto à sua própria cognição — isto é, sua percepção de mundo —, quanto aos conteúdos que lhe são apresentados. Com o uso de uma prática pedagógica que dialoga com a linguagem e o contexto social do público alvo, o estudante se enxerga em uma posição que o capacita a tomar decisões críticas, consistentes e coerentes a fim de resolver, com o devido embasamento científico, as eventuais situações problemas com as quais se depara no decorrer da sua formação.

> Romper uma velha maneira de ensinar e aprender é um grande desafio, visto que, além desse rompimento a escola tem o desafio de se atualizar frente a era digital, não apenas nos recursos didáticos, mas também com os recursos humanos. Uma vez que a escola tem papel fundamental na construção da sociabilidade dos indivíduos, o que contribui para uma sociedade mais crítica, onde os atores sociais tenham a oportunidade de serem formadores de opinião (Pizani; Oliveira, 2015, p. 3).

Consideramos que uma abordagem que ressalta a exposição compartilhada dos conceitos propicia um ambiente de aprendizado recíproco entre os personagens da sala de aula. Modelados pela instrução do educador, os educandos são instigados a pensar criticamente sobre os conteúdos a serem discutidos no processo de validação e justificação do conhecimento ora ofertado. Podemos destacar, inclusive, que essa pedagogia encontra respaldo teórico no campo das metodologias de ensino interativas e tem sido eficaz no desenvolvimento cognitivo daqueles de cujo aprendizado é compartilhado.

Pautados nessa frente mobilização instrucional, buscamos correlacionar o letramento científico com o engajamento contextual e social dos agentes que desenvolvem as ações no ambiente da sala de aula.

> Desta forma, os nossos conhecimentos e decisões têm uma origem externa, formando-se a partir dos intercâmbios de linguagem estabelecidos nos múltiplos contextos do dia-a-dia: em casa, na rua, nos programas de televisão, nos jornais, na rádio, nas salas de aula, nas reuniões formais e informais, entre outros. O nosso discurso sobre conhecimentos e questões públicas é influenciado pelos diálogos em que participamos ou a que assistimos previamente (Reis, 2009, p. 13, tradução nossa).

Sob a ótica do ensino de Física, a inserção de uma pedagogia que destaca o pensamento libertador torna-se indispensável quando se deseja uma real participação do aluno como protagonista daquilo se aprende. A instigação ao questionamento ambientado nas percepções sintonizadas em prática e teoria — isto é, o estudante percebe a utilidade do conteúdo estudado mediante suas implicações no mundo em que ele está inserido —, provê a problematização contextualizada, basilar à educação problematizadora. No entanto, esse elo precisa ser construído por meio de esforços mútuos, desde a estruturação escolar até a formação continuada dos professores, os quais revisitam suas notas de aula do modo a sociabilizá-la com metodologia, enfatizando as potencialidades do aluno.

> Não basta que os professores possuam uma visão filosófica e sociologicamente mais rica e reflexiva sobre a ciência e as múltiplas interações com a tecnologia, sociedade e o ambiente, pois a coerência entre essas concepções e a prática de sala de aula é mediada por um conjunto diversificado e complexos de fatores. Unicamente através da sua compreensão e da definição de estratégias para ultrapassar esses fatores, será possível acalentar a esperança de uma educação científica mais real, humana e social e ambientalmente relevante (Reis 2007, tradução nossa).

Neste sentido, o pensamento problematizador está inteiramente condicionado com o "saber pensar". Em uma abordagem freireana, e portanto libertadora, o professor traz consigo a responsabilidade de propiciar as bases para um posicionamento sócio-educacional condizente com o questionamento vivenciado. Tal contextualização se verifica no conjunto da sua prática docente, que tem como combustível propulsor a consciência de que nada pode ser sabido (e aprendido) de forma individual. O "saber" requer o "pensar", e este só encontra real significado se for compartilhado. O ser que age com o intuito puramente mecanicista de reproduzir algo que leu em algum material de instrução, não se enquadra na condição de agente social. Este, por sua vez, é fruto de uma educação vindoura do pensar criticamente, mediante sua predisposição de conhecer e intervir em seu mundo. É preciso perceber a utilidade daquilo que lhe é exposto como tarefa de aprendizagem em seu cotidiano.

Na proposta de ensino por abordagem aqui defendida, pretendemos estabelecer bases pedagógicas consistentes e eficazes para o estudo do eletromagnetismo. Uma vez que

> Os alunos estudam o eletromagnetismo sem refletirem sobre as diferenças fundamentais entre os conceitos ali apresentados. Em geral, não perce-

> bem que, [...] explicita-se uma forte relação entre fenômenos naturais aparentemente distintos, um fenômeno elétrico podendo ser gerado por um magnético e vice-versa. A questão da possibilidade de conversão é um problema filosófico muito caro à ciência e, em um ensino puramente instrumental, voltado exclusivamente aos produtos científicos e tecnológicos, é deixado de lado (Guerra; Reis; Braga, 2004, p. 232).

No contexto que permeia a produção oriunda das pesquisas consolidadas pelo Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF), ao longo dos seus 13 anos de existência (a serem completados em 2025), destacamos a elaboração de 1680 produtos educacionais – como consequência da formação de 1680 mestres – (MNPEF, 2025). Essa vasta publicação abrange temas voltados exclusivamente para o ensino básico, com o fim de fomentar e aperfeiçoar as práticas pedagógicas dos professores de Física que atuam, majoritariamente, em turmas do ensino médio.

Nessa gama de produção, convém destacar que existem diferentes tipologias que englobam a elaboração desses produtos educacionais, os quais são classificadas de acordo com a estruturação pedagógica que cada autor estabelece para o seu trabalho (Casanova; Zara, 2020). Assim, podemos encontrar: Sequências Didáticas; Roteiros Didáticos; Sequências de Ensino e Aprendizagem (SEA); Sequências de Ensino Investigativo; Unidades de Ensino Potencialmente Significativas (UEPS); Materiais Didáticos, Material Potencialmente Significativo (MPS); Guias ou Manuais; Jogos e Vídeos.

A fim de situarmos a posição de nosso trabalho em relação às demais publicações do MNPEF, realizamos uma levantamento bibliográfico destacando quantos produtos educacionais estariam minimamente alinhados com a proposta de ensino e aprendizagem que trazemos nesta dissertação. Para isso, prosseguimos com uma verificação na base de dados da CAPES e do *Google Scholar* com o fim encontrar produtos educacionais que pudessem ter algumas das seguintes palavras-chave em comum: livro didático, magnetismo; freire; vygotsky.

A investigação realizada por (Casanova; Zara, 2020) nos mostra que o conteúdo do Magnetismo figurou entre os temas menos presentes nos produtos educacionais publicados entre 2013 e 2018. Considerando somente o último ano dessa pesquisa, por exemplo, verificou-se que apenas 3 dos 60 trabalhos publicados (menos de 5% do total) versam sobre os conceitos magnéticos na natureza.

A pesquisa de (Pereira; Erthal, 2022) analisou todos os trabalhos do MNPEF publicados entre 2013 e 2020. Esse detalhamento investigativo nos permite observar, de maneira geral, à menção e/ou utilização dos pensamentos de Freire e Vygostky, bem como o estudo dos conceitos de eletromagnetismo existentes nessas publicações. Foi verificado que das 1376 dissertações consolidadas, apenas 139 (cerca de 10% do total) abrangem os conceitos físicos do eletromagnetismo em seu conteúdo (vide Figura 16). No que concerne

aos referencias teóricos explícitos[2] nas dissertações do MNPEF, constatou-se que entre as 1323 analisadas, 239 delas trazem o pensamento vygostkyano como teoria fundamental (figurando como o segundo tema mais utilizado, cerca de 15% do total) e apenas 50 (3, 7%) apresentam a pedagogia de Freire como fundamentação teórica norteadora.

No que concerne aos livros didáticos, as produções do MNPEF, que recorrem à essa tipologia, se debruçam majoritariamente na análise críticas (com diversos fins) de os materiais que já são realidade para o ambiente escolar. Isto é, não se verifica assiduamente a pretensão de publicar um livro didático e/ou paradidático como produto educacional. Exceções à essa tendência são, além da nossa proposta, os trabalhos de (Oliveira, 2019) e de (Moura, 2017). Todavia convém destacar que não percebemos nestes e em nenhuma outra produção similar, uma dimensão educacional que visa abranger o entrelaçamento teórico-experimental contido em nossa proposta pedagógica. Isso se dá, sobretudo, pelo viés exclusivo dos experimentos que foram elaborados por nosso grupo de pesquisa e extensão, os quais modelaram a abordagem conceitual descrita no nosso material instrucional. Ainda podemos citar outros elementos exclusivos que trazemos na nossa pesquisa educacional, a exemplo da metodologia de investigação lapidada para a escrita e editoração do livro, bem como os parâmetros utilizados para aferir o impacto dessa pedagogia inovadora na sala de aula.

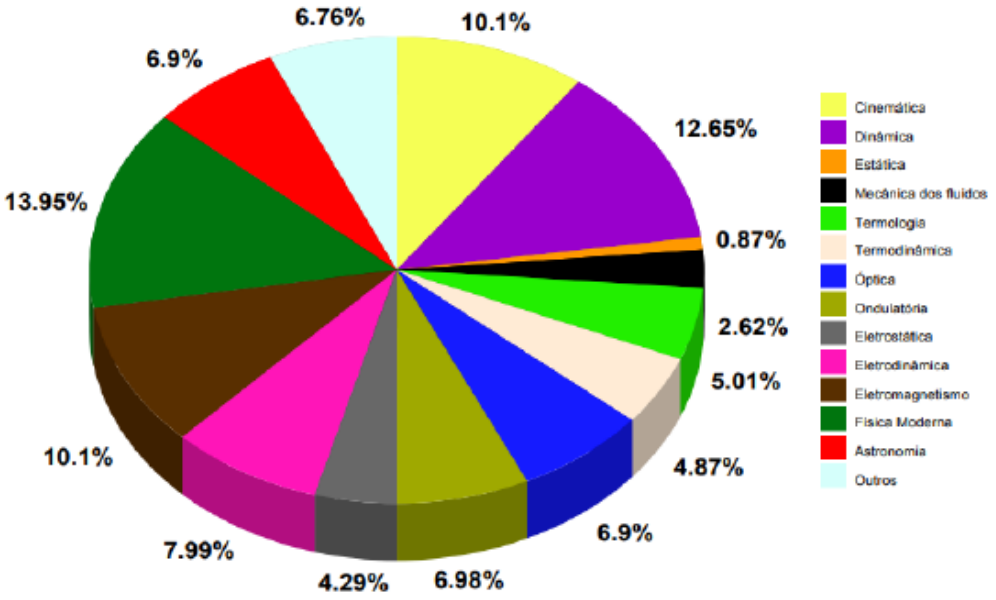


Figura 16 – Conceitos físicos presentes nas dissertações do MNPEF. Análise estatística realizada englobando todos os trabalhos publicados entre 2013 e 2020. Destacamos o percentual referente ao tema Eletromagnetismo (cerca de 10%). Fonte: Pereira; Erthal, 2022.

[2] Segundo (Pereira; Erthal, 2022), no período abrangido pela pesquisa, foram analisadas 235 dissertações que não traziam um referencial teórico explícito como sustentação da pesquisa educacional. Tal constatação traz à luz um alerta sobre como alguns trabalhos não estão em sintonia com os moldes exigidos pelo MNPEF. (N. A.)

Outrossim, um levantamento feito através de alguns dos periódicos mais conceituados na área de ensino de Física, tais como *Revista Brasileira de Ensino de Física*; *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*; *Investigações em Ensino de Ciências*; *Experiências em Ensino de Ciências*, entre outros meios de divulgação/publicação científica e educacional, nos rendeu diversos trabalhos que entrelaçam as teorias vygotskyana e freireana – por exemplo, (Pizani; Oliveira, 2015) e (Birznek; Higa, 2017). Por outro lado, não constatamos nenhum documento, publicado até o ano de 2024, que coadunasse o ensino do magnetismo por meio da elaboração de um livro didático nos moldes propostos em nosso produto educacional.

Neste sentido, o produto educacional escrito no decorrer desta pesquisa foi elaborado de acordo com a percepção contextual relacionada à necessidade de estabelecer um espelhamento entre os aspecto instrumental e os conceitos epistemológicos pertinentes ao enredo conceitual abordado. Outrossim, a relevância de uma perspectiva de ensino e aprendizagem edificada pela dialogicidade entre o educador, o educando e o produto educacional, visa subsidiar práticas pedagógicas que prezam pela compreensão do conteúdo explanado em função da metodologia com a qual ele foi apresentado. Desse modo, podemos justificar e sublinhar a urgência de termos materiais didáticos, que dialoguem reciprocamente com o ser que recebe a instrução, considerando seu processo de assimilação mediante uma abordagem alternativa que reflita sobre os aspectos científicos, sociais e tecnológicos da temática ensinada.

> É nas ações do professor (construtivista) com esse material que se reforçam e se ampliam significados para um aluno que quer aprender. [*De tal maneira a ser possível*] tornar as aulas de física mais desafiadoras e reflexivas, promovendo o desenvolvimento do pensamento crítico, da argumentação fundamentada (Peduzzi, 2011, p. 18-19, grifo nosso).

4 Metodologia de Ensino

4.1 Elaboração e Desenvolvimento do Produto Educacional

Amparando-nos na pedagogia libertadora freireana e na teoria mediadora vygotskyana, propomos um produto educacional que dispõe de uma nova abordagem instrucional sobre o magnetismo associado à construção de motores elétricos. Este trabalho detalha tal pretensão como fruto de um estudo que buscava ensinar os conceitos do magnetismo em uma linguagem que pudesse dialogar melhor com a realidade e com a vivência dos alunos, trazendo essa ramificação da Física dentro de uma nova proposta de ensino, com vistas a explorar as definições abordadas por meio de um conflito teórico-experimental. Diante disso, decidimos por escrever nosso produto educacional sob a forma de um livro didático, que foi modelado a partir das investigações do projeto de pesquisa desenvolvido no Grupo "Física na Escola" (FnEsc/DFI/UFS), que traz, dentre outros, aspectos experimentais do eletromagnetismo a fim de correlacioná-los às demonstrações práticas voltadas para o ensino básico. O livro então, surge como o arcabouço teórico que buscou envolver tais experimentos com a devida sustentação conceitual a fim de desenvolver uma confluência entre a teoria a prática experimental, destacando os conceitos físicos envolvidos na dimensão pedagógica adotada.

Vale ressaltar que nossa investigação encontra respaldo naquilo que é requerido pelos documentos norteadores do ensino de Ciências, pautados na legislação educacional em vigor no Brasil, de tal maneira que percebemos e enfatizamos a urgência de se ter uma alternativa metodológica capaz de oferecer uma pedagogia que pervaga no âmbito epistêmico dos conceitos teóricos-experimentais elencados.

> [...] não basta que os conhecimentos científicos sejam apresentados aos alunos. É preciso oferecer oportunidades para que eles, de fato, envolvam-se em processos de aprendizagem nos quais possam verificar momentos de investigação que lhes possibilitem exercitar e ampliar sua curiosidade, aperfeiçoar sua capacidade de observação, de raciocínio lógico e de criação, desenvolver posturas mais colaborativas e sistematizar suas primeiras explicações sobre o mundo natural e tecnológico, e sobre seu corpo, sua saúde e seu bem-estar, tendo como referência os conhecimentos, as linguagens e os procedimentos próprios das Ciências da Natureza (BRASIL, 2024, p. 331).

Pretendíamos escrever sobre Física. Essa escrita foi modelada pelos saberes próprios dos agentes os quais aspiramos englobar. Uma das nossas inovações consiste em ensinar os conceitos de Física sem a obrigatoriedade do formalismo matemático. Neste ponto, defendemos que o arcabouço algébrico é essencial para a comprovação dos conceitos, mas é facultativo para a sua assimilação, sobretudo quando buscamos contextualizar

as definições de acordo com o recorte da realidade dos estudantes. Ao longo da nossa investigação percebemos a eficácia dessa forma de apresentação do conteúdo, prezando por uma constante conexão entre a teoria e a prática experimental como alternativa pedagógica para contornar um problema tão recorrente ligado ao nível de letramento matemático que os estudantes do ensino médio apresentam, especialmente quando são confrontados a estabelecer uma assimilação a partir da sua compreensão de mundo. Em outras palavras, podemos nos questionar: o que fazer quando os estudantes não demonstram uma cognoscibilidade matemática satisfatória que permita a associação do formalismo algébrico existente na descrição dos fenômenos físicos do seu dia a dia? Nós propomos que essa abordagem não preze exclusivamente pelo conteúdo matemático, mas sim pela associação investigativa através da prática experimental dialógica, ou seja, uma exposição compartilhada das ideias físicas existentes nos aparatos demonstrativos-experimentais, correlacionando-as com o recorte sensorial dos estudantes.

Modelamos a escrita do nosso material didático prezando por uma estruturação técnica que pudesse elencar os principais conceitos do magnetismo, prezando pelos vieses contextualizado e ontológico, bem como por suas aplicações tecnológicas e implicações sociais. O livro didático produzido teve sua elaboração pautada no lidar diário do professor, enquanto ser que busca constantemente a dialogicidade com os seus alunos através da troca ininterrupta dos saberes compartilhados. Embora tratemos de um livro, nós decidimos por dividir suas seções em aulas, ao invés de capítulos — no total de seis, as quais contemplam uma unidade de ensino de magnetismo, formulada exclusivamente a partir dos experimentos desenvolvidos por nosso grupo de pesquisa. A organização pedagógica está assim elencada:

- **Aula 1** – Motores: história e epistemologia

Objetivo da Aprendizagem:
Promover uma discussão contextualizada sobre a percepção histórica da manufatura, destacando seu papel no desenvolvimento da potência de trabalho do homem, possibilitando a evolução gradual das tecnologias industrias que culminaram na construção dos primeiros motores.

- **Aula 2** – O Magnetismo e os ímãs: origens e aplicações

Objetivo da Aprendizagem:
Estabelecer uma discussão problematizadora mediante argumentação científica, tecnológica e social investigando a origem do magnetismo e observando a presença e relevância dos ímãs em nosso cotidiano.

- **Aula 3** – O conceito de Campo Magnético

Objetivo da Aprendizagem:
Instigar uma discussão contextualizada mediante argumentação científica, tecnológica e social observando a presença e relevância do campo magnético em nosso dia a dia.

- **Aula 4** – Processos de Indução

Objetivo da Aprendizagem:
Explicar a caracterização dos domínios magnéticos bem como conceituar os processos de imantação, destacando àquele que ocorre nos eletroímãs. Como exemplo de aplicação e verificação, pretende-se abordar o funcionamento do eletroímã, enfatizando sua importância na contextualização e aplicação das definições abordadas.

- **Aula 5** – Força Magnética

Objetivo da Aprendizagem:
Apresentar o conceito de força magnética e como ela pode ser discutida no estudo do magnetismo.

- **Aula 6** – O funcionamento dos Motores Elétricos

Objetivo da Aprendizagem:
Apresentar os conceitos elétricos e magnéticos próprios do funcionamento dos motores e geradores elétricos, além de impulsionar os alunos na compreensão e percepção da utilidade desses equipamentos através dos processos de transformação de energia próprios de cada uma dessas tecnologias.

Convém destacarmos o caráter inovador de nossa investigação pedagógica, uma vez que as demonstrações experimentais elencadas ao longo de todo o produto não são encontradas em quaisquer outros materiais instrucionais. Isso significa que a correlação experimental trazida é feita por meio das demonstrações didáticas exclusivamente elaboradas para o nosso trabalho. Os experimentos são inéditos, uma vez que foram elaborados pelo FnEsc, de modo a serem explorados nas aulas da unidade de magnetismo que elaboramos. Além disso, a visualização de tais aparatos experimentais também está pautada na maneira como cada experimento foi construído, contendo cada um deles duas devidas contextualizações e descrições.

Ressaltamos também uma atenção ao irrefreável avanço tecnológico vivenciado na sociedade em que estamos inseridos, de modo que nosso material possui um viés digital que conecta os leitores/estudantes às demonstrações experimentais e/ou explicações sobre a construção dos experimentos através de *QR codes* distribuídos especificadamente ao longo

das aulas, que visam explorar tanto a investigação temática, quanto a experimentação pautada, de modo que nossos alunos terão acesso às explicações para além das páginas do livro. Portanto, ofertamos uma propriedade intelectual própria, que foi devidamente delineada como estratégia de ensino a partir da modelagem editorial presente no nosso livro.

Tratamos de contextualizar algumas definições próprias do magnetismo como noções conciliadoras e fundamentais ao entendimento funcional dos motores elétricos. Apresentamos uma unidade de ensino dividida em seis aulas, agregando aos conteúdos metodológicos, raízes epistemológicas e ontológicas acerca das proposições condizentes com a temática abordada. A fim de inserir o aluno em uma posição de protagonismo, revelando-o como um agente questionador e problematizador frente ao desafio de interpretar e descrever alguns fenômenos de natureza elétrica e magnética, procuramos estabelecer uma linha central de raciocínio, propondo ao final de cada seção, sugestões de pesquisa mediante aplicação de questionários a serem respondidos conforme a absorção da instrução recebida. Isso porque, a linguagem que entrelaça os pensamentos freireano e vygostkyano, pede que instiguemos o alunado a pensar criticamente sobre o conteúdo instrucional com qual ele está sendo ensinado.

Desse modo, ao final de cada aula trazemos "Questões Problematizadoras", as quais foram elaboradas com o fim de obter respostas reflexivas e condizentes com a cognição de cada aluno. Em outras palavras, os estudantes são instigados a dissertar e não apenas responder binariamente — isto é, com "sim" ou "não". Os estudantes são convidados ao debate. O professor conduz a discussão promovendo a troca de ideias, com a percepção de cada um dos alunos sobre o conceito e aplicações da temática estudada. O padrão comparativo das respostas apresentadas permite uma real observação assimilativa do conteúdo abordado. Tais atividades incluem não apenas a resolução de exercícios, mas também a discussão em conjunto das respostas sugeridas, bem como a investigação em campo, isto é, verificação prática daquilo que foi exposto na sala. Essa pedagogia busca envolver os participantes através do diálogo, uma vez que nessa construção do saber em comunhão, o professor irá analisar o raciocínio do aluno a ponto de estabelecer as bases conceituais para a próxima tarefa. Assim, o elo entre o educando e o educador é fixado como mecanismo chave para que o ensino esteja em sintonia com o aprendizado alcançado.

Ofertamos esse material, respeitando a dimensão de comunicação dialógica entre o professor e aluno, fugindo do método diretivo, bancário[1], que condiciona o aluno à mera

[1] *Educação bancária* foi o termo cunhado por Paulo Feire (1921-1997) para designar o método de ensino unilateral, que há seculos, vem perdurando na educação tradicional. Nesta forma arcaica de ensino, o professor é o único detentor do saber e, como tal, atua como depositante do conhecimento na cabeça dos alunos, os quais, passivos, apenas recebem a instrução e tentam reproduzir mecanicamente, sem maiores indagações. Em um ambiente construído nessa perspectiva, não há o espaço para o debate, o que impede, naturalmente, o surgimento do novo, do modificador, isto é, daquilo que viria a embasar o questionamento da realidade, para então, tentar melhorá-la. (N. A.)

exposição dos conceitos sem, de fato, refletir sobre eles (Freire, 2021). Nosso produto educacional, por outro lado, foi pensado e produzido com o intuito de caracterizar fielmente a tarefa de ensino-aprendizagem como um ato de reciprocidade.

Apresentamos a presente pesquisa educacional que segue organizada no âmbito da educação problematizadora (Freire), a qual se estabelece como ponte à mediação cognitivista (Vygotsky), a fim de amparar o alunado na tarefa de estudar os conceitos eletromagnéticos e perceber como eles se entrelaçam para a construção de motores e geradores elétricos, dentro das competências necessárias ao ensino médio. A nossa proposta editorial – que segue apresentada na íntegra no Apêndice A – não se restringe somente a versar sobre as instruções para a sua replicabilidade, mas também visa possibilitar ao público alvo, em especial aos educadores, um caráter reflexivo sobre como abordar uma unidade de ensino de magnetismo através da comunicação recíproca entre a teoria e a prática. De tal maneira que os agentes da pesquisa, isto é, professores e alunos, sintam-se parte do processo transformador do conhecimento trocado.

Cientes da abrangência presente na função existencial de um livro voltado exclusivamente para o ensino de Física, sob a perspectiva de dialogicidade entre as práticas teóricas e experimentais, entendemos que os relatos e pareceres oriundos dos protagonistas desta pesquisa (professores e alunos), serão fundamentais para a validação da nossa proposta como um produto educacional replicável, reprodutível e indicado para o fim do qual se destinou sua elaboração. Dessa forma, se fez justo e necessário irmos ao ambiente escolar a fim de trabalhar o nosso material didático e instrucional como parte das atividades pedagógicas regulares aplicadas à disciplina Física, envolvendo duas séries do ensino médio.

5 Metodologia da Investigação

5.1 Aplicação do Produto Educacional

A implementação do nosso produto educacional abrangeu três turmas da primeira série e uma turma da segunda série do ensino médio, totalizando uma amostra com 109 alunos – esse número de estudantes/participantes variou durante o período de verificação do objeto de estudo devido à ausência de alguns no decorrer da aplicação. Nosso trabalho foi desenvolvido em três unidades escolares vinculadas às redes públicas de ensino federal e estadual de Sergipe, localizadas nos municípios de São Cristóvão e Nossa Senhora das Dores, a saber, respectivamente: Colégio de Aplicação (CODAP/UFS), Centro Estadual de Educação Profissional Berila Alves de Almeida (CEEPBAA) e Colégio Estadual Professor Fernando Azevedo (CEPFA).

Os alunos participantes estavam matriculados em turmas que compõem os quadros do ensino regular (Primeira Série "C"/33 estudantes/CEPFA) e da modalidade integral e técnico profissionalizante (Primeiras Séries "A" e "B"/70 estudantes/CEEPBAA) – envolvendo, em especial, os cursos técnicos em Agroindústria e em Redes de Computadores – e outros ainda, matriculados na disciplina eletiva "Tópicos Especiais de Física: eletromagnetismo", ofertada para os alunos da Segunda Série "A", voltada exclusivamente para o assunto versado em nossa proposta de ensino (6 estudantes/CODAP). Vale ressaltar que, para os colégios situados no município de Nossa Senhora das Dores/SE, não foi possível estar amparado com os experimentos desenvolvidos por nosso Grupo de Pesquisa e Extensão "Física na Escola" (FnEsc), os quais são parte determinante para a exposição compartilhada que nós nos propusemos a discorrer com a elaboração desse produto educacional, em especial. A logística de transporte vinculada à distância até o nosso laboratório no DFI, impediram o manuseio dos aparatos demonstrativos.

Buscamos aplicar o produto conforme a estruturação didática própria do livro. Isto é, pretendíamos seguir com a implementação no decurso das as seis aulas elencadas, elaboradas seguindo a sequência proposta para uma unidade de ensino de magnetismo. No entanto, devido ao dinamismo particular de cada turma, bem como considerando as nuances vinculadas à modificação da rotina do alunado frente à nossa atuação na sala de aula, não foi possível abranger todos o conteúdo elencado no livro durante o período de aplicação. As aulas foram ministradas no período regular, dentro do conteúdo da disciplina Física, com o aval dos professores regentes, os quais puderam contribuir com colocações durante toda a fase de implementação. Como forma de certificação e validação, não somente da realização dessa etapa, mas sobretudo a fim de avaliar o material pedagógico proposto, os professores responsáveis pelas turmas emitiram pareceres sobre o livro, bem

como para a transposição didática correlacionada. Esses documentos estão anexados ao final do Capítulo 6 (Resultados e Discussões). Vale ressaltar que a nossa aplicação se deu conforme a versão do produto antes da correção/sugestões dos pareceristas, seguindo rigorosamente a sequência de aulas que seguem descritas no referido capítulo.

Embora o conteúdo do nosso material didático tenha sido elaborado com o fim de ser utilizado em turmas da terceira série do ensino médio, de acordo com o regido pelos documentos norteadores do ensino nacional, procuramos um viés alternativo e dialógico, trazendo o assunto que versa sobre uma unidade de magnetismo para as séries que ainda não estão no último nível dessa fase de formação (BRASIL, 2024). A justificativa por trás dessa escolha está alinhada com a dimensão pedagógica sócio-libertadora defendida como fundamentação teórica deste trabalho, a qual prevê a comunhão do conhecimento com um público leigo, a fim de que, mediante os saberes compartilhados, torne-se possível validar a justificação da aprendizagem. Desse modo, ao analisarmos a percepção dos alunos submetidos a um conteúdo inédito e inesperado, desejamos medir o real impacto da nossa instrução, pautada nas respostas oriundas das questões problematizadoras às quais eles foram motivados a responder. Consequentemente, ao investigar o desempenho dos estudantes nesta fase de ensino, pretendemos modelar nossa prática pedagógica de modo a lapidar nossa proposta educacional.

Apresentamos no Apêndice B os documentos que comprovam a aplicação do produto nas respectivas unidades escolares.

6 Resultados e Discussões

A assimilação e justificação da aprendizagem dos estudantes foram analisadas com base nas resoluções dissertativas elaboradas por cada aluno em relação aos tópicos listados no sumário do livro. Conforme mostrado no produto educacional, trazemos no fim de cada aula, três questões problematizadoras que foram elaboradas com o fim de obter um parâmetro comparativo e instrucional do conteúdo ministrado. Para as turmas da Primeira Série, essa verificação individual está assim elencada:

- Aula 1: O que são Motores? (79 alunos e 237 respostas);
- Aula 2: O Magnetismo e os ímãs: origens e aplicações (61 alunos e 183 respostas);
- Aula 3: O conceito de campo magnético (60 alunos e 180 respostas);
- Aula 4: Processos de imantação (37 alunos e 111 respostas).

Sendo possível ter acesso à íntegra dessas respostas, através do link:
<https://drive.google.com/drive/u/1/folders/1WiOxYM_4QNrGwwe2-BaDtRc9xtlDBEr1>

É justo citar que o número de respostas registradas na Aula 4, não representa de forma fiel a quantidade de alunos engajados. Essa discrepância está associada à, sobretudo, o tempo de exposição do conteúdo, que acabou sendo reduzido durante a ministração dessa aula, em especial.

Em linhas gerais, podemos pormenorizar o grau de compreensão das turmas selecionadas investigando, nas palavras dos alunos, a presença dos principais conceitos de cada tópico abordado. Para as três turmas da Primeira Série, foi possível desenvolver o conteúdo pertinentes às quatro primeiras aulas do produto educacional. Entendemos que essa limitação da exposição se deveu à fatores pertinentes à aplicação, tais como:

- Engajamento da turma frente à proposta de inserção de uma nova atividade;
- Limitação dos recursos amostrais, os quais se refletiam, por exemplo, tanto na exposição do livro somente via projetor de imagem, quanto na ausência do aparato experimental devido à logística de transporte (distância entre o laboratório do nosso grupo de pesquisa até à cidade da aplicação);
- Dinamismo da turma relacionado à percepção cognitiva do nível de aprendizado;
- Duração da hora/aula em (re)adaptação à rotina escolar.

Dentre as respostas apresentadas, gostaríamos de destacar algumas que foram elaboradas pelos estudantes das primeiras séries. Entendemos que esse recorte pode ser interpretado como um fiel reflexo do real impacto de assimilação de cada tópico abordado nas respectivas aulas, especialmente para um público inicialmente leigo no assunto. Optamos por listar de acordo com a evolução do conteúdo ministrado em relação à sequência de ensino. Vejamos:

Aula 1

Questão 3: Qual é a sua percepção sobre o impacto do uso dos motores na indústria moderna? Isto é, quais ferramentas você observa no seu dia a dia que funcionam à base de motores? Você considera que existe algum equipamento industrial que funcione sem a tecnologia empregada no uso dos motores?

Resposta do(a) aluno(a): *De que tudo ao nosso redor, mesmo que seja apenas um, exige motores para o seu funcionamento, como carros, geradores, cisternas, etc. Sim, pois mesmo que exista a evolução tecnológica nos motores e no trabalho, há equipamentos que exigem o trabalho braçal, que a máquina não pode fazer, como a colheita de certos alimentos.*

Aula 2

Questão 2: Em virtude da propriedade que o ímã possui em atrair certos materiais, poderíamos pensar que ele também possui a característica de repelir certos materiais? Seria correto afirmar que todo metal pode ser atraído por um ímã?

Resposta do(a) aluno(a): *Sim. Não, pois ele é atraído somente por metais que tem Fe em sua composição, ou até mesmo o próprio ferro.*

Resposta do(a) aluno(a): *Ele apenas repele ele mesmo. Ele apenas atrai o ferro, por ele ter uma estrutura química semelhante,* $Fe = Fe_3O_4$.

Aula 3

Questão 1: Uma vez que usamos o conceito de campo gravitacional para definirmos campo magnético, podemos pensar que, tal como há interação mútua entre a Terra e a Lua, o mesmo ocorre entre os ímãs e os metais? Em outras palavras, é possível que um metal atraia um ímã? Explique seu raciocínio em função das propriedades que lhe foram apresentadas.

Resposta do(a) aluno(a): *Não, pois os ímãs e os metais precisam estar em um campo magnético para interagiram, enquanto a Terra e Lua precisam estar em um campo gravitacional. Acredito que não, pois o metal não possui a capacidade de atração que o ímã possui.*

Aula 4

Questão 1: Dentre os processos de imantação apresentados, qual você acredita ser mais facilmente reproduzido em uma experiência na sala de aula.

Resposta unânime: *Imantação Magnética.*

Gostaríamos de sublinhar que, em virtude o especial engajamento durante a Aula 4, sobretudo no que concerne ao entendimento apresentado sobre o processo de imantação magnética, foi possível realizar uma demonstração desse fenômeno, em uma das turmas que, por iniciativa dos alunos, levaram ímãs e outros materiais pertinentes à essa demonstração – tendo sido gravado um vídeo desse momento interativo, o qual pode ser acessado através do link:<https://www.youtube.com/watch?v=h_63jYGRvU8&t=6s>, FILHO (2024).

Percebemos também a necessidade de apresentar uma análise estatística referente às respostas binárias registradas pelos estudantes da primeira série no decorrer da aplicação. Isso porque uma das nossas expectativas permeava justamente a não obtenção desse tipo de percepção, a qual limita uma interpretação à apenas dois tipos de respostas: "sim" ou "não". Como podemos ver no gráfico da Figura 17, poucos foram os alunos que optaram por apresentar suas resoluções dentro desse domínio cognitivo. Nós entendemos que o resultado visto nessa amostra é consequência da maneira com a qual os assunto foi explanado possibilitou a dialogicidade esperada, corroborando com a elaboração de respostas com maior consistência dissertativa.

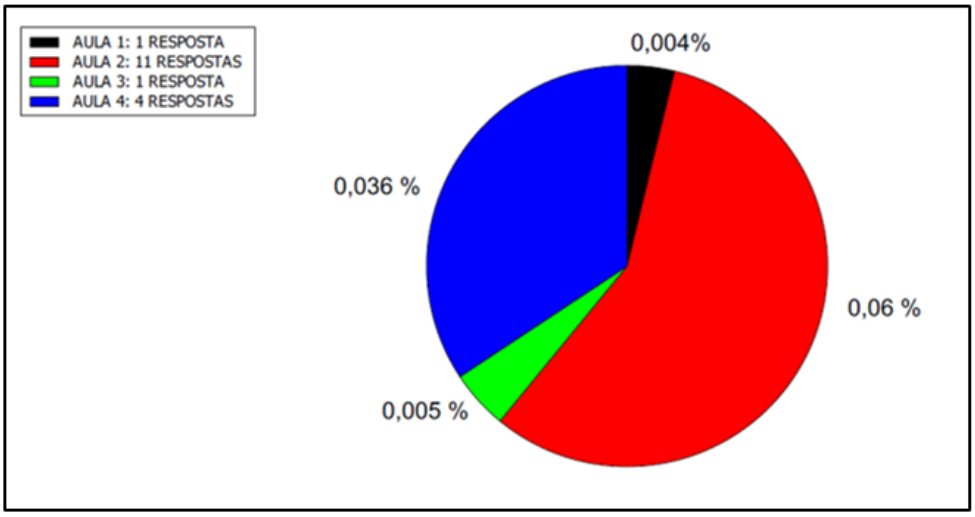


Figura 17 – Respostas Binárias. Percentuais referentes à quantidade de alunos que limitaram suas resoluções à apenas "sim" e "não", em relação às questões aplicadas no decorrer das Aulas 1, 2, 3 e 4. Fonte: Imagem do autor, 2025.

Nesse sentido, é interessante frisar de igual modo que, dentre todas as 711 (setecentos e onze) respostas apresentadas, apenas 3 (três) refletiram uma total falta de assimilação

ao conteúdo exposto. Esse fato foi verificado no decorrer da Aula 3, em se tratando mais especificamente da seguinte questão:

Questão 2: O que você entendeu sobre o conceito de monopolo magnético? Fale um pouco da sua percepção acerca dessa propriedade dos ímãs. Como podemos identificar os polos de um ímã? Além da bússola, poderia citar alguma outra do nosso dia a dia que funciona com base no magnetismo dos ímãs?
Respostas de três estudantes:

- *Não entendi nada.* (2 alunos)
- *Não possuo esse conhecimento.* (1 aluno)

Em se tratando da verificação do objeto de estudo na turma da Segunda Série/CODAP, optamos por fazer uma análise à parte, tendo em vista a excepcionalidade desse grupo de alunos, os quais decidiram cursar uma disciplina eletiva que engloba especificamente o conteúdo abordado no nosso livro. Portanto, para os seis alunos matriculados em "Tópicos Especiais de Física: Eletromagnetismo", registramos:

- Aula 1: O que são Motores? (6 respostas);
- Aula 2: O Magnetismo e os ímãs: origens e aplicações (6 respostas);
- Aula 3: O conceito de campo magnético (5 respostas);
- Aula 4: Processos de imantação (5 respostas);
- Aula 5: Força Magnética (6 respostas);
- Aula 6: O funcionamento dos Motores Elétricos (6 respostas).

Cujas resoluções individuais podem ser acessadas através do link:<https://drive.google.com/drive/u/1/folders/1LlA6PpAB9jrW5WvuWxPLNNPbO8unRlP0>

Para essa turma, as seis aulas propostas em nosso material instrucional foram ministradas em três terças consecutivas, nos dias 12, 19 e 26 de novembro. Em cada encontro, foi possível desenvolver os assuntos contidos em duas aulas, seguindo a unidade de ensino sugerida, contemplando toda a sequência elencada em nosso livro didático - com destaque para o uso da demonstração experimental apropriada. No que concerne ao engajamento do público alvo, podemos destacar:

- Ambiente de ensino adequado: embora não seja um quesito determinante para um eventual sucesso na aplicação, o fato de as aulas terem sido desenvolvidas no laboratório facilitou a exposição, estimulando a participação dos alunos permitindo-lhes uma melhor manipulação dos materiais de ensino, sobretudo os experimentos.

- Acesso ao material didático: Os dois professores regentes da turma providenciaram, junto ao colégio, a impressão de uma cópia do livro para cada aluno matriculado, como forma de melhorar a aplicação e análise do nosso produto educacional.

- Demonstração experimental: em virtude da localização do CODAP (nas dependências da cidade universitária) foi possível levar todos os experimentos propostos no livro e abordá-los conforme a pedagogia proposta de abordagem trazida no livro.

Julgamos pertinente registrar a percepção cognitiva dos alunos, aguçada pela presteza experimental presente em cada aula. Eles foram além das demonstrações didáticas propostas, sugerindo e indagando sobre determinada modificações e adaptações em alguns dos aparatos experimentais. Por exemplo, durante a aula Aula 4, quando abordamos o conceito de Imantação Eletromagnética, eles questionaram sobre o que aconteceria se, ao manusear o eletroímã, fosse aproximado uma bússola, ao invés dos pregos (que são atraídos em função do fenômeno descrito). Pois bem, o laboratório dispunha de uma bússola, que foi prontamente utilizada por eles a fim de analisar a própria indagação. Como resultado, eles perceberam a existência da variação do fluxo magnético por meio da movimento da agulha da bússola e relacionaram essa variabilidade com presença da eletricidade gerada no eletroímã.

Podemos sintetizar a assimilação dos alunos mediante a aplicação nessa turma apresentando uma das respostas elencadas que reflete o objetivo maior desse produto educacional: ensinar conceitos do eletromagnetismo a partir da construção de motores elétricos. Vejamos: **Aula 6**
Questão 3: Como você explicaria o funcionamento dos motores e dos geradores elétricos com base nos aparelhos industriais usados em seu dia a dia? Reflita um pouco sobre a indispensabilidade desses equipamentos na sociedade moderna e responda: como seria viver em um mundo sem motores elétricos?
Resposta do(a) aluno(a): *Os motores elétricos são uma peça que faz com que aparelhos eletrônicos liguem e girem em um movimento de rotação, transpassando energia elétrica para energia mecânica. Nos tempos de hoje seria bem difícil conviver sem os motores elétricos.*

A fim de consolidar a discussão oriunda dos resultados apresentados trazemos no Apêndice C os pareceres avaliativos preenchidos pelos professores regentes das turmas participantes desta pesquisa educacional. A esses profissionais, em especial, registramos nossos agradecimentos.

- CEPFA: Prof. Alex Lima de Brito, Licenciado em Física pela UFS.

- CEEPBAA: Prof. José Santos Sobral, Licenciado em Física e Bacharel em Física: Astrofísica, pela UFS.

- CODAP: Prof. Nemésio Augusto Alvares Silva, Licenciado e Bacharel em Física e Mestre em Educação pela UFS.
- CODAP: Prof. André Oliveira Silva, Doutor em Física pela UFS.

7 Considerações Finais

A consolidação de um trabalho se atesta a partir da confirmação da proposta utilizada mediante as situações, teóricas ou observacionais, as quais a pesquisa se predispôs a analisar.

Como podemos propiciar um ensino dialógico e problematizador senão por meio da oferta de ferramentas pedagógicas que auxiliem educadores-educandos no processo de ensino e aprendizagem? Iniciativas metodológicas que visam o progresso do ato lecionar são compostas de ações concretas que se apresentam como modificadoras do seio educacional. Entendemos que o livro – mediante a sua aplicabilidade histórica e revolucionária na difusão do conhecimento ao longo da evolução da humanidade – possui esse especial potencial instrucional, o qual contribui concretamente com a melhoria do ambiente escolar no qual ele se encontra. Cientes da implicação social e existencial atrelada desse instrumento pedagógico em consonância com um enredo teórico-experimental aplicado à educação básica, produzimos um produto educacional em formato de livro didático, fundamentado em metodologias pedagógicas interativas e reconhecidamente eficazes, destacando a aplicabilidade das teorias freireana e vygotsikiana.

Nos dispusemos a explorar os aspectos elementares do eletromagnetismo compilando um material instrucional que tem a pretensão de auxiliar na compreensão do fenômenos atrelados à essa área da Física. Essa motivação foi totalmente impulsionada pelo projeto de pesquisa desenvolvido no Grupo "Física na Escola" (FnEsc/DFI/UFS) – que se apresenta como uma atividade de extensão dialógica e problematizadora –, a qual busca aproximar e envolver os estudantes nas definições do magnetismo, através de uma aplicação totalmente experimental dos conceitos elétricos e magnéticos. O livro, como nossa proposta de produto educacional, busca revelar a natureza dialógica das práticas promovidas pelo referido grupo, de modo a entrelaçar a presteza dos componentes por meio de uma simbiose das competências existentes, enfatizando seu aspecto pedagógico que visa instruir professores e alunos na prática contextualizadora, como forma de embasamento teórico ao entendimento da construção, funcionamento e aplicação dos motores e geradores elétricos. Esse desenvolvimento metodológico buscou unir a conceituação didática com a experimentação prática, enfatizando os domínios de escrita e a elaboração experimental próprios do enredo explorado.

Entendemos como fundamental o fortalecimento do elo educador-educando no avanço do processo de ensino e aprendizagem que urge em se contrapor a perspectivas educacionais pautadas passividade coadjuvante do ser que recebe a instrução. Para tanto, nossa proposta pedagógica visar proporcionar uma alternativa ao tradicionalismo presente

na mera transmissão do conteúdo, propondo uma sugestão dialógica presente na constante troca de conhecimento entre os protagonistas da sala de aula. Esperamos que o material elaborado, englobando a tecnicidade acadêmica própria da dissertação, mas sobretudo, abraçando o aspecto problematizador que permeia o produto educacional, possa fomentar e edificar as bases cognitivas daqueles que doravante poderão vir a ser contemplados com esta metodologia.

Referências

ASSIS, A. K. T.; HARUNA, L. F. Pesquisas experimentais em eletricidade. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 28, n. 1, p. 152–204, 2011.

BATISTA, A. Processos de trabalho: da manufatura à maquinaria moderna. *Serviço Social & Sociedade*, v. 1, n. 118, p. 209–238, 2014.

BIRZNEK, F. C.; HIGA, I. A interação social em paulo freire e vygotsky como referencial teórico na reflexão sobre as interações discursivas na aprendizagem de física. In: *XI Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciências – XI ENPEC*. [S.l.: s.n.], 2017.

BRASIL. *Base Nacional Comum Curricular*. [S.l.]: Ministério da Educação. Brasília, 2024.

CARDOSO, J. M. *O Motor a Vapor: uma proposta contextualizada e interdisciplinar*. 2017. 29 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciatura em Química — Universidade do Sul de Santa Catarina (UNISUL), Tubarão, 2017.

CARVALHO, T. *Campo Magnético*. 2024. Disponível em: <https://www.infoescola.com/fisica/campo-magnetico/>.

CASANOVA, S. S.; ZARA, R. a. Análise dos produtos educacionais provenientes do mestrado nacional profissional em ensino de fÍsica. *Arquivos do Mudi*, v. 24, n. 3, p. 267–276, 2020.

CIENTÍFICO, C. *História do trabalho – como surgiu e principais regimes trabalhistas*. 2023. Disponível em: <https://conhecimentocientifico.r7.com/historia-do-trabalho/>.

DATHIEN, R. Inovação e revoculões industriais: uma apresentação das mudanças tecnológicas determinantes nos séculos xviii e xix. *Publicações DECON Textos Didáticos*, p. 1–8, 2003.

DIAS, V. S.; MARTINS, R. d. A. Michael faraday: o caminho da livraria à descoberta da indução eletromagnética. *Ciência & Educação*, v. 10, n. 3, p. 517–530, 2004.

DRISCOLL, M. P. *Pysichology of learning and studing*. [S.l.]: Allyn and Bacon, 1995. v. 1.

ESPíNDOLA, K.; MOREIRA, M. A. Relato de uma experiência didática: ensinar física com os projetos didáticos na eja, um estudo de caso. *Experiências em Ensino de Ciências*, v. 1, n. 1, p. 55–66, 2006.

FILHO, J. d. S. Geração de corrente elétrica em uma solução iônica: abordagem didática e aplicação experimental. *Revista Brasileira de Física*, v. 3, n. 2, p. 27–42, 2023.

FILHO, J. d. S. *Imantação Magnética*. 2024. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=h_63jYGRvU8&t=6s>.

FREIRE, P. *Pedagogia da Autonomia*. [S.l.]: Paz e Terra, 1996. v. 1.

FREIRE, P. *Pedagogia do Oprimido*. [S.l.]: Paz e Terra, 2021. v. 78.

GARDELLI, D.; NEVES, M. C. D. Equívocos didáticos na física do ensino médio sobre a interpretação dada à experiência de oersted. *Revista Ensino de Ciências*, v. 3, n. 2, p. 18–36, 2012.

GEHLEN, S. T.; HALMENSCHLAGER, K. R.; MACHADO, A. R.; AUTH, M. A. O pensamento de freire e vygotsky no ensino de física. *Experiências em Ensino de Ciências*, v. 7, n. 2, p. 76–98, 2012.

GUERRA, A.; REIS, J. C.; BRAGA, M. Uma abordagem histórico-filosófica para o eletromagnetismo no ensino médio. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 21, n. 2, p. 224–248, 2004.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; KRANE, K. S. *Física 3*. [S.l.]: LTC, 2014. v. 5.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; KRANE, K. S. *Física 3*. [S.l.]: LTC, 2014. v. 3.

HELERBROCK, R. *Entenda como é o princípio de funcionamento de um gerador de corrente alternada*. 2024. Disponível em: <https://blog.tecnogera.com.br/blog/entenda-como-e-o-principio-de-funcionamento-de-um-gerador-de-corrente-alternada>.

HELERBROCK, R. *Indução eletromagnética*. 2024. Disponível em: <https://brasilescola.uol.com.br/fisica/a-inducao-eletromagnetica.htm>.

JÚNIOR, O. P. Modelo causal dos primórdios da ciência do magnetismo. *Scientiae Studia*, v. 8, n. 2, p. 195–212, 2010.

KAZANTZAKIS, N. *Os irmãos inimigos.* [S.l.]: Nova Fronteira S.A., 1965. v. 1.

LIMA, M. C. d. Sobre o surgimento das equações de maxwell. *Revista Brasileira de Ensino de Física)*, v. 41, n. 4, p. 1–18, 2019.

MATTEDE, H. *Primeira usina de geração de eletricidade*. sem data. Disponível em: <https://www.mundodaeletrica.com/primeira-usina-de-geracao-de-eletricidade/>.

MNPF. *Histótico*. 2025. Disponível em: <http://www1.fisica.org.br/mnpef/historico>.

MOURRA, F. P. *Utilização de um livro paradidático no processo de ensino e aprendizagem de conceitos de Física.* Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal Rural do Semiárido., 2017.

NEVES, D.; SOUSA, R. *Revolução Industrial*. sem data. Disponível em: <https://mundoeducacao.uol.com.br/historiageral/revolucao-industrial-2.htm>.

NOVAK, J. D.; ALBERTO, J. C. A teoria sujacente aos mapas conceituais e como elaborá-los e usá-los. *Práxis Educativa*, v. 5, 2010.

OLIVEIRA, S. P. R. d. *Proposta de livro didático para o estudo da dinâmica nos cursos técnicos: mecatrônica, eletrônica, eletrotécnica e áreas afins*. Dissertação (Mestrado) — Institito Federal do Amazonas, 2019.

OLIVEIRA, V. G. d. *Aprendizagem Significativa na engenharia: das Propostas Político Pedagógicas até o Diálogo entre Professor e Aluno*. Dissertação (Mestrado) — Universidade de Uberaba, 2016.

PAZ, O. *O labirinto da solidão e post scriptum.* [S.l.]: Paz e Terra, 1984. v. 1.

PEDUZZI, L. O. Q. *Evolução dos Conceitos da Física.* [S.l.]: UFSC/EAD/CED/CFM, 2011. v. 1.

PHET, C. *Faraday's Law.* 2024. Disponível em: <https://phet.colorado.edu/sims/html/faradays-law/latest/faradays-law_all.html>.

PINHEIRO, N. A. M.; F, S. R. M. C.; BAZZO, W. A. Ciência, tecnologia e sociedade: a relevância do enfoque cts para o contexto do ensino médio. *Ciência & Educação*, v. 13, n. 1, p. 71–84, 2007.

PIZANI, I. C. M.; OLIVEIRA, R. E. C. d. *O diálogo no processo de ensino e aprendizagem de acordo com Paulo Freire e Lev Vygotsky.* [S.l.]: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2015. v. 1.

PÉREZ, N. *Máquina de vapor de Watt.* 2004. Disponível em: <https://es.wikipedia.org/wiki/M%C3%A1quina_de_vapor_de_Watt#/media/Archivo:Maquina_vapor_Watt_ETSIIM.jpg>.

REIS, P. R. Os temas controversos na educação ambiental. *Pesquisa em Educação Ambiental*, v. 2, n. 1, p. 125–140, 2007.

REIS, P. R. Ciência e controvérsia. *Revista de Estudos Universitários – REU*, v. 35, n. 2, p. 09–15, 2009.

REITZ, J. R.; MILFORD, F. J. *Fundamentos de la Teoría Electromagnética.* [S.l.]: UTEHA, 1969. v. 1.

REZENDE, F.; OSTERMANN, F. O protagonismo controverso dos mestrados profissionais em ensino de ciências. *Ciência & Educação*, v. 21, n. 3, p. 543–558, 2015.

ROCHA, J. F. M. Origem e evolução do eletromagnetismo. In: *Origem e evolução das ideias da física.* [S.l.]: EDUFBA, 2002. p. 185–276.

SAVIANI, D. O choque teórico da politecnia. *Trabalho, Educação e Saúde*, v. 1, n. 1, p. 131–152, 2003.

SHOR, I.; FREIRE, P. *Medo e Ousadia – O Cotidiano do Professor.* [S.l.]: Paz e Terra, 1986. v. 1.

SILVA, E. C. da. *Análise Termodinâmica e Reprojeto de um Motor a Vapor.* 2019. 84 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica — Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria, RS, 2019.

SILVA, V. A. d.; MARTINS, M. I. Análise de questões de física do enem pela taxonomia de bloom revisada. *Ensaio Pesquisa em Educação em Ciências (Belo Horizonte)*, SciELO Brasil, v. 16, n. 3, p. 189–202, 2014.

SIMUFíSICA. *Motor Elétrico.* 2023. Disponível em: <https://simufisica.com/simulacoes/motor-eletrico/>.

TAVARES, L. A. *James Watt: A trajetória que levou ao desenvolvimento da máquina a vapor vista por seus biógrafos e homens de ciências.* 2008. 74 p. Disertação de Mestrado (História da Ciência — Pontifícia Universidade Católica de São Paulo, São Paulo, 2008.

TEMAS e referenciais presentes nas dissertações do Mestrado Nacional Profissional de Ensino de Física. *Revista de Ensino de Ciências e Matemática*, v. 13, n. 3, p. 1–17, 2022.

VYGOSTKY, L. S. *A formação social da mente.* [S.l.]: Livraria Martins Fontes, 1991. v. 4.

APÊNDICE A – PRODUTO EDUCACIONAL

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE (UFS)
DEPARTAMENTO DE FÍSICA (DFI)
MESTRADO NACIONAL PROFISSIONAL EM ENSINO DE FÍSICA
POLO 11

PRODUTO EDUCACIONAL

EXPLORANDO OS DOMÍNIOS TEÓRICOS E EXPERIMENTAIS DO MAGNETISMO DOS MOTORES ELÉTRICOS: UM MÉTODO DE ENSINO POR ABORDAGEM PARA A EDUCAÇÃO DE JOVENS E ADULTOS

Jailton dos Santos Filho

Edvaldo Alves de Souza Júnior

São Cristóvão/SE

2025

APRESENTAÇÃO

A primeira tarefa da educação é ensinar a ver.

Nietzsche

Lecionar, verbo bitransitivo. Se pensarmos somente segundo o regido pela gramática da Língua Portuguesa, notamos que a definição de bitransitividade por si só já carrega uma excepcionalidade, pois indica a necessidade de um complemento ao objeto, para dar sentido a oração. Para além da sintaxe, o olhar humano colocado na conjugação do verbo *lecionar* nos faz refletir sobre a profundidade de suas declinações. Analisando-o sob a perspectiva de um dos seus sinônimos, percebemos que ele tem a faculdade de ser escrito de modo a representar uma missão: educar. Esta, tem a capacidade de modelar-se em prol da dignificação do ser que se debruça à aprendizagem. Eis que entra em cena o professor, isto é, o indivíduo que em sua essência única se (re)faz constantemente em um quefazer de significados para seguir aprendendo enquanto ensina.

> O termo professor foi uma tentativa de traduzir uma ação: aquele ou aquela que declara em público, ou aquele(a) que afirmou publicamente. Cada professor, ao assumir a responsabilidade por um conteúdo, carrega e declara, publicamente, as vozes daqueles e daquelas que trouxeram elementos necessários para a construção da própria civilização, em qualquer área do conhecimento. Assim, o interessante dessa ação social é que ela carrega consigo a multiplicidade de vozes que ecoaram ao longo dos tempos. No entanto, em sua prática diária, o faz solitariamente frente a um grupo que testa sua verificabilidade e respeitabilidade à medida que constrói segurança naquela voz uníssona que representa outras tantas (FARIA, 2021, p. 4-5).

A tarefa do educador — aquele que tem como propósito de vida a missão de educar —, se realiza quando encontra no educando a ponte entre ensino e aprendizagem como via de mão dupla do ato de lecionar. Ela transcende o espaço tridimensional ocupado por ele enquanto ministra suas aulas, e se efetiva em cada palavra proferida, sobretudo quando ela é dita após ser ouvida daqueles que recebem a instrução. Quando a palavra deseja alcançar a eternidade, ela se apresenta em forma de escritos, e estes transcendem à temporalidade espacial e se tornam imprescindíveis ao processo da educação. Durante a elaboração de um material didático e instrucional o professor tem a responsabilidade de se fazer presente metafisicamente e, para tanto, precisa se revelar em cada ensinamento proferido e perpetuado nas letras redigidas.

O produto educacional que ora ofertamos foi elaborado com o intuito de impulsionar o surgimento de práticas pedagógicas que visem o aprendizado como

parte substancial da docência. Para tanto, foi preciso compreender e respeitar a realidade sociocultural do público-alvo, isto é, professores e alunos, com os quais desejamos compartilhar um pouco da nossa vivência na fronteira científica aqui explorada. Este material terá cumprido seu papel existencial se, e somente se, for usado e aplicado no ambiente escolar, como ferramenta didática que correlaciona o conflito experimental com a conceituação teórica.

Tratamos neste documento de contextualizar algumas definições próprias do magnetismo como noções conciliadoras e fundamentais ao entendimento funcional dos motores elétricos. Apresentamos uma unidade de ensino dividida em seis aulas, agregando aos conteúdos metodológicos, raízes epistemológicas e ontológicas acerca das proposições condizentes com a temática abordada. A fim de inserir o aluno em uma posição de protagonismo, revelando-o como um agente questionador e problematizador frente ao desafio de interpretar e descrever alguns fenômenos de natureza elétrica e magnética, procuramos estabelecer uma linha central de raciocínio, propondo ao final de cada seção, sugestões de pesquisa mediante aplicação de questionários a serem respondidos conforme a absorção da instrução recebida. Tais atividades incluem não apenas a resolução de exercícios, mas também a discussão em conjunto das respostas sugeridas, bem como a investigação em campo, isto é, verificação prática daquilo que foi exposto na sala. Essa pedagogia busca envolver os participantes através do diálogo, uma vez que nessa construção do saber em comunhão, o professor irá analisar o raciocínio do aluno a ponto de estabelecer as bases conceituais para a próxima tarefa. Assim, o elo entre o educando e o educador é fixado como mecanismo chave para que o ensino esteja em sintonia com o aprendizado alcançado.

Confiamos de forma esperançosa que iniciativas voltadas ao melhoramento das condições de ensino tendem a surgir por intermédio dos profissionais que enxergam na educação a única e mais eficaz maneira de se edificar uma sociedade com valores de justiça e humanidade. Que este material instrucional possa refletir a responsabilidade por trás da missão de educar, cujo desígnio de existência se dá no espelhamento de ideias e vivências suscitadas no processo de ensino e aprendizagem.

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

SUMÁRIO

Introdução **4**

Organização das Aulas **9**

Unidade de Ensino **22**

Aula 1
Motores: história e epistemologia **23**

Aula 2
O Magnetismo e os ímãs: origens e aplicações **28**

Aula 3
Campo Magnético **33**

Aula 4
Processos de Indução **42**

Aula 5
Força Magnética **51**

Aula 6
O funcionamento dos Motores Elétricos **56**

Referências **64**

Índice Onomástico **67**

INTRODUÇÃO

Casa sem tomada. Inimaginável, não? Convido a quem está lendo este material a pensar um pouco mais sobre a realidade ambiental e tecnológica que nos cerca. Propomos uma reflexão partindo da observação de um simples dispositivo, presente em quantidades variáveis em cada residência: as tomadas. A presença de uma tomada significa, por conseguinte, o acesso à eletricidade. Tenhamos um olhar mais profundo sobre essas informações e analisemos o quão abrangente é essa distribuição de modo a perceber o poder de transformação social que a eletricidade proporcionou à humanidade ao longo dos últimos 150 anos.

Uma casa sem tomada é um retrocesso. O cotidiano que desconhece a finalidade desse dispositivo, não condiz com a visão de muito trazida pela revolução industrial ocorrida no século 19. Desde então, a utilização dos princípios elétricos e magnéticos na industrialização, vem sendo o principal combustível para o desenvolvimento do setor fabril. Uma implicação direta desse avanço foi a construção dos motores elétricos, invenção que iniciou uma nova era na industrialização moderna, culminando na criação de novas aplicações sociais, tendo em vista o potencial de aplicabilidade tecnológica percebido na propensão de se ter um mecanismo capaz de gerar energia mecânica por meio da eletricidade. O potencial de trabalho conquistado pelo homem em razão da presteza trazida por essa tecnologia pôde elevar no nível de sofisticação e modernização da humanidade.

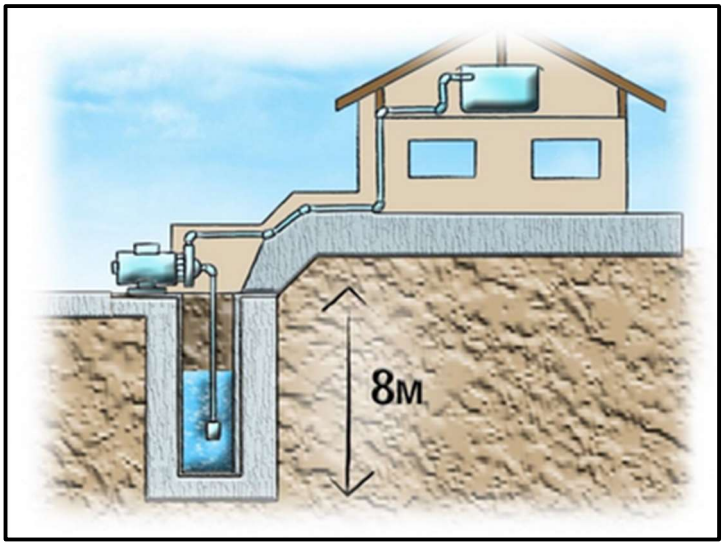
Quem veio primeiro: o motor ou o gerador? O impacto de tal investigação proporcionou o surgimento de novas tecnologias ligadas à fabricação de aparelhos cujo funcionamento já se dava majoritariamente pela presença dos motores, os quais passaram a ser impulsionados pelos fundamentos do eletromagnetismo em sua construção. Isso, naturalmente, permitiu o aprimoramento dos mecanismos industrias, os quais fizeram surgir outros aparelhos com aplicações mais abrangentes. Assim foram feitos os geradores elétricos, que têm seu funcionamento descrito de forma inversa ao que ocorre nos motores elétricos.

A energia mecânica utilizada para o acionamento dos geradores, isto é, para impulsionar produção de eletricidade, pode ser obtida por diversas fontes. Nos anos que seguiriam a invenção desse mecanismo, por exemplo, usava-se o vapor d'água que provinha do aquecimento (trocas de calor) do reservatório sobre o qual o gerador era construído. Hoje em dia, podemos citar com maior notoriedade, outras

fontes de energia mecânica, tais como a força oriunda da água represada em uma usina hidrelétrica e o movimento giratórios das hélices das enormes pás dos aerogeradores existentes nos parques eólicos.

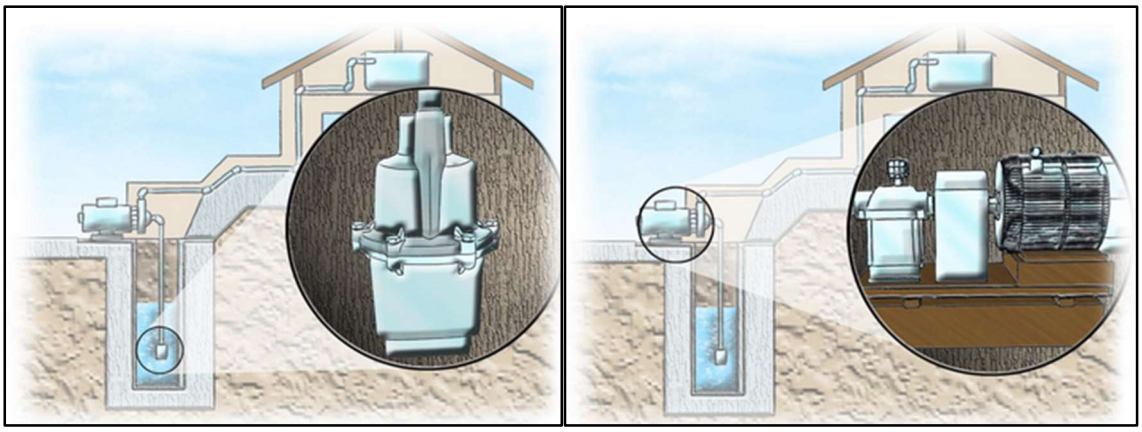
Há diversas implicações e aplicações dos motores e geradores elétricos no nosso dia a dia. Por exemplo, é comum encontrarmos em residências, sobretudo nas cidades interioranas, um sistema de captação de água diretamente do subsolo. São as chamadas *cisternas* e/ou *poços artesianos*. Para que seja possível abastecer a casa com a água que flui nos lençóis freáticos — ou seja, do leito de rio que passa abaixo da terra —, é preciso um sistema que opere à base de um motor. Eles são costumeiramente conhecidos como "bomba d'água", pois sua principal função é bombear a água diretamente do subsolo para a residência e armazená-la nas "caixas d'água" (feitas de cerâmica ou cimento) a fim de prover o fornecimento para a família. Um olhar para a Figura I nos permite visualizar essa aplicação.

Figura 1. Casa com sistema de bombeamento de água subterrâneo.



Poço artesiano contendo a chamada bomba d'água e seu mecanismo de captação hídrica. Fonte: C&C Construção (2024).

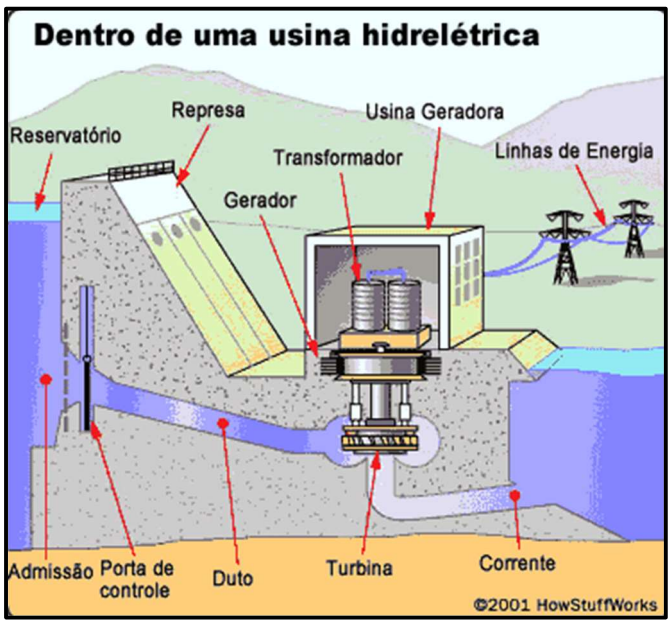
Figura 2. Bomba d'água



À esquerda, imagem ampliada da bomba d'água (motor submerso). À direita, detalhe do motor de filtro e bombeamento. Fonte: Adaptada de C&C Construção (2024).

Quando nos atemos à capacidade de produzir energia elétrica em larga escala, logo pensamos nas usinas, que operam seguindo uma determinada fonte de energia, seja ela eólica, hidrelétrica, nuclear ou solar. Em todas essas há um componente primordial, que é o gerador elétrico. Por exemplo, destacando o processo que ocorre nas usinas elétricas, encontraremos no gerador, o mecanismo de conversão de energia mecânica em energia elétrica.

Figura 3. Esquema de produção de energia em uma usina hidrelétrica.



Destaque para o gerador, peça fundamental para converter a energia mecânica, proveniente do movimento das águas represadas, em energia elétrica, a qual que segue distribuídas por meio dos fios e cabos de alimentação nas linhas de distribuição (postes). Fonte: Azeheb (2018).

Os geradores elétricos são indispensáveis para o fornecimento de energia elétrica em todo o planeta. Eles se tornaram cruciais para ao progresso dos meios de produção, os quais alavancaram pesquisas destinadas à consolidação e à correlação dos conceitos elétricos e magnéticos na aplicação em diversos equipamentos industriais com os quais nos deparamos diariamente.

Gostaríamos, então, de enfatizar uma das indagações a serem propostas ao longo das aulas que se seguem, ratificando o seguinte questionamento: como seria viver em uma realidade sem a tecnologia empregada pelos motores e geradores elétricos? Você consegue imaginar um mundo sem luz elétrica e água encanada nas residências, sem automóveis, aviões, satélites, bem como sem a existência dos aparelhos eletrodomésticos, tais como liquidificador, geladeira, ventilador, além de todos os demais dispositivos eletrônicos, como os celulares, computadores, televisão etc?

Por mais que essa resposta seja individual, não é difícil presumir que ela também seja unânime. Ou seja, todos iremos concordar que a humanidade alcançou um nível de modernização tal que é impossível pensar em um outro cenário no qual toda essa tecnologia simplesmente não venha a existir e ser usufruída. Neste sentido, um dos objetivos deste material didático e instrucional se revela não somente na pedagogia ligada ao ensino e aprendizagem dos conceitos aqui reunidos, mas sobretudo na conscientização sobre valores existências que estão entrelaçados com a nossa capacidade criativa, que visa buscar novas e melhores soluções solidárias de acordo com os recursos que dispomos. Que possamos almejar, portanto, uma harmonização em nossas ações a fim de que seja possível alcançar e um desenvolvimento mais ético, inteligente e sustentável.

Só realmente aprendemos
aquilo que usamos.

Rubem Alves

Organização das Aulas

Aula 1 – Motores: história e epistemologia

Conteúdo Programático

Introdução ao conteúdo
Texto: O que são motores?

Discussão do conteúdo
Questões problematizadoras

Contextualização do conteúdo
Atividade de Pesquisa

Estruturação Didática

Objetivo do texto
Promover uma discussão contextualizada sobre a percepção histórica da manufatura, destacando seu papel no desenvolvimento da potência de trabalho do homem, possibilitando a evolução gradual das tecnologias industrias que culminaram na construção dos primeiros motores.

Síntese dos questionamentos
Os alunos serão instigados a pensar sobre como responder as questões propostas com base na leitura do texto inicial, de modo que o professor possa obter parâmetros das respostas, com o intuito de esclarecer as eventuais dúvidas e gerenciar as próximas tarefas contextualizadas.

Dialogicidade
Os estudantes são convidados ao debate. O professor conduz a discussão promovendo a troca de ideias, com a percepção de cada um dos alunos sobre o conceito e aplicações dos motores para a sociedade. O padrão comparativo das respostas apresentadas permite uma real observação assimilativa do conteúdo abordado.

Desenvolvimento da aprendizagem
Após a aula, o professor propõe uma tarefa extraclasse pautada em uma pesquisa sobre como a utilização da tecnologia presente nos motores veio a modificar a sociedade.

Bibliografia Consultada

MELO, Pâmella Raphaella. “Motor elétrico”. **Brasil Escola**. Disponível em: https://brasilescola.uol.com.br/fisica/eletricidade-acionamento-motores-eletricos.htm . Acesso em 17 de outubro de 2023.

Porto Editora. “James Hargreaves na Infopédia”. **Porto Editora.** Disponível em: https://www.infopedia.pt/artigos/$james-hargreaves . Acesso em 29 de julho de 2024.

SANTOS, Vanessa Sardinha dos. “Homo sapiens”. **Brasil Escola**. Disponível em:https://brasilescola.uol.com.br/biologia/a-nossa-especie-homo-sapiens.htm Acesso em 13 de novembro de 2023.

SILVA, E. C. da. **Análise Termodinâmica e Reprojeto de um Motor a Vapor**. 2019. 84 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica — Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria, RS, 2019.

Aula 2 – O Magnetismo e os ímãs: origens e aplicações

Conteúdo Programático

Introdução ao conteúdo
Texto: Os ímãs e o surgimento do magnetismo

Discussão do conteúdo
Questões problematizadoras

Contextualização do conteúdo
Atividade de Pesquisa

Estruturação Didática

Objetivo do texto
Estabelecer uma discussão problematizadora mediante argumentação científica, tecnológica e social investigando a origem do magnetismo e observando a presença e relevância dos ímãs em nosso cotidiano.

Síntese dos questionamentos
Como sugestão de discussão a partir da leitura do texto introdutório, convém destacar como a curiosidade leva o homem a inquietar-se, buscando soluções para as situações do dia a dia, indo além dos limites a ele imposto. A característica peculiar de um certo tipo de pedra passou a ser o fato que marcou o início dos estudos do Magnetismo, comprovando que a observação dos fenômenos induz o conflito de ideias para o surgimento do novo.

Dialogicidade
Os estudantes são convidados ao debate. O professor conduz a discussão promovendo a troca de ideias, com a percepção de cada um dos alunos sobre o conceito e aplicações dos motores para a sociedade. O padrão comparativo das respostas apresentadas permite uma real observação assimilativa do conteúdo abordado.

Desenvolvimento da aprendizagem
Após a aula, o professor propõe uma tarefa extraclasse pautada em uma pesquisa sobre como a utilização dos conceitos oriundos da descoberta do magnetismo, com enfoque nos estudos dos ímãs, tornou-se fundamental para a modernização da sociedade.

Bibliografia Consultada

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS (IGc/USP). Disponível em: https://didatico.igc.usp.br/minerais/oxidos-hidroxidos/magnetita/ . Acesso em 11 de fevereiro de 2024.

FRANCO, HUGO. Evolução dos conceitos da Física. IN: **plato.usp**. Disponível em: http://plato.if.usp.br/1-2003/fmt0405d/apostila/renasc7/node8.html . Acesso 01 de maio de 2023.

GUITARRARA, Paloma. "Bússola". **Brasil Escola.** Disponível em: https://brasilescola.uol.com.br/geografia/bussola.htm . Acesso em 09 de março de 2024.

JÚNIOR, Osvaldo Pessoa. Modelo causal dos primórdios da ciência do magnetismo. **Scientiae Studia.** São Paulo, v. 8, n. 2, 2010, p. 195-212.

NEWTON, Villas Bôas; DOCA, Ricardo Helou; BISCUOLA, Gualter José. **Tópicos de Física 3:** eletricidade, física moderna e análise dimensional.

ROCHA, José Fernando M. (Org.). **Origens e evolução das ideias da física**. Salvador: EDUFBA, 2002.

Aula 3 – O conceito de Campo Magnético

Conteúdo Programático

Introdução ao conteúdo
Texto: Campo Magnético

Discussão do conteúdo
Questões problematizadoras

Contextualização do conteúdo
Atividade de Pesquisa

Estruturação Didática

Objetivo do texto
Instigar uma discussão contextualizada mediante argumentação científica, tecnológica e social observando a presença e relevância do campo magnético em nosso dia a dia.

Síntese dos questionamentos
A proposta principal do texto é socializar os estudantes na percepção não trivial de interação à distância entre dois ou mais corpos. Tendo em vista o senso comumente conhecido de que é preciso existir uma região espacial na qual possam ser observados eventuais acontecimentos, surge a ideia de campo magnético para representar a fronteira na qual são percebidas as interações magnéticas.

Dialogicidade
Os estudantes são convidados ao debate. O professor conduz a discussão promovendo a troca de ideias, com a percepção de cada um dos alunos sobre como o entendimento do conceito de campo magnético tornou-se útil à sociedade. O padrão comparativo das respostas apresentadas permite uma real observação assimilativa do conteúdo abordado.

Desenvolvimento da aprendizagem
Após a aula, o professor propõe uma tarefa extraclasse pautada em uma atividade experimental sobre como podemos visualizar as linhas de campo magnético utilizando materiais de fácil acesso, como ímãs e limalhas de

ferro (bombril) a fim de ambientar os estudantes sobre as aplicações dos conceitos mostrados durante a aula.

Bibliografia Consultada

CARVALHO, Thomas. “Campo Magnético”. **InfoEscola.** Disponível em: https://www.infoescola.com/fisica/campo-magnetico/ Acesso em 13 de fevereiro de 2024.

ROCHA, José Fernando M. (Org.). **Origens e evolução das ideias da física**. Salvador: EDUFBA, 2002.

FILHO, Jailton dos Santos. **Introdução ao Magnetismo.** YouTube, 12 de abril de 2023. Disponível em: https://youtu.be/X-ePfG1dG38?si=0bEBn1nwi77ZGNvh . Acesso em 12 de janeiro de 2024.

MAGNETISMO: CONCEITOS. Guia do Estudante (GE), 2024. Disponível em: < https://guiadoestudante.abril.com.br/curso-enem/conceitos>. Acesso em 13 de fevereiro de 2024.

Aula 4 – Processos de Indução

Conteúdo Programático

Introdução ao conteúdo
Texto: Domínios magnéticos e imantação por eletrização

Discussão do conteúdo
Questões problematizadoras

Contextualização do conteúdo
Atividade de Pesquisa

Estruturação Didática

Objetivo do texto
Explicar a caracterização dos domínios magnéticos bem como conceituar os processos de imantação, destacando àquele que ocorre nos eletroímãs. Como exemplo de aplicação e verificação, pretende-se abordar o funcionamento do eletroímã, enfatizando sua importância na contextualização e aplicação das definições abordadas.

Síntese dos questionamentos
Através da compreensão dos domínios magnéticos e do princípio imantação por eletrização, os alunos poderão verificar os conceitos por trás do funcionamento do eletroímã, verificando sua aplicabilidade mediante a possibilidade de fazer com que outros objetos possam vir a ter características de um ímã.

Dialogicidade
Os estudantes são convidados ao debate. O professor conduz a discussão promovendo a troca de ideias, com a percepção de cada um dos alunos sobre os processos de imantação. O padrão comparativo das respostas apresentadas permite uma real observação assimilativa do conteúdo abordado.

Desenvolvimento da aprendizagem
O professor tem a possibilidade de explorar alguns experimentos próprios do processo de imantação, como por exemplo, o surgimento de ímãs artificiais.

Recomenda-se que haja uma fiel contextualização entre a ocorrência desse fenômeno com a natureza de existência mútua entre os conceitos de magnetização e eletrização.

Bibliografia Consultada

DEUTY, Soctt. Solenoids Vs. Relays: What is The Difference? **Planet Analog.** 27 de fevereiro de 2018. Disponível em: https://www.planetanalog.com/relays-and-solenoids-electromechanical-devices/ . Acesso em 24 de março de 2024.

DINIZ, Alexandre Magno Ferreira; ARAÚJO, Rômulo Diniz. "Uma abordagem prática para o ensino de eletromagnetismo usando um motor de indução de baixo custo." IN: **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 41, n. 1, p. 3, ago. 2019.

DOMÍNIO MAGNÉTICO. **Neocities.org.** Disponível em: https://rocarneval.neocities.org/CP_NDE-ED.ORG/EM_07-Dominio . Acesso em 13 de setembro de 2024.

GOMES, Sinésio Raimundo. Aula 03 – Fundamentos de Magnetismo. **Maquinas Elétricas I**. 30 de janeiro de 2023. Disponível em: < https://maquinaseletricasi.blogspot.com/2014/01/aula-02-fundamentos-de-magnetismo.html> . Acesso em 18 de dezembro de 2023.

MikeRun. Coil right-hand rule3.svg. **Wikimedia Commons.** 23 de maio de 2020. Disponível em: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Coil_right-hand_rule3.svg . Acesso em 24 de março de 2024.

STIKMAN. The Solenoid and Electromagnet. **StickMan Physics Home.** Disponível em: https://stickmanphysics.com/stickman-physics-home/magnets-and-magnetism/electromagnet/ . Acesso em 24 de março de 2024.

Aula 5 – Força Magnética

Conteúdo Programático

Introdução ao conteúdo
Texto: Força Magnética

Discussão do conteúdo
Questões problematizadoras

Contextualização do conteúdo
Atividade de Pesquisa

Estruturação Didática

Objetivo do texto
Apresentar o conceito de força magnética e como ela pode ser discutida no estudo do magnetismo.

Síntese dos questionamentos
A sugestão da abordagem textual pode ser acompanhada de uma exposição audiovisual, com o auxílio de *slides* e figuras que mostrem alguns processos de interação magnética. Com isso, haverá uma melhor identificação, por parte dos estudantes, dos princípios elencados na capacidade a qual as cargas elétricas adquirem movimento.

Dialogicidade
Os estudantes são convidados ao debate. O professor conduz a discussão promovendo a troca de ideias, com a percepção de cada um dos alunos sobre o conceito e aplicações dos motores elétricos para a sociedade. O padrão comparativo das respostas apresentadas permite uma real observação assimilativa do conteúdo abordado.

Desenvolvimento da aprendizagem
Sugere-se uma pesquisa sobre como percebemos e utilizamos a ideia de força magnética no nosso dia a dia e o quanto essa percepção nos auxilia na compreensão dos processos de obtenção de energia magnética presentes no funcionamento dos aparelhos elétricos. Essa investigação pode ser feita como uma atividade de exploração em grupo, com vistas a estimular a curiosidade sobre como alguns dos equipamentos que usamos com

frequência os componentes internos desse equipamento (carregadores de celular, por exemplo).

Bibliografia Consultada

ALMEIDA, Daniel. Como funcionam os motores elétricos. **TRACTIAN**. Disponível em: https://tractian.com/blog/motores-eletricos-entenda-a-funcionalidade-desse-ativo . Acesso em 28 de novembro de 2023.

Como funciona o motor elétrico de um carro. **GREENBRAS**. São Paulo, 18 de abril de 2022. Disponível em: https://greenbras.com/como-funciona-o-motor-de-um-carro-eletrico/ Acesso em: 27 de novembro de 2023.

Motor Elétrico. **SimuFísica/ CNPq.** Disponível em: https://simufisica.com/simulacoes/motor-eletrico/ . Acesso em: 01 de março de 2023.

Você conhece os principais tipos de motores elétricos? **Abecom**. São Paulo, 03 de fevereiro de 2022. Disponível em: https://www.abecom.com.br/tipos-de-motor-eletrico/ . Acesso em: 24 de novembro de 2023.

Aula 6 – O funcionamento dos Motores Elétricos

Conteúdo Programático

Introdução ao conteúdo
Texto: Como funcionam os Motores Elétricos?

Discussão do conteúdo
Questões problematizadoras

Contextualização do conteúdo
Atividade de Pesquisa

Estruturação Didática

Objetivo do texto
Apresentar os conceitos elétricos e magnéticos próprios do funcionamento dos motores e geradores elétricos, além de impulsionar os alunos na compreensão e percepção da utilidade desses equipamentos através dos processos de transformação de energia próprios de cada uma dessas tecnologias.

Síntese dos questionamentos
Neste momento busca-se enfatizar a diferença entre os motores e os geradores elétricos por meio da distinção dos processos de conversão de energia que devem ocorrer para que tais equipamentos alcancem o desempenho esperado. A sugestão da abordagem textual pode ser acompanhada de uma exposição audiovisual, com o auxílio de *slides* e figuras que mostrem o funcionamento das tecnologias exploradas. Com isso, haverá uma melhor identificação, por parte dos estudantes, dos componentes usados na fabricação desses equipamentos, como também será possível inserir os alunos na verificação dos fundamentos teóricos próprios de suas aplicações tecnológicas e sociais.

Dialogicidade
Os estudantes são convidados ao debate. O professor conduz a discussão promovendo a troca de ideias, com a percepção de cada um dos alunos sobre o conceito e aplicações dos motores elétricos para a sociedade. O padrão

comparativo das respostas apresentadas permite uma real observação assimilativa do conteúdo abordado.

Desenvolvimento da aprendizagem
Sugere-se uma pesquisa sobre os aparelhos (domésticos ou industriais) que funcionam graças aos motores e geradores elétricos. Essa investigação pode ser feita como uma atividade de exploração em grupo, com o auxílio do professor que iria à campo junto com os alunos (em uma oficina eletrônica, ou no próprio laboratório da escola, por exemplo), a fim de mostrar quais equipamentos possuem dependência com a tecnologia presente dos motores elétricos.

Bibliografia Consultada

ALMEIDA, Daniel. Como funcionam os motores elétricos. **TRACTIAN**. Disponível em: https://tractian.com/blog/motores-eletricos-entenda-a-funcionalidade-desse-ativo . Acesso em 28 de novembro de 2023.

Como funciona o motor elétrico de um carro. **GREENBRAS**. São Paulo, 18 de abril de 2022. Disponível em: https://greenbras.com/como-funciona-o-motor-de-um-carro-eletrico/. Acesso em: 27 de novembro de 2023.

MANAVELLA, Humberto. Gerador automotivo, mais conhecido como alternador, é a fonte de energia dos veículos. **Oficina Brasil,** 2020. Disponível em: https://germinaloficinabrasi.websiteseguro.com/noticia/tecnicas/gerador-automotivo-mais-conhecido-como-alternador-e-a-fonte-de-energia-dos-veiculos. Acesso em 23 de setembro de 2024.

Motor Elétrico vista explodida. **Manutenção em ação.** Disponível em:< https://pt.linkedin.com/posts/jos%C3%A9-xavier-100981124_vista-explodida-motor-el%C3%A9trico-largamente-activity-7030196513276346368-_J27>. Acesso em 07 de julho de 2024.

Motor Elétrico visualização explodida. **Depositphotos.** Disponível em: https://depositphotos.com/br/photo/electric-motor-exploded-view-rendering-isolated-white-background-650694648.html . Acesso em 07 de julho de 2024.

Motor Elétrico. **SimuFísica/ CNPq.** Disponível em: https://simufisica.com/simulacoes/motor-eletrico/ . Acesso em: 01 de março de 2023.

VERVE CIENTÍFICA. **Entenda a diferença entre um motor e um gerador elétricos**. YouTube, 25 de abril de 2023. Disponível em: <https://youtu.be/Qk8Ajtyh5Uc?si=xhKn98bK044KTp18>. Acesso em 05 de dezembro de 2023.

Você conhece os principais tipos de motores elétricos? **Abecom**. São Paulo, 03 de fevereiro de 2022. Disponível em: https://www.abecom.com.br/tipos-de-motor-eletrico/ . Acesso em: 24 de novembro de 2023.

Unidade de Ensino

Aula 1

Motores: história e epistemologia

Figura 4. Máquina de Tear.

Equipamento mecânico construído com o fim de alavancar a produção industrial de tecidos, implementado no sistema fabril no século 18. Fonte: Porto Editora (2024).

Ao analisarmos o processo evolutivo da nossa espécie, constatamos que a nossa habilidade manual foi um dos primeiros recursos dos quais fizemos uso a fim de modificar a natureza. As mãos se revelaram como um elemento fundamental no processo de desenvolvimento da potência de trabalho do ser humano e "deram vida" a novos instrumentos e equipamentos, os quais modificaram a humanidade ao longo de séculos e milênios.

O avanço nas habilidades de **manuseio** para o aprimoramento de materiais, processos, técnicas e até mesmo para a criação de novas ferramentas[1], originou-se da inerente necessidade de sobrevivência, adaptação e crescimento do *homo sapiens* nos primeiros momentos de sua história, tendo sido crucial para que a espécie prosperasse, diferenciando-a de forma contundente dos outros animais. Essa necessidade posicionou o homem como a "primeira máquina" desenvolvida e aprimorada pelo próprio homem: uma máquina complexa com a capacidade de gerar uma força de trabalho de imensa potência de criação.

À medida que a espécie evoluía, aprimorava-se também a capacidade de elaborar ferramentas e maquinários, proporcionando o aperfeiçoamento das técnicas para a criação de novas tecnologias que possibilitassem ampliar o potencial da força de trabalho do homem em cada tarefa realizada diariamente. Os **motores** surgiram como uma dessas mais eficientes criações do homem, que se via confrontado com a necessidade de aumentar seu nível de produtividade, rompendo os limites do trabalho braçal.

A invenção dos motores e, consequentemente o aprimoramento dos maquinários utilizados nas fábricas com diversos fins de utilidade, resultou em um marco para a sociedade. Tal acontecimento ficou registrado na história da humanidade como a Primeira Revolução industrial, tendo como base o uso de máquinas que passaram a elevar a produtividade das indústrias. O homem, então, deixa de ser um trabalhador usado como ferramenta e passa a ser instrumento para a utilização de outro, isto é, "a ferramenta da própria ferramenta". Dentro desse recorte temporal, podemos destacar a invenção da primeira máquina de fiar tecidos (Figura 4), construída pelo carpinteiro inglês James Hargreaves (1720-1778), que alavancou a tecelagem dos fios de lã. A produção, que era de um fio por vez, com o uso da máquina de tear passou a ser de oitenta fios ao mesmo tempo.

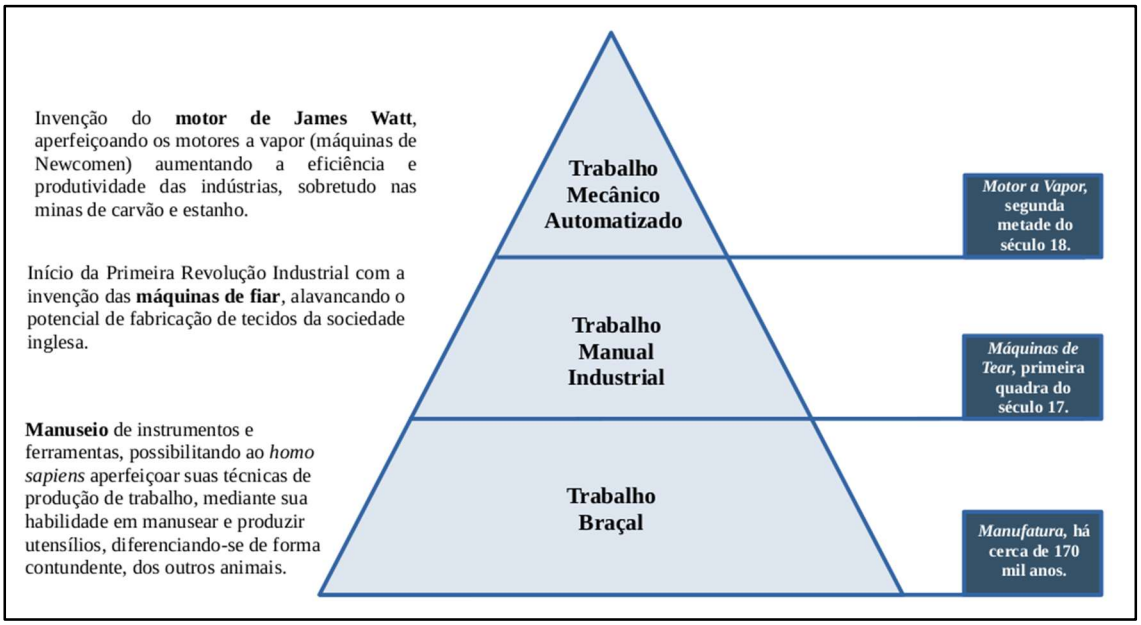
A ascendência da utilização das Máquinas a Vapor com fins industrias deu impulso à construção dos motores, tendo sido a Máquina de Vapor Atmosférica a construção mais proeminente. Ela foi projetada no início do século 18 pelo ferreiro britânico Thomas Newcomen (1664-1729) para coletar água das minas de carvão, o qual era utilizado como combustível de expansão, condicionando o uso do

[1] Com o entendimento sobre os processos de emancipação e aprimoramento das práticas manuais para a produção de trabalho, essa conceituação passaria a ser conhecida como **manufatura**. (N. A.)

maquinário na melhoria e eficiência da análise da combustão atmosférica (SILVA, 2019). A Máquina de Newcomen foi brilhantemente aperfeiçoada por seu compatriota, o engenheiro James Watt (1736-1819), que empregou suas ideias no equipamento com fim de minimizar a perda de energia causada pela constante troca de calor no processo mecânico envolvido.[2]

A Figura 5 nos informa sobre o contexto histórico atrelado ao avanço das habilidades motoras desenvolvidas pela sociedade, a fim de contextualizar como se era empregada a potência de trabalho do homem nos anos que compreendiam o final do século 17 e início do século 18.

Figura 5. Pirâmide evolutiva da potência de trabalho do homem.



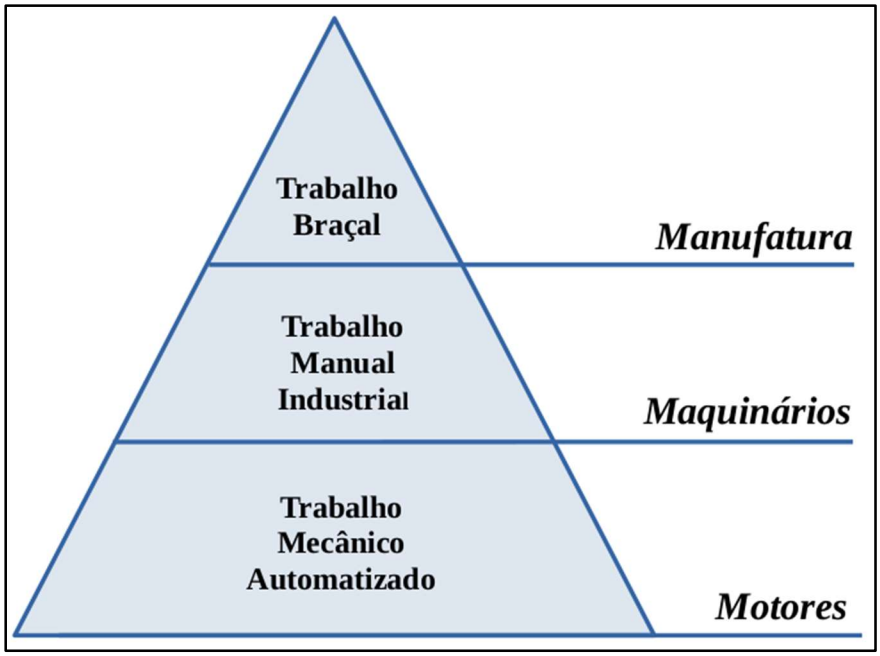
Recorte temporal que retrata a evolução dos processos de trabalho do homem no período que permeia o final do século 17 e início do século 18. Fonte: Autoria própria (2024).

A partir da segunda metade do século 18, a distribuição vista na pirâmide evolutiva destacada na Figura 5 foi inteiramente modificada mediante a invenção, implementação e aperfeiçoamento dos motores a vapor. Na Figura 6, podemos observar um outro panorama graças ao uso dessa tecnologia como peça

[2] A engenhosidade de Watt consistiu em acoplar condensadores externos aos motores desses maquinários, refrigerando o reservatório de água, aumentando sua eficácia no processo de utilização do vapor d'água como combustível gerador de energia mecânica.

fundamental do processo de melhoramento dos maquinários industriais, o que possibilitou um salto gigantesco rumo ao progresso da humanidade que se via modelada pela necessidade de produzir cada vez mais e melhor.

Figura 6. Pirâmide representativa sobre a distribuição das aptidões de trabalho do homem.



Retrato do cenário industrial no final do final do século 18. Fonte: Autoria própria (2024).

Este material instrucional foi elaborado com o fim de explorarmos didaticamente como se deu a evolução do potencial de trabalho do homem, graças ao avanço nos estudos sobre os fenômenos elétricos e magnéticos e seu uso voltado para o aperfeiçoamento dos motores, modificando para sempre as relações sociais impulsionadas pela constante modernização e invenção de diversos aparelhos tecnológicos que surgiram desde então.

➢ QUESTÕES PROBLEMATIZADORAS

1. A criação e utilização dos motores modificaram as relações de trabalho da humanidade? Justifique.

_____
_____
_____
_____

2. Conte-nos sobre seu conhecimento sobre as conexões entre os motores e a Primeira Revolução Industrial. Você poderia citar uma outra utilização dessa tecnologia na sociedade contemporânea?

_____
_____
_____
_____
_____

3. Qual é a sua percepção sobre o impacto do uso dos motores na indústria moderna? Isto é, quais ferramentas você observa no seu dia a dia que funcionam à base de motores? Você considera que existe algum equipamento industrial que funcione sem a tecnologia empregada no uso dos motores?

_____
_____
_____
_____

Aula 2

Os ímãs e o surgimento do magnetismo

Figura 7. Magnetita, o ímã natural.

Tetróxido de Triferro (Fe_3O_4), nomenclatura oficial de acordo com as suas propriedades químicas. Foto: Bruno Yutiro Maruyama (IGc – USP).

Quem não conhece aquele "pedaço de metal", capaz de atrair uma moeda, um prego ou até mesmo fazer com que alguns enfeites fiquem "grudados" na geladeira? Na realidade, esses objetos não são metais, mas sim óxidos (cerâmicas), e estão no centro de estudo de uma área estratégica para o desenvolvimento contemporâneo: o magnetismo.

Atualmente, os estudiosos da ciência admitem três vertentes históricas e independentes sobre a origem do magnetismo. A primeira delas — talvez a mais difundida nos livros didáticos —, remete à região da "Magnésia", na Grécia Antiga, situada no litoral do Mar Egeu, na província de Tessália. Nessa localidade existiam

abundantes reservatórios naturais de Óxido de Ferro[3], descoberto pelas observações feitas por um camponês de nome Magne. Enquanto manuseava o seu cajado de pastoreio, ele notou que este atraía exclusivamente pedaços de uma determinada pedra. Em sua curiosidade inicial, passou a se perguntar por qual motivo o mesmo não acontecia com outras rochas com as quais se deparava no caminho. Em provável alusão à curiosidade do pastor e desbravador, foi dado o nome de "Magnetita" à pedra que era atraída pelo seu cajado.

A segunda narrativa acerca do surgimento do magnetismo converge para uma outra região, igualmente chamada de "Magnésia", mas por sua vez situada na Ásia Menor, em cuja proximidade se destacava a famosa cidade de Mileto – onde nasceu o célebre filósofo Tales[4].

O terceiro registro aponta para a América Central, entre os séculos 12 e 5 a. C., mais precisamente área região compreendida entre o sul do México e o oeste da Guatemala. Evidências arqueológicas comprovam o que os povos originários dessas localidades detinham o conhecimento sobre os efeitos de atração e repulsão ligados à magnetita, bem como suas aplicações artesanais, especialmente na construção de artefatos religiosos.

O curioso manuseio da magnetita acarretou em alguns estudos práticos, considerando facilidade própria desse tipo de minério para atrair diversos tipos de metais. Por conta dessa característica especial, e em virtude da correspondência etimológica com o termo francês *aimant* (amante), esse tipo de rocha passou a ser conhecido como "ímã". Assim, os ímãs, no sentido pejorativo da palavra, são considerados "amantes do ferro", em função da sua capacidade natural de atrair materiais que possuem o elemento Ferro (Fe) em suas composições.

Os primeiros registros práticos do uso dos ímãs em construções experimentais são creditados aos chineses, por volta do ano 100 antes de Cristo. Eles foram os inventores da bússola, que são dispositivos usados para a orientação espacial em decorrência da existência de um campo magnético terrestre — como veremos na Aula 2. No ocidente, contudo, um eventual progresso nos estudos das propriedades dos ímãs só ocorreu mais de mil anos depois da invenção chinesa.

---

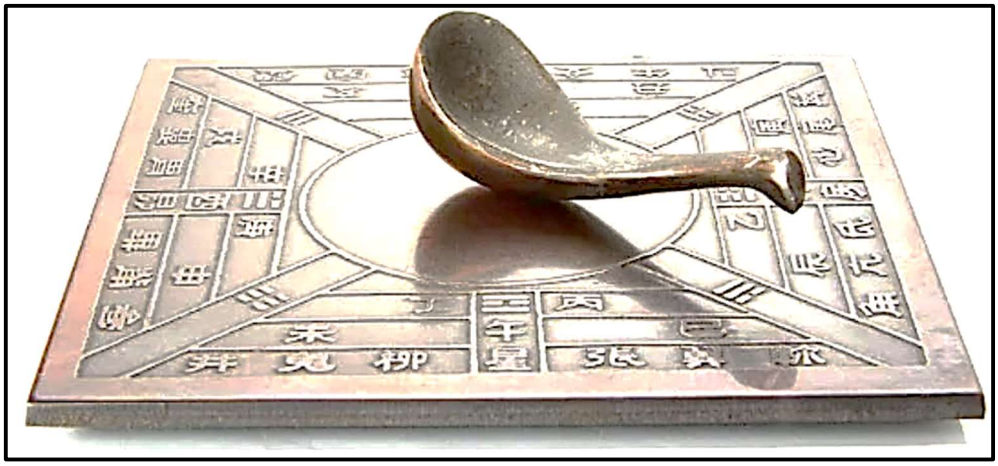
[3] Nessa fronteira geográfica, mais especificamente, existiam os compostos rochosos (Fe_2O_3), um dos tipos de óxidos (conhecido por Hematita), que são identificados como ímãs naturais. (N. A.)

[4] Tales de Mileto (624-548 a. C.), iminente pensador da escola jônica, cujos trabalhos filosóficos e matemáticos seguem influenciando gerações até os dias atuais. (N. A.)

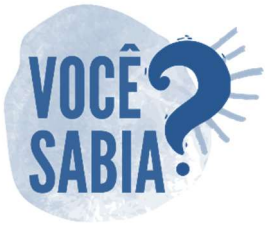
Destaque para os trabalhos que estabeleceram o conceito de "polos magnéticos", do engenheiro militar francês Pierre de Maricourt (1220-1270), e a inseparabilidade dos polos de um ímã — que mais tarde viria a se consolidar como uma propriedade fundamental no estudo do Magnetismo.

Depois de Maricourt, um outro avanço atrelado ao estudo dos ímãs só ocorreu em 1600, com a publicação do livro *De Magnete*[5], escrito pelo físico inglês William Gilbert (1544-1603). Em seus apontamentos, encontramos a primeira observação de que a Terra tinha características similares àquelas presente nos ímãs, porém com maiores implicações. Gilbert conjecturou a importante característica presente nas agulhas imantadas (isto é, magnetizadas) a qual apontam para os polos magnéticos da Terra, de tal maneira que o polo norte do nosso planeta é capaz de atrair o polo sul de um ímã.

Figura 8. Bússola chinesa.



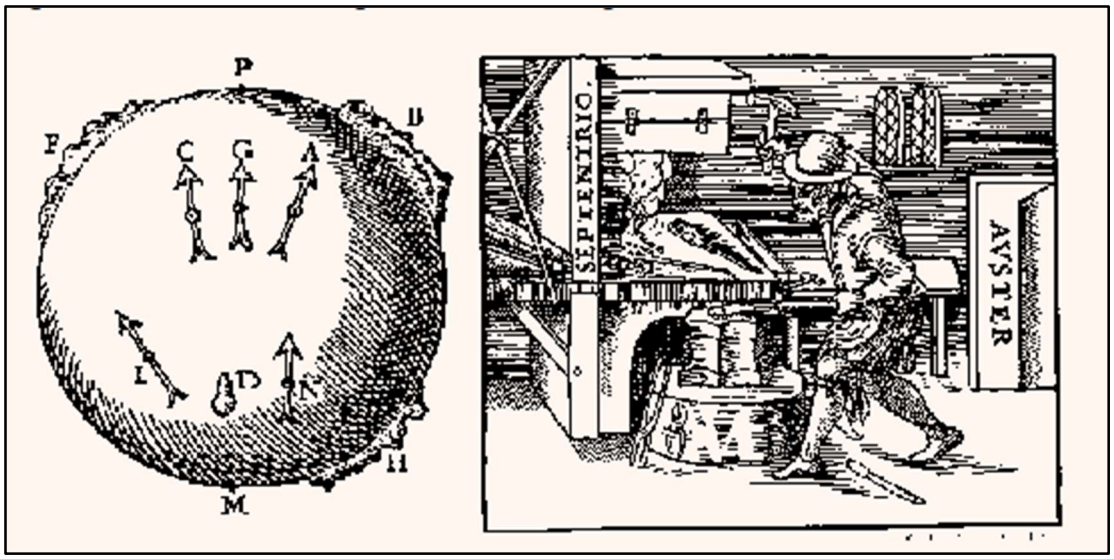
Representação da bússola inventada pelos chineses. A agulha orientada possui a forma de uma colher, contendo seu polo sul no extremo mais delgado (cabo). Relatos dos primeiros séculos da era cristã remontam seu uso para práticas de adivinhações. Fonte: Guitarrara (2024).



Mesmo com os avanços nos estudos do magnetismo — sobretudo com o entendimento do conceito de campo magnético (Aula 2) — ainda hoje não é possível estabelecer indubitavelmente por qual motivo a Terra possui características de um "grande ímã". A Física converge para uma narrativa baseada nas interações (e. g. movimento de rotação e altíssima temperatura) presentes na composição do núcleo líquido do nosso planeta. (N. A.)

[5] *"De Magnete, magneticisque corporibus, et de magno magnete tellure"*, título original que pode ser traduzido como "Sobre o magnetismo, corpos magnéticos e o grande ímã da Terra". (N. A.)

Figura 9. Ilustrações originais presente no livro *De Magnete*.



À esquerda tem-se a representação da Terra com características de ímãs, destacando o sentido orientado das possíveis atrações magnéticas. À direita, observa-se o processo manual de magnetização em uma barra de ferro. Fonte: Hugo Franco (2003).

Muito se pode discorrer sobre o recorte histórico referente ao surgimento e à consolidação do Magnetismo como elo fundamental da Física. Neste sentido, pretendemos enfatizar alguns de seus principais conceitos, a fim de relacioná-los com importantes aplicações tecnológicas do nosso dia a dia, com destaque para o funcionamento dos motores e geradores elétricos.

Neste QR Code você terá a um vídeo didático que explora algumas das propriedades dos ímãs citadas durante esta aula.

- **QUESTÕES PROBLEMATIZADORAS**

4. Qual estratégia você adotaria para identificar um ímã, entre os diversos tipos de minérios existentes? Seria possível fazer com que um ímã deixe de ser ímã? Ou ainda, será que um ímã pode ser criado artificialmente?

_____

_____

_____

_____

5. Em virtude da propriedade que o ímã possui em atrair determinados materiais, poderíamos pensar que ele também possui a característica de repelir certos materiais? Seria correto afirmar que todo metal pode ser atraído por um ímã?

_____

_____

_____

_____

_____

6. O que você entende por atração e/ou repulsão entre materiais? Se você tivesse que escolher uma região específica para designar a descoberta do magnetismo, qual seria a sua escolha? Por quê?

_____

_____

_____

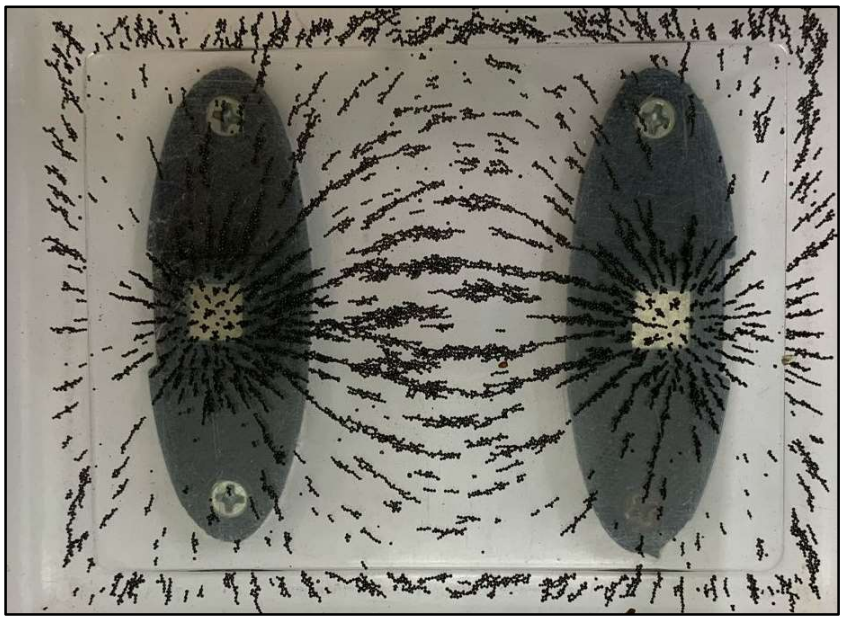
_____

_____

Aula 3

Campo Magnético

Figura 10. Representação do Campo Magnético



Linhas de campo magnético observadas devido à interação entre o ímã e as limalhas de ferro dispostas ao redor de um ímã. A orientação percebida pela disposição das linhas comprova a existência de uma região de interação, isto é, o campo magnético, induzido pelo magnetismo do ímã. Foto: FnEsc / SEDUC (2024).

No estudo da natureza, dizemos que dois objetos interagem quando um influencia, ou provoca algum tipo de alteração, no outro. Isso pode ser observado, por exemplo, quando uma bola de futebol bate na trave, ou quando pedalamos uma bicicleta. Entretanto, reconhecemos não ser de fácil entendimento a percepção de como dois ou mais corpos podem interagir à distância sem que haja um contato direto. Tal dificuldade de assimilação pode estar relacionada com a sutil definição da palavra "contato", a qual iremos tratar como a troca de informações entre dois ou mais objetos — sendo essas informações entendidas como um conjunto de características físicas inerentes aos corpos que estão interagindo. A interação à distância existe, e suas implicações estão diretamente relacionadas a uma ideia fundamental na Física, que é o conceito de *Campo*.

A primeira definição de campo, como espaço no qual são percebidas trocas de informações físicas entre dois os mais objetos, aparece no século 17, fruto dos estudos de Sir Issac Newton[6] (1643-1727). Em seu *Princípios Matemáticos de Filosofia Natural* (1687), ele trouxe ao mundo a definição de *Campo Gravitacional* para designar a região onde a força gravitacional atua, agindo de modo a atrair dois corpos diferentes e que não estão em contato direto.

Uma vez que ficou consolidada a percepção de campo gravitacional, abriu-se a possibilidade para descrevermos outras manifestações análogas da natureza. Seguiu-se, desta forma, a definição de *Campo Magnético*, conceito fundamental para explicar como que os ímãs provocam reações em alguns objetos ao seu redor, através do entendimento de seus processos de interação. Portanto, assim como a Lua é atraída pela Terra por estar em uma região do espaço que tem forte influência do campo gravitacional terrestre, um objeto só pode ser atraído (ou repelido) por um ímã, se estiver em uma região que esteja sob a influência de seu campo magnético.

Mediante o avanço nos estudos das características dos ímãs foi possível notar que esses materiais possuem algumas propriedades que o diferenciam dos demais objetos e que são responsáveis pelos fenômenos resultantes a partir da interação entre eles. Os ímãs apresentam polos distintos e inseparáveis, que são costumeiramente designados por "Norte Magnético" (N) e "Sul Magnético" (S), e que vêm a ser classificados a partir da sua capacidade de se atraírem ou de repelirem, mutuamente. Isto é, para que seja possível classificar os polos dos ímãs é preciso notar uma outra propriedade: atração e repulsão entre eles. Sendo possível constatar que "polos magnéticos com a mesma designação são repelidos, enquanto polos magnéticos com designações distintas são atraídos".

A fim de verificarmos os efeitos oriundos das interações dos ímãs e das propriedades do campo magnético, construímos o experimento "Mola Magnética" (Figura 11), por meio do qual foi possível analisar alguns pontos dentro da perspectiva abordada.

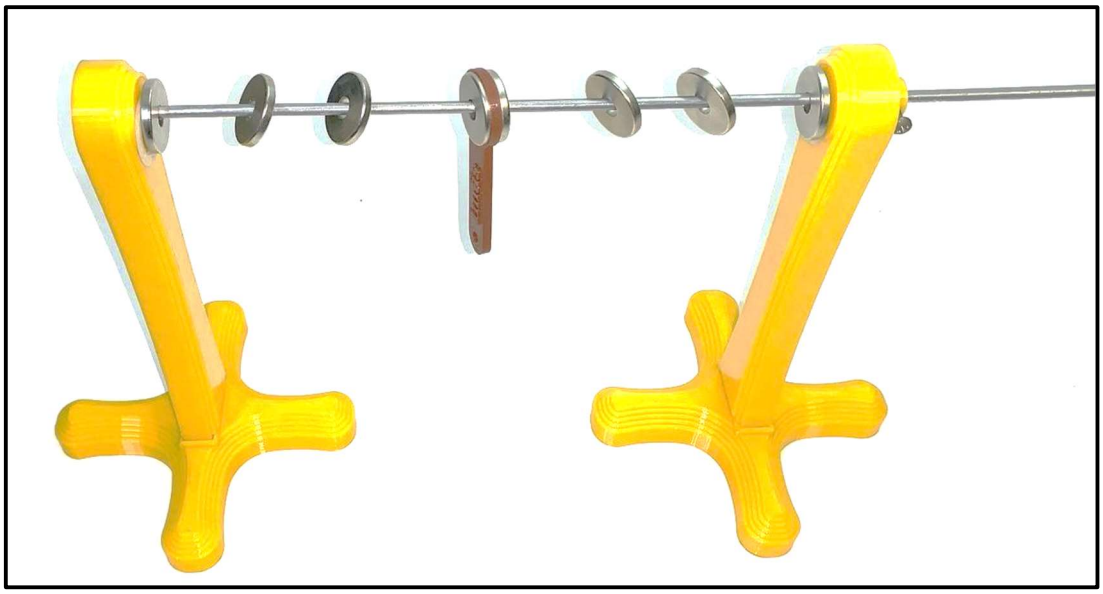
Interaja com o experimento "Mola Magnética" através do QR Code ao lado.

[6] "A Natureza e suas leis estavam ocultas na noite. Deus disse: Seja Newton! E tudo fez-se luz!" Frase escrita na lápide de Newton, na Abadia de Westminster/UK. (N. A.)

Na “Mola Magnética”, podemos observar:

- A interação entre os ímãs ocorre sem contato e instantaneamente. Isso se deve ao fato de o campo magnético ser, assim como o gravitacional, invisível a olho nu;
- A influência do campo magnético de um ímã é limitada a uma região do espaço, definida pela intensidade do campo magnético;
- A polaridade dos ímãs é percebida pelo fato de não ser possível juntar (por contato direto) dois ímãs nesse aparato, uma vez que eles foram posicionados com o fim de se repelirem.

Figura 11. Mola Magnética



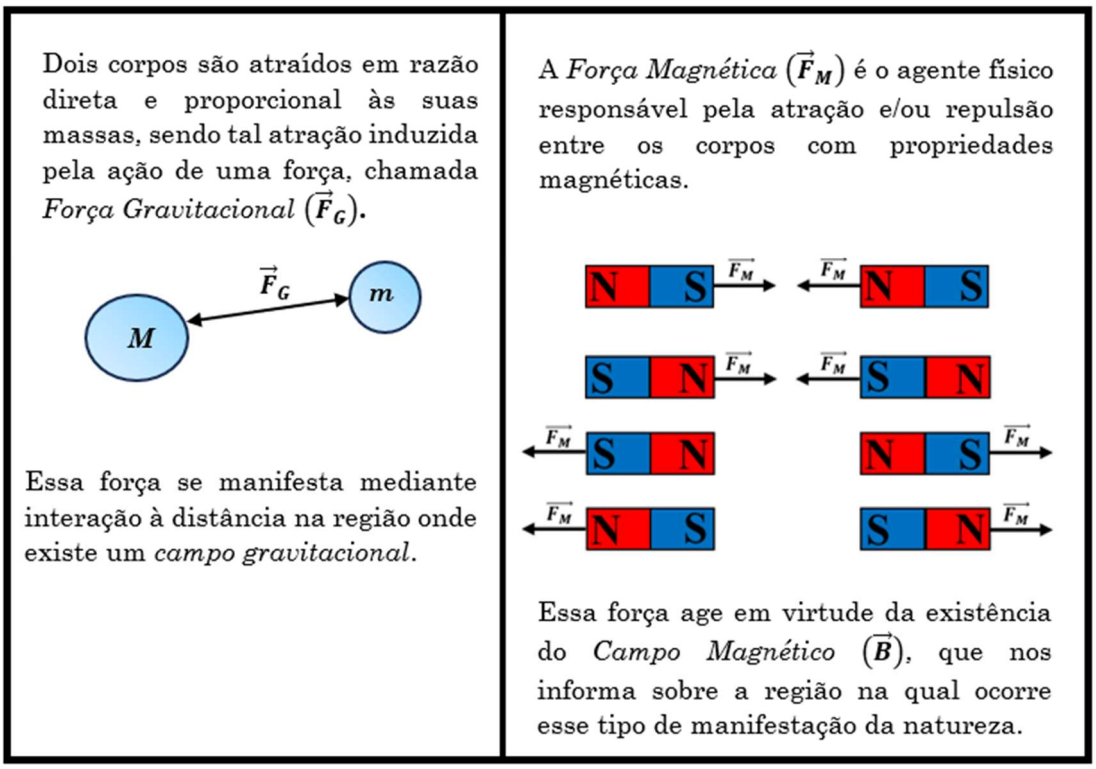
Experimento construído com o fim de verificar as interações próprias dos ímãs através do seu campo magnético. Foto: FnEsc / SEDUC (2024).

A inseparabilidade dos polos se apresenta como uma propriedade fundamental, visto que ela atesta não ser possível criar um monopolo magnético, por mais que o ímã venha ser dividido (quebrado). Esse fato possui importantes implicações em um estudo mais aprofundado do Magnetismo. (N. A).

Mas afinal, haveria um agente físico responsável por essa interação (atrativa ou repulsiva) entre os polos de um ímã? Outrossim, haveria uma fronteira específica na qual pode-se constatar a existência desse tipo de manifestação

magnética? Podemos responder tais questionamentos fazendo uma analogia ao pensamento newtoniano, oriundo da ideia de campo gravitacional. Vejamos a Figura 12, a fim de compreendermos o raciocínio.

Figura 12. Interações gravitacional e magnética.

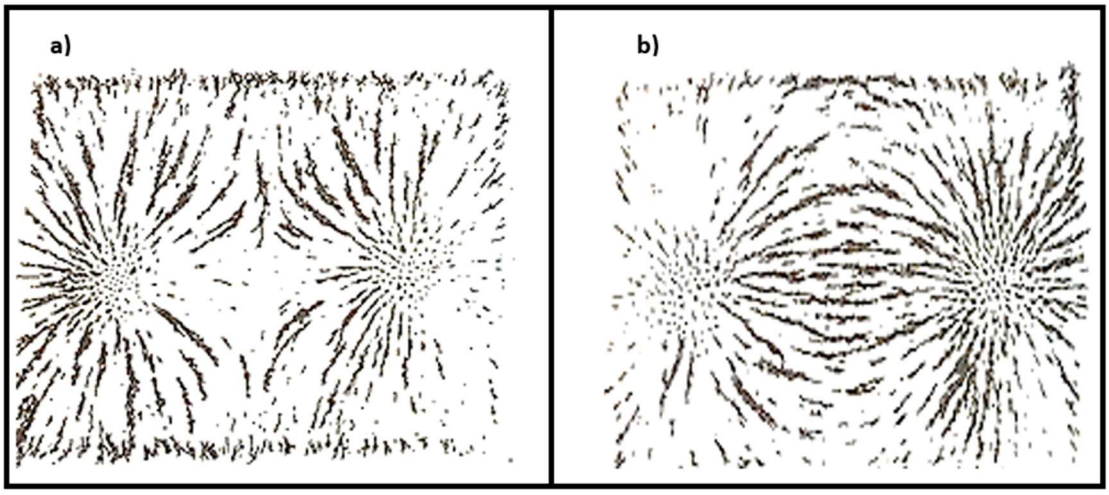


Analogia entre a compreensão da ideia de campo gravitacional com as observações provenientes das interações existentes em função da existência da região de campo magnético. Fonte: Autoria própria (2024).

Não é possível enxergar a região permeada pelo campo gravitacional, mas será seria possível enxergar a região de influência do campo magnético proveniente dos ímãs? Sim, é possível. Ela pode ser representada por meio das linhas que circulam ao seu redor, denominadas *linhas de campo* (também chamadas de *linhas de força* ou *linhas de fluxo*). A Figura 10 (apresentada no início desta aula) mostra como esse fenômeno pode ser observado experimentalmente. Nela temos dois ímãs envoltos por pequenas partículas metálicas (pó escuro) resultantes de processos de usinagem. Essas limalhas de ferro tendem a ser atraídas pelo campo magnético do ímã, formando ao redor dele várias linhas circulares que seguem um contorno que nos permite concluir que as linhas de campo "entram" e "saem" do ímã. Tais linhas circulares são as próprias linhas de campo que revelam a natureza vetorial do campo magnético, aqui representado pelo vetor $(\vec{B})$.

Assim como a definição de força, o conceito de campo também se apresenta como uma grandeza vetorial e, portanto, sua descrição quantitativa depende da intensidade, da direção e do sentido. Essas propriedades são definidas com base nos seguintes critérios: i) intensidade: as linhas de fluxo são mais numerosas (densas) próximas ao ímã e desaparecem à medida que se afastam dele; ii) direção: as linhas de força "saem" e "retornam" ao ímã e não se cruzam; iii) sentido: as linhas, por convenção didática, tendem a "sair" do polo norte (N) e "entrar" no polo sul (S). A Figura 13 nos ajuda a observar essas características.

Figura 13. Enxergando o invisível.

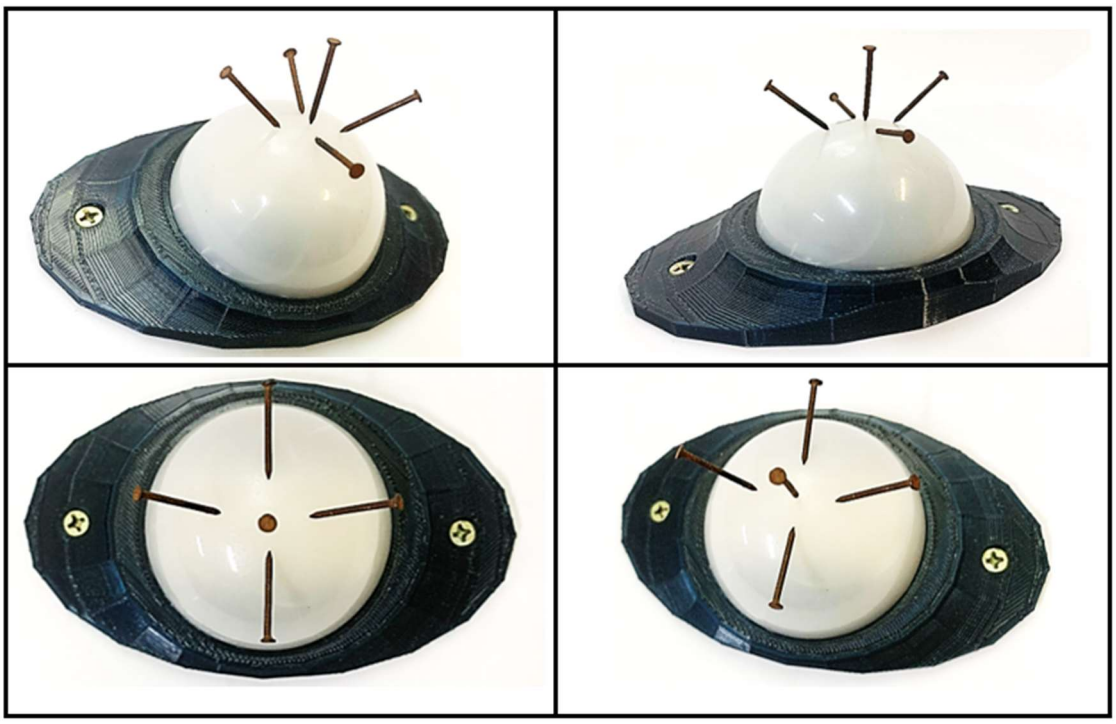


Propriedades do campo magnético dos ímãs. Em a) são mostradas as linhas de força produzidas pelo campo magnético de dois ímãs interagindo no modo repulsivo, circunstância em que há uma repulsão entre os mesmos polos. Nesta situação, o polo norte (N) e o polo sul (S), estão dispostos em confronto — isto é, N-N ou S-S. Desse modo, como as linhas de fluxo têm de seguir o sentido orientado convencional, ou seja, "saindo" de N e "entrando" em "S", elas precisam retornar ao ímã, curvando-se nessa direção. Além disso, elas não podem se cruzar — sendo essa propriedade a responsável por criar a repulsão observada. Em b) as linhas de fluxo são apresentadas mediante a atração entre os polos opostos, isto é, em uma situação N-S. Esse fato pode ser verificado conforme notado pela interseção entre as linhas de campo magnético dos ímãs — "saindo" e "entrando" em cada ímã —, gerando assim a atração. Vale ressaltar que não é possível detectar sem indicar — ou seja, com base apenas na observação da interação das limalhas de ferro —, quais são, efetivamente, os polos N e S de cada ímã. Fonte: FnEsc / SEDUC (2024).

As imagens da Figura 14 mostram que a região de influência do campo magnético possui natureza tridimensional. O experimento denominado "Enxergando o Invisível (3d)" foi elaborado a fim de nos lembrar que o campo

magnético se estende por toda a região do ímã, em três dimensões — contrastando com a ideia de uma região bidimensional como sugere as linhas planas mostradas na Figura 13.

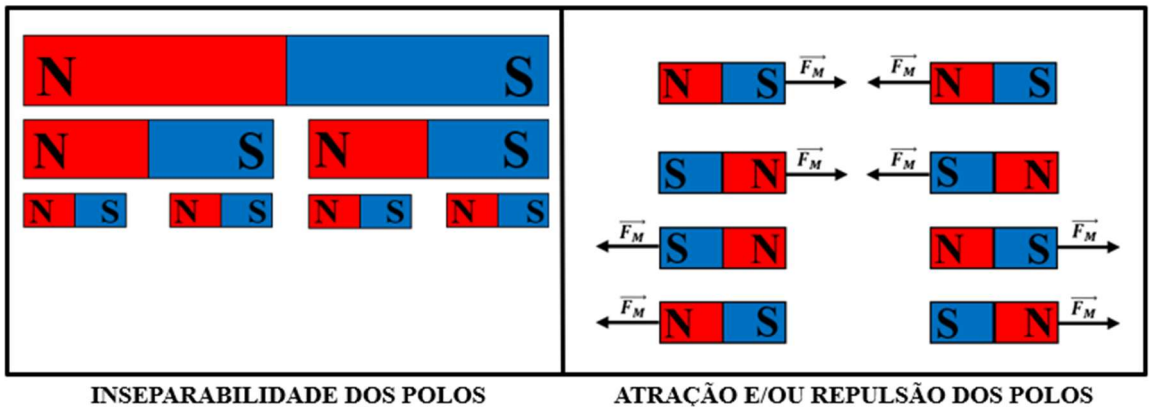
Figura 14. Experimento “Enxergando o Invisível (3d)”



Nesta ilustração temos quatro imagens que representam o mesmo fenômeno, fotografadas a partir de ângulos distintos, a fim de mostrar as diferentes direções com as quais os pregos são orientados em virtude da influência do campo magnético do ímã. Fonte: FnEsc/ SEDUC (2024).

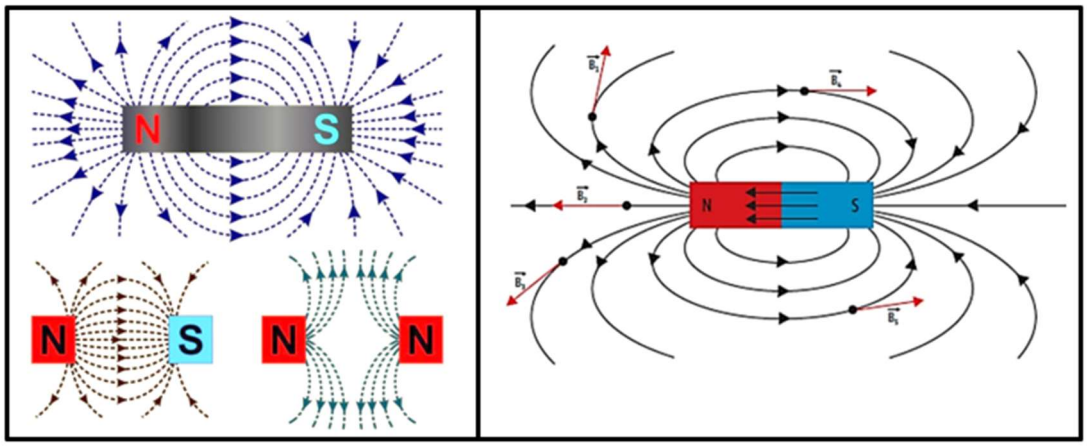
Trazemos nas Figuras 15 e 16 outras ilustrações que nos condicionam a uma melhor compreensão dos conceitos descritos. Nelas podemos observar algumas das propriedades magnéticas dos ímãs e seus agentes físicos responsáveis pelas interações. É possível também observar como a orientação resultante das linhas de campo está em acordo com as características de atração e repulsão dos ímãs, além de nos revelar o sentido do campo magnético $(\vec{B})$.

Figura 15. Propriedades magnéticas dos ímãs



À esquerda está ilustrada a impossibilidade de existência de um ímã com somente um polo magnético. Isto é, por mais que ele seja dividido em outros ímãs, os novos pedaços irão conter, obrigatoriamente, dois polos magnéticos distintos, "norte" (N) e "sul" (S). À direita, há a representação da interação entre os polos em virtude da atuação da força magnética $(\vec{F}_M)$, fazendo com que polos iguais sejam repelidos e polos diferentes sejam atraídos. Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 16. Linhas de Campo Magnético



À esquerda: orientação das linhas de campo magnético, regida pelo direcionamento conforme as propriedades de atração e repulsão entre os polos de um ímã — repelindo-se, se deparadas entre polos iguais, e atraindo-se, quando confrontadas entre polos distintos. Note que as linhas de campo são direcionadas a partir do polo norte, em direção ao polo sul (N → S), com a orientação: "saindo" do polo norte e "entrando" no polo sul. À direita: orientação do vetor campo magnético, sempre tangente às linhas de fluxo magnético. Fonte: Adaptado de Carvalho (2024) e GE (2024).

Até o século 19, o magnetismo havia se consolidado como a ciência dedicada ao estudo dos ímãs, das bússolas e do grande ímã Terra (FILHO, 2023). As

interações oriundas desses fenômenos proporcionaram grandes avanços no sistema fabril — especialmente com a invenção dos motores elétricos —, bem como contribuíram com a modernização da sociedade desde então. Na Aula 3 veremos como alguns desses progressos tecnológicos foram conquistados como consequência de um novo entendimento sobre a correlação existencial entre magnetismo e eletricidade — culminando em um novo ramo do conhecimento científico: o *Eletromagnetismo*.

➢ QUESTÕES PROBLEMATIZADORAS

7. Uma vez que usamos o conceito de campo gravitacional para definirmos campo magnético, podemos pensar que, tal como há interação mútua entre a Terra e a Lua, o mesmo ocorre entre os ímãs e os metais? Em outras palavras, é possível que um metal atraia um ímã? Explique seu raciocínio em função das propriedades que lhe foram apresentadas.

_____

_____

_____

_____

8. O que você entendeu sobre o conceito de monopolo magnético? Fale um pouco da sua percepção acerca dessa propriedade dos ímãs. Como podemos identificar os polos de um ímã? Além da bússola, poderia citar alguma tecnologia do nosso dia a dia que funciona com base no magnetismo dos ímãs?

_____

_____

_____

_____

_____

9. Proposta de contextualização: Você sabia que o planeta Terra possui polos, tal como os ímãs? Você acredita que existe alguma relação entre os polos do planeta com o magnetismo presente nos ímãs? Será que a Terra também possui um campo magnético? Compartilhe seu pensamento com os demais colegas da turma e, eventualmente, questione o professor sobre as dúvidas provenientes dessa indagação.

_____

_____

_____

_____

_____

Aula 4

Processos de indução

Figura 17. Parafusos imantados

Três ilustrações que mostram parafusos contendo características de um ímã em decorrência de um dos processos de imantação. Os ímãs em forma de "U" são industrializados, já a pedra preta, no canto inferior direito, é a magnetita. Fonte: FnEsc/ SEDUC (2024)

Se você já se deparou com muitas chaves de fenda, possivelmente já deve ter encontrado uma que tinha a capacidade de atrair um parafuso. Na tentativa de entender como ocorre este caso em específico, talvez você tenha escutado uma explicação do tipo: "o parafuso é atraído pela chave, pois existe um ímã na extremidade da ferramenta". Bom, podemos chegar a um consenso de que essa resposta não está exatamente certa, nem errada. A chave de fenda, de fato, pode conter um ímã, ou ser apenas uma ferramenta que possui a extremidade imantada. Ou seja, o objeto pode comportar-se como um ímã sem ser propriamente um — fenômeno denominado *imantação.*

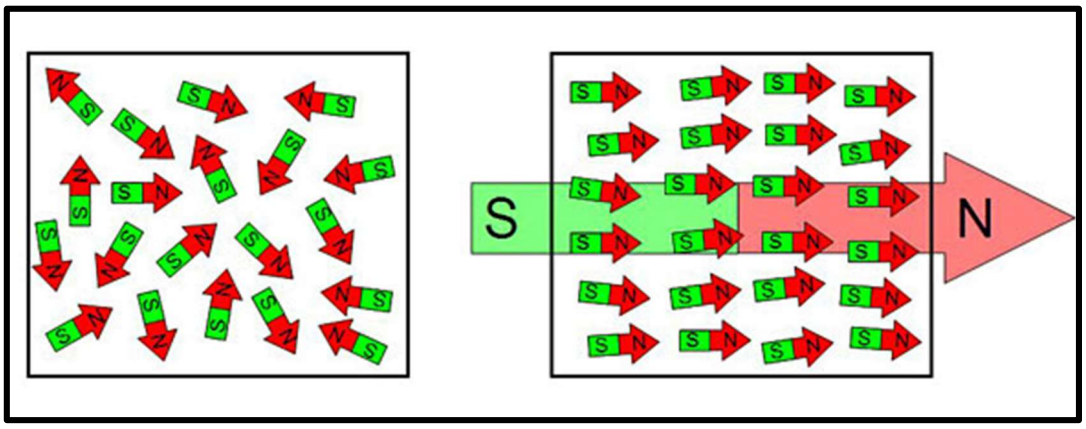
Por imantação compreende-se a capacidade que certos materiais têm de adquirirem as características típicas de um ímã. Há três formas de imantar um objeto: i) por contato; ii) por indução; iii) por eletrização. No primeiro caso um determinado corpo é imantado após ser atritado (em sentido único) em um ímã

permanente. Na segunda situação, mesmo não havendo contato, um objeto pode sofrer imantação após permanecer por um dado intervalo de tempo nas proximidades de um ímã permanente. Para o terceiro caso, um condutor elétrico passará a ter atributos de ímã ao ter uma corrente elétrica circulando através dele.

A fim de estudarmos um pouco mais sobre os processos de imantação por contanto e por indução, precisamos compreender como se dá o fenômeno de magnetização de um material, que se caracteriza mediante sua capacidade de interação magnética com um campo magnético. Essa causa está interligada à existência de regiões formadas por estruturas micro e nanoscópicas, denominadas de *domínios magnéticos* (formadas pelos átomos), que podem se organizar de maneira aleatória, ou serem orientadas em uma mesma direção.

Quando os domínios magnéticos estão aleatoriamente dispostos, o material apresenta baixa, ou nenhuma, magnetização — assim são os plásticos, a madeira, e a água, por exemplo. Entretanto, quando orientados em uma mesma direção, os domínios magnéticos deixarão o material com um valor considerável de magnetização, de tal modo que ele poderá interagir de forma macroscópica com um outro material que também apresente um relevante potencial de magnetização — tais como os ímãs naturais, por exemplo. A Figura 18 ilustra essa conceituação.

Figura 18. Domínios Magnéticos.



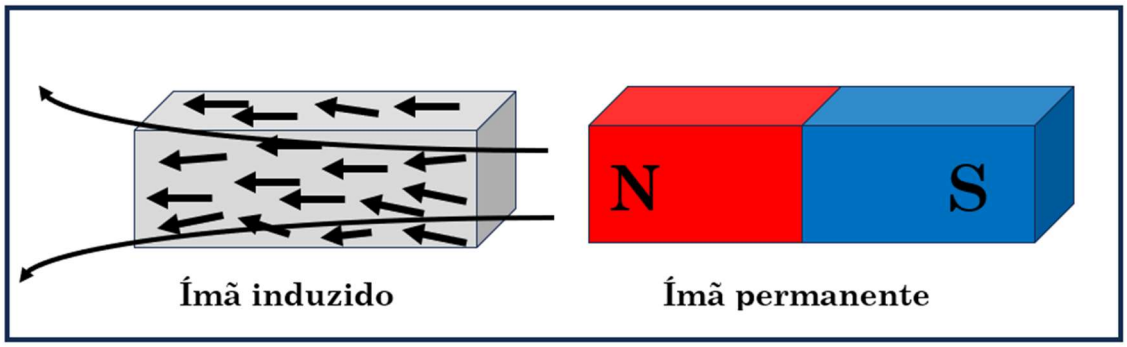
À esquerda: baixa magnetização oriunda da disposição aleatória dos domínios magnéticos. À direita: alta magnetização, domínios magnéticos orientados em uma mesma direção. Fonte: NEOCITIES (2024).

É importante ressaltar que um material com alta magnetização possui uma alta intensidade de interação magnética, fazendo-o apresentar um campo magnético relevante em uma determinada região do espaço[7]. Tal interação tem nos domínios magnéticos o ente fundamental para o entendimento da criação de ímãs artificiais, temporário ou permanente. Em alguns materiais, os domínios magnéticos estão desorientados — dispostos de forma aleatória —, e, portanto, não apresentam nenhuma magnetização. Entretanto, as "paredes dos domínios" podem se mover e mudar a direção dos domínios magnéticos. Logo se um ímã se aproximar de um material com essas características, ele consegue mudar e orientar a direção e sentido dos domínios magnéticos de acordo com o seu campo magnético. A orientação do conjunto de domínios faz com que o material passe a apresentar um campo magnético macroscópico, capaz de interagir magneticamente com outros objetos do espaço. Esse processo de orientação dos domínios através de um campo magnético externo formando um novo ímã é chamado de *indução magnética.*

A existência dos domínios magnéticos está atrelada ao movimento coordenado dos elétrons de algumas centenas a milhares de átomos, assim como a existência do campo magnético externo está atrelada ao movimento dos domínios magnéticos desse material. O exemplo mais comum desse fenômeno é o contato de um ímã permanente com uma barra de ferro — tal como ilustrado na Figura 19. A aproximação do ímã à barra faz com que os domínios magnéticos do ferro se orientem e criem um campo magnético com polaridade oposta ao ímã. Consequentemente, aquele pedaço de ferro torna-se um novo ímã, que imediatamente interage com ímã permanente, fazendo com que ocorra uma interação atrativa entre eles. Ao se afastar, os domínios magnéticos perdem a orientação, tornam-se aleatórios, e a barra de ferro deixa de se comportar como um ímã. Portanto, ela pode ser considerada um ímã temporário.

[7] Se faz justo esclarecer que, quando estamos nos referindo à "altas" ou "baixas" intensidades de magnetização, consideramos os parâmetros de acordo com as escalas micro e nanoscópicas pertinentes aos domínios magnéticos. (N. A.)

Figura 19. Indução Magnética.



Imantação de um objeto não magnetizado em decorrência de sua interação com um ímã permanente. Fonte: Autoria Própria (2024).

Muitas vezes o alinhamento dos domínios magnéticos permanece, mesmo quando um ímã é retirado de sua presença, passando a ser, portanto, um ímã induzido. Esse fenômeno é observado, por exemplo, em bússolas, as quais possuem pequenas agulhas de material ferromagnético (material que responde fortemente a um campo magnético externo) que são capazes de serem imantadas permanentemente.

No QR Code a seguir você terá acesso à uma demonstração experimental do processo de imantacão magnética:

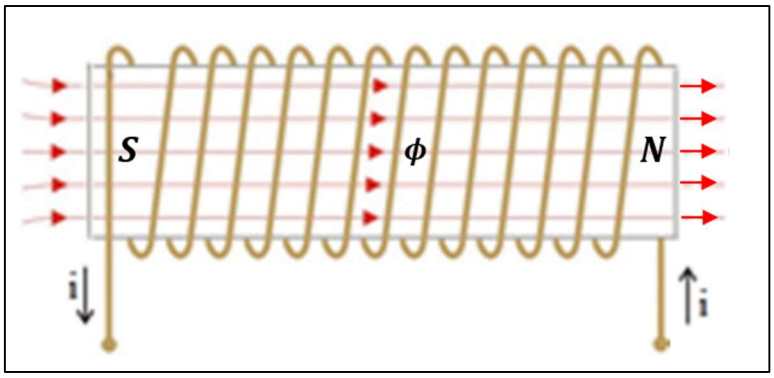
Em se tratando da imantação por eletrização, um material ferroelétrico envolvido por um condutor elétrico (no formato de bobina, por exemplo) apresentará um campo magnético quando uma corrente estiver passando por ele. A origem desse campo magnético está relacionada aos fundamentos do *Eletromagnetismo*, o ramo da Física que descreve a complementariedade entre os campos elétrico e magnético[8]. Os pilares de sua consolidação como ciência

[8] Embora os conceitos sobre eletricidade e magnetismo tenham sido estudados pela humanidade desde o quarto século antes de Cristo, foi somente durante o século 19 que a

elementar foram edificados através da criação de duas leis fundamentais: a Lei de Ampère[9] e a Lei de Faraday[10]. A primeira afirma que uma corrente elétrica, ao passar por um condutor, irá gerar um campo magnético ao redor do seu caminho e. Enquanto a segunda, afirma que o fluxo de campo magnético é capaz de gerar um campo elétrico.

Imagine um fio condutor longo o suficiente para que déssemos várias voltas e fizéssemos uma bobina. Ao circular uma corrente elétrica através desse condutor, pela Lei de Faraday, um campo magnético surgirá ao longo do fio, e, portanto, teremos um ímã artificial — pouco intenso, é verdade, mas teremos. Contudo, podemos ampliar a intensidade desse campo magnético se colocarmos um material ferromagnético dentro das espiras — tal como ilustrado na Figura 20. Uma vez que campo magnético foi criado, suas linhas de força atravessarão o núcleo ferromagnético e irão alinhar, na mesma direção e sentido, os domínios magnéticos do material. Essa interação aumenta fortemente a magnetização do material, tornando-o um ímã mais forte do que o fio condutor.

Figura 20. Núcleo ferromagnético envolvido por espiras condutoras.



Nesta representação, podemos observar como as bobinas (espiras em amarelo) são enroladas ao ímã no interior do estator. A corrente elétrica (**i**), em decorrência do processo de imantação, produz um fluxo magnético (**ϕ**) — linhas orientadas, em vermelho. A

---

sociedade pôde ser contemplada com a metodologia teórica que permitiu o entendimento entre essas duas ramificações da Física como uma só manifestação da natureza. Essa nova (e fundamental) área de estudo passou a ser conhecida como *Eletromagnetismo*. (N. A.)

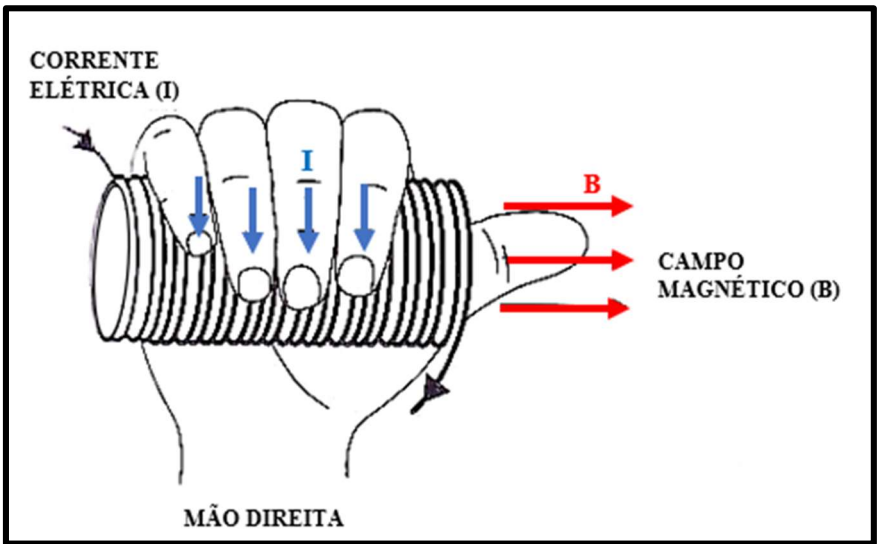
[9] Homenagem justa e necessária ao notável físico francês André-Marie Ampère (1775-1836) que, na primeira metade do século 19, pôde explicar fenômeno observado com base em um pioneiro formalismo matemático pertinente aos resultados experimentais. (N. A.)

[10] Essa lei, que por vezes também chamada de *Lei de Indução Eletromagnética,* descreve o fenômeno de *indução eletromagnética*, o qual foi comprovado pela primeira vez em meados do século 19 graças aos trabalhos experimentais de físico britânico Michael Faraday (1791-1867), um dos nomes mais respeitados no estudo do eletromagnetismo. (N. A.)

orientação das linhas de campo magnético condiz com o esperado, isto é, "saindo" do polo norte (**N**) e "entrando" no polo sul (**S**) e do material, agora imantado. Fonte: Adaptado de Diniz & Araújo (2019).

Na Figura 20, observa-se uma indicação de polaridade (N) e (S) do ímã. Isso é possível em decorrência de uma regra que correlaciona a disposição dos dedos da mão direita com as orientações (direção e sentido) dos campos magnético e elétrico. Essa relação é conhecida *Regra da mão direita para o solenoide*, cuja aplicação para um condutor segue ilustrada na Figura 21. Você também pode tentar reproduzir o que é visto na imagem. Para tanto, utilize sua mão direita, colocando o polegar em posição transversal aos outros dedos das mãos. Com os quatro dedos restantes, envolva o condutor e o material ferromagnético. As pontas desses dedos estarão informando sobre a direção da corrente elétrica. Desta maneira, o polegar ficará apontado para o polo norte do ímã formado. Quando estamos considerando, por outro lado, um fio condutor longo e retilíneo, utilizamos a *Regra da mão direita para o fio condutor*, cuja aplicação se dá de maneira inversa ao explicado anteriormente. Isto é, o polegar informará o sentido da corrente elétrica, enquanto os demais dedos informarão a direção do campo magnético.

Figura 21. Regra da mão direita para o solenoide.



A direção do campo magnética é dada pelo polegar direito. Enquanto o sentido de orientação da corrente elétrica que percorre as espiras condutoras é dado pelos demais dedos que envolvem o núcleo ferromagnético. Fonte: Adaptado de Deuty (2018).

A corrente elétrica nada mais é do que cargas elétricas em movimento, sendo esse fenômeno atrelado à existência de um campo elétrico, o qual produz, em virtude de sua variação, um campo magnético. Em geral para aumentar a

efetividade desse campo, o condutor é enrolado em bobinas (solenoides). Dessa forma, um condutor, até então não magnético — isto é, não contendo características próprias dos ímãs — responde como ímã durante a passagem de corrente elétrica por ele. Observamos também que a resposta magnética pode ser aumentada quando a bobina é enrolada ao redor de um material ferromagnético que contribui para o confinamento do campo magnético.

A imantação por eletrização nos leva a um dispositivo bastante conhecido, o *eletroímã* (ver Figura 22). Nesse aparato, um material ferromagnético é enrolado por um condutor elétrico formando uma bobina. Na referida montagem experimental, temos que o núcleo ferromagnético é um parafuso e o condutor é um fio de cobre. Para gerar a corrente elétrica, usamos uma fonte de tensão de celular. Ao ligar o eletroímã — isto é, quando a corrente elétrica começa a circular através do fio condutor —, podemos notar que ele se torna capaz de atrair peças metálicas que interagem com o seu próprio campo magnético. Ao desligá-lo — ou seja, quando não há circulação de corrente —, ele não mais consegue atrair nenhuma peça. Trazemos na Figura 23 o esquema ilustrativo de como se dá essa interação, destacando como podemos identificar a polaridade do eletroímã.

Figura 22. Eletroímã.

Eletroímã. No *QR CODE* abaixo, você pode visualizar todo ao processo de funcionamento e montagem experimental. Acesse-o e veja como criar seu próprio eletroímã. Foto: FnEsc / SEDUC (2024).

Figura 23. Regra da mão direita indicando a polarização do eletroímã.

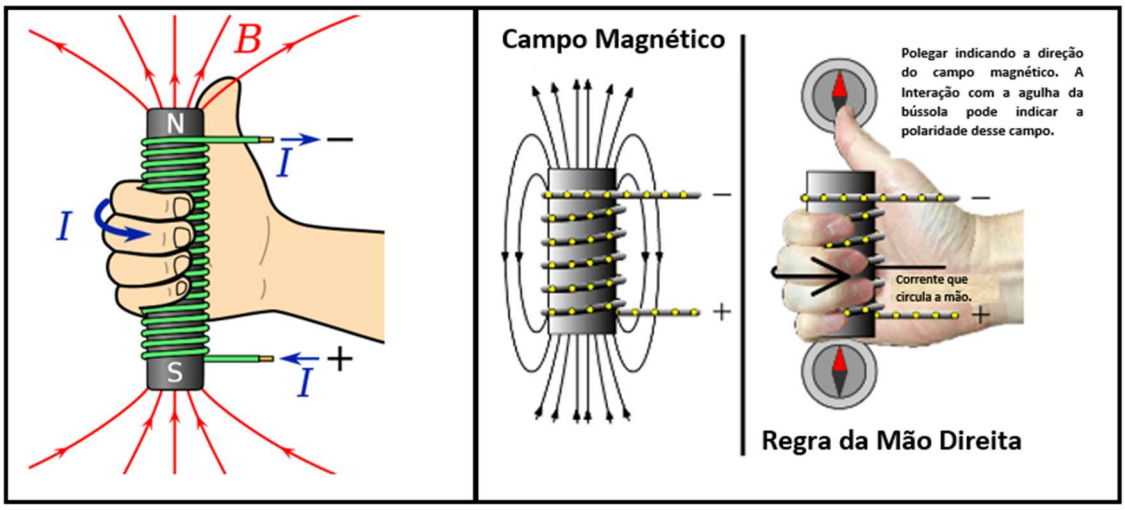


Ilustração contendo a orientação do campo magnético e a circulação da corrente elétrica. Destaque para o uso da mão direita na identificação da direção do campo e do sentido dessa circulação. A regra da mão direita aplicada conforme sugerido pela imagem, pode determinar a polaridade do eletroímã através da interação com o campo magnético de uma bússola (ou de outro ímã). Fonte: Adaptada de MikeRum (2020) & StickMan (2024).

➢ QUESTÕES PROBLEMATIZADORAS

10. Dentre os processos de imantação apresentados, qual você acredita ser mais facilmente reproduzido em uma experiência na sala de aula?

_____

_____

_____

_____

11. Podemos afirmar que toda bobina funciona como um eletroímã? Por exemplo, o alumínio não é um material ferromagnético, mas é um bom condutor. Ele pode ser usado como solenoide em um eletroímã?

_____

_____

_____

_____

_____

12. Que tipo de material pode ser imantado? O que faz a agulha de uma bússola ser imantada e qual é a diferença desse processo para aquele ocorrido no eletroímã? Justifique.

_____

_____

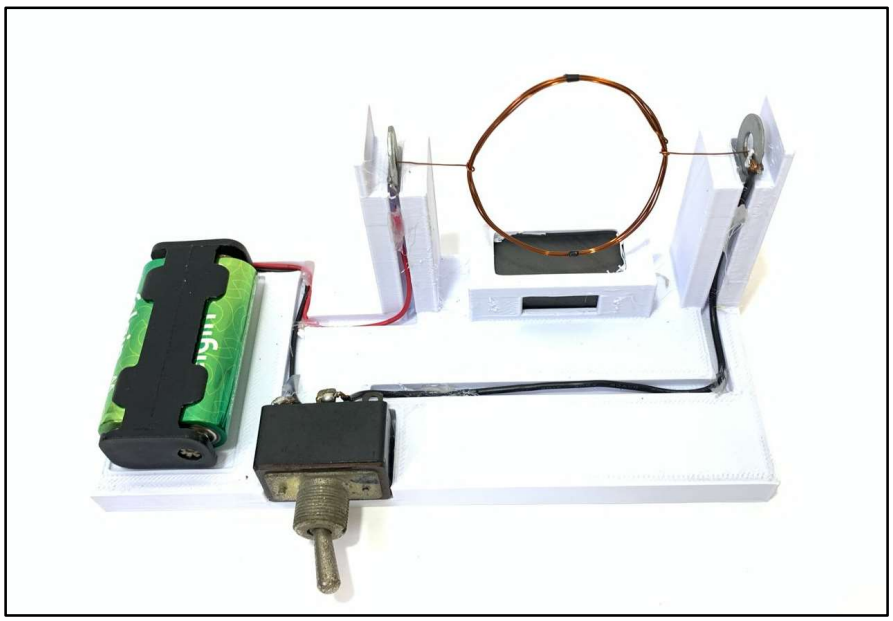
_____

_____

Aula 5

Força Magnética

Figura 24. Bobina Magnética.



Protótipo experimental de um equipamento que funciona com base na ação da força magnética. Fonte: FnEsc/ SEDUC (2024).

Ao caminhar, ao pedalar, ao dirigir, ao trocar o sofá de lugar, estamos usufruindo da capacidade de movimento oriunda das mais variadas interações do dia a dia. É fato comum em todas essas situações que nem o carro, nem tampouco a bicicleta, ou até mesmo o sofá poderiam se deslocar sem uma "motivação externa", isto é, sem a atuação de uma *força*. Se faz necessária, portanto, uma determinada causa para que se tenha o efeito desejado. Em outras palavras, observamos que os objetos não se movimentam ou modificam suas trajetórias sozinhos.

A Ciência nos mostra que a ideia de força foi definida graças aos trabalhos de Issac Newton que, ao formular as Três Leis do Movimento, estabeleceu física e matematicamente o conceito de força, como sendo a ação capaz perturbar os objetos, causando o movimento (alterando seu estado inercial) e produzindo desvios

em suas trajetórias[11]. Ela também é necessária para explicar as interações dos corpos sujeitos às ações magnéticas. Por exemplo, quando observamos um ímã atraindo uma moeda, verificamos que esta tem sua trajetória modificada. O deslocamento dessa moeda só foi possível graças à atuação de uma força que proveu o seu movimento em direção ao ímã. Em movimentos existentes nessa região devido ao campo magnético, a força atuante recebe o nome de **Força Magnética**.

Em termos do formalismo teórico-experimental, verificamos que a conceituação de força magnética foi motivo de análise durante todo o século 19, tendo seu significado melhor compreendido com base nos trabalhos do físico neerlandês Hendrik Lorentz (1853-1928). Desde então, pôde-se estabelecer que para um fio de comprimento (***L***), percorrido por uma corrente elétrica (***I***), há a atuação de uma força magnética que possui dependência direta e proporcional com os valores da intensidade da corrente e do comprimento referente ao fio condutor, como também da intensidade do campo magnético (***B***) resultante dessa interação — descrição conhecida por *Lei de Lorentz*.

Na situação em questão, o campo magnético exerce uma força intensa o suficiente para ser capaz de transladar o fio condutor — quanto maior o fio sob influência do campo, maior a força exercida sobre ele. Entretanto, essa interação, tal como descrita, nem sempre é fácil de ser percebida experimentalmente, fazendo-se necessário aprimorar o aparato, utilizando-se uma espira para observar o efeito desejado. Por exemplo, consideremos o ilustrado na Figura 24. Ela apresenta uma estrutura dotada de uma pilha e um conjunto de espiras, uma chave liga/desliga e um ímã permanente abaixo da bobina. Enquanto a chave está desligada, nada acontece ao sistema. Por outro lado, quando acionada, uma corrente elétrica começa a passar pelo circuito e circular através da bobina.

A intensidade do campo magnético está diretamente relacionada com a velocidade com que a espira gira. Quanto mais rápido a rotação da bobina, mais intenso é o campo. Esse movimento de rotação observado é descrito pela atuação do agente físico conhecido como *Torque*. Sua definição está relacionada com a existência das forças e eixos que causam o movimento de rotação dos corpos, de

---

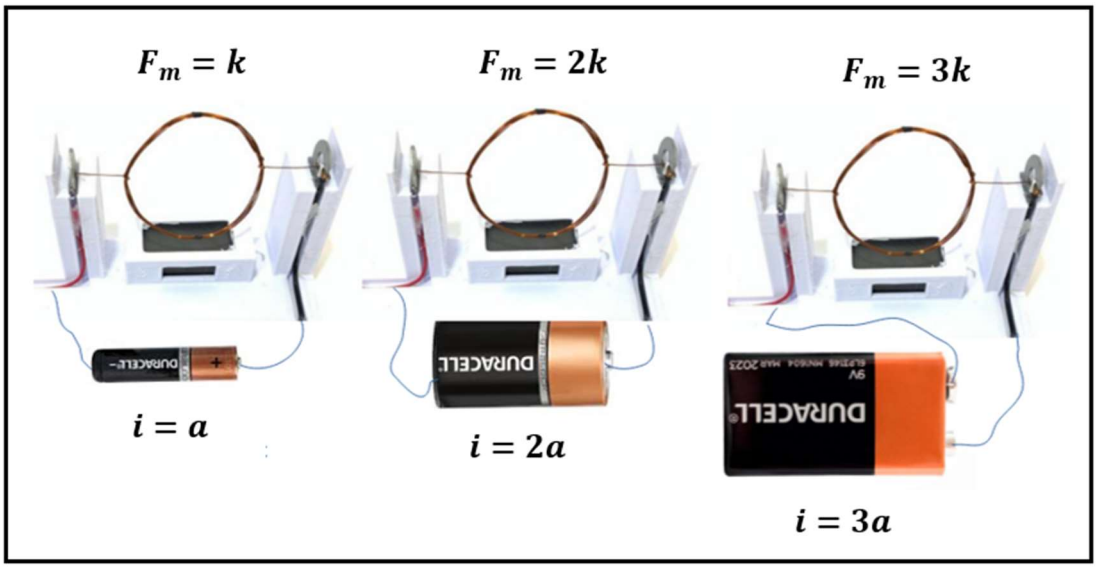
[11] O conceito de força, embora hoje comumente aceito e compreendido, foi motivo de discussão filosófica durante vários séculos, percorrendo gerações de eminentes pensadores. Uma respeitada lista que reúne, entre outros, Aristóteles (384-322 a. C.), René Descartes (1596-1650), Christiaan Huygens (1629-1695) e Gottfried Leibniz (1646-1716). (N. A.)

modo a ser possível estabelecer que sua intensidade possui dependência com a variação da rotação. Quanto mais intenso for o torque (força de rotação), mais rápido será o giro obtido (frequência angular).

Mas então, como podemos avaliar o módulo da força magnética? Ora, basta analisarmos a montagem. A pilha fornecerá energia suficiente para gerar uma corrente elétrica que circula pela espira. Quanto mais energia essa bateria fornecer, mas rápida as cargas elétricas irão se mover pelo fio condutor (maior a intensidade de corrente elétrica). Essa interação faz gerar um campo magnético que passa por dentro da bobina (Lei de Ampère). O campo magnético criado na bobina interagirá com um ímã de modo repulsivo, e a repulsão entre eles fará com que a espira comece a rotacionar. Quanto mais intenso é o campo magnético da bobina mais rápida é a rotação da bobina. Portanto, se considerarmos aumentar o fluxo de corrente elétrica no circuito, a força do campo magnético aumentará de forma proporcional, como mostrado na Figura 25.

Da mesma forma bobina poderá girar mais rapidamente quanto maior for o campo magnético do ímã, e, portanto, a força magnética também terá uma dependência direta com o campo magnético em que a bobina está imersa. Haverá também a dependência com o comprimento do condutor, conforme comentado para o fio. Entretanto a espira não translada, ela rotaciona. Assim, a força magnética é usada para o cálculo do torque sobre a região da espira.

Figura 25. Intensidade da força magnética em um circuito elétrico.



Montagem experimental para obtenção dos valores da força magnética. Para fins de representação didática, atribuímos um certo valor ***k*** para o módulo da força magnética (***F_m***) e um certo valor ***a*** para representar um dado valor para a intensidade de corrente elétrica (***i***). A espessura de cada pilha condiz com o suprimento de corrente elétrica fornecido ao circuito. A intensidade do fluxo elétrico tem seu valor triplicado na pilha mais espessa, em relação à mais delgada. O mesmo ocorre com o valor da força magnética, que tem seu módulo três vezes maior quando a corrente elétrica for três vezes mais intensa. Fonte: Adaptado de FnEsc/ SEDUC (2024).

Por meio do QR Code abaixo você terá acesso à demonstração do funcionamento do aparato mostrado na Figuras 24 e 25.

➢ QUESTÕES PROBLEMATIZADORAS

13. É possível observar a atuação da força magnética em uma região para além do alcance do campo magnético? Justifique.

_____
_____
_____
_____

14. Como você explicaria a relação entre a intensidade da corrente elétrica em um fio condutor e o valor da força magnética que atua na região externa ao fio?

_____
_____
_____
_____

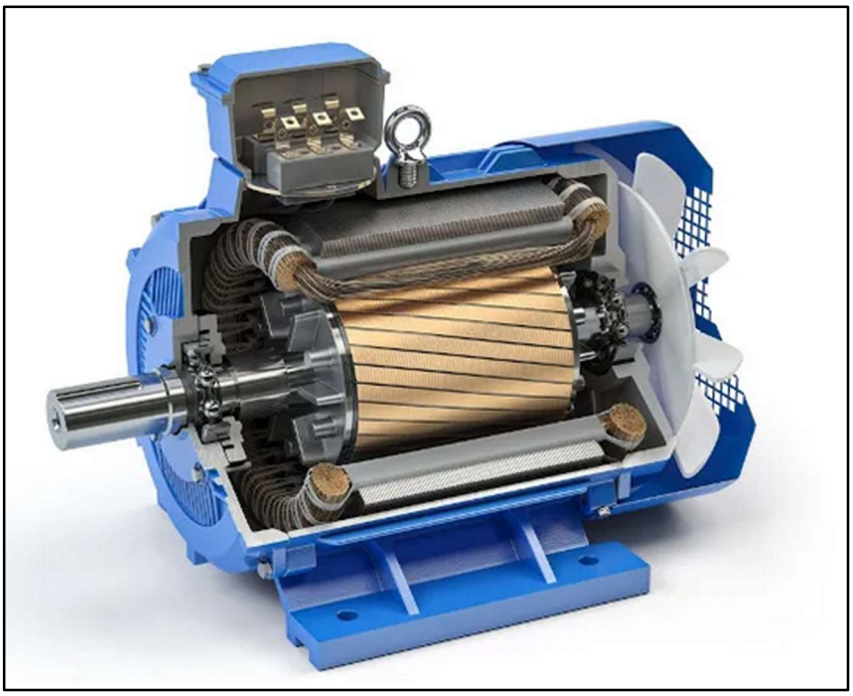
15. Você consegue observar alguma relação entre o aparato experimental mostrado durante a aula como algum outro aparelho eletrônico presente no seu dia a dia? Cite exemplos.

_____
_____
_____
_____

Aula 6

O funcionamento dos Motores Elétricos

Figura 26. Ilustração de um motor elétrico



Destaque para alguns dos componentes internos do maquinário. Fonte: Melo (2023)

Os anos que abriram o século 19 trouxeram avanços significativos à modernização da sociedade. Isso se deveu não somente ao potencial evolutivo do sistema fabril, impulsionado pelo uso em larga escala dos motores a vapor – que passaram a ter papel central em setores como o metalúrgico, o têxtil e o de transporte –, mas sobretudo aos estudos voltados ao desenvolvimento de novas tecnologias. O progresso nas descobertas científicas, as quais se expandiam especialmente nos campos da Física, Química e Engenharia, proporcionou o crescimento do setor industrial que ganhou um novo impulso com o surgimento dos motores e geradores elétricos.

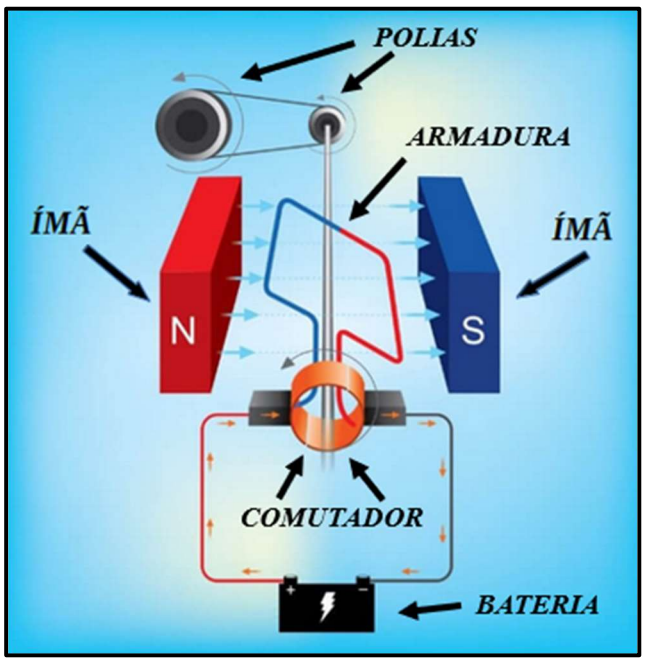
Os motores e geradores elétricos foram desenvolvidos para serem ferramentas capazes de converter elétrica em energia mecânica, e vice-versa. É interessante observar que ambos os equipamentos funcionam com base nos

princípios das interações eletromagnéticas, conforme estabelecido pelas Leis de Ampère e Faraday.

Os motores elétricos são dispositivos que produzem energia mecânica a partir da energia elétrica. Para o seu acionamento, é necessária uma fonte de energia elétrica para que o dispositivo produza uma rotação. Seu funcionamento, em geral, baseia-se na circulação da corrente elétrica em um conjunto de espiras (bobinas), que estão fixas ao próprio motor. Esse fluxo de corrente produz, por si só, um campo magnético que permanecerá no entorno das bobinas. Além desse arranjo, o motor também é dotado de um conjunto de ímãs permanentes, acoplados em um eixo móvel, que interagem com o campo magnético das bobinas — assim que ele é gerado. Essa interação produz movimentos de atração e repulsão, possibilitando o giro do motor. É possível também que a montagem do motor possa ser feita com ímãs permanentes e fixos, estando as bobinas em um eixo dinâmico.

Um esquema de motor simples é apresentado na Figura 27, em que a armadura é a espira pela qual passa a corrente elétrica, cuja fonte é uma bateria. O campo magnético que se formará na armadura e a sua interação com o campo magnético dos ímãs faz com que ela rotacione, essa rotação fará girar as polias que estão acopladas nas bobinas.

Figura 27. Esquema de funcionamento básico de um motor elétrico com corrente contínua.



Na ilustração ao lado é possível notar a orientação (em azul) das linhas de campo magnético gerado pelos ímãs, cujo fluxo magnético interage com a corrente elétrica (indicadas pelas setas em laranja) percorrida na armadura central culminando na ação mecânica de rotação do comutador que gira as polias. Fonte: Adaptado de Greenbras (2022)

Para ter acesso à demonstração prática do princípio de funcionamento descrito na Figura 27, acesse o QR CODE ao lado.

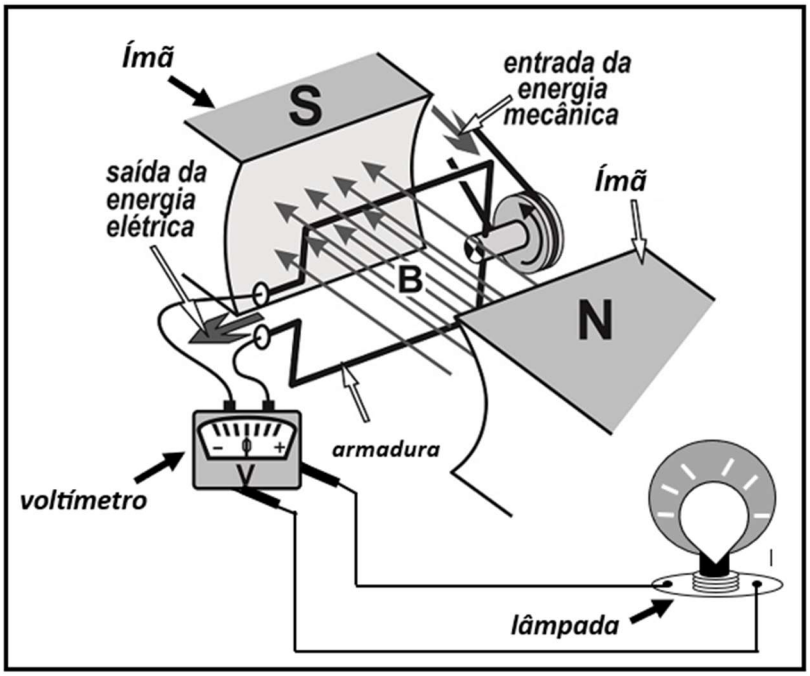
Para o motor mostrado na Figura 27, destacamos que o fluxo das cargas que passa pelo comutador (peça laranja, em forma de anel, destacada na ilustração) faz com que a armadura gire conforme a orientação do campo magnético gerado entre os ímãs.

Os geradores elétricos são dispositivos que produzem eletricidade a partir da energia mecânica, em um processo inverso aos dos motores. O essencial para o funcionamento dos geradores é a criação do fluxo magnético ao redor das bobinas, formadas por condutores pelos quais passa a corrente elétrica. Para tanto, é necessário que os ímãs sejam fixados à parte móvel do dispositivo e as bobinas permaneçam sem movimento (estáticas). À medida que rotaciona, cada ímã irá aproximar-se e afastar-se de cada uma das bobinas, fazendo com que a bobina sinta o campo magnético crescer e diminuir, a todo instante. Isso se caracteriza como a variação do fluxo magnético. Consequentemente, a variação desse fluxo faz surgir a corrente elétrica na bobina (Lei de Faraday), que será proporcional ao campo magnético dos ímãs e à velocidade de rotação dos ímãs, bem como ao número de espiras existentes. Vale ressaltar que se a montagem for tal que a espira possa rotacionar, com os ímãs permanecendo estáticos, teremos o mesmo resultado. A Figura 28 traz um esquema de um gerador, e não há como não notar a grande similaridade com a Figura 27.

Os geradores vão sempre produzir uma corrente alternada, entretanto os motores, através de uma modificação de sua arquitetura, podem ser alimentados por uma corrente elétrica contínua ou por uma corrente elétrica alternada.[12] Isso depende estritamente da forma como a espira é ligada ao circuito.

[12] Para diferenciar os tipos de corrente elétrica utilizadas em determinados circuitos, utilizamos a sigla (em inglês): AC/DC. Sendo a corrente contínua representada por DC (Direct Current) e a corrente alternada designada por AC (Alternating Current). (N. A.)

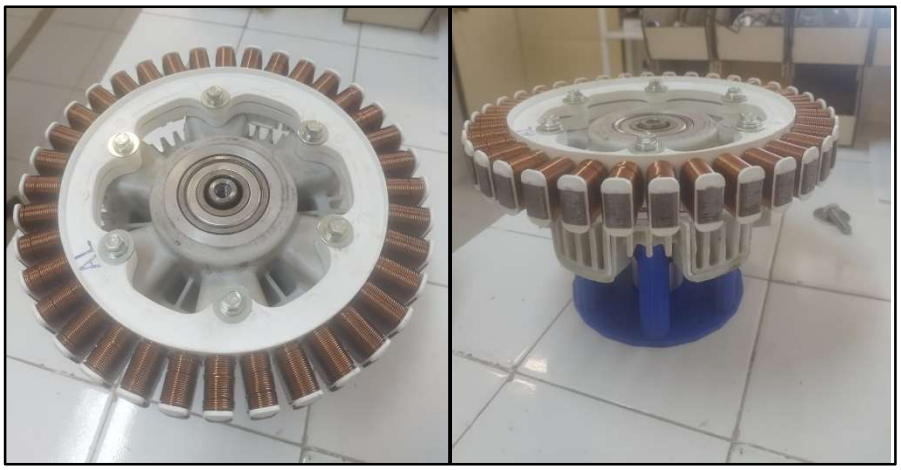
Figura 28. Esquema de um gerador elétrico.



Funcionamento de um gerador elétrico. Fonte: Adaptado de Manavella (2020).

O conjunto de bobinas dos motores e geradores é conhecido como *estator*. Quando as bobinas são eletrizadas, elas geram um fluxo de campo magnético ao seu redor. Se a corrente de eletrização for alternada, o campo magnético também irá variar seu fluxo. A construção do motor, portanto, é feita associando esses efeitos com os ímãs permanentes, a fim de produzir a rotação. Note que, essencialmente, cada bobina do estator é um eletroímã — conforme estudamos na Aula 4.

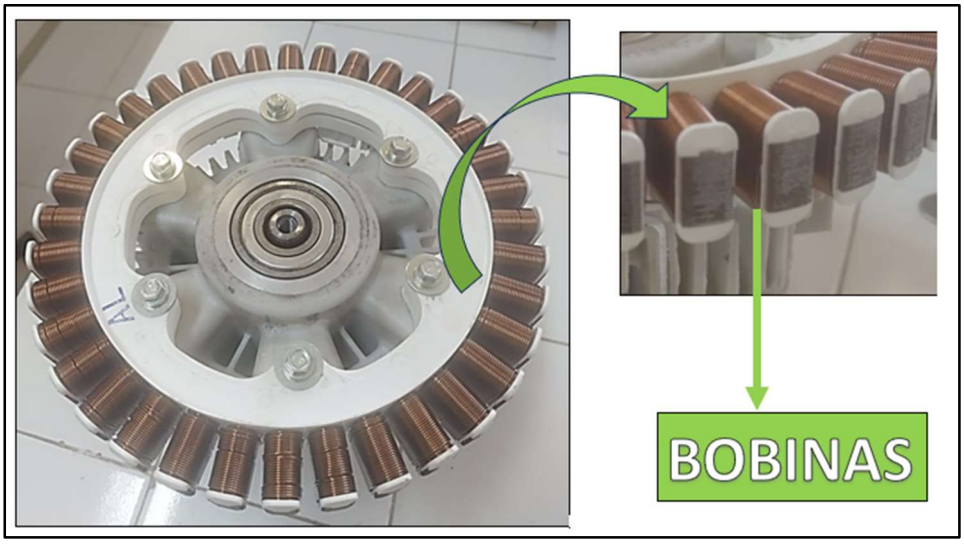
Figura 29. Estator construído em nosso laboratório.



Peça fundamental para o funcionamento dos motores e geradores elétricos. Sua principal função é proporcionar um movimento de giro por meio do processo de imantação. Fotos: FnEsc / SEDUC (2024).

A ação mecânica desejada, isto é, o giro do eixo, é executado pelo rotor. Esse movimento é alcançado uma vez que estrutura do rotor contém os ímãs permanentes, os quais interagem com as bobinas eletrizadas (ímãs artificiais) em virtude do campo magnético criado pelos ímãs (como polaridade oposta).

Figura 30. Bobinas.

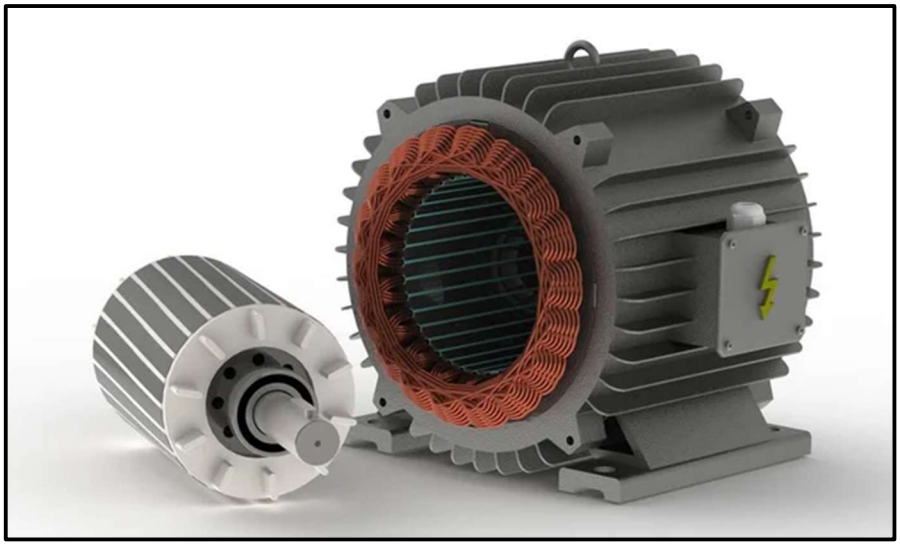


Espiras condutoras que são submetidas à passagem de corrente elétrica, gerando um eletroímã no interior do estator. Fotos: Adaptada de FnEsc / SEDUC (2024).

Neste QR Code mostramos uma alternativa experimental para construir bobinas:

Trazemos na Figura 31 uma ilustração do rotor e do estator.

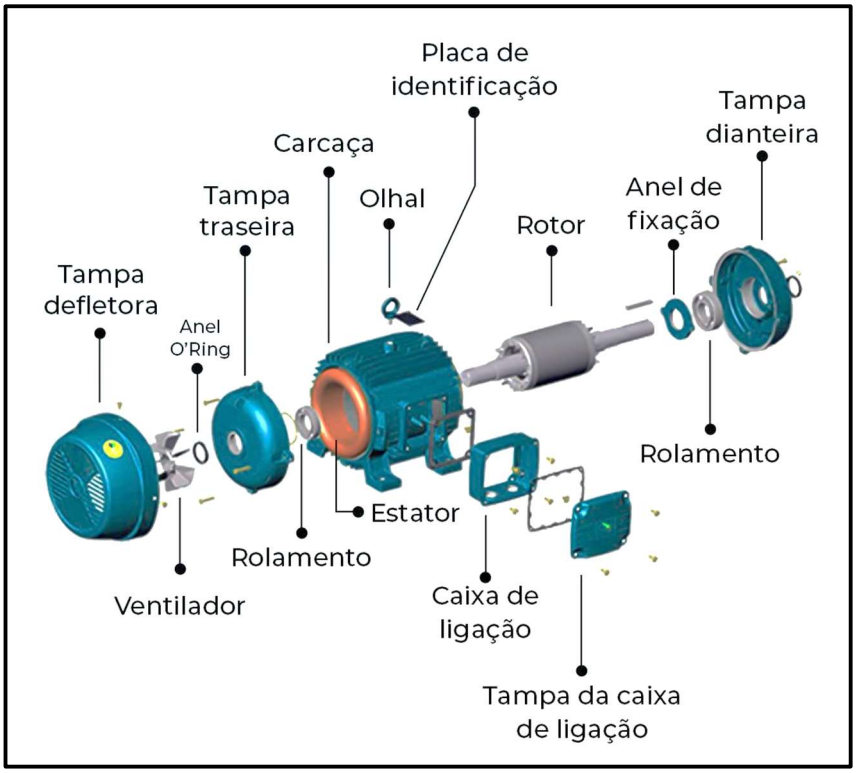
Figura 31. Rotor e Estator.



Rotor (peça menor, à esquerda), ao lado do Estator. O rotor é o responsável pelo movimento de rotação motor. Fotos: Depositphotos (2024).

Na Figura 32 trazemos algumas das peças estruturais de um motor elétrico. Logo após, conceituamos àquelas com maior destaque na montagem.

Figura 32. Partes de um motor elétrico.



Fonte: Adaptada de Manutenção em Ação (2024).

◆ Caixa de Ligações: local em que são colocados os cabos de alimentação para as ligações elétricas.

◆ Carcaça: camada externa que protege toda estrutura do motor.

◆ Eixo: peça central, geralmente feita de aço condutor, que permite a transferência de energia gerada em função do giro.

◆ Enrolamentos estator: ligações entre fios para o acionamento do estator.

◆ Estator: Parte fixa do motor ligado à rede elétrica. Ele é o responsável por permitir o fluxo magnético necessário à conversão em energia mecânica.

◆ Placa de Identificação: local onde estão as informações sobre alguns componentes do motor.

◆ Rolamento: componente que permite a rotação entre duas peças.

◆ Rotor: peça que gira em torno do próprio eixo de rotação, em função da energização recebida do estator.

◆ Ventoinha: peça semelhante a um ventilador que tem por finalidade resfriar a parte interna do motor, que tende a aquecer devido à dissipação do calor produzida no processo de conversão de energia do mecanismo.

No QR CODE abaixo você terá acesso aos componentes básicos de um motor elétrico, bem como seu processo de montagem.

➢ QUESTÕES PROBLEMATIZADORAS

16. Como base em qual princípio físico podemos relacionar a tecnologia empregada no funcionamento dos motores elétricos com a construção dos geradores elétricos?

_____
_____
_____
_____

17. Como funciona um estator? Com base em seu funcionamento, podemos afirmar que todo gerador elétrico é um motor elétrico? Justifique sua resposta.

_____
_____
_____
_____

18. Como você explicaria o funcionamento dos motores e dos geradores elétricos com base nos aparelhos industriais usados em seu dia a dia? Reflita um pouco sobre a indispensabilidade desses equipamentos na sociedade moderna e responda: como seria viver em um mundo sem motores elétricos?

_____
_____
_____
_____

Referências

ALMEIDA, Daniel. Como funcionam os motores elétricos. **TRACTIAN.** Disponível em: https://tractian.com/blog/motores-eletricos-entenda-a-funcionalidade-desse-ativo . Acesso em 28 de novembro de 2023.

Bomba dágua. C&c Construção. Disponível em: https://www.cec.com.br/dicas-construcao-bomba-d-agua?id=219. Acesso em 02 de setembro de 2024.

CARVALHO, Thomas. "Campo Magnético". **InfoEscola.** Disponível em: https://www.infoescola.com/fisica/campo-magnetico/. Acesso em 13 de fevereiro de 2024.

Como é gerada a energia hidrelétrica? **Azeheb,** 2018. Disponível em: https://azeheb.com.br/blog/como-e-gerada-a-energia-hidreletrica/. Acesso em 02 de outubro de 2024.

Como funciona o motor elétrico de um carro. **GREENBRAS**. São Paulo, 18 de abril de 2022. Disponível em: https://greenbras.com/como-funciona-o-motor-de-um-carro-eletrico/ . Acesso em: 27 de novembro de 2023.

DEUTY, Soctt. Solenoids Vs. Relays: What is The Difference? **Planet Analog.** 27 de fevereiro de 2018. Disponível em: https://www.planetanalog.com/relays-and-solenoids-electromechanical-devices/ . Acesso em 24 de março de 2024.

DINIZ, Alexandre Magno Ferreira; ARAÚJO, Rômulo Diniz. "Uma abordagem prática para o ensino de eletromagnetismo usando um motor de indução de baixo custo." IN: **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 41, n. 1, p. 3, ago. 2019.

DOMÍNIO MAGNÉTICO. **Neocities.org.** Disponível em: https://rocarneval.neocities.org/CP_NDE-ED.ORG/EM_07-Dominio . Acesso em 13 de setembro de 2024.

FARIA, Renato de. O que faz uma aula ser boa? **Estado de Minas.** Belo Horizonte, 21 de nov. de 2021. Disponível em: https://www.em.com.br/colunistas/filosofia-explicadinha/2023/11/amp/6658954-o-que-faz-uma-aula-ser-boa.html . Acesso em 24 de novembro de 2023.

FILHO, Jailton dos Santos. **Introdução ao Magnetismo.** YouTube, 12 de abril de 2023. Disponível em: < https://youtu.be/X-ePfG1dG38?si=0bEBn1nwi77ZGNvh>. Acesso em 12 de janeiro de 2024.

FRANCO, HUGO. Evolução dos conceitos da Física. IN: **plato.usp.** Disponível em: http://plato.if.usp.br/1-2003/fmt0405d/apostila/renasc7/node8.html . Acesso 01 de maio de 2023.

GOMES, Sinésio Raimundo. Aula 03 – Fundamentos de Magnetismo. **Maquinas Elétricas I.** 30 de janeiro de 2023. Disponível em: < https://maquinaseletricasi.blogspot.com/2014/01/aula-02-fundamentos-de-magnetismo.html>. Acesso em 18 de dezembro de 2023.

GUITARRARA, Paloma. "Bússola". **Brasil Escola.** Disponível em: https://brasilescola.uol.com.br/geografia/bussola.htm . Acesso em 09 de março de 2024.

JÚNIOR, Gonçalo. **É uma pena não viver:** uma biografia de Rubem Alves. São Paulo: Planeta do Brasil, 2015.

JÚNIOR, Osvaldo Pessoa. Modelo causal dos primórdios da ciência do magnetismo. **Scientiae Studia.** São Paulo, v. 8, n. 2, 2010, p. 195-212.

MAGNETISMO: CONCEITOS. Guia do Estudante (GE), 2024. Disponível em: < https://guiadoestudante.abril.com.br/curso-enem/conceitos>. Acesso em 13 de fevereiro de 2024.

MANAVELLA, Humberto. Gerador automotivo, mais conhecido como alternador, é a fonte de energia dos veículos. **Oficina Brasil,** 2020. Disponível em: https://germinaloficinabrasi.websiteseguro.com/noticia/tecnicas/gerador-automotivo-mais-conhecido-como-alternador-e-a-fonte-de-energia-dos-veiculos . Acesso em 23 de setembro de 2024.

MELO, Pâmella Raphaella. "Motor elétrico". **Brasil Escola.** Disponível em: https://brasilescola.uol.com.br/fisica/eletricidade-acionamento-motores-eletricos.htm . Acesso em 17 de outubro de 2023.

MikeRun. Coil right-hand rule3.svg. **Wikimedia Commons.** 23 de maio de 2020. Disponível em: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Coil_right-hand_rule3.svg . Acesso em 24 de março de 2024.

Motor Elétrico vista explodida. **Manutenção em ação.** Disponível em:< https://pt.linkedin.com/posts/jos%C3%A9-xavier-100981124_vista-explodida-motor-el%C3%A9trico-largamente-activity-7030196513276346368-_J27>. Acesso em 07 de julho de 2024.

Motor Elétrico visualização explodida. **Depositphotos.** Disponível em: https://depositphotos.com/br/photo/electric-motor-exploded-view-rendering-isolated-white-background-650694648.html . Acesso em 07 de julho de 2024.

Motor Elétrico. **SimuFísica/ CNPq.** Disponível em: https://simufisica.com/simulacoes/motor-eletrico/ . Acesso em: 01 de março de 2023.

NEWTON, Villas Bôas; DOCA, Ricardo Helou; BISCUOLA, Gualter José. **Tópicos de Física 3:** eletricidade, física moderna e análise dimensional.

Porto Editora. "James Hargreaves na Infopédia". **Porto Editora.** Disponível em: https://www.infopedia.pt/artigos/$james-hargreaves . Acesso em 29 de julho de 2024.

ROCHA, José Fernando M. (Org.). **Origens e evolução das ideias da física**. Salvador: EDUFBA, 2002.

SANTOS, Vanessa Sardinha dos. "Homo sapiens". **Brasil Escola.** Disponível em:https://brasilescola.uol.com.br/biologia/a-nossa-especie-homo-sapiens.htm Acesso em 13 de novembro de 2023.

SILVA, E. C. da. **Análise Termodinâmica e Reprojeto de um Motor a Vapor.** 2019. 84 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica — Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria, RS, 2019.

STIKMAN. The Solenoid and Electromagnet. **StickMan Physics Home.** Disponível em: https://stickmanphysics.com/stickman-physics-home/magnets-and-magnetism/electromagnet/ . Acesso em 24 de março de 2024.

VERVE CIENTÍFICA. **Entenda a diferença entre um motor e um gerador elétricos.** YouTube, 25 de abril de 2023. Disponível em: https://youtu.be/Qk8Ajtyh5Uc?si=xhKn98bK044KTp18 . Acesso em 05 de dezembro de 2023.

Você conhece os principais tipos de motores elétricos? **Abecom.** São Paulo, 03 de fev. de 2022. Disponível em: < https://www.abecom.com.br/tipos-de-motor-eletrico/> Acesso em: 24 de novembro de 2023.

Índice Onomástico

Alves, Rubem, 8
Aristóteles, 52
Ampère, André-Marie, 46
Descartes, Renè, 52
Gilbert, William, 30
Faraday, Michael, 46
Hargreaves, James, 25
Huygens, Christiaan, 52
Leibniz, Gottfried, 50
Lorentz, Hendrik, 52
Maricourt, Pierre de, 30
Mileto, Tales de, 29
Newcomen, Thomas, 24
Newton, Isaac, 34
Nietzsche, Friedrich, 1
Watt, James, 25

APÊNDICE B – Declarações emitidas pelas unidades de ensino visitadas

GOVERNO DE SERGIPE
SECRETARIA DE ESTADO DA EDUCAÇÃO E DA CULTURA
DIRETORIA REGIONAL DE EDUCAÇÃO - DRE'05
CENTRO DE EXCELÊNCIA DE EDUCAÇÃO PROF. BERILA ALVES DE ALMEIDA

DECLARAÇÃO

Declaramos para os devidos fins que o Produto Educacional **"EXPLORANDO OS DOMÍNIOS TEÓRICOS E EXPERIMENTAIS DO MAGNETISMO DOS MOTORES ELÉTRICOS: UM MÉTODO DE ENSINO POR ABORDAGEM PARA A EDUCAÇÃO DE JOVENS E ADULTOS",** foi implementado nesta Unidade Escolar entre os dias 21 e 25 de outubro de 2024. Essa aplicação foi realizada nas Primeiras Séries "A" e "B" do ensino médio, como parte do processo de validação da pesquisa do Mestrando **JAILTON DOS SANTOS FILHO**, **CPF 063.296.305-00** e **RG 02.584.360-5**, matriculado sob o nº 202311008260 no Programa de Pós-Graduação Profissional em Ensino de Física (PPGPF) da Universidade Federal de Sergipe (UFS), polo nº 11 do Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF).

Nossa Senhora das Dores/SE, 25 de outubro de 2024.

Andreia Lima Santos

ANDREIA LIMA SANTOS

Diretora Escolar

Andreia Lima Santo
DIRETORA
Portaria: Nº 0415/023 de 01/02/2...

GOVERNO DE SERGIPE

SECRETARIA DE ESTADO DA EDUCAÇÃO, DO ESPORTE E DA CULTURA

DIRETORIA REGIONAL DE EDUCAÇÃO - DRE'05

COLÉGIO ESTADUAL PROFESSOR FERNANDO AZEVEDO

CÓDIGO INEP: 28006046

DECLARAÇÃO

Declaramos para os devidos fins que o Produto Educacional **"EXPLORANDO OS DOMÍNIOS TEÓRICOS E EXPERIMENTAIS DO MAGNETISMO DOS MOTORES ELÉTRICOS: UM MÉTODO DE ENSINO POR ABORDAGEM PARA A EDUCAÇÃO DE JOVENS E ADULTOS",** foi implementado nesta Unidade Escolar entre os dias 28 e 30 de outubro de 2024. Essa aplicação foi realizada na Primeira Série "C" do ensino médio, como parte do processo de validação da pesquisa do Mestrando **JAILTON DOS SANTOS FILHO**, **CPF 063.296.305-00** e **RG 02.584.360-5**, matriculado sob o nº 202311008260 no Programa de Pós-Graduação Profissional em Ensino de Física (PPGPF) da Universidade Federal de Sergipe (UFS), polo nº 11 do Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF).

Nossa Senhora das Dores, 30 de outubro de 2024.

Diretora Escolar

Taciana Carneiro da Rocha Feitosa
Secretária
Portaria nº1477/2021

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
COLÉGIO DE APLICAÇÃO

DECLARAÇÃO

Declaramos para os devidos fins que o Produto Educacional **"EXPLORANDO OS DOMÍNIOS TEÓRICOS E EXPERIMENTAIS DO MAGNETISMO DOS MOTORES ELÉTRICOS: UM MÉTODO DE ENSINO POR ABORDAGEM PARA A EDUCAÇÃO DE JOVENS E ADULTOS",** foi implementado nesta Unidade Escolar no dia 12 de novembro de 2024. Essa aplicação foi realizada na turma "Tópicos Especiais em Física: Eletromagnetismo", do ensino médio, como parte do processo de validação da pesquisa do Mestrando **JAILTON DOS SANTOS FILHO**, **CPF 063.296.305-00** e **RG 02.584.360-5**, matriculado sob o nº 202311008260 no Programa de Pós-Graduação Profissional em Ensino de Física (PPGPF) da Universidade Federal de Sergipe (UFS), polo nº 11 do Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF).

Cidade Universitária, São Cristóvão, 19 de novembro de 2024.

Prof. Msc. Carlos Alberto Barreto
Diretor - CODAP/UFS
Mat. SIAPE nº 2084908

Prof. Carlos Alberto Barreto
Diretor do Colégio de Aplicação-UFS

APÊNDICE C – Pareceres avaliativos assinados pelos professores regentes

IMPLEMENTAÇÃO DO PRODUTO EDUCACIONAL: PARECER AVALIATIVO

PRODUTO EDUCACIONAL (LIVRO DIDÁTICO): EXPLORANDO OS DOMÍNIOS TEÓRICOS E EXPERIMENTAIS DO MAGNETISMO DOS MOTORES ELÉTRICOS: UM MÉTODO DE ENSINO POR ABORDAGEM PARA A EDUCAÇÃO DE JOVENS E ADULTOS

Unidade escolar de aplicação: Centro Est. de Educação Profissional Berila Alves de Almeida
Município: Nossa Senhora das Dores/SE
Professor Parecerista: José Santos Sobral

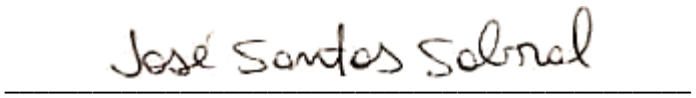
CRITÉRIOS		NOTA									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
LINGUAGEM E ESTRUTURA TEXTUAL	Coesão e Coerência										X
	Adequação da linguagem ao público-alvo									X	
	Clareza e objetividade do conteúdo no que se refere à proposição, exposição e desenvolvimento dos temas tratados										X
RELEVÂNCIA DA OBRA	Atualidade da temática										X
	Contribuição para a área de conhecimento e resolução de problemas relevantes.									X	
	Caráter inovador da abordagem dos temas e dos métodos adotados									X	
	Impacto científico, cultural e social da obra										X
	Abordagem experimental condizente com à exposição conceitual dos fenômenos abordados										X
FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	Consistência e relevância para o contexto em que se insere										X
	Senso crítico no exame do material estudado										X
	Clareza didática no conteúdo explanado										X
	Formatação, citações e referências do texto de acordo com a ABNT										X

Utilize este espaço adicional para suas impressões pessoais, bem como sugestões e observações a fim de que o autor possa enxergar eventuais modificações e aprimoramento no produto elaborado.

PONTOS POSITIVOS	Toca-se no tema Magnetismo de forma bastante intuitiva e simples.
PONTOS A SEREM MELHORADOS	Colocar uma figura do planeta Terra mostrando o seu interior, a fim de explicar melhor o campo magnético da mesma.

SUGESTÕES	Procurar não usar certas palavras rebuscadas para explicar alguns tópicos, use sinônimos mais simples.

Nossa Senhora das Dores/SE, 30 de outubro de 2024.



José Santos Sobral
Professor de Física do C. E. E. P. Berila Alves de Almeida

IMPLEMENTAÇÃO DO PRODUTO EDUCACIONAL: PARECER AVALIATIVO

PRODUTO EDUCACIONAL (LIVRO DIDÁTICO): EXPLORANDO OS DOMÍNIOS TEÓRICOS E EXPERIMENTAIS DO MAGNETISMO DOS MOTORES ELÉTRICOS: UM MÉTODO DE ENSINO POR ABORDAGEM PARA A EDUCAÇÃO DE JOVENS E ADULTOS

Unidade escolar de aplicação: Colégio Estadual Professor Fernando Azevedo
Município: Nossa Senhora das Dores/SE
Professor Parecerista: Alex Lima de Brito

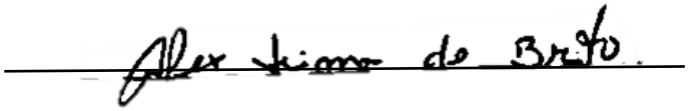
CRITÉRIOS		NOTA									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
LINGUAGEM E ESTRUTURA TEXTUAL	Coesão e Coerência									X	
	Adequação da linguagem ao público-alvo									X	
	Clareza e objetividade do conteúdo no que se refere à proposição, exposição e desenvolvimento dos temas tratados										X
RELEVÂNCIA DA OBRA	Atualidade da temática										X
	Contribuição para a área de conhecimento e resolução de problemas relevantes.										X
	Caráter inovador da abordagem dos temas e dos métodos adotados										X
	Impacto científico, cultural e social da obra									X	
	Abordagem experimental condizente com à exposição conceitual dos fenômenos abordados									X	
FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	Consistência e relevância para o contexto em que se insere										X
	Senso crítico no exame do material estudado										X
	Clareza didática no conteúdo explanado										X
	Formatação, citações e referências do texto de acordo com a ABNT									X	

Utilize este espaço adicional para suas impressões pessoais, bem como sugestões e observações a fim de que o autor possa enxergar eventuais modificações e aprimoramento no produto elaborado.

PONTOS POSITIVOS	
PONTOS A SEREM MELHORADOS	

SUGESTÕES	

Nossa Senhora das Dores/SE, 30 de outubro de 2024.



Alex Lima de Brito
Professor de Física do C. E. Professor Fernando Azevedo

IMPLEMENTAÇÃO DO PRODUTO EDUCACIONAL:

PARECER AVALIATIVO

PRODUTO EDUCACIONAL (LIVRO DIDÁTICO): EXPLORANDO OS DOMÍNIOS TEÓRICOS E EXPERIMENTAIS DO MAGNETISMO DOS MOTORES ELÉTRICOS: UM MÉTODO DE ENSINO POR ABORDAGEM PARA A EDUCAÇÃO DE JOVENS E ADULTOS

Unidade escolar de aplicação: Colégio de Aplicação – CODAP/UFS
Município: São Cristóvão
Professor Parecerista: Prof. Me. Nemésio Augusto Alvares Silva

CRITÉRIOS		NOTA									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
LINGUAGEM E ESTRUTURA TEXTUAL	Coesão e Coerência									X	
	Adequação da linguagem ao público-alvo									X	
	Clareza e objetividade do conteúdo no que se refere à proposição, exposição e desenvolvimento dos temas tratados									X	
RELEVÂNCIA DA OBRA	Atualidade da temática										X
	Contribuição para a área de conhecimento e resolução de problemas relevantes.										X
	Caráter inovador da abordagem dos temas e dos métodos adotados									X	
	Impacto científico, cultural e social da obra										X
	Abordagem experimental condizente com à exposição conceitual dos fenômenos abordados										X
FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	Consistência e relevância para o contexto em que se insere									X	
	Senso crítico no exame do material estudado									X	
	Clareza didática no conteúdo explanado										X
	Formatação, citações e referências do texto de acordo com a ABNT									X	

Utilize este espaço adicional para suas impressões pessoais, bem como sugestões e observações a fim de que o autor possa enxergar eventuais modificações e aprimoramento no produto elaborado.

PONTOS POSITIVOS	- Coerência entre a proposta apresentada e o público alvo pretendido, o que certamente possibilitará o êxito e sucesso do produto apresentado. - Os vídeos e simuladores facilmente acessados pelos QRcode; - As questões problematizadoras muito bem redigidas e contextualizadas com os objetivos que se quer atingir com o produto.
PONTOS A SEREM MELHORADOS	- Retificação de algumas legendas de figuras e inclusão de alguns conceitos para a referência do leitor.

SUGESTÕES	- Inclusão de algumas notas de rodapé com definições de alguns conceitos como epistemologia, classificação de materiais magnéticos e torque - Correção na legenda das figuras 17 e 18 na página 49 (as figuras estão trocadas); - A apresentação da Organização das aulas com a metodologia proposta fosse feita capítulo a capítulo nas unidades de ensino.

Cidade Universitária, São Cristóvão/SE, 26 de novembro de 2024.

Documento assinado digitalmente
gov.br
NEMESIO AUGUSTO ALVARES SILVA
Data: 26/11/2024 13:07:28-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

_____ _____

Prof.Me. Nemésio Augusto Alvares Silva

Professor de Física do CODAP/UFS

IMPLEMENTAÇÃO DO PRODUTO EDUCACIONAL: PARECER AVALIATIVO

PRODUTO EDUCACIONAL (LIVRO DIDÁTICO): EXPLORANDO OS DOMÍNIOS TEÓRICOS E EXPERIMENTAIS DO MAGNETISMO DOS MOTORES ELÉTRICOS: UM MÉTODO DE ENSINO POR ABORDAGEM PARA A EDUCAÇÃO DE JOVENS E ADULTOS

Unidade escolar de aplicação: Colégio de Aplicação – CODAP/UFS
Município: São Cristóvão
Professor Parecerista: Dr. André Oliveira Silva

CRITÉRIOS		NOTA									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
LINGUAGEM E ESTRUTURA TEXTUAL	Coesão e Coerência									X	
	Adequação da linguagem ao público-alvo								X		
	Clareza e objetividade do conteúdo no que se refere à proposição, exposição e desenvolvimento dos temas tratados								X		
RELEVÂNCIA DA OBRA	Atualidade da temática									X	
	Contribuição para a área de conhecimento e resolução de problemas relevantes.									X	
	Caráter inovador da abordagem dos temas e dos métodos adotados								X		
	Impacto científico, cultural e social da obra								X		
	Abordagem experimental condizente com à exposição conceitual dos fenômenos abordados										X
FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	Consistência e relevância para o contexto em que se insere									X	
	Senso crítico no exame do material estudado										X
	Clareza didática no conteúdo explanado									X	
	Formatação, citações e referências do texto de acordo com a ABNT										X

Utilize este espaço adicional para suas impressões pessoais, bem como sugestões e observações a fim de que o autor possa enxergar eventuais modificações e aprimoramento no produto elaborado.

PONTOS POSITIVOS	1. O livro é bem escrito, demonstrando rigor e cuidado com o conteúdo. 2. Apresenta uma formatação muito bem elaborada, que facilita a navegação e a compreensão estrutural. 3. A inserção de diversos QR CODE facilita o acesso para a compreensão do assunto apresentado.

PONTOS A SEREM MELHORADOS	1. A linguagem utilizada é formal e rebuscada, o que pode dificultar o interesse e a compreensão por parte dos alunos do Ensino Médio. 2. Os exemplos e práticas apresentados poderiam ser atualizados para refletir contextos contemporâneos e situações mais próximas do cotidiano dos estudantes, tornando o material ainda mais relevante e atrativo para eles.
SUGESTÕES	1. Simplificar a linguagem, tornando-a mais acessível e adequada ao público-alvo, sem comprometer a qualidade do conteúdo. 2. Inserir mais figuras ilustrativas em partes estratégicas do texto, especialmente em seções mais densas ou conceituais, para facilitar a compreensão e atrair a atenção dos adolescentes. O uso de imagens relevantes e bem contextualizadas pode tornar o conteúdo mais visual e acessível, aumentando o engajamento dos alunos. 3. Incluir atividades práticas que incentivem os alunos a montar suas próprias experiências (passo a passo), promovendo o aprendizado ativo e investigativo.

Nossa Senhora das Dores/SE, 12 de novembro de 2024.

gov.br
Documento assinado digitalmente
ANDRE OLIVEIRA SILVA
Data: 27/11/2024 11:38:20-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

_____

Dr. André Oliveira Silva
Professor de Física do CODAP/UFS

APÊNDICE D – Demonstração das equações de Maxwell por derivação e integração

D.1 Operadores Diferenciais Vetoriais

O tratamento algébrico que utilizamos com o fim de obtermos as equações de Maxwell nas formas diferencial e integral, passa pela definição de alguns operadores diferenciais e vetoriais. A começar, apresentamos aquele que atua tanto em funções escalares quanto em funções vetoriais: o operador *Nabla* $\vec{\nabla}$. Em coordenadas cartesianas ele é dado por:

$$\vec{\nabla} = \vec{i}\frac{\partial}{\partial x} + \vec{j}\frac{\partial}{\partial y} + \vec{k}\frac{\partial}{\partial z}. \tag{D.1}$$

Sendo $f = f(x)$ uma função escalar, definimos como *Gradiente* (grad) dessa função a ação do operador nabla sobre ela, resultando em uma função vetorial. Vejamos:

$$\begin{aligned} \vec{\nabla} f &= \left(\vec{i}\frac{\partial}{\partial x} + \vec{j}\frac{\partial}{\partial y} + \vec{k}\frac{\partial}{\partial z}\right) f \\ \vec{\nabla} f &= \vec{i}\frac{\partial f}{\partial x} + \vec{j}\frac{\partial f}{\partial y} + \vec{k}\frac{\partial f}{\partial z} \\ \vec{\nabla} f &= \vec{A} \end{aligned} \tag{D.2}$$

em que A é a função vetorial resultante, cujas componentes são:

$$A_x = \frac{\partial f}{\partial x}\,; \quad A_y = \frac{\partial f}{\partial y} \quad ; A_z = \frac{\partial f}{\partial z}$$

A ação do operador $\vec{\nabla}$ em uma função vetorial é dada através da operação chamada de produto escalar, resultando no cálculo do *Divergente* (div). Assim, seja uma dada função vetorial $\vec{f} = \vec{f}(x, y, z)$, de componentes cartesianas tridimensionais dadas por $\vec{i}f_x + \vec{j}f_y + \vec{k}f_z$, então a atuação de $\vec{\nabla}$ sobre ela resultará:

$$\begin{aligned} \vec{\nabla} \cdot \vec{f} &= \left(\vec{i}\frac{\partial}{\partial x} + \vec{j}\frac{\partial}{\partial y} + \vec{k}\frac{\partial}{\partial z}\right)\left(\vec{i}f_x + \vec{j}f_y + \vec{k}f_z\right) \\ \vec{\nabla} \cdot \vec{f} &= \frac{\partial}{\partial x}f_x + \frac{\partial}{\partial y}f_y + \frac{\partial}{\partial z}f_z. \end{aligned} \tag{D.3}$$

Convém destacar que a Eq. (D.3) representa uma função escalar – como desejado, em virtude da aplicação do divergente.

Quando utilizamos a definição de produto vetorial na aplicação do operador $\vec{\nabla}$, temos o cálculo do *Rotacional* de um vetor. Tal operação resulta em uma função vetorial. Considerando a função $\vec{f} = \vec{A}(x, y, z)$, temos:

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ \dfrac{\partial}{\partial x} & \dfrac{\partial}{\partial y} & \dfrac{\partial}{\partial z} \\ A_x & A_y & A_z \end{vmatrix}$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{A} = \vec{i}\left(\frac{\partial}{\partial y}A_z - \frac{\partial}{\partial z}A_y\right) + \vec{j}\left(\frac{\partial}{\partial z}A_x - \frac{\partial}{\partial x}A_z\right) + \vec{k}\left(\frac{\partial}{\partial x}A_y - \frac{\partial}{\partial y}A_x\right) \tag{D.4}$$

Vamos definir também o operador de Laplace, representado por ∇^2, também conhecido como *Laplaciano*. Ele é o resultado da aplicação do produto escalar entre os vetores definidos pelo operador nabla. Isto é,

$$\nabla^2 = \vec{\nabla} \cdot \vec{\nabla} \tag{D.5}$$

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}. \tag{D.6}$$

Notemos que, como esperado, o laplaciano é uma função escalar.

D.2 Equações de Maxwell na forma diferencial

> A gênese das equações eletromagnéticas deu-se num contexto bastante adverso ao que nos é apresentado hoje, nos textos didáticos de eletromagnetismo clássico. Temos agora uma percepção das Equações de Maxwell como leis fundamentais, que se justificam sem apelo a mais nada senão a experiência (desde que nos limitemos ao domínio de fenômenos não quânticos) (LIMA, 2019, p. 1, grifo no original).

Até 1863, o estudo do Magnetismo era regido conforme a aplicação das seguintes equações:

- O cálculo do divergente do vetor deslocamento das cargas elétricas nos informa sobre o valor da densidade dessas cargas no meio estudado (Lei de Gauss).

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho \,, \tag{D.7}$$

em que $\vec{D}$ é o vetor deslocamento e ρ a densidade de carga no meio.

- O rotacional do campo elétrico é igual ao negativo da taxa de variação parcial temporal do vetor campo magnético (relação de correspondência entre os campos elétrico e magnético).

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \,, \tag{D.8}$$

em que $\vec{E}$ é o vetor Campo Elétrico e $\vec{B}$ é o vetor Campo Magnético.

- O divergente do vetor campo magnético é nulo.

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \,. \tag{D.9}$$

- O cálculo do rotacional da intensidade magnética resulta na densidade de corrente elétrica.

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J} \,. \tag{D.10}$$

em que $\vec{H}$ é o vetor de intensidade magnética e $\vec{J}$ é o vetor densidade de corrente elétrica.

Em suas investigações Maxwell propôs, a priori, uma modificação algébrica na Eq. (D.10). Desse modo, ao aplicarmos o divergente em ambos os lados dessa expressão, iremos obter:

$$\vec{\nabla} \cdot \left(\vec{\nabla} \times \vec{H} \right) = \vec{\nabla} \cdot \vec{J} \,. \tag{D.11}$$

Dentre as definições válidas para os operadores vetoriais, há uma identidade em especial que afirma: o divergente do rotacional é nulo. Então, sendo $\vec{u}$ uma função vetorial qualquer, segue:

$$\vec{\nabla} \cdot \left(\vec{\nabla} \times \vec{U} \right) = 0 \,. \tag{D.12}$$

Aplicando a identidade da Eq. (D.12) na Eq. (D.11), temos:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{J} = 0 \,. \tag{D.13}$$

No entanto, ao analisarmos a identidade obtida na Eq. (D.13) iremos notar que ela não possui sentido físico. Pois, uma vez que admitimos ser nula a divergência da densidade de corrente elétrica, violamos o princípio fundamental da conservação de carga elétrica. Desse modo, Maxwell teve de acrescentar um termo correspondente ao vetor deslocamento $\vec{D}$ na Eq. (D.11) e retomar o seu raciocínio inicial (voltando a aplicar o divergente na nova equação). Isto é,

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \,, \tag{D.14}$$

em que $\dfrac{\partial \vec{D}}{\partial t}$ corresponde à taxa de variação temporal do vetor deslocamento.

Aplicando o divergente em ambos os lados da Eq. (D.14), segue:

$$\begin{aligned} \cancelto{0}{\vec{\nabla} \cdot \left(\vec{\nabla} \times \vec{H} \right)} &= \vec{\nabla} \cdot \vec{J} + \vec{\nabla} \cdot \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \\ \vec{\nabla} \cdot \vec{J} + \frac{\partial}{\partial t} \left(\vec{\nabla} \cdot \vec{D} \right) &= 0 \end{aligned} \tag{D.15}$$

Fazendo uso da identidade definida na Eq. (D.7), segue imediatamente que:

$$\nabla \cdot \vec{J} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \,, \tag{D.16}$$

que é uma equação condizente com o princípio de conservação de carga. A Eq. (D.16) é conhecida como *Equação da Continuidade*.

Para dar prosseguimento à obtenção das quatro equações desejadas, vamos representar às grandezas envolvidas (campo magnético e campo elétrico), por meio das seguintes relações:

- $\vec{H}\,\mu = \vec{B}$
- $\vec{E}\,\epsilon = \vec{D}$

Nessas expressões, μ e ϵ são constantes a serem determinadas. Com isso, a Eq. (D.7) passa a ser apresentada como:

$$\begin{aligned} \vec{\nabla} \cdot \vec{D} &= \rho \\ \vec{\nabla} \cdot \vec{E}\epsilon &= \rho \\ \left(\vec{\nabla} \cdot \vec{E}\right)\epsilon &= \rho \\ \vec{\nabla} \cdot \vec{E} &= \frac{\rho}{\epsilon} \end{aligned} \tag{D.17}$$

em que ϵ é definida como *permissividade dielétrica do meio.*

Para a Eq. (D.14), temos:

$$\begin{aligned} \nabla \times \vec{H} &= \vec{J} + \frac{\partial D}{\partial t} \\ \nabla \times \frac{\vec{B}}{\mu} &= \vec{J} + \frac{\partial \left(\epsilon \vec{E}\right)}{\partial t} \\ \left(\nabla \times \vec{B}\right)\frac{1}{\mu} &= \vec{J} + \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \\ \nabla \times \vec{B} &= \mu \vec{J} + \mu \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \end{aligned} \tag{D.18}$$

em que μ é definida como a *permeabilidade magnética do meio.*

Portanto, as equações de Maxwell, para meios condutores, obtidas por meio da diferenciação são:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon} \tag{D.19}$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial}{\partial t}\vec{B} \tag{D.20}$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \tag{D.21}$$

$$\nabla \times \vec{B} = \mu \vec{J} + \mu \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \tag{D.22}$$

Para o espaço livre, isto é, o vácuo, se faz necessário que considerar:

- $\rho = 0$
- $\vec{J} = 0$
- $\mu = \mu_0$
- $\epsilon = \epsilon_0$

uma vez que não há movimento das cargas elétrica no espaço livre, por isso, não se pode definir sua densidade ρ nem tampouco seu deslocamento $\vec{D}$.

Consequentemente, as equações de Maxwell, para o espaço livre, obtidas por meio da diferenciação são:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = 0 \tag{D.23}$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \tag{D.24}$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \tag{D.25}$$

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \, \epsilon_0 \, \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \tag{D.26}$$

D.2.1 Obtenção do coeficiente da velocidade da luz no vácuo

Comecemos por aplicar o rotacional para a Eq. (D.24). Isto é,

$$\begin{aligned} \vec{\nabla} \times \vec{E} &= -\frac{\partial}{\partial t} \vec{B} \\ \vec{\nabla} \times \left(\vec{\nabla} \times \vec{E} \right) &= -\vec{\nabla} \times \frac{\partial}{\partial t} \vec{B} \end{aligned}$$

$$\vec{\nabla} \times \left(\vec{\nabla} \times \vec{E} \right) = -\frac{\partial}{\partial t} \left(\vec{\nabla} \times \vec{B} \right) \tag{D.27}$$

Substituindo a Eq. (D.26) na Eq. (D.27), segue:

$$\vec{\nabla} \times \left(\vec{\nabla} \times \vec{E} \right) = -\frac{\partial}{\partial t} \left(\mu_0 \, \epsilon_0 \, \frac{\partial}{\partial t} \vec{E} \right)$$

$$\vec{\nabla} \times \left(\vec{\nabla} \times \vec{E} \right) = -\mu_0 \, \epsilon_0 \, \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \tag{D.28}$$

Seja $\vec{u}$ uma função vetorial, então, por meio dos operadores diferencias vetoriais, podemos admitir que o rotacional do rotacional dessa função vetorial é equivalente ao gradiente da divergência dessa mesma função, menos seu laplaciano. Isto é,

$$\vec{\nabla} \times \left(\vec{\nabla} \times \vec{u} \right) = \vec{\nabla} \left(\vec{\nabla} \cdot \vec{u} \right) - \nabla^2 \, u. \tag{D.29}$$

Assim, tomando $\vec{u} = \vec{E}$ e substituindo a Eq. (D.29) na Eq. (D.28), segue imediatamente

$$\vec{\nabla} \left(\vec{\nabla} \cdot \vec{E} \right) - \nabla^2 \, \vec{E} = -\mu_0 \, \epsilon_0 \, \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}. \tag{D.30}$$

Em se tratando do espaço livre,

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = 0. \tag{D.31}$$

Logo,

$$\begin{aligned} -\nabla^2 \vec{E} &= -\mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \\ \nabla^2 \vec{E} - \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} &= 0 \\ \left(\nabla^2 - \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2}{\partial t^2}\right) \vec{E} &= 0 \end{aligned} \tag{D.32}$$

Fazendo um procedimento análogo para a Eq. (D.26), temos:

$$\begin{aligned} \vec{\nabla} \times \vec{B} &= \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \\ \vec{\nabla} \times \left(\vec{\nabla} \times \vec{B}\right) &= \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial}{\partial t} \left(\vec{\nabla} \times \vec{E}\right) \end{aligned} \tag{D.33}$$

Substituindo a Eq. (D.24) na Eq. (D.33), segue:

$$\begin{aligned} \vec{\nabla} \times \left(\vec{\nabla} \times \vec{B}\right) &= -\frac{\partial}{\partial t} \left(\mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial}{\partial t} \vec{B}\right) \\ \vec{\nabla} \times \left(\vec{\nabla} \times \vec{B}\right) &= -\mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} \end{aligned} \tag{D.34}$$

Usando a Eq. (D.29) com $\vec{u} = \vec{B}$, e substituindo na Eq. (D.34), segue de imediato:

$$\begin{aligned} -\nabla^2 \vec{B} &= -\mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} \\ \nabla^2 \vec{B} - \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} &= 0 \\ \left(\nabla^2 - \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2}{\partial t^2}\right) \vec{B} &= 0 \end{aligned} \tag{D.35}$$

Em termos de ondulatória, para uma dada função vetorial $\vec{z}$, dizemos que ela pode ser descrita como uma onda se, e somente se, puder ser descrita em termos da seguinte expressão:

$$\left(\nabla^2 - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2}\right) \vec{z} = 0\,, \tag{D.36}$$

em que v corresponde ao valor da velocidade de propagação dessa onda no meio em questão.

Notemos que as Equações (D.32) e (D.35) possuem a forma a equação de propagação de uma onda. Então, ao compararmos essas expressões com a Eq. (D.36), iremos obter:

$$\frac{1}{v^2} = \epsilon_0 \, \mu_0 \tag{D.37}$$

Isso significa que a velocidade com a qual estamos lidando diz respeito à grandeza associada propagação da luz, sendo dada termos de uma onda eletromagnética com $v = c$. Logo,

$$\begin{aligned} \frac{1}{c^2} &= \epsilon_0 \, \mu_0 \\ c &= \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \, \mu_0}} \end{aligned} \tag{D.38}$$

em que c é o coeficiente da velocidade da luz no vácuo.

Os valores da permissividade dielétrica (ϵ_0) e da permeabilidade magnética (μ_0), no SI, são:

- $\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12}$ F/m
- $\mu_0 = 1,26 \times 10^{-6}$ H/m

De modo a ser possível calcular o valor de c.

$$\begin{aligned} c &= \frac{1}{\sqrt{(8,85 \times 10^{-12}) \; (1,26 \times 10^{-12})}} \\ c &= 2,99 \times 10^8 \end{aligned} \tag{D.39}$$

O que corresponde com o módulo da velocidade da luz no vácuo, isto é, aproximadamente, $c = 3,00 \times 10^8$ m/s. Por conta da relações algébricas propostas por Maxwell, pôde-se comprovar não somente que a luz se propaga como uma onda, mas que ela representa uma manifestação mútua dos campos elétrico e magnético.

D.2.2 Obtenção do coeficiente de penetração da luz em meio materiais

> Ainda que as equações de Maxwell tenham sido formuladas *(na segunda metade do século 19)*, os conceitos sobre eletricidade e magnetismo não permaneceram sem mudanças. (...) O progresso alcançado na década de 1930 sobre a constituição microscópica da matéria e o progresso da física do estado sólido posterior a Segunda Guerra Mundial, permitiram um melhor entendimento dos campos elétrico e magnético no interior subatômico. (...) Uma completa compreensão dos campos elétrico e magnético no interior da matéria só é possível depois de conhecer sua natureza atômica (REITZ; MILFORD, 1969, p. 5, grifo e tradução nossa).

Sejam as quatro leis do magnetismo dadas por:

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial D}{\partial t} \tag{D.40}$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \tag{D.41}$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho \tag{D.42}$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \tag{D.43}$$

Aplicando o rotacional para a Eq. (D.40), temos:

$$\vec{\nabla} \times \left(\vec{\nabla} \times \vec{H}\right) = \vec{\nabla} \times \vec{J} + \frac{\partial}{\partial t}\left(\vec{\nabla} \times \vec{D}\right) \tag{D.44}$$

Iremos considerar o vetor densidade de corrente elétrica ($\vec{J}$) e o vetor descolamento ($\vec{D}$), dados em função de:

- $\vec{J} = g\,\vec{E}$
- $\vec{D} = \epsilon\,\vec{E}$

em que $\vec{E}$ é o vetor campo elétrico, $\vec{\epsilon}$ é a permissividade do meio e g uma constante a ser determinada ao final da demonstração. Assim,

$$\vec{\nabla} \times \left(\vec{\nabla} \times \vec{H}\right) = \vec{\nabla} \times g\vec{E} + \frac{\partial}{\partial t}\left(\vec{\nabla} \times \epsilon\vec{E}\right),$$

$$\vec{\nabla} \times \left(\vec{\nabla} \times \vec{H}\right) = g\left(\vec{\nabla} \times \vec{E}\right) + \epsilon\frac{\partial}{\partial t}\left(\vec{\nabla} \times \vec{E}\right). \tag{D.45}$$

Inserindo a relação presente na Eq. (D.41), segue:

$$\vec{\nabla} \times \left(\vec{\nabla} \times \vec{H}\right) = -g\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} - \epsilon\frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} \tag{D.46}$$

Usando ainda,

$$\vec{B} = \mu \vec{H}, \tag{D.47}$$

em que μ é a permeabilidade magnética do meio, obtemos:

$$\vec{\nabla} \times \left(\vec{\nabla} \times \vec{H} \right) = -\mu\, g \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} - \mu\, \epsilon \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2}. \tag{D.48}$$

De posse de algumas das propriedades dos operadores diferenciais vetoriais, podemos escrever a seguinte identidade:

$$\vec{\nabla} \times \left(\vec{\nabla} \times \vec{H} \right) = \vec{\nabla} \cdot \left(\vec{\nabla} \cdot \vec{H} \right) - \nabla^2 \vec{H} \tag{D.49}$$

Com isso,

$$\vec{\nabla} \cdot \left(\vec{\nabla} \cdot \vec{H} \right) - \nabla^2 \vec{H} = -\mu\, g \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} - \mu\, \epsilon \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2}. \tag{D.50}$$

Mas,

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0. \tag{D.51}$$

Logo,

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{H} = \frac{1}{\mu} \left(\vec{\nabla} \cdot \vec{B} \right) = 0. \tag{D.52}$$

Consequentemente,

$$-\nabla^2 \vec{H} = -\mu\, g \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} - \mu\, \epsilon \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2}, \tag{D.53}$$

$$\nabla^2 \vec{H} - \mu\, \epsilon \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} - \mu\, g \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = 0. \tag{D.54}$$

Continuando com um raciocínio análogo, desta vez aplicando o rotacional para a Eq. (D.41), iremos obter:

$$\begin{aligned}
\vec{\nabla} \times \left(\vec{\nabla} \times \vec{E} \right) &= -\mu \frac{\partial}{\partial t} \left(\vec{\nabla} \times \vec{H} \right), \\
\vec{\nabla} \times \left(\vec{\nabla} \times \vec{E} \right) &= -\mu \frac{\partial}{\partial t} \left(\vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right), \\
\vec{\nabla} \times \left(\vec{\nabla} \times \vec{E} \right) &= -\mu\, g \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} - \mu\, \epsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}.
\end{aligned} \tag{D.55}$$

O que nos permite escrever:

$$\vec{\nabla} \cdot \left(\vec{\nabla} \cdot \vec{E} \right) - \nabla^2 \vec{E} = -\mu\, g \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} - \mu\, \epsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}. \tag{D.56}$$

Mas,

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = 0. \tag{D.57}$$

Logo,

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E}\epsilon = 0. \tag{D.58}$$

Consequentemente,

$$\nabla^2 \vec{E} - \mu\,\epsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} - \mu\, g \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = 0. \tag{D.59}$$

Em se tratando de uma dispersão ondulatória e monocromática, podemos analisar a vibração da propagação em uma determinada frequência. Para tanto, iremos buscar uma equação que defina a variação ondulatória espacial do campo elétrico.

Seja o vetor campo elétrico $\vec{E}$, apreciado em termos da unidade imaginária $i \in \mathbf{C}$, sob o ponto de análise da ondulatória. Isto é,

$$\vec{E}(r,t) = \vec{E}_s(\vec{r})\, e^{-i\omega t}\,, \tag{D.60}$$

em que $\vec{r}$ é o vetor posição dado em coordenadas polares e ω é a frequência angular de oscilação. Buscando a derivação parcial temporal de segunda ordem para a Eq. (D.60), temos:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \vec{E}}{\partial t} &= -i\,\omega\, \vec{E}_s(\vec{r})\, e^{-i\omega t} \\
\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} &= i^2\,\omega^2\, \vec{E}_s(\vec{r})\, e^{-i\omega t} \\
\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} &= -\omega^2\, \vec{E}_s(\vec{r})\, e^{-i\omega t}
\end{aligned} \tag{D.61}$$

Substituindo na Eq. (D.59), segue:

$$\begin{aligned}
\nabla^2 \vec{E}_s\, e^{-i\omega t} - \mu\,\epsilon \left(-\omega^2\, \vec{E}_s\, e^{-i\omega t}\right) - \mu\, g \left(-i\,\omega\, \vec{E}\, e^{-i\omega t}\right) &= 0, \\
e^{-i\omega t} \left(\nabla^2 \vec{E}_s + \mu\,\epsilon\omega^2\, \vec{E}_s + i\,\mu\, g\,\omega\, \vec{E}_s\right) &= 0.
\end{aligned} \tag{D.62}$$

De modo que, sem perda de generalidade, podemos considerar

$$\nabla^2 \vec{E}_s + \mu\,\epsilon\,\omega^2\, \vec{E}_s + i\,\mu\, g\,\omega\, \vec{E}_s = 0 \tag{D.63}$$

como sendo a equação que fornece a variação espacial do campo elétrico.

Em se tratando de meios condutores, cuja propagação se dá por meio de ondas planas, tendo frentes paralelas aos eixos xy, é possível reescrever a Eq. (D.63) como:

$$\frac{\partial^2 \vec{E}_s}{\partial z^2} + \mu\,\epsilon\,\omega^2\, \vec{E}_s + i\,\mu\, g\,\omega\, \vec{E}_s = 0 \tag{D.64}$$

com $\vec{E}_s$ sendo uma função somente de z. Isso nos permite verificar uma solução válida, do tipo:

$$\begin{aligned} \vec{E}_s &= \vec{E}_0\, e^{-i\gamma z} \\ \frac{d\vec{E}_s}{dz} &= i\gamma\, \vec{E}_0\, e^{-i\gamma z} \\ \frac{d^2\vec{E}_s}{dz^2} &= -\gamma^2\, \vec{E}_0\, e^{-i\gamma z} \end{aligned} \tag{D.65}$$

Com isso, a Eq. (D.64) passa a ser:

$$-\gamma^2\, \vec{E}_0\, e^{-i\gamma z} + \mu\,\epsilon\,\omega^2\, \vec{E}_0\, e^{-i\gamma z} + i\,\mu\, g\,\omega\, \vec{E}_0\, e^{-i\gamma z} = 0 \tag{D.66}$$

$$\vec{E}_0\, e^{-i\gamma z}\left(-\gamma^2 + \mu\,\epsilon\,\omega^2 + i\,\mu\, g\,\omega\right) = 0 \tag{D.67}$$

O que é verificável, se e somente se,

$$-\gamma^2 + \mu\,\epsilon\,\omega^2 + i\,\mu\, g\,\omega = 0. \tag{D.68}$$

No entanto, é conveniente frisar que γ é um número complexo. Isto é, ele pode ser escrito como:

$$\gamma = \alpha + i\beta. \tag{D.69}$$

Consequentemente,

$$\begin{aligned} \gamma^2 &= (\alpha + i\beta)^2 \\ \gamma^2 &= \alpha^2 + 2\,\alpha\, i\beta + (i\beta)^2 \\ \gamma^2 &= \alpha^2 - \beta^2 + 2\,\alpha\, i\beta \end{aligned} \tag{D.70}$$

E, ainda da Eq.(D.68), podemos ter:

$$\begin{aligned} -\gamma^2 &= -\mu\,\epsilon\,\omega^2 - i\,\mu\, g\,\omega \\ \gamma^2 &= \mu\,\epsilon\,\omega^2 + i\,\mu\, g\,\omega \end{aligned} \tag{D.71}$$

Comparando Eqs. D.70 e D.71, vemos que o fator comum à identidade imaginária, pode ser igualado para obtermos:

$$\omega\, g\,\mu = 2\,\alpha\,\beta \tag{D.72}$$

$$\beta = \frac{\omega\, g\,\mu}{2\,\alpha} \tag{D.73}$$

que será apresentado como sendo o coeficiente de profundidade de penetração no meio condutor.

Mas para isso, é preciso considerar que a frente de onda plana que se propaga em direção a z – isto é, a variação espacial do campo elétrico dada pela Eq. (D.60) –, pode ser descrita por:

$$\begin{aligned}
\vec{E}(\vec{r},\vec{t}) &= \vec{E}(\vec{s})e^{-i\omega t} \\
\vec{E}(\vec{r},\vec{t}) &= \vec{E}_0\, e^{i\gamma z}\, e^{-i\omega t} \\
\vec{E}(\vec{r},\vec{t}) &= \vec{E}_0\, e^{i(\gamma z - i\omega t)} \\
\vec{E}(\vec{r},\vec{t}) &= \vec{E}_0\, e^{i[(\alpha + i\,\beta)\, z - i\omega t]} \\
\vec{E}(\vec{r},\vec{t}) &= \vec{E}_0\, e^{[i\,\alpha\, z + i^2\,\beta\, z - i\omega t]} \\
\vec{E}(\vec{r},\vec{t}) &= \vec{E}_0\, e^{[i\,\alpha\, z - \beta\, z - i\omega t]} \\
\vec{E}(\vec{r},\vec{t}) &= \vec{E}_0\, e^{(i\,\alpha\, z - i\omega t)}\, e^{-\beta\, z}
\end{aligned} \tag{D.74}$$

Agora, podemos determinar a profundidade de penetração dessa onda no meio condutor analisando a Eq. (D.73) em uma dada frequência de oscilação no intervalo óptico em que o ângulo de fase seja $\pi/4$. Assim,

$$\begin{aligned}
\beta &= \sqrt{\omega\, g\, \mu}\, \sin\frac{\pi}{4} \\
\beta &= \sqrt{\omega\, g\, \mu}\, \frac{\sqrt{2}}{2} \\
\beta &= \sqrt{\omega\, g\, \mu}\, \frac{\sqrt{2}\sqrt{2}}{2\,\sqrt{2}} \\
\beta &= \frac{\sqrt{\omega\, g\, \mu}\, 2}{2\sqrt{2}} \\
\beta &= \sqrt{\frac{\omega\, g\, \mu}{2}}
\end{aligned} \tag{D.75}$$

Se a frequência admitir $g >> \epsilon\,\omega$, para condutores metálicos, então $1/\beta$ representa a profundidade que o campo elétrico cai $1/e$ de seu valor na superfície. Sendo,

$$\frac{1}{\beta} = \delta \tag{D.76}$$

o *coeficiente de profundidade de penetração*. De modo que,

$$\begin{aligned}
\delta &= \frac{1}{\beta} \\
\delta &= \sqrt{\frac{2}{\omega\, g\, \mu}} \\
\delta &= \left(\frac{2}{\omega\, g\, \mu}\right)^{1/2}
\end{aligned} \tag{D.77}$$

em que g é a condutividade efetiva do material.

D.3 Equações de Maxwell na forma integral

Sejam as equações de Maxwell na forma diferencial dadas por:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \tag{D.78}$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \tag{D.79}$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \tag{D.80}$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu \vec{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \tag{D.81}$$

Consideremos o *Teorema Fundamental para Divergentes* – também chamado de Teorema de Gauss-Ostrogradski –, expresso por:

$$\int_V \left(\vec{\nabla} \cdot \vec{A}\right) d\vec{\tau} = \oint_S \vec{A} \cdot d\vec{a}\,, \tag{D.82}$$

isto é, a integral do divergente avaliada em um certo volume é igual a integral sobre uma superfície fechada para o mesmo campo vetorial.

De posse dessa relação, vamos analisar as duas expressões, dentre as quatro equações diferenciais supracitadas, que podem ser modeladas por meio do Teorema (D.82) – a começar pela Eq. (D.78).

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

$$\int_V \left(\vec{\nabla} \cdot \vec{E}\right) d\vec{\tau} = \int_V \frac{\rho}{\epsilon_0} \cdot d\vec{\tau}\,, \tag{D.83}$$

Vamos aplicar o Teorema (D.82) no lado esquerdo da equação anterior. Assim,

$$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{a} = \int_V \frac{\rho}{\epsilon_0} \cdot d\vec{\tau}. \tag{D.84}$$

No lado direito da Eq. (D.84), temos uma integração sobre o volume da densidade de cargas, a qual, naturalmente, irá acarretar na obtenção de um valor que corresponde a quantidade de carga total Q nesse mesmo volume fechado. Isto é,

$$\int_V \rho \cdot d\vec{\tau} = Q \tag{D.85}$$

Desse modo, chegamos à seguinte expressão:

$$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{a} = \frac{Q}{\epsilon_0} \tag{D.86}$$

que é a *Equação de Maxwell para o vetor Campo Elétrico na forma integral.*

Analogamente, para a Eq. (D.80), segue:

$$\begin{aligned} \vec{\nabla}\cdot\vec{B} &= 0 \\ \int_V \left(\vec{\nabla}\cdot\vec{B}\right) d\vec{\tau} &= 0\,. \end{aligned} \tag{D.87}$$

Consequentemente,

$$\oint_S \vec{B}\cdot d\vec{a} = 0\,, \tag{D.88}$$

que é a *Equação de Maxwell para o vetor Campo Magnético na forma integral.*

Para darmos prosseguimento com a obtenção do segundo par das equações que desejamos, faz-se necessário apresentar um outro teorema, que diz respeito ao operador rotacional. Ei-lo:

Seja $\vec{\Gamma}$ um dado campo vetorial. Então, a integral de superfície do rotacional desse campo é igual a integral do mesmo campo analisada em uma dada região fechada (p). Esse enunciado é conhecido como Teorema de Stokes. Matematicamente,

$$\int_S \left(\vec{\nabla}\times\vec{\Gamma}\right) d\vec{a} = \oint_p \vec{\Gamma}\cdot d\vec{l}. \tag{D.89}$$

Vamos integrar a Eq. (D.79) sobre uma certa superfície (S). Ou seja,

$$\begin{aligned} \vec{\nabla}\times\vec{E} &= -\frac{\partial\,\vec{B}}{\partial t} \\ \int_S \left(\vec{\nabla}\times\vec{E}\right) d\vec{a} &= -\int_S \frac{\partial\,\vec{B}}{\partial t}\, d\vec{a}\,. \end{aligned} \tag{D.90}$$

Aplicando o Teorema de Stokes no lado esquerdo dessa última equação, segue:

$$\oint_p \vec{E}\cdot d\vec{l} = -\int_S \frac{\partial\,\vec{B}}{\partial t}\, d\vec{a}\,. \tag{D.91}$$

Para prosseguirmos com a resolução referente ao lado direito da Eq. (D.91) iremos fazer uso da *derivação sob o sinal de integral* para podermos escrever:

$$\oint_p \vec{E}\cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt}\int_S \vec{B}\, d\vec{a}\,. \tag{D.92}$$

Por outro lado, definimos *fluxo magnético* como:

$$\Phi_B = \int_S \vec{B}\, d\vec{a}. \tag{D.93}$$

De modo que,

$$\oint_p \vec{E}\cdot d\vec{l} = -\frac{d\,\Phi_B}{dt}. \tag{D.94}$$

Seguindo com o mesmo raciocínio, desta vez aplicado à Eq. (D.81), temos:

$$\begin{aligned} \vec{\nabla}\times\vec{B} &= \mu_0\,\vec{J} + \epsilon_0\,\mu_0\,\frac{\partial\,\vec{E}}{\partial t} \\ \int_S \left(\vec{\nabla}\cdot\vec{B}\right) d\vec{a} &= \int_S \mu_0\,\vec{J} d\vec{a} + \int_S \epsilon_0\,\mu_0\,\frac{\partial\,\vec{E}}{\partial t} d\vec{a}\,. \end{aligned} \tag{D.95}$$

Aplicando o Teorema (D.89) no lado esquerdo da equação anterior, segue:

$$\oint_p \vec{B} \cdot d\vec{l} = \int_S \mu_0 \, \vec{J} d\vec{a} + \epsilon_0 \, \mu_0 \int_S \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} d\vec{a} \, . \tag{D.96}$$

O primeiro termo do lado direito da Eq. (D.96) representa a integração da densidade de corrente elétrica ($\vec{J}$) sobre uma superfície. O resultado dessa integral representa o valor total da corrente elétrica (I) nessa região. Isto é,

$$\int_S \vec{J} \cdot d\vec{a} = I \tag{D.97}$$

Portanto,

$$\oint_p \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \, I + \epsilon_0 \, \mu_0 \, \frac{d}{dt} \int_S \vec{E} \, d\vec{a} \tag{D.98}$$

A derivada total apresentada como fator multiplicativo no último termo da Eq. (D.98) surge, novamente, do uso da derivação sob o sinal de integral. Além disso, definimos fluxo elétrico como:

$$\Phi_E = \int_S \vec{E} \, d\vec{a}, \tag{D.99}$$

o que nos permite concluir[1]:

$$\begin{aligned} \oint_p \vec{B} \cdot d\vec{l} &= \mu_0 \, I + \epsilon_0 \, \mu_0 \, \frac{d \, \Phi_E}{dt} \\ \oint_p \vec{B} \cdot d\vec{l} &= \mu_0 \left(I + \epsilon_0 \, \frac{d\Phi_E}{dt} \right) \end{aligned} \tag{D.100}$$

As quatro equações de Maxwell que obtivemos por meio da integração são:

$$\begin{aligned} \oint_S \vec{E} \cdot d\vec{a} &= \frac{Q}{\epsilon_0} \\ \oint_S \vec{B} \cdot d\vec{a} &= 0 \\ \oint_p \vec{E} \cdot d\vec{l} &= -\frac{d\Phi_B}{dt} \\ \oint_p \vec{B} \cdot d\vec{l} &= \mu_0 \left(I + \epsilon_0 \, \frac{d\Phi_E}{dt} \right) \end{aligned} \tag{D.101}$$

[1] Essa verificação algébrica foi um dos marcos conceituais estabelecidos pela teoria de Maxwell ao relacionar a existência do campo magnético em função da variabilidade do fluxo elétrico. Como consequência imediada, surgiu uma nova formulação para Lei de Ampère – equação que regia essa relação, até então. (N. A.)