



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO
RIO GRANDE DO NORTE - IFRN
CAMPUS NATAL-CENTRAL
DIRETORIA ACADÊMICA DE CIÊNCIAS - DIAC
MESTRADO NACIONAL PROFISSIONAL EM ENSINO DE FÍSICA
POLO 10**

João Paulo de Lima Silva

**Aprendizagem por descoberta no ensino de Eletromagnetismo: uma
proposta investigativa no Ensino Médio com motor *brushless* como contexto**

João Paulo de Lima Silva

Aprendizagem por descoberta no ensino de Eletromagnetismo: uma proposta
investigativa no Ensino Médio com motor *brushless* como contexto

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Mestrado Profissional em Ensino de Física (MNPEF), da Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte - IFRN para a obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Orientador: DSc. Tibério Magno de Lima Alves

Natal/RN

2026

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Estado do Rio Grande do Norte – IFRN
Sistema Integrado de Bibliotecas – SIBi

S586a	Silva, João Paulo de Lima. Aprendizagem por descoberta no ensino de eletromagnetismo : uma proposta investigativa no ensino médio com motor <i>brushless</i> como contexto / João Paulo de Lima Silva. – 2026. 32 f. : il. color. Dissertação (mestrado) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, Natal, 2026. Orientador(a): Dr. Tibério Magno de Lima Alves. 1. Eletromagnetismo – Estudo e ensino. 2. Motor <i>brushless</i> 3. Aprendizagem por descoberta. 4. Sequência didática. 5. Ensino médio. I. Título. SIBi/IFRN CDU 537.8(043.3)
-------	--

Elaborada pela Bibliotecária
Sandra Nery S. Bigois – CRB-15/439

João Paulo de Lima Silva

**Aprendizagem por descoberta no ensino de Eletromagnetismo:
uma proposta investigativa no Ensino Médio com motor
brushless como contexto**

Dissertação apresentada ao Polo 10 – IFRN do
Programa de Mestrado Nacional Profissional em
Ensino de Física como parte das exigências à ob-
tenção do título de Mestre em Ensino de Física.
Área de concentração: Ensino de Física.

Aprovada em 13 de março de 2026.

BANCA EXAMINADORA



Documento assinado digitalmente

TIBERIO MAGNO DE LIMA ALVES

Data: 20/03/2026 15:52:31-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Tibério Magno de Lima Alves – Orientador
IFRN



Documento assinado digitalmente

BRUNO LUSTOSA DE MOURA

Data: 23/03/2026 15:44:48-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Bruno Lustosa de Moura – Examinador interno
IFRN



Documento assinado digitalmente

BRUNO FERREIRA AMORIM

Data: 22/03/2026 23:06:53-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Bruno Ferreira Amorim – Examinador externo
SEEC — RN

Dedico esse trabalho a minha família, em especial a minha esposa, Heloyza, a minha mãe, Maria José e a minha irmã, Ana Paula.

Agradecimentos

Dedico minha gratidão à toda minha família, especialmente à minha mãe e à minha irmã, por sempre acreditarem na minha capacidade. Agradeço pelos ensinamentos, orientação, carinho e cuidado que tornaram a conclusão desta etapa uma realidade.

À minha esposa, Heloyza Viana, pela presença constante, paciência, zelo e pelo amor que me fortaleceu nos momentos difíceis, permitindo-me superar todas as adversidades.

À coordenação do polo 10 do Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF), na pessoa do professor Dr. Edemerson de Moraes, por todo o suporte prestado.

Aos docentes do programa, pela solicitude demonstrada em todas as ocasiões e pelos valiosos aprendizados construídos durante o curso.

Aos meus colegas de mestrado, que caminharam ao meu lado compartilhando desafios e conquistas. Em especial, à minha amiga Gislânia, a quem sou extremamente grato pela parceria e auxílio durante esta jornada.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte (IFRN), minha segunda casa desde os 14 anos, por sempre me acolher e ter sido fundamental na minha formação como cidadão crítico.

Aos autores de livros didáticos de Física e Filosofia em língua nacional, áreas pelas quais nutro profundo interesse e que fundamentaram o profissional que sou hoje.

À Pró-Reitoria de Pesquisa, Pós-Graduação e Inovação (Propi) do IFRN, pela concessão da bolsa de pesquisa, essencial para a realização deste curso.

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

Por fim, expresso todo meu carinho e gratidão ao meu orientador, Prof. Dr. Ti-bério Alves, pelo inestimável suporte, apoio e paciência durante o desenvolvimento deste trabalho.

O conhecimento científico não é neutro. As perguntas que fazemos e as que ignoramos refletem poder.

Chanda Prescod-Weinstein

Resumo

O presente trabalho, resultante de uma dissertação desenvolvida no âmbito do Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF), Polo 10, sediado no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte (IFRN), tem por objetivo oferecer uma proposta para o ensino de conceitos de Eletromagnetismo, utilizando como ferramenta experimental o motor *brushless*. A sequência didática fundamenta-se pedagogicamente na aprendizagem por descoberta de Jerome Bruner e, do ponto de vista filosófico-epistemológico, no realismo de Mário Bunge. O estudo de caráter qualitativo e investigativo foi realizado em uma turma da terceira série do Ensino Médio do curso integrado em Edificações do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba (IFPB), *campus* Guarabira. Nesta turma apresentamos como proposta, o estudo de conceitos como campo magnético, fios percorridos por corrente elétrica e a interação existente entre eletricidade e magnetismo. Os resultados indicam avanços na compreensão de conceitos abstratos de eletromagnetismo, evidenciados pela superação de concepções alternativas e pela formulação de explicações mais coerentes pelos estudantes, utilizando um aparato experimental físico e uma sequência de atividades que estimula a investigação. Os dados qualitativos foram estudados, ou seja, as respostas que os estudantes fornecem nas atividades foram estudadas via o método de Análise de Conteúdo, identificando padrões de aprendizagem e a construção de novos conhecimentos. Conclui-se que, no contexto investigado, a proposta didática apresentou indícios consistentes de eficácia para a aprendizagem de conceitos de eletromagnetismo, configurando-se como uma experiência situada e replicável cujos resultados encorajam a ampliação da aplicação a outros contextos.

Palavras-chave: Ensino de Eletromagnetismo. Aprendizagem por descoberta. Sequência didática. Motor *brushless*. Ensino de Física.

Abstract

The present work, resulting from a dissertation developed within the scope of the Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF), Pole 10, based at the Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte (IFRN), aims to offer a proposal for teaching Electromagnetism concepts, using the brushless motor as an experimental tool. The didactic sequence is pedagogically grounded in Jerome Bruner's discovery learning and, from a philosophical-epistemological point of view, in Mario Bunge's realism. The qualitative and investigative study was carried out in a third-year High School class of the integrated course in Edificações at the Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba (IFPB), Guarabira campus. In this class, we presented as a proposal the study of concepts such as magnetic field, current-carrying wires, and the interaction between electricity and magnetism. The results indicate advances in the understanding of abstract electromagnetism concepts, evidenced by the overcoming of alternative conceptions and the formulation of more coherent explanations by the students, using a physical experimental apparatus and a sequence of activities that stimulates investigation. The qualitative data were analyzed, meaning the responses provided by students in the activities were studied via the Content Analysis method, identifying learning patterns and the construction of new knowledge. It is concluded that, within the investigated context, the didactic proposal showed consistent evidence of effectiveness for the learning of electromagnetism concepts, constituting a situated and replicable experience whose results encourage its application in other contexts.

Keywords: Electromagnetism teaching. Discovery learning. Didactic sequence. Brushless motor. Physics teaching.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Vetor velocidade angular	27
Figura 2 – Um fio e a obtenção do campo magnético	38
Figura 3 – Um curva qualquer envolvendo um fio condutor.	45
Figura 4 – Um curva qualquer envolvendo um fio condutor.	45
Figura 5 – IFPB - <i>Campus</i> Guarabira	50
Figura 6 – <i>Slide</i> 1 - Motor <i>brushless</i>	53
Figura 7 – <i>Slide</i> 2 - Motor <i>brushless</i> : por dentro	54
Figura 8 – <i>Slide</i> 3 - <i>Eletronic Speed Controller</i>	54
Figura 9 – <i>Slide</i> 4 - Servo Teste	55
Figura 10 – <i>Slide</i> 5 - Bateria	55
Figura 11 – Investigação do funcionamento do motor - fase inicial	56
Figura 12 – Investigação do funcionamento do motor - em funcionamento	56
Figura 13 – Ímãs de neodímio	60
Figura 14 – Esquema do experimento de Ørsted	62
Figura 15 – Exemplo da conservação da energia no campo gravitacional	63
Figura 16 – Analogia sobre o motor trifásico	67
Figura 17 – <i>GIF</i> 1: Funcionamento do motor	67
Figura 18 – <i>GIF</i> 2: Funcionamento do motor	68
Figura 19 – Questão 2 da terceira atividade	70
Figura 20 – Resposta 1 à questão 1 da primeira atividade	74
Figura 21 – Resposta 2 à questão 1 da primeira atividade	74
Figura 22 – Resposta 3 à questão 1 da primeira atividade	75
Figura 23 – Resposta 4 à questão 1 da primeira atividade	75
Figura 24 – Resposta 5 à questão 1 da primeira atividade	75
Figura 25 – Resposta 6 à questão 1 da primeira atividade	76
Figura 26 – Resposta 7 à questão 1 da primeira atividade	76
Figura 27 – Resposta 8 à questão 1 da primeira atividade	77
Figura 28 – Resposta 9 à questão 1 da primeira atividade	77
Figura 29 – Resposta 10 à questão 1 da primeira atividade	78
Figura 30 – Resposta 1 à questão 2 da primeira atividade	79
Figura 31 – Resposta 2 à questão 2 da primeira atividade	79
Figura 32 – Resposta 3 à questão 2 da primeira atividade	79
Figura 33 – Resposta 4 à questão 2 da primeira atividade	80
Figura 34 – Resposta 5 à questão 2 da primeira atividade	80
Figura 35 – Resposta 6 à questão 2 da primeira atividade	80
Figura 36 – Resposta 7 à questão 2 da primeira atividade	81

Figura 37 – Resposta 8 à questão 2 da primeira atividade	81
Figura 38 – Resposta 9 à questão 2 da primeira atividade	81
Figura 39 – Resposta 10 à questão 2 da primeira atividade	82
Figura 40 – Resposta 1 à questão 3 da primeira atividade	83
Figura 41 – Resposta 2 à questão 3 da primeira atividade	83
Figura 42 – Resposta 3 à questão 3 da primeira atividade	84
Figura 43 – Resposta 4 à questão 3 da primeira atividade	84
Figura 44 – Resposta 5 à questão 3 da primeira atividade	84
Figura 45 – Resposta 1 à questão 4 da primeira atividade	85
Figura 46 – Resposta 2 à questão 4 da primeira atividade	86
Figura 47 – Resposta 3 à questão 4 da primeira atividade	86
Figura 48 – Resposta 4 à questão 4 da primeira atividade	86
Figura 49 – Resposta 5 à questão 4 da primeira atividade	87
Figura 50 – Resposta 1 à questão 5 da primeira atividade	87
Figura 51 – Resposta 2 à questão 5 da primeira atividade	88
Figura 52 – Resposta 3 à questão 5 da primeira atividade	89
Figura 53 – Resposta 4 à questão 5 da primeira atividade	89
Figura 54 – Resposta 5 à questão 5 da primeira atividade	90
Figura 55 – Resposta 1 à questão 1 da segunda atividade	91
Figura 56 – Resposta 2 à questão 1 da segunda atividade	91
Figura 57 – Resposta 3 à questão 1 da segunda atividade	92
Figura 58 – Resposta 4 à questão 1 da segunda atividade	92
Figura 59 – Resposta 5 à questão 1 da segunda atividade	92
Figura 60 – Resposta 6 à questão 1 da segunda atividade	93
Figura 61 – Distribuição das concepções dos estudantes sobre sistemas conservativos	94
Figura 62 – Resposta 1 à questão 2 da segunda atividade	94
Figura 63 – Resposta 2 à questão 2 da segunda atividade	94
Figura 64 – Resposta 3 à questão 2 da segunda atividade	95
Figura 65 – Resposta 4 à questão 2 da segunda atividade	95
Figura 66 – Resposta 5 à questão 2 da segunda atividade	95
Figura 67 – Distribuição das concepções dos estudantes sobre a corrente elétrica	96
Figura 68 – Resposta 1 à questão 3 da segunda atividade	97
Figura 69 – Resposta 2 à questão 3 da segunda atividade	97
Figura 70 – Resposta 3 à questão 3 da segunda atividade	97
Figura 71 – Resposta 4 à questão 3 da segunda atividade	98
Figura 72 – Resposta 5 à questão 3 da segunda atividade	98
Figura 73 – Distribuição das concepções dos estudantes sobre o torque no motor	99
Figura 74 – Resposta 1 à questão 4 da segunda atividade	99
Figura 75 – Resposta 2 à questão 4 da segunda atividade	99

Figura 76 – Resposta 3 à questão 4 da segunda atividade	100
Figura 77 – Resposta 4 à questão 4 da segunda atividade	100
Figura 78 – Resposta 5 à questão 4 da segunda atividade	100
Figura 79 – Distribuição das concepções dos estudantes sobre o papel do campo magnético dos ímãs	101
Figura 80 – Resposta 1 à questão 5 da segunda atividade	101
Figura 81 – Resposta 2 à questão 5 da segunda atividade	102
Figura 82 – Resposta 3 à questão 5 da segunda atividade	102
Figura 83 – Resposta 4 à questão 5 da segunda atividade	103
Figura 84 – Estrutura dos modelos explicativos finais dos estudantes	104
Figura 85 – Resposta 1 à questão 1 da terceira atividade	104
Figura 86 – Resposta 2 à questão 1 da terceira atividade	105
Figura 87 – Resposta 3 à questão 1 da terceira atividade	105
Figura 88 – Resposta 4 à questão 1 da terceira atividade	106
Figura 89 – Resposta 5 à questão 1 da terceira atividade	106
Figura 90 – Estrutura das equações do torque criadas pelos estudantes	108
Figura 91 – Resposta 1 à questão 3 da terceira atividade	108
Figura 92 – Resposta 2 à questão 3 da terceira atividade	109
Figura 93 – Resposta 3 à questão 3 da terceira atividade	109
Figura 94 – Resposta 4 à questão 3 da terceira atividade	109
Figura 95 – Resposta 5 à questão 3 da terceira atividade	110
Figura 96 – Aplicações práticas propostas para o motor <i>brushless</i>	110
Figura 97 – Resposta 1 à questão 4 da terceira atividade	111
Figura 98 – Resposta 2 à questão 4 da terceira atividade	111
Figura 99 – Resposta 3 à questão 4 da terceira atividade	111
Figura 100 – Resposta 4 à questão 4 da terceira atividade	112
Figura 101 – Resposta 5 à questão 4 da terceira atividade	112
Figura 102 – Análise da simetria entre a eletricidade e o magnetismo	113
Figura 103 – Resposta 1 à questão 5 da terceira atividade	113
Figura 104 – Resposta 2 à questão 5 da terceira atividade	113
Figura 105 – Resposta 3 à questão 5 da terceira atividade	114
Figura 106 – Resposta 4 à questão 5 da terceira atividade	114
Figura 107 – Resposta 5 à questão 5 da terceira atividade	115

Lista de quadros

Quadro 1 – Questão 1 da primeira atividade	57
Quadro 2 – Questão 2 da primeira atividade	57
Quadro 3 – Questão 3 da primeira atividade	58
Quadro 4 – Questão 4 da primeira atividade	58
Quadro 5 – Questão 5 da primeira atividade	58
Quadro 6 – Questão 6 da primeira atividade	59
Quadro 7 – Questão 1 da segunda atividade	64
Quadro 8 – Questão 2 da segunda atividade	64
Quadro 9 – Questão 3 da segunda atividade	64
Quadro 10 – Questão 4 da segunda atividade	65
Quadro 11 – Questão 5 da segunda atividade	65
Quadro 12 – Questão 1 da terceira atividade	68
Quadro 13 – Questão 3 da terceira atividade	71
Quadro 14 – Questão 4 da terceira atividade	71
Quadro 15 – Questão 5 da terceira atividade	71
Quadro 16 – Questão 6 da terceira atividade	72

Lista de tabelas

Tabela 1	–	Processo de modelagem de Bunge - da realidade ao objeto-modelo . . .	25
Tabela 2	–	Diferenças entre pesquisa quantitativa e qualitativa	48
Tabela 3	–	Assuntos de Física mais cobrados no ENEM	51
Tabela 4	–	Ordem sequencial de aplicação do produto	52
Tabela 5	–	Percentual correspondente a cada alternativa marcada na questão 2 . .	108

Lista de abreviaturas e siglas

SBF: Sociedade Brasileira de Física

MNPEF: Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física

SI: Sistema Internacional de Unidades

CGS: Sistema de Unidades - centímetro, grama e segundo

IFPB: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba

IFRN: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte

ENEM: Exame Nacional do Ensino Médio

ESC: *Electronic Speed Controller*

BLDC: *Brushless Direct Current*

Sumário

1	INTRODUÇÃO	15
2	REVISÃO DA LITERATURA	20
2.1	A teoria da aprendizagem por descoberta de Jerome Bruner	20
2.2	A epistemologia de Mário Bunge: Realismo	22
2.3	Torque, conservação da energia e campos magnéticos	25
2.3.1	Torque de uma força	26
2.3.2	Conservação da energia	28
2.3.2.1	Brevíssimo histórico	28
2.3.2.2	Modelagem matemática	33
2.3.3	Campos magnéticos clássicos	35
2.3.3.1	Brevíssimo histórico	35
2.3.3.2	Modelagem matemática	37
2.3.4	Motor <i>brushless</i>	46
2.3.4.1	Brevíssimo histórico	46
3	METODOLOGIA	48
3.1	Caracterização do público-alvo	49
3.2	Estratégia de pesquisa	50
3.3	Estrutura didática	51
3.4	Aplicação do produto educacional	52
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	73
4.1	Respostas da Atividade 1	74
4.1.1	Questão 1	74
4.1.2	Questão 2	79
4.1.3	Questão 3	83
4.1.4	Questão 4	85
4.1.5	Questão 5	87
4.2	Respostas da Atividade 2	91
4.2.1	Questão 1	91
4.2.2	Questão 2	94
4.2.3	Questão 3	96
4.2.4	Questão 4	99
4.2.5	Questão 5	101
4.3	Respostas da Atividade 3	104

4.3.1	Questão 1	104
4.3.2	Questão 2	107
4.3.3	Questão 3	108
4.3.4	Questão 4	111
4.3.5	Questão 5	113
5	CONCLUSÃO	117
	REFERÊNCIAS	119
	APÊNDICE A – PRODUTO EDUCACIONAL	124

1 Introdução

Um dos principais obstáculos epistemológicos no processo de ensino e aprendizagem da teoria eletromagnética clássica é lidar com a abstração do conceito de campo. Diferentemente da mecânica, em que os estudantes possuem uma base de experiências intuitivas e cotidianas com conceitos como força, velocidade e aceleração, os conceitos centrais do eletromagnetismo são invisíveis e não mecânicos (MAGALHÃES; SANTOS; DIAS, 2002). O presente trabalho propõe uma sequência didática que contribua para o desenvolvimento do ensino do eletromagnetismo, com o objetivo de introduzir os conceitos fundamentais dessa teoria, relevante para a sociedade moderna, para uma turma de Ensino Médio.

Este trabalho foi realizado no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba (IFPB), *campus* Guarabira, em uma turma da terceira série do Ensino Médio do Curso Técnico Integrado em Edificações. Nele, utilizamos um motor *brushless* para o ensino e aprendizagem dos conceitos de fios condutores percorridos por correntes elétricas, campos magnéticos de ímãs, a relação intrínseca entre corrente elétrica e campo magnético no experimento de Ørsted e a revisão de conceitos supostamente estudados em anos anteriores, como torque e conservação da energia. A base pedagógica está calcada na teoria de aprendizagem por descoberta, de Jerome Bruner, enquanto a base epistemológica e filosófica se fundamenta no realismo de Mário Bunge. Para realizar as discussões pertinentes acerca dos resultados obtidos nas atividades, foi escolhida a técnica de Análise de Conteúdo, adequada a contextos de dados qualitativos.

A presente pesquisa estrutura-se a partir de um conjunto de indagações que orientam tanto sua fundamentação teórica quanto suas escolhas metodológicas. Em primeiro lugar, busca-se compreender a justificativa para a utilização do motor *brushless* como elemento central na abordagem inicial do eletromagnetismo, considerando seu potencial didático e experimental na elucidação de conceitos fundamentais dessa área da física. Em seguida, questiona-se a motivação que fundamenta a escolha do tema do eletromagnetismo, tendo em vista sua relevância conceitual, tecnológica e formativa no contexto da educação científica. Outro aspecto de interesse diz respeito à opção pela realização de uma atividade experimental, tendo em vista que essa abordagem é capaz de favorecer a aprendizagem significativa, a articulação entre teoria e prática e o desenvolvimento do senso investigativo por parte dos estudantes.

Ademais, discute-se a escolha de uma turma da terceira série do Ensino Médio, etapa em que os discentes se encontram em um momento propício para o aprofundamento e a sistematização de conhecimentos científicos mais abstratos. No que se refere ao refe-

rencial teórico pedagógico, investiga-se a adoção de Jerome Bruner como base conceitual, tendo em vista suas contribuições à teoria da aprendizagem por descoberta e à proposta de organização espiral do currículo, que se articulam aos objetivos desta pesquisa.

No campo epistemológico e filosófico, considera-se relevante explicitar a opção pela abordagem realista de Mário Bunge, cuja concepção de ciência e de conhecimento oferece bases consistentes para uma compreensão crítica e coerente da física enquanto empreendimento racional. Tal perspectiva contribui para sustentar o diálogo entre teoria e prática, dando a pesquisa um referencial sólido quanto à natureza do conhecimento científico. Por sua vez, a escolha da Análise de Conteúdo como estratégia metodológica para o tratamento dos resultados fundamenta-se em seu caráter sistemático e rigoroso, que permite uma leitura interpretativa das respostas discursivas dos participantes e possibilita a construção de significados a partir das evidências coletadas.

A escolha do conteúdo do eletromagnetismo ocorre por algumas razões. A primeira delas é que a pesquisa em ensino de física no Brasil está concentrada na área da mecânica clássica; em comparação, o ensino de eletromagnetismo é pouco pesquisado, como mostram os trabalhos de Fontes e Rodrigues (2021), Martins, Garcia e Brito (2011) e Pieper e Neto (2015). Existem diversas razões para que isso aconteça, a mais simples de entender é o fato de que os conceitos envolvidos em mecânica clássica regem a vida cotidiana de maneira explícita. Outra razão relevante é o fato de que a teoria eletromagnética modificou radicalmente a forma como as sociedades se estruturam a partir de meados do século XIX, tendo seus aspectos políticos, sociais, econômicos e culturais sofrendo rupturas e adaptando-se à nova realidade de cabos submarinos e comunicação a distância (LAZAROFF-PUCK, 2024).

Dado este cenário, a utilização do motor *brushless* se torna plausível e adequada ao processo de ensino e aprendizagem de conceitos presentes na teoria eletromagnética clássica. As principais características de um motor deste tipo, em comparação aos motores elétricos convencionais que possuem escova, são maior eficiência, durabilidade, desempenho, menor ruído e maior confiabilidade. Existem motores *brushless* de diversos modelos, cada um com uma finalidade específica; no caso deste trabalho, o modelo escolhido foi o A2212-2200KV, um modelo compacto utilizado em aeromodelos e *drones*, portanto fácil de utilizar em sala de aula. Assim, o motor *brushless* torna-se uma potencial ferramenta para estudo de elementos do eletromagnetismo.

Uma das habilidades que precisa ser desenvolvida pelo estudante do Ensino Médio dentro da Competência Específica 1 no contexto de Ciências da Natureza e suas Tecnologias presente na BNCC, é a seguinte:

Realizar previsões qualitativas e quantitativas sobre o funcionamento de geradores, motores elétricos e seus componentes, bobinas, transformadores, pilhas, baterias e dispositivos eletrônicos, com base na análise dos

processos de transformação e condução de energia envolvidos com ou sem o uso de dispositivos e aplicativos digitais, para propor ações que visem a sustentabilidade. (BRASIL, 2018, pg. 555)

Já os Parâmetros Curriculares Nacionais, em sua Unidade 3.2, no contexto do tema estruturador, Equipamentos Eletromagnéticos e Telecomunicações, orientam a inserção de estudos sobre motores elétricos da seguinte forma: Reconhecer a relação entre fenômenos magnéticos e elétricos para explicar o funcionamento de motores elétricos e seus componentes, interações envolvendo bobinas e transformações de energia (BRASIL, 2000, pg. 555). O documento que rege o currículo do Ensino Médio da Paraíba, na unidade temática de Matéria e Energia, diz: Examinar e/ou experimentar qualitativa e quantitativamente o funcionamento de geradores, motores elétricos e seus componentes, para propor ações que visem à solução de situações-problema, considerando a sustentabilidade (PARAÍBA, 2021, pg. 341). Constata-se, a partir destes documentos orientadores, a relevância de compreender os aspectos operacionais de motores elétricos em um contexto técnico, mas também político e social.

A abordagem experimental dos conteúdos de física constitui-se como um dos principais artifícios didáticos e pedagógicos possíveis, já que, em sua natureza, a física é uma ciência experimental. Segundo Silva et al. (2024), podemos classificar a física quanto aos métodos utilizados da seguinte forma:

Teoricamente, a Física trabalha com um conjunto de métodos, envolvendo modelagem teórica com equação diferenciais, equações de diferença, modelagem computacional, etc. Assim, uma área como a “Econofísica”, o que se tem são técnicas matemáticas usadas em Física que são aplicadas à Economia e ao mercado de ações. Experimentalmente, os métodos de medição da Física envolvem a obtenção de valores numéricos associados a processos físicos e a construção de instrumentos cada vez mais sensíveis para a obtenção desses números. Tais instrumentos são aplicados na maioria dos campos científicos, como nas técnicas de imagem da Neurociência. (SILVA et al., 2024, pg. 30)

O físico escocês James Clerk Maxwell comenta sobre a importância da abordagem experimental no ensino de física em uma palestra proferida no ano de 1871:

Deixe-me dizer algumas palavras sobre essas duas classes de experimentos - Experimentos de Ilustração e Experimentos de Pesquisa. O objetivo de um experimento de ilustração é lançar luz sobre alguma ideia científica para que o estudante possa ser capaz de compreendê-la. As circunstâncias do experimento são organizadas de tal forma que o fenômeno que desejamos observar ou exibir seja trazido à tona, em vez de ser obscurecido e enredado entre outros fenômenos, como é quando ocorre no curso normal da natureza. Exibir experimentos ilustrativos, encorajar outros a fazê-los e cultivar de todas as maneiras as ideias sobre as quais eles lançam luz, constitui uma parte importante de nosso dever. Quanto mais simples forem os materiais de um experimento ilustrativo, e quanto mais familiares forem para o estudante, mais completamente ele

provavelmente adquirirá a ideia que se destina a ilustrar. (MAXWELL, 1890)

Nesse contexto, levar experimentos para as aulas de Física pode tornar o processo de assimilação de determinados conceitos mais estimulante. Entidades físicas, como o campo e a interação por meio dele, são aspectos complexos do mundo natural; por isso, é necessária uma abordagem mais visual e palpável. O experimento cumpre essa finalidade.

A escolha por uma turma da terceira série do Ensino Médio do curso de Edificações do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Campus Guarabira, deu-se por alguns fatores. O primeiro deles é o fato de que essa turma cursa a disciplina de Física III e, segundo o PPC¹ do curso, é nessa disciplina que o conteúdo de eletromagnetismo deve ser ministrado (IFPB, 2013). O segundo motivo é que o curso técnico integrado em Edificações possui contato básico com elementos de arquitetura e engenharia, o que favorece um entendimento mais amplo do objeto físico motor *brushless*. O terceiro motivo reside no fato de que é nessa turma que o professor pesquisador responsável por este trabalho atua diretamente como docente de Física, o que favorece o acompanhamento e as intervenções necessárias.

Para realizar a guia pedagógica da aprendizagem, o trabalho de Jerome Bruner será essencial. Seus conceitos de aprendizagem por descoberta, nos quais o estudante é estimulado a participar ativamente das formulações e construção do conhecimento estão alinhados com a proposta deste trabalho. Em todas as atividades, os estudantes serão convidados a fornecerem explicações e formular modelos para entender, do ponto de vista físico, como funciona o motor *brushless*. Nesta perspectiva, o professor fornecerá, a cada nova atividade, informações úteis para que os estudantes construam o próprio conhecimento.

A inserção de uma discussão epistemológica e filosófica dos fenômenos físicos neste trabalho justifica-se pela transformação radical que a teoria quântica provocou nos fundamentos da física. Duas linhas de pensamento relacionadas à ontologia das teorias físicas ganharam notoriedade a partir de 1925: a visão realista, aqui defendida, e a visão anti-realista, sustentada por alguns dos pilares da construção da teoria quântica, como Bohr, Heisenberg e von Neumann. A perspectiva realista, defendida por Mário Bunge, sustenta que a física deve manter um compromisso ontológico objetivo, ou seja, deve preocupar-se em descrever o mundo real (LEITE, 2025).

Considerado o exposto, o objetivo geral deste trabalho é desenvolver uma atividade investigativa a partir de uma sequência didática que permita o estudo dos mecanismos e princípios que regem o funcionamento de um motor *brushless*. A partir disso, os estudantes terão contato com um motor *brushless* em funcionamento, serão instigados a elaborar uma

¹ Plano Pedagógico do Curso

explicação para o seu funcionamento munidos de conhecimentos sobre fenômenos físicos e compreender, ao final, os princípios básicos que regem esse tipo de motor.

O presente trabalho está organizando da seguinte forma: o capítulo 2 versa sobre a revisão da literatura abordando o referencial teórico de cunho pedagógico, físico e filosófico. O capítulo 3 apresenta a metodologia escolhida, partindo da caracterização do público-alvo, seguido da estratégia de pesquisa, a estrutura didática e por fim de como se dará a aplicação do produto educacional. No capítulo 4 serão exibidos os resultados obtidos, acompanhado das discussões pertinentes e ao final, o capítulo 5, com as considerações finais sobre o trabalho desenvolvido.

2 Revisão da Literatura

Este capítulo de revisão da literatura busca estabelecer as bases pedagógicas, epistemológicas e filosóficas que orientam este estudo sobre a abordagem introdutória do eletromagnetismo utilizando um motor *brushless*. A discussão está ancorada principalmente em duas perspectivas teóricas. A abordagem pedagógica será orientada pelas contribuições de Jerome Bruner¹, especialmente sua teoria da aprendizagem por descoberta, que valoriza a participação ativa do estudante na construção do conhecimento. Já a fundamentação epistemológica e filosófica será sustentada pelo realismo científico de Mario Bunge², que defende a busca por um conhecimento objetivo e verificável da realidade física. A articulação dessas duas perspectivas, portanto, sustentar a relevância da proposta de ensino aqui apresentada.

2.1 A teoria da aprendizagem por descoberta de Jerome Bruner

Jerome Bruner foi um psicólogo norte-americano, de origem judaica que atuou como professor de psicologia em Harvard e Oxford entre os anos de 1945 e 1980. Sua principal obra intelectual versa sobre a superação do behaviorismo³, iniciando o que chamou de “Revolução Cognitiva”. No tempo em que esteve em Harvard, Bruner publicou trabalhos sobre organização perceptiva, cognição e teoria da aprendizagem (aprendizagem por descoberta), enfatizando a importância de estratégias e representações mentais no processamento de fenômenos do mundo real. Bruner ocupa a 28ª posição na lista da Associação Americana de Psicologia que reúne os 100 psicólogos mais eminentes do século XX. (UNIVERSITY, s.d.).

O conceito de aprendizagem por descoberta é caracterizado pelo que Bruner chama de modelo hipotético, onde o professor e o estudante estão em posição de cooperação. Nesse modelo, o estudante participa ativamente das formulações, compreende as diferentes alternativas e exerce sua liberdade de expressão. Segundo o autor, o modo hipotético constitui a essência do ato de ensinar, promovendo o incentivo à descoberta e à construção autônoma do conhecimento. Existem, segundo Bruner alguns benefícios de aprender por meio da descoberta, como uma elevação do potencial intelectual, aprendizado da heurística do conhecimento e uma clara conservação da memória (GOI; SANTOS, 2018).

¹ Jerome Seymour Bruner (1915 - 2016), psicólogo estadunidense.

² Mario Augusto Bunge (1919 - 2020), físico, filósofo da ciência e humanista argentino.

³ Estudo do comportamento, para saber mais leia Baum (2018).

A prática de utilização do motor *brushless* para o primeiro contato com elementos do eletromagnetismo, como campo magnético de ímãs e bobinas, relação intrínseca entre eletricidade e magnetismo, potencial elétrico por meio de perguntas que instigam a investigação intelectual por conta própria está alinhado com a teoria da aprendizagem por descoberta de Bruner. Nas 3 atividades aqui propostas, os estudantes são convidados a fornecerem explicações para o funcionamento correto do motor, recebendo novas informações a cada etapa e realizando revisões de conteúdos já estudados anteriormente. Essa prática garante os benefícios propostos na teoria de Bruner.

A aprendizagem de qualquer assunto pode ser dividida estruturalmente da seguinte maneira: primeiro se adquire novas informações, que vão refinar ou substituir o que o indivíduo já sabe, segundo o ocorre uma transformação, que consiste em manipular o conhecimento de forma a ajustá-lo e aplicá-lo a novas situações ou tarefas e a avaliação, que analisa de que maneira a manipulação da informação se revela apropriada para a realização da tarefa (GOI; SANTOS, 2018). A partir disso, a aprendizagem por descoberta acontecerá quando o estudante seleciona e transforma a informação, constrói hipóteses e toma decisões, utilizando sua estrutura cognitiva (BORBA; GOI, 2021). Ou seja, a descoberta de uma relação ou de um princípio físico com base em seus modelos mentais e conhecimentos prévios é essencialmente o que um cientista de ciências naturais faz em um laboratório, isso nos leva a perceber que a investigação de como funcionam tecnologias tornam-se potenciais ferramentas didático-pedagógicas para o ensino de ciências, especialmente Física.

Neste modelo de aprendizagem, o professor assume um papel de guia e facilitador no processo, sendo necessário ajudar o estudante a descobrir por conta própria. Nesse sentido, Bruner sinaliza que grande parte do desenvolvimento intelectual ocorre quando revisitamos nossos próprios passos e, com o apoio de professores, somos capazes de modificá-los e organizá-los de novas formas. Os novos modelos de pensamento se formam em sistemas de representação cada vez mais potentes, e é por isso que o autor entende o processo educacional como um diálogo constante, voltado à tradução das experiências em sistemas mais elaborados de notação e ordenação. Assim, a teoria do desenvolvimento deve estar intrinsecamente relacionada à teoria do conhecimento (GOI; SANTOS, 2018).

Todas as atividades propostas nesta sequência didática seguem essa perspectiva. Em todos os momentos, o professor atua como guia, oferecendo informações relevantes que possibilitam aos estudantes construir suas próprias explicações sobre o funcionamento do motor. A revisão de conceitos já estudados, como torque e conservação de energia, juntamente com a introdução de novos conhecimentos, como o princípio da atração e repulsão magnéticas e o experimento de Ørsted com fios percorridos por corrente elétrica, oferece subsídios intelectuais para que os estudantes possam desenvolver as etapas de descoberta do conhecimento.

Bruner em sua teoria chama atenção de que esse processo de descoberta só será possível se estiver fortemente estruturado e em uma sequência que torne tudo menos caótico, para que as confusões sejam minimizadas. No caso de atividades experimentais, como é o caso deste sequência didática, as atividades não devem seguir uma receita pronta, sem liberdade de criação, mas também não podem conter quaisquer resquícios de desestruturação (MOREIRA, 1999).

Em seu livro *The Process of Education*, Bruner defende a seguinte tese

Começamos com a hipótese de que qualquer assunto pode ser ensinado eficazmente, de alguma forma intelectualmente honesta, a qualquer criança em qualquer estágio de desenvolvimento. É uma hipótese ousada e essencial ao se pensar sobre a natureza de um currículo. Não existem evidências que a contradigam; evidências consideráveis que a apoiam estão sendo acumuladas. (BRUNER, 2009, pg. 33)

Essa ideia é base fundamental do que Bruner chamou de currículo em espiral, cuja essência reside em alguns pontos centrais. O primeiro seria a premissa de revisitar ideias fundamentais repetidamente, pois o verdadeiro domínio das ideias básicas não ocorre apenas na primeira exposição a elas, se consolida por meio de um processo contínuo de revisitação e aprofundamento. Temos também a perspectiva de aproveitar a compreensão intuitiva inicial, segundo Bruner, a criança é capaz de apreender intuitivamente muitas das ideias fundamentais em matemática, ciências naturais e ciências sociais, embora somente em termos concretos e práticos. Por fim, destaca-se a noção de foco na estrutura da disciplina, uma vez que o autor argumenta que o verdadeiro aprendizado acontece quando o estudante compreende a estrutura essencial do campo de estudo, isto é, os princípios, conceitos e relações que organizam e sustentam o conhecimento dentro daquela área.

O conceito de currículo em espiral favorece a ideia de que o eletromagnetismo pode ser abordado em diferentes níveis de profundidade - revisando conceitos antigos e adicionando novos - ao longo de atividades sequenciadas e estruturadas. Entende-se que a teoria de aprendizagem por descoberta de Bruner colabora para a sequência didática proposta, tendo em vista que a atividade experimental motiva os estudantes a engajarem no processo de descoberta do conhecimento.

2.2 A epistemologia de Mário Bunge: Realismo

No contexto desta dissertação, que aborda os conceitos fundamentais do Eletromagnetismo utilizando um motor *brushless*, a escolha de uma fundamentação filosófica para compor o corpo do embasamento teórico não é arbitrária, consideramos de extrema importância a inserção de pressupostos filosóficos, diante da quantidade de discussões dessa natureza ao longo do desenvolvimento da Física enquanto ciência. Ao basear-se no realismo de Mário Bunge, este estudo busca demonstrar que os modelos e as teorias

científicas, não são meras convenções úteis para a previsão de fenômenos, mas representações progressivamente mais verdadeiras e objetivas da realidade. Essa perspectiva realista fornece a justificção para que os conceitos abordados não sejam vistos apenas como abstrações matemáticas, mas como entidades que capturam a essência de um mundo físico que existe independentemente da nossa percepção.

No âmbito da epistemologia da Física, a Filosofia, em nossa visão, desempenha um papel indispensável para a consolidação da ciência e a confiabilidade de seus métodos. Essa perspectiva é defendida por alguns autores, como Heisenberg⁴, Einstein⁵ e Rovelli⁶ e criticada por outros como Feynman⁷ e Weinberg⁸. Segundo Bassalo, Caruso e Marques (2021)

Não são poucos os físicos que comentam em público (algumas vezes com estranho orgulho) que “não gostam de Filosofia” ou que “a Física moderna nada tem a ver com ela.” Ledo engano! (...) É lamentável que tal postura negativista é adotada por um professor de Física. Aprendendo com este viés, o estudante deixa de apreciar a evolução das ideias físicas em toda a sua amplitude e beleza. Tampouco consegue enxergar a Física como uma atividade humana inserida em um contexto histórico, social e cultural. (BASSALO; CARUSO; MARQUES, 2021, pg. xi)

Sobre isso, Silva et al. (2024) citando Einstein,

A relação recíproca entre a epistemologia e a ciência é de uma espécie notável. Elas são dependentes uma da outra. Epistemologia sem contato com a ciência torna-se um esquema vazio. Ciência sem epistemologia - na medida em que isso até seja pensável - é primitiva e confusa. (...) (SILVA et al., 2024, pg. 21)

Mário Bunge sentiu a necessidade de estudar filosofia e se aprofundar nessa área em virtude do descontentamento que tinha com a Interpretação de Copenhague da Mecânica Quântica, por vezes chamada de Interpretação Ortodoxa da Mecânica Quântica. Entre os defensores dessa interpretação estão Bohr⁹, Heisenberg, Born¹⁰, von Neumann¹¹, Pauli¹² e outros. Os críticos mais famosos são Einstein, Schrödinger¹³, de Broglie¹⁴, Bohm¹⁵ e Everett¹⁶. Assim, entre os anos de 1974 e 1989, Bunge trabalhou em seu tratado de

⁴ Werner Karl Heisenberg (1901 - 1976), físico teórico alemão.

⁵ Albert Einstein (1879 - 1955), físico teórico alemão.

⁶ Carlo Rovelli (1956 -), físico e cosmólogo italiano.

⁷ Richard Phillips Feynman (1918 - 1988), físico teórico norte-americano.

⁸ Steven Weinberg (1933 - 2021), físico teórico norte-americano.

⁹ Niels Henrik David Bohr (1885 - 1962), físico e filósofo dinamarquês.

¹⁰ Max Born (1882 - 1970), físico e matemático alemão.

¹¹ John von Neumann (1903 - 1957), físico-matemático e engenheiro químico húngaro.

¹² Wolfgang Ernst Pauli (1918 - 1958), físico teórico e pesquisador austríaco.

¹³ Erwin Rudolf Josef Alexander Schrödinger (1887 - 1961), físico teórico austríaco.

¹⁴ Louis-Victor-Pierre-Raymond (1892 - 1987), físico francês.

¹⁵ David Joseph Bohm (1917 - 1992), físico e filósofo norte-americano.

¹⁶ Hugh Everett III (1930 - 1982), físico norte-americano.

filosofia, no qual reúne conceitos e posições filosóficas confrontando-se com o conhecimento estabelecido da ciência. O conceito que utilizaremos de sua filosofia é o de realismo, ou seja, para Bunge o mundo exterior existe independentemente do observador e é cognoscível - aquilo que pode ser conhecido pelo ser humano, isto é, que está ao alcance da razão, da percepção ou da experiência - pelo menos parcialmente e gradualmente (OLIVEIRA, 2019).

Bunge, em relação ao conhecimento humano, distingue dois tipos de realismo, o ingênuo e o crítico. O realista ingênuo assume que o mundo é exatamente como o percebemos por meio de nossos sentidos, essa visão, segundo Bunge, é insustentável e facilmente refutada. Em contraste, o realismo crítico desconfia dos dados sensoriais diretos e promove a construção de “sistemas conceituais sofisticados (teorias)” para explicar a realidade. Esses sistemas, apesar de abstratos, dizem respeito a entidades reais, ainda que de forma indireta. Ele exemplifica isso recorrendo à física quântica: nela, um conceito extremamente abstrato como um vetor em um espaço de Hilbert serve para representar o estado de algo concreto, como um elétron (BUNGE, 2015).

Em nosso contexto de ideias iniciais de Eletromagnetismo, conceitos como “campo elétrico” e “campo magnético” não são meras ficções matemáticas ou convenções de cálculo, mas representações de propriedades e interações que existem no mundo físico de forma independente de nossa percepção. Ou seja, a teoria não é um substituto para a realidade, mas uma ferramenta para sua compreensão, e essa compreensão se torna progressivamente mais precisa por meio da pesquisa científica. Essa perspectiva é claramente comunicada aos estudantes participantes da pesquisa.

Em seu fundamento, o cientificismo de Bunge não lida diretamente com a realidade em sua totalidade, mas sim com “objetos-modelo” e “modelos teóricos”, que são idealizações e abstrações da realidade. Tais modelos que são criados pelo sujeito que está imerso no contexto intelectual de determinada área, não possuem um caráter de arbitrariedade. Eles devem se referir, aproximar e ser validados por uma realidade independente, caso contrário a valorização do papel das construções individuais será mais relevante do que a realidade externa, o que, para Bunge, se torna inviável.

A Tabela 1 define os três elementos que Bunge considera fundamentais no processo de teorização do conhecimento. Assim, o objeto-modelo passa a assumir o papel de representar os objetos reais, enquanto o modelo teórico descreve o comportamento desses objetos. Desse modo, o modelo teórico pode ser entendido como um sistema hipotético-dedutivo, isto é, uma estrutura capaz de gerar novas proposições a partir de proposições iniciais. Isso torna possível realizar previsões, pois, ao constituir uma rede de relações dedutivas, o modelo pode extrapolar os contextos para os quais foi originalmente elaborado, revelando propriedades e comportamentos dos objetos-modelos nele integrados (PIETROCOLA, 1999).

Tabela 1 – Processo de modelagem de Bunge - da realidade ao objeto-modelo

Fenômeno Físico	Objeto-Modelo (Idealização)	Modelo Teórico (Abstração)
Queda de uma maçã	Corpo pontual em queda livre	Leis do Movimento de Newton
Oscilação de um pêndulo	Ponto material preso a fio inextensível sem atrito	Movimento Harmônico Simples
Expansão de um gás	Conjunto de partículas ideais sem interação	Equação dos Gases Ideais
Propagação da luz	Onda eletromagnética em meio homogêneo	Equações de Maxwell
Funcionamento do motor brushless	Configuração do estator e rotor; linhas de campo simplificadas	Leis de Faraday e Ampère

Fonte: Autor (2025)

Cumpre ressaltar que o objetivo não é conduzir os estudantes, ao final da atividade, à formulação direta do modelo teórico das Leis de Faraday e Ampère a partir de suas próprias idealizações. Busca-se, antes, que desenvolvam a capacidade de elaborar idealizações de conceitos e relações a partir das novas informações que lhes são apresentadas. Ressalte-se, entretanto, que o caráter realista do funcionamento do motor *brushless* é preservado em todas as etapas do processo de construção.

Essa articulação entre o referencial bungeano e a prática didática se manifesta de modo concreto na sequência de atividades proposta. Quando, por exemplo, os estudantes são convidados a propor um modelo explicativo para o funcionamento do motor *brushless*, estão operando precisamente dentro do que Bunge denomina construção de um objeto-modelo: partem do fenômeno físico observado (o giro do rotor) e elaboram idealizações — campo magnético dos ímãs, corrente nas bobinas, torque resultante — que, embora simplificadas, mantêm compromisso com a realidade objetiva do sistema. A cada nova atividade, à medida que informações adicionais são fornecidas, os estudantes refinam seus modelos em direção a representações progressivamente mais coerentes, reproduzindo, em escala didática, o processo de teorização descrito na Tabela 1. Assim, a fundamentação filosófica não constitui um adorno externo ao estudo empírico, mas sim a lente por meio da qual se interpreta a evolução conceitual dos estudantes ao longo da sequência.

2.3 Torque, conservação da energia e campos magnéticos

A compreensão integrada dos fenômenos físicos é essencial para a análise e a resolução de problemas em diferentes áreas da ciência e da tecnologia. Neste capítulo, vamos revisar conceitos fundamentais que serão empregados ao longo deste trabalho, iniciando pelo torque, grandeza vetorial associada à rotação de corpos sob a ação de forças, e pela conservação da energia, princípio que fornece sentido à interpretação das transformações

energéticas em sistemas mecânicos e eletromagnéticos. Em seguida, abordaremos os campos magnéticos, tanto no contexto dos ímãs permanentes quanto na geração de campos por correntes elétricas, explorando a relação direta entre corrente elétrica e campo magnético, conforme estabelecido pelas leis do eletromagnetismo clássico. Essa revisão fornece a base conceitual necessária para a compreensão dos fenômenos investigados neste produto educacional.

2.3.1 Torque de uma força

Para se chegar à discussão sobre Torque de uma força, é necessário definir algumas grandezas importantes existentes no estudo da dinâmica de rotação de sistemas físicos. A primeira grandeza é a velocidade angular.

A velocidade angular $\boldsymbol{\omega}$ ¹⁷, de uma partícula em função do tempo em relação à origem de um sistema de coordenadas (sendo o sistema polar o mais adequado para essa análise), é dada por:

$$\boldsymbol{\omega}(t) = \frac{d}{dt}\boldsymbol{\theta}(t). \quad (2.1)$$

Assim, temos uma partícula movendo-se em uma trajetória circular ao redor de um eixo. Se considerarmos um intervalo de tempo infinitesimal, $\delta t \rightarrow 0$, a trajetória será um arco de círculo infinitesimal (MAHON, 2020).

Vamos considerar uma partícula que se move em um círculo de raio R , ao redor de um eixo perpendicular ao plano em que se dá o movimento. A Figura 1 exibe a configuração.

A partir da figura, constatamos que $\delta \mathbf{r}$ e $\mathbf{v}$ são colineares. Sabemos, pela cinemática angular que a velocidade linear é dada por:

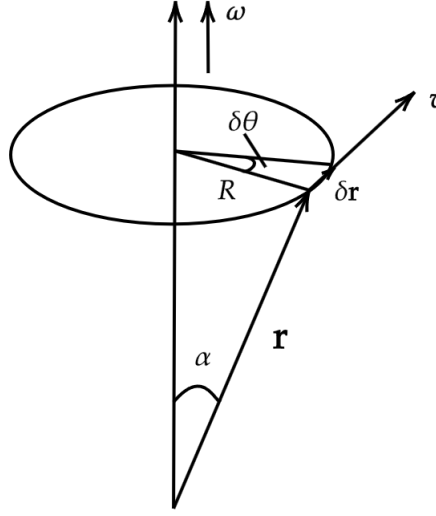
$$\mathbf{v} = \frac{d}{dt}\mathbf{r} = \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}. \quad (2.2)$$

Com essa definição, podemos introduzir outra grandeza da dinâmica de rotação: o momento angular, $\mathbf{L}$. Definimos o momento angular de uma partícula em função do tempo e em relação à origem de um sistema de coordenadas, a partir da qual medimos $\mathbf{r}$, como:

$$\mathbf{L} = \mathbf{r} \times \mathbf{p}. \quad (2.3)$$

¹⁷ $\boldsymbol{\omega}$ é um pseudovetor (vetor axial). Optamos, neste texto, por escrever as grandezas vetoriais em negrito ao invés de colocar a “seta” sobre cada símbolo.

Figura 1 – Vetor velocidade angular



Fonte: Autor (2025)

Onde $\mathbf{p}$ é o momento linear da partícula. Temos que $\mathbf{L} = \mathbf{L}(t)$, $\mathbf{r} = \mathbf{r}(t)$ e $\mathbf{p} = \mathbf{p}(t)$. Como o momento angular $\mathbf{L}$ é dado pelo produto vetorial entre $\mathbf{r}$ e $\mathbf{p}$, sua configuração no espaço é perpendicular ao plano formado por $\mathbf{r}$ e $\mathbf{p}$, e sua direção pode ser obtida pela regra da mão direita¹⁸.

Utilizando a equação 2.2, podemos reescrever a relação em 2.3 como:

$$\mathbf{L} = \mathbf{r} \times m\mathbf{v} = \mathbf{r} \times (m\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}). \quad (2.4)$$

A partir da propriedade do produto vetorial triplo, $\mathbf{A} \times (\mathbf{B} \times \mathbf{C}) = (\mathbf{A} \cdot \mathbf{C})\mathbf{B} - (\mathbf{A} \cdot \mathbf{B})\mathbf{C}$ (ALVES, 2023), obtemos:

$$\mathbf{L} = m[(\mathbf{r} \cdot \mathbf{r})\boldsymbol{\omega} - (\mathbf{r} \cdot \boldsymbol{\omega})\mathbf{r}], \quad (2.5)$$

como $\mathbf{r}$ e $\mathbf{v}$ são perpendiculares, e $\boldsymbol{\omega}$ é perpendicular a ambos, temos uma relação simplificada:

$$\mathbf{L} = mr^2\boldsymbol{\omega}. \quad (2.6)$$

Chegamos à conclusão de que $\mathbf{L}$ aponta na mesma direção de $\boldsymbol{\omega}$.

Agora vamos definir o torque. Também chamado de momento de uma força em algumas literaturas, o torque é definido em função do tempo e em relação à origem de um sistema de coordenadas da seguinte forma:

¹⁸ Sistema dextrogiro

$$\boldsymbol{\mathcal{T}} = \mathbf{r} \times \mathbf{F}, \quad (2.7)$$

onde $\mathbf{r}$ é o vetor posição da origem do sistema de coordenadas ao ponto onde $\mathbf{F}$ é aplicada. Podemos utilizar a segunda lei de Newton na expressão acima,

$$\boldsymbol{\mathcal{T}} = \mathbf{r} \times m \frac{d}{dt} \mathbf{p}. \quad (2.8)$$

Diferenciando a equação 2.3 em relação ao tempo:

$$\frac{d}{dt} \mathbf{L} = \frac{d}{dt} (\mathbf{r} \times \mathbf{p}), \quad (2.9)$$

aplicando a propriedade da derivada do produto¹⁹, temos:

$$\frac{d}{dt} \mathbf{L} = \frac{d}{dt} \mathbf{r} \times \mathbf{p} + \mathbf{r} \times \frac{d}{dt} \mathbf{p}, \quad (2.10)$$

ou seja,

$$\frac{d}{dt} \mathbf{L} = m \mathbf{v} \times \mathbf{v} + \mathbf{r} \times \mathbf{F} = \boldsymbol{\mathcal{T}}. \quad (2.11)$$

Concluimos, então, que o torque é igual à taxa de variação temporal do momento angular. Assim, desde que não haja torque em um sistema, o momento angular será conservado. Em outras palavras, a força que não produz torque não é capaz de modificar o momento angular de uma partícula. Exemplos de forças que são caracterizadas por essa propriedade são as forças centrais do tipo $\mathbf{F} = -F(\mathbf{r})\hat{\mathbf{e}}_r$, como são as forças gravitacional newtoniana e a eletrostática coulombiana.

2.3.2 Conservação da energia

2.3.2.1 Brevíssimo histórico

Ideias sobre quantidades conservadas no contexto do estudo do movimento e suas causas não são exclusivas de um período pós-newtoniano ou contemporâneo, como as literaturas costumam mostrar. Em seu trabalho intitulado *Quaestiones Super Octo Libros Physicorum Aristotelis*²⁰, Jean Buridan²¹ propôs a teoria do ímpeto (*virtus impressa*), segundo a qual objetos adquirem uma “qualidade permanente” que os mantém em movimento. Essa teoria constituiu o alicerce para desenvolvimentos posteriores, influenciando a dinâmica de Galileu Galilei²², o princípio da inércia de Isaac Newton, a concepção de

¹⁹ Sejam f e g funções reais diferenciáveis em um intervalo. A derivada do produto $f \cdot g$ é dada por: $(f \cdot g)' = f' \cdot g + f \cdot g'$

²⁰ Em tradução livre, *Questões sobre o oitavo livro da Física de Aristóteles*.

²¹ Jean Buridan (1300 - 1358), filósofo e religioso francês.

²² Galileo di Vincenzo Bonaiuti de Galilei (1564 - 1642), astrônomo, físico e engenheiro florentino.

quantidade de movimento de René Descartes e o conceito de *vis viva* de Leibniz. (LINO; NEVES, 2018).

No século XVII, temos Galileu e sua concepção de ímpeto. Segundo Bucussi

Galileu Galilei (1564-1642) em sua obra “Diálogos sobre Duas Novas Ciências” chegou a fazer considerações a respeito de regularidades observadas em alguns processos de transformação envolvendo a força gravitacional, mais especificamente sobre o funcionamento do “bate-estacas”; também afirmava conservar-se o que entendia ser o ímpeto presente nos corpos em movimento. (BUCUSSI, 2007, pg. 6)

Temos o episódio em que Huygens²³ aplicou essa ideia aos choques elásticos, mostrando que, em colisões elásticas, a soma das “quantidades de movimento” (e, sob certas condições, das *vis viva*) se conserva. Leibniz²⁴, em seu *Essay de Dynamique* de 1692, define a quantidade $m\mathbf{v}^2$ (massa vezes velocidade ao quadrado)²⁵ como a verdadeira medida de força, postula como um axioma natural: “*A mesma quantidade de força é conservada, ou melhor, o efeito todo é igual à causa total*”, num ciclo completo de queda e subida de uma partícula (PONCZEK, 2000). Posteriormente, no século XVIII, Lagrange²⁶ consolidou esta visão em seu *Mécanique Analytique* de 1788, onde estabeleceu o que hoje chamamos princípio da conservação da energia mecânica, ou seja, a quantidade energia cinética mais potencial permanece constante em sistemas conservativos.

Em virtude do sucesso da Mecânica de Newton, era inevitável, no estudo da filosofia natural, não estruturar tudo em termos de choques mecânicos entre partículas; não foi diferente no estudo do calor. No século XVIII, Lavoisier²⁷ e Laplace²⁸ construíram o calorímetro de gelo e consideraram que o calor poderia ser explicado por movimentos internos das partículas²⁹ (“força viva” das moléculas) proporcional a $m\mathbf{v}^2$. Eles deduziram, então, que, em processos de mistura térmica reversível, o calor total envolvido permanece constante (TAVARES; PRADO, 2010). No mesmo período, Rumford³⁰ demonstrou que perfurar canhões gerava calor indefinidamente, contradizendo a ideia de calor como substância; suas descobertas motivaram a busca pela conversão entre trabalho e calor.

Já no século XIX, no ano de 1842, Mayer³¹ publica seu trabalho intitulado *Bemerkungen über die Kräfte der unbelebten Nature*³², nos *Annalen der Chemie und Pharmacie*.

²³ Christiaan Huygens (1629 - 1695), matemático, físico, engenheiro, astrônomo e inventor neerlandês.

²⁴ Gottfried Wilhelm Leibniz (1646 - 1716), filósofo e matemático alemão.

²⁵ Os cartesianos, ou seja, os seguidores de Descartes definiam a mesma grandeza como $m\mathbf{v}$.

²⁶ Joseph Louis Lagrange (1736 - 1813), matemático italiano.

²⁷ Antoine-Laurent de Lavoisier (1743 - 1794), químico francês.

²⁸ Pierre-Simon Laplace (1749 - 1827), Marquês de Laplace, matemático, astrônomo e físico francês.

²⁹ O cenário na segunda metade do século XVIII residia na crença generalizada de que o calor era um fluido imponderável, formado por partículas que se repeliam entre si, mas eram atraídas pelas partículas de matéria. Lavoisier era um grande defensor do calórico.

³⁰ Benjamin Thompson (1753 - 1814), Conde de Rumford, físico e inventor anglo-americano.

³¹ Julius Robert von Mayer (1814 - 1878), físico e médico alemão.

³² Em tradução livre: *Observações sobre as forças da natureza inanimada*.

Neste trabalho, Mayer calculou, pela primeira vez, o que mais tarde seria conhecido como equivalente mecânico do calor. Ele concluiu que um peso caindo a uma distância de 365 metros e impactando o solo aumentaria sua temperatura em 1 grau Celsius³³. Segundo ele, calor e movimento eram manifestações diferentes da mesma quantidade, que agora chamamos de energia. Seu artigo, embora tenha sido publicado, não foi bem aceito na comunidade científica da época, inclusive tendo recebido inúmeras críticas. Joule³⁴ escreveu seu primeiro artigo sobre o valor mecânico do calor no ano seguinte, em 1843, completamente inconsciente do trabalho de Mayer (ASHWORTH, 2023).

Embora o reconhecimento da prioridade de Mayer pudesse ter permanecido obscuro, um episódio envolvendo disputas científicas no contexto britânico alterou esse cenário. O físico John Tyndall³⁵, figura proeminente da Royal Institution, demonstrava descontentamento com Joule, em especial com a atribuição a este da descoberta do princípio de conservação de energia (então identificado como a Primeira Lei da Termodinâmica) e com os defensores de Joule, como William Thomson³⁶. Em 1862, tendo tomado conhecimento da existência do trabalho de Mayer, Tyndall entrou em contato com Rudolf Clausius, solicitando informações a respeito. Clausius, inicialmente cético quanto à relevância da contribuição, revisitou o artigo de 1842 e concluiu que Mayer havia, de fato, abordado o núcleo do problema com grande acuidade, antecipando resultados centrais da conservação de energia. Impressionado, Clausius enviou a Tyndall uma cópia do referido trabalho, qualificando-o como uma contribuição brilhante. Naquele mesmo ano, Tyndall proferiu uma palestra na Royal Institution em defesa de Mayer como legítimo formulador da Primeira Lei da Termodinâmica, contrariando a visão predominante entre os físicos britânicos. Nessa ocasião, afirmou: *“Aqui estava um homem de gênio, trabalhando em silêncio, movido apenas pelo amor ao seu tema, alcançando resultados da mais alta importância antes mesmo daqueles cuja vida fora inteiramente dedicada à Filosofia Natural”*³⁷, em clara referência a Joule e Thomson (ASHWORTH, 2023).

Tomado pelo espírito científico da época, principalmente as contribuições de Galileu no que tange à experiência como guia para o conhecimento, Joule, em meados de 1840, realiza uma série de experimentos, principalmente para comprovar ou refutar as ideias de Rumford sobre a equivalência entre trabalho e calor. Ele apresentou suas ideias em 1845 à *British Association for the Advancement of Science* e, posteriormente, em 1850, é publicado na *Philosophical Transactions of the Royal Society* com o título *On the Mechanical Equivalent of Heat*. Esses experimentos se tornaram a base da Primeira Lei da

³³ Experimento dedutivo (*Gedankenexperiment*).

³⁴ James Prescott Joule FRS (1818 - 1889), físico britânico.

³⁵ John Tyndall (1820 - 1871), físico britânico.

³⁶ William Thomson (1824 - 1907), Barão Kelvin, físico-matemático e engenheiro britânico.

³⁷ Tradução livre de *“Here was a man of genius working in silence, animated solely by a love of his subject, and arriving at the most important results some time in advance of those whose lives were entirely devoted to Natural Philosophy.”*

Termodinâmica, o princípio da conservação de energia, e deram suporte a grande parte da tecnologia energética da vida moderna. (WILLIAMS, 2015). Se os experimentos de pensamento fossem valorizados na época, talvez a unidade de medida de energia no S.I.³⁸ fosse o *Mayer*.

Temos também, concomitantemente a essa época (século XIX), a ebulição de teorias, na tentativa de explicar a eletricidade, o magnetismo e a relação intrínseca entre os dois, por meio da Teoria Clássica de Campos. A partir da metade do século, o campo eletromagnético deixou de ser visto apenas como um efeito de correntes e cargas isoladas, passando a portar energia própria. As ideias que sustentam esse aspecto são encontradas principalmente nas obras de Faraday³⁹, Maxwell⁴⁰, Poynting⁴¹, Heaviside⁴² e Thomson (Lord Kelvin).

Em 1857, Faraday proferiu em uma palestra na Royal Institution, a qual depois se tornou um ensaio intitulado *On the Conservation of Force*, sobre o conceito de conservação da força - hoje chamamos de energia. Segundo ele,

Não há questão que esteja mais próxima da raiz de todo conhecimento físico do que aquela que indaga se a força pode ser destruída ou não. O progresso da ciência estrita dos tempos modernos tendeu cada vez mais a produzir a convicção de que “a força não pode ser criada nem destruída” e a tornar cada dia mais manifesto o valor do conhecimento dessa verdade na pesquisa experimental. Admitir, de fato, que a força pode ser destrutível ou pode desaparecer completamente, seria admitir que a matéria poderia ser incriada; pois conhecemos a matéria apenas por suas forças: e embora uma delas seja mais comumente referida, a saber, a gravidade, para provar sua presença, não é porque a gravidade tenha qualquer pretensão, ou qualquer isenção entre as formas de força, no que diz respeito ao princípio da conservação; mas simplesmente esse ser, até onde percebemos, inconversível em sua natureza e imutável em sua manifestação, oferece um teste imutável da matéria que reconhecemos por ele. (FARADAY, 1857, pg. 225)

Nesta perspectiva, Faraday acreditava que estava colaborando com a teoria newtoniana da gravitação para dar uma explicação satisfatória sobre a ação à distância, aspecto que incomodava os astrônomos e os mecanicistas cartesianos. Na visão de Faraday, o princípio da conservação da força poderia ajudar muito os filósofos experimentais na formulação de problemas a serem resolvidos (VINAIRE’S BLOG, 2017).

Diferentemente de Faraday, Maxwell possuía um repertório matemático mais abrangente devido à sua formação e condição social mais privilegiada. Conhecendo os trabalhos de Faraday, ele formalizou esses conceitos matematicamente de forma unificada. Em seu

³⁸ Sistema Internacional de Unidades.

³⁹ Michael Faraday (1791 - 1867), físico e químico britânico.

⁴⁰ James Clerk Maxwell (1831 - 1879), físico e matemático escocês.

⁴¹ John Henry Poynting (1852 - 1914), físico inglês.

⁴² Oliver Heaviside (1850 - 1925), matemático e engenheiro eletricista inglês.

mais famoso trabalho, *Teatrise on Electricity and Magnetism*, de 1873, propõe que o campo eletromagnético possui energia armazenada. Em suas palavras: “*a energia magnética do campo é energia cinética, [e] a energia elétrica [é] potencial.*” (MAXWELL, 1873). Utilizando a formulação Lagrangiana, calculou que, ao manter correntes em um circuito era necessário mais trabalho do que o dissipado em calor, e esse excesso de energia ficava acumulado no campo magnético, e sendo seu valor calculado proporcional⁴³ a $\mu H^2/8\pi$. De maneira análoga, em um condensador carregado, a energia elétrica permanecia armazenada como “estado de tensão” no meio isolante (THE PROJECT GUTENBERG, 2021).

A partir disso, esse modelo permitiu que a teoria eletromagnética pudesse perversa a existência de ondas eletromagnéticas. Em seus cálculos, ele chegou ao resultado de que as oscilações dos campos magnéticos e elétricos no éter se propagam à velocidade da luz, concluindo que a luz e os campos eletromagnéticos são o mesmo fenômeno físico, resultado obtido a partir da conservação da energia nos campos.

Entre os anos de 1880 e 1890, os chamados *maxwellianos*⁴⁴ desenvolveram a formulação vetorial das ideias de Maxwell (HUNT, 1994). Heaviside reescreveu as equações de Maxwell em forma vetorial em 1884, simplificando a análise. Poynting, também em 1884, derivou explicitamente o balanço de energia do campo eletromagnético — hoje chamado Teorema de Poynting — mostrando que a energia no campo varia conforme o trabalho feito sobre cargas e o fluxo de energia deixando um determinado volume. Em outras palavras, o fluxo de energia eletromagnética para fora de uma superfície fechada, deve ser igual à diminuição da energia eletromagnética armazenada no interior do volume, somada à uma taxa dissipativa de trabalho dos campos sobre as partículas (DARTORA, s.d.). Podemos concluir, a partir do Teorema de Poynting que os campos elétrico e magnético carregam energia pelo espaço, assim como momento linear e angular. Nas palavras de Lindley⁴⁵,

Notavelmente, Heaviside (e independentemente Poynting) provou que o campo eletromagnético carregava energia. Era geralmente assumido que, quando a eletricidade se movia, toda a energia era transportada por correntes elétricas. Essa certamente era a visão de Thomson. Mas com a notação vetorial em vez da velha bagunça de componentes cartesianos, tornou-se possível encontrar uma definição matemática de energia que poderia ser seguida com relativa facilidade por meio de manipulações algébricas complexas. Tornou-se evidente que a energia eletromagnética, como os campos, permeava o espaço e não se concentrava apenas em cargas e correntes. (LINDLEY, 2004, pg. 272)

Esse resultado demonstrou matematicamente a continuidade de energia, ou seja, a energia retirada de um circuito aparece exatamente fluindo no campo, unificando fluxos

⁴³ Onde μ é a permeabilidade magnética do meio, H é a intensidade de campo magnético e o termo 8π Fator constante que aparece na formulação no sistema CGS.

⁴⁴ Os seguidores de Maxwell.

⁴⁵ Tradução livre.

elétricos e mecânicos.

Um fato histórico relevante, é que Lord Kelvin, embora defensor do conceito de energia e sua conservação, resistiu às ideias abstratas de campo de Maxwell. Seu pensamento, moldado pela mecânica de Newton e de Descartes, preferia modelos mecânicos concretos - “rodas, molas e polias” - e rejeitava “um campo vetorial intangível estendendo-se e flexionando-se no espaço”. Ligando isso ao fato de que tais entidades “pretendiam transportar energia”, o que contrariava sua visão mecanicista (LINDLEY, 2004).

2.3.2.2 Modelagem matemática

Em Física⁴⁶, afirmamos que uma força é conservativa quando existe a possibilidade de ser representada como o gradiente de uma determinada função, ou seja, uma força $\mathbf{F}(\mathbf{r}, t)$ é dita conservativa, se e somente se, existir uma função $U(\mathbf{r}, t)$ tal que

$$\mathbf{F} = -\nabla U \equiv -\frac{\partial U}{\partial x}\hat{\mathbf{e}}_x - \frac{\partial U}{\partial y}\hat{\mathbf{e}}_y - \frac{\partial U}{\partial z}\hat{\mathbf{e}}_z, \quad (2.12)$$

onde o operador diferencial ∇ denota o gradiente em coordenadas cartesianas retangulares⁴⁷. Dizemos, assim, que U é o potencial da força. Existem algumas forças que possuem essa característica, como é caso da força gravitacional, da força eletrostática, da força elástica e da força constante. Quando temos uma força que depende explicitamente da velocidade da partícula, como a força de atrito em um fluido - modelada na forma $\mathbf{F} = -\beta\mathbf{v}$ onde β é uma constante e $\mathbf{v}$ é a velocidade da partícula - em geral, dizemos que ela não é conservativa (BATISTA, 2023).

Existe uma condição suficiente e também necessária para que $\mathbf{F}(\mathbf{r}, t)$ seja conservativa, isto é, seja o gradiente de uma função. Tal condição ocorre quando o seu rotacional é nulo, temos então, $\nabla \times \mathbf{F} = 0$. Vamos considerar uma partícula de massa m , sujeita a uma força conservativa com potencial associado U . Utilizando a mecânica newtoniana, temos:

$$m \frac{d^2}{dt^2} \mathbf{r} = -\nabla U. \quad (2.13)$$

Denotando E a energia total da partícula, ou seja, a soma da energia cinética com a potencial, ficamos com:

$$E = \frac{m}{2} \mathbf{v}^2 + U. \quad (2.14)$$

A taxa de variação da energia em relação ao tempo ao longo do percurso vai ser dado por:

⁴⁶ Teoria Clássica de Campos.

⁴⁷ Para outros sistemas de coordenadas, consultar Alves (2023) e Machado (2014).

$$\frac{d}{dt}E = m \left(\frac{d}{dt} \mathbf{v} \right) \cdot \mathbf{v} + \frac{\partial U}{\partial r} \frac{d}{dt} \mathbf{r} + \frac{\partial U}{\partial t}. \quad (2.15)$$

Neste caso, $\mathbf{r} = \mathbf{r}(t)$. Aplicando o princípio fundamental da dinâmica⁴⁸ na equação 2.15, temos:

$$\frac{d}{dt}E = \mathbf{F} \cdot \mathbf{v} + (-\mathbf{F}) \cdot \mathbf{v} + \frac{\partial U}{\partial t} = \frac{\partial U}{\partial t}. \quad (2.16)$$

Conclui-se, portanto, que, se a energia potencial não depender explicitamente do tempo t , a energia total será conservada. Em termos analíticos, podemos afirmar que a energia total será conservada se a Lagrangiana ($\mathcal{L}$)⁴⁹ não depender explicitamente do tempo t .

Um detalhe importante, e que precisa ser mencionado, é que a energia potencial não é uma propriedade intrínseca de um corpo isolado, mas sim uma medida da interação entre duas ou mais partes de um sistema físico. Seu valor depende exclusivamente da configuração relativa entre os entes, por exemplo, da distância entre massas na gravitação ou entre cargas no eletromagnetismo; e é definido de modo que apenas as variações dessa energia possuam significado físico (BATISTA, 2023).

Existem circunstâncias específicas em que é possível associar um potencial a forças de atrito. Como comentado acima, forças constantes se enquadram na categoria de forças conservativas. Logo, se temos um sistema com um bloco sobre uma superfície (sendo esta horizontal na direção $\hat{\mathbf{e}}_x$), e há atrito cinético entre eles, essa força normalmente é constante e se opõe ao movimento do bloco. A força, neste caso, será dada por $\mathbf{F} = -f_0 \hat{\mathbf{e}}_x$, e assim é possível associar um potencial. Vale destacar que, neste caso, a energia conservada aqui não é a do bloco e sim a do sistema bloco - superfície.

Em termos modernos, a conservação da energia é entendida como uma consequência direta do Teorema de Noether⁵⁰, que estabelece a correspondência entre simetrias contínuas e leis de conservação. Nesse contexto, a invariância das leis físicas sob translações temporais implica, de forma rigorosa, a existência de uma quantidade escalar constante ao longo da evolução do sistema: a energia total (ACEVEDO; PIMENTEL, 2023).

⁴⁸ Segunda lei de Newton.

⁴⁹ A Lagrangiana $\mathcal{L}$ de um sistema dinâmico é a função escalar $L = T - U$, onde T é a energia cinética total e U é a energia potencial total. A evolução do sistema é determinada pelo Princípio da Ação Estacionária, que, por meio das equações de Euler-Lagrange, $\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial q_i} - \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{q}_i} \right) = 0$, fornece as equações de movimento em termos das coordenadas generalizadas (q_i) e suas velocidades ($\dot{q}_i$).

⁵⁰ Amalie Emmy Noether (1882 - 1935), matemática alemã.

2.3.3 Campos magnéticos clássicos

2.3.3.1 Brevíssimo histórico

A história do magnetismo é rica em relatos, sejam eles orais, em forma de poemas, livros técnicos e até de cunho político. Segundo Tonidandel, Araújo e Boaventura (2018) registros históricos mostram que, no ano de 2637 a.C, durante uma perseguição às tropas do príncipe rebelde Tchi-yu, as forças do imperador chinês Huang-ti⁵¹ perderam-se na enevoadada planície de Tchu-lu. Para orientar seus soldados, Huang-ti mandou construir uma carruagem sobre a qual se erguia uma grande figura feminina, de braços abertos, capaz de girar livremente e apontar constantemente para o sul, independentemente da direção seguida pela carruagem. Suspeita-se, com fundamento, que essa figura estivesse associada a algum tipo de agulha magnética, semelhante ao princípio de uma bússola.

Na Grécia Antiga, no século VI a.C., Tales de Mileto⁵² é citado como um dos primeiros a conhecer os fenômenos elétricos associados ao âmbar e os fenômenos magnéticos da pedra-ímã, encontrada na região da Magnésia. Tales associava o movimento do ferro pela pedra-ímã à presença de uma “alma” que se encontrava na pedra. Outros filósofos, como Empédocles⁵³, tinham uma visão diferente: segundo ele, o efeito de atração devia-se ao fato de existir um princípio do amor. Outros pensadores antigos, como Alexandre de Afrodisias⁵⁴ e Galeno⁵⁵, sugeriram uma “força vital” ou que o ferro obtinha “nutrição” do ímã (PESSOA, 2010). Com maior relevância histórica, existem os relatos de tentativas de explicação do fenômeno do magnetismo feitos por Platão⁵⁶, em sua obra *Timeu*, e no poema *De Rerum Natura* de Lucrécio⁵⁷. Este último influenciado pela teoria atômica de Demócrito⁵⁸ (ROVELLI, 2017).

Um marco fundamental para a compreensão do magnetismo, e um precursor crucial para a ideia de campo, foi o trabalho de Petrus Peregrinus⁵⁹. Em sua carta *Epistola de magnete*, ele introduz claramente o conceito de polos magnéticos ao realizar um estudo experimental aprofundado do magnetismo. Os principais pontos de sua obra são: definição e localização dos polos, identificação dos Polos Norte e Sul, leis qualitativas de atração e repulsão, magnetização por toque e inversão de polaridade, e surgimento de novos polos após a quebra. Muitas obras enaltecem Galileu como o primeiro cientista experimental da história, entretanto o trabalho de Petrus mostra que ele já realizava o mesmo com rigor

⁵¹ Huang Di ou Huang-Ti (2717 a.C. - 2597 a.C.), o Imperador Amarelo.

⁵² Tales de Mileto (624 a.C. - 548 a.C.), filósofo pré-socrático, astrônomo, matemático, engenheiro e comerciante da Grécia Antiga.

⁵³ Empédocles de Agrigento (490 a.C. - 430 a.C.), filósofo, professor, legislador, médico, dramaturgo e poeta grego.

⁵⁴ Titus Aurelius Alexandre (198 d.C. - 209 d.C.), filósofo peripatético e autor grego.

⁵⁵ Cláudio Galeno ou Élio Galeno (129 d.C - 216 d.C.), médico e filósofo romano de origem grega.

⁵⁶ Aristocles de Atenas (428 a.C. - 348 a.C.), filósofo grego.

⁵⁷ Titus Lucretius Carus (99 a.C. - 55 a.C.), poeta e filósofo romano.

⁵⁸ Demócrito de Abdera (460 a.C. - 370 a.C.), filósofo pré-socrático grego.

⁵⁹ Pierre Pèlerin de Maricourt (1240 -), estudioso francês.

relevante dois séculos antes.

Como diz Martins:

Sob muitos aspectos, o trabalho de Petrus Peregrinus é espantosamente “moderno”, pela grande ênfase em experimentos e, também, por não adotar as muitas superstições antigas a respeito dos poderes magnéticos. Por outro lado, algumas de suas ideias eram muito diferentes das que aceitamos hoje em dia. Ele não acreditava que a orientação das bússolas fosse devida ao magnetismo da própria Terra, como nós aceitamos: defende que ela é produzida por um efeito celeste como havia exposto Messahalla. Um dos dispositivos que descreve apresentaria uma demonstração experimental da influência celeste sobre os ímãs, produzindo uma rotação espontânea de uma pedra magnética redonda, em torno do seu eixo, a cada 24 horas um fenômeno que não existe. Suas explicações sobre atração e repulsão também são “antiquadas”, baseando-se na analogia entre esses fenômenos e as emoções humanas. (MARTINS, 2017, pg. 6)

Sua obra influenciou muitos outros trabalhos entre os séculos XIII, XIV e XV, inclusive a grande obra de William Gilbert⁶⁰, *De Magnete*. Embora pouco citada, muito em razão do trabalho mais elaborado de Gilbert, o texto *Epistola de magnete* desempenhou papel fundamental na construção da teoria eletromagnética. Depois de Gilbert, a próxima grande revolução no entendimento do magnetismo aconteceu com Michael Faraday, em meados do século XVIII.

Em 1813, iniciou-se a imersão de Faraday em contextos científicos. Embora não tenha tido educação formal, tornou-se assistente de Humphry Davy⁶¹, onde passou a frequentar locais onde florescia as ideias que mais tarde o ajudariam a formular suas hipóteses sobre as linhas de força (DIAS; MARTINS, 2004). Um marco importante na história da Física e também para Faraday foi a descoberta de Ørsted⁶², em 1820, de que fios percorridos por corrente elétrica conseguem defletir bússolas que estão próximas. A partir desse momento, ele e seu mentor Davy passaram a trabalhar nesse assunto nos anos seguintes.

Uma concepção importante de Faraday, e que já foi discutida brevemente neste texto, é sua aversão à chamada ação à distância⁶³, concepção essa que refletiu em seu trabalho. Embora a mecânica de Newton tivesse estabelecido que tipo de perguntas a ciência deve responder, delegando outras a metafísica, Faraday, físico experimental, estava incomodado com a explicação teórica dos fenômenos envolvendo eletricidade e magnetismo. Ele inicialmente concebeu que as forças elétricas e magnéticas eram transmitidas através da polarização de partículas contíguas na matéria. Essa ideia, embora inicialmente

⁶⁰ William Gilbert (1544 - 1603), físico, médico e filósofo natural inglês.

⁶¹ Humphry Davy (1778 - 1829), químico britânico.

⁶² Hans Christian Ørsted (1777 - 1851), físico e químico dinamarquês.

⁶³ No que diz respeito à gravitação, Faraday considerava satisfatória a explicação da ação à distância, ele colocava a gravidade em outra categoria. O que ele não aceitava era a ação à distância para fenômenos elétricos e magnéticos.

problemática (pela ambiguidade da “contiguidade”), levou-o a uma solução mais radical, influenciada pelos átomos de Boscovich⁶⁴: a matéria não seria composta de átomos duros e impenetráveis, mas sim de “centros de força” cujos “poderes” poderiam irradiar-se por todo o universo, agindo onde a matéria não estivesse fisicamente presente. A partir daí, em meados de 1840, Faraday recorreu à ideia de um Deus criador, invocando seus poderes na tentativa de formular uma solução metafísica para o problema da ação à distância (DION, 2006). Essa foi a resposta que Faraday tinha para um problema metafísico.

Munido do trabalho de Faraday e de outros, Maxwell desenvolveu sua teoria eletromagnética durante alguns anos, no período em que escreveu as seguintes obras: *On Faradays Lines of Force* de 1856, *On Physical Lines of Force* de 1861, *A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field* de 1864 e, em sua principal obra, *A Treatise on Electricity & Magnetism* de 1873, e assim como Faraday, possuía uma descrença na ação à distância (DIAS; MORAIS, 2014).

Segundo ele,

Supomos que o fenômeno do magnetismo dependa da existência de tensões na direção das linhas de força, combinada com uma pressão hidrostática; ou, em outras palavras, uma pressão maior na região equatorial do que na direção axial. A próxima questão é: Que explicação mecânica podemos dar para essa desigualdade de pressão em um fluido ou meio em movimento? A explicação que mais prontamente ocorre à mente é que o excesso de pressão na direção equatorial surge da força centrífuga dos vórtices [...] no meio, tendo seus eixos na direção paralela à das linhas de força. (DIAS; MORAIS, 2014, pg. 3)

Assim, o magnetismo era explicado pela existência de tensões e vórtices no éter, com os eixos dos vórtices paralelos às linhas de força magnética. Com base nessa ideia dos vórtices, Maxwell conseguiu deduzir matematicamente a lei da indução de Faraday e todas as demais leis do eletromagnetismo. Temos agora uma teoria robusta, capaz de explicar muitos fenômenos e unificar alguns campos da física: a eletricidade, o magnetismo e a óptica. A noção de campo magnético, portanto, não surgiu de uma única descoberta, mas de um processo histórico complexo, que começou com a observação e descrição de fenômenos, passou pela experimentação sistemática e conceituação de polos e interações, e culminou na formulação de uma teoria que descreve a interação através do espaço, não por “ação à distância”, mas por um campo físico presente em cada ponto do espaço. Esse campo, embora invisível, possui existência real dentro da teoria de Maxwell.

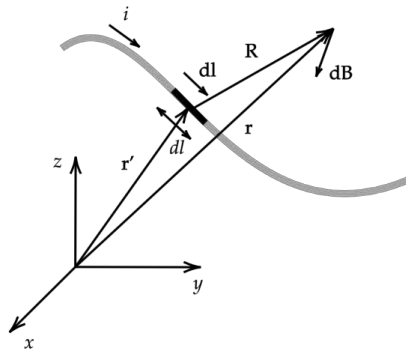
2.3.3.2 Modelagem matemática

Como foi discutido neste texto, a descoberta de Ørsted, em 1820, de que correntes elétricas em fios condutores geram ao seu redor campos magnéticos, foi um marco no

⁶⁴ Ruer Josip Bokovi SJ (1711 - 1787), padre jesuíta, físico, astrônomo, matemático, filósofo, diplomata e poeta dalmata.

desenvolvimento da teoria eletromagnética. Com uma investigação mais profunda, ele deduziu que as linhas de campo deveriam descrever circunferências em torno do fio, e que a orientação do campo respeita a regra da mão direita. No entanto foram os físicos franceses Biot⁶⁵ e Savart⁶⁶ que chegaram a uma expressão matemática capaz de calcular o campo magnético de várias configurações distintas a partir de diversas observações experimentais (MACHADO, 2020). Observe a Figura 2 abaixo.

Figura 2 – Um fio e a obtenção do campo magnético



Fonte: Machado (2020)

Matematicamente, eles chegaram à seguinte proporcionalidade para o campo magnético em um elemento dl retilíneo de um fio:

$$dB \propto \frac{idl}{R^2} \hat{dl} \times \hat{R} \quad (2.17)$$

A primeira constatação que fazemos é que o campo magnético depende da corrente elétrica que passa no fio, sendo diretamente proporcional a ela. Percebemos que o campo magnético, assim como o campo eletrostático, tem dependência inversa com o quadrado da distância entre o elemento dl e o ponto onde se quer calcular o campo. Por fim, temos que a direção de $\mathbf{B}$ é dada pelo produto vetorial entre $\hat{dl}$ e $\hat{R}$.

Como $dl\hat{dl} = d\mathbf{l}$, temos

$$dB \propto \frac{i}{R^2} d\mathbf{l} \times \hat{R}. \quad (2.18)$$

Se quisermos transformar a relação em 2.18 numa igualdade, adicionamos uma constante de proporcionalidade; no SI, ela tem a forma:

$$d\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{i}{R^2} d\mathbf{l} \times \hat{R}, \quad (2.19)$$

⁶⁵ Jean-Baptiste Biot (1774 - 1862), físico, astrônomo e matemático francês.

⁶⁶ Félix Savart (1791 - 1841), físico, matemático e médico francês.

sendo μ_0 a permeabilidade magnética do vácuo, e com valor no SI de $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ N/A}^2$. Podemos generalizar a expressão 2.19 para um sistema de referências genérico da seguinte maneira:

$$\mathbf{R} = \mathbf{r} - \mathbf{r}' \quad R = |\mathbf{r} - \mathbf{r}'| \quad \hat{\mathbf{R}} = \frac{\mathbf{R}}{R} = \frac{\mathbf{r} - \mathbf{r}'}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|}, \quad (2.20)$$

a expressão final se torna:

$$d\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{i d\mathbf{l} \times (\mathbf{r} - \mathbf{r}')}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|^3}. \quad (2.21)$$

Com ela, é possível calcular o campo magnético gerado por diversas configurações de correntes elétricas (fios retilíneos, espira circular, solenoide, bobinas, etc.)

É possível obter a lei de Biot-Savart através do que chamamos de potencial vetor⁶⁷. No contexto da magnetostática, as equações que regem esse regime são descritas abaixo.

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (2.22)$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} \quad (2.23)$$

A equação 2.22 é conhecida como Lei de Gauss para a Magnetostática e afirma que o campo magnético é solenoidal, ou seja, não possui “fontes” ou “sumidouros”. Em outras palavras, o campo magnético não diverge de um ponto. A equação 2.23 é a lei de Ampère⁶⁸. Nela, temos o termo $\mathbf{J}$, que é o vetor densidade de corrente elétrica. Em resumo, a lei de Ampère estabelece que, onde houver uma corrente elétrica, haverá um campo magnético circulando ao redor dela. Um teorema fundamental do cálculo vetorial afirma que qualquer campo vetorial com divergência nula pode ser escrito como o rotacional de outro campo vetorial. Como $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$, podemos definir um potencial vetor magnético $\mathbf{A}$, tal que:

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}. \quad (2.24)$$

Agora, substituímos esta definição na equação 2.23:

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{A}) = \mu_0 \mathbf{J}. \quad (2.25)$$

Utilizando a identidade vetorial⁶⁹ $\nabla \times (\nabla \times \mathbf{A}) = \nabla(\nabla \cdot \mathbf{A}) - \nabla^2 \mathbf{A}$, ficamos com:

$$\nabla(\nabla \cdot \mathbf{A}) - \nabla^2 \mathbf{A} = \mu_0 \mathbf{J}. \quad (2.26)$$

⁶⁷ Para mais detalhes, consultar Neto (2015).

⁶⁸ André-Marie Ampère (1775 - 1836), físico, filósofo, cientista e matemático francês

⁶⁹ Segundo Alves (2023).

Segundo Neto (2015), podemos fazer uma escolha inteligente. Existe um conceito denominado *gauge de Coulomb* (calibre de Coulomb), onde temos a liberdade de escolher $\mathbf{A}$ de modo que sua divergência seja da forma mais conveniente para simplificar o problema. Neste caso, teremos $\nabla \cdot \mathbf{A} = 0$. Nossa expressão 2.26 ficará:

$$\nabla^2 \mathbf{A} = -\mu_0 \mathbf{J}. \quad (2.27)$$

Esta é a Equação de Poisson⁷⁰ para o potencial vetor $\mathbf{A}$, é uma equação diferencial parcial bem conhecida. Se analisarmos componente a componente ($\nabla^2 \mathbf{A}_x = -\mu_0 \mathbf{J}_x$, etc.), vemos que ela é matematicamente idêntica à equação de Poisson da eletrostática para o potencial elétrico V ($\nabla^2 V = \rho/\varepsilon_0$). A solução geral para a equação de Poisson, assumindo que as fontes (correntes $\mathbf{J}$) estão localizadas em uma região finita do espaço e que o potencial vai a zero no infinito, é bem estabelecida. Por analogia direta com a solução da eletrostática:

$$V(\mathbf{r}) = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \int \frac{\rho(\mathbf{r}')}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|} dV', \quad (2.28)$$

a solução para cada componente de $\mathbf{A}$ é:

$$\mathbf{A}(\mathbf{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{\mathbf{J}(\mathbf{r}')}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|} dV'. \quad (2.29)$$

Agora que temos a solução para $\mathbf{A}$, podemos encontrar o campo magnético $\mathbf{B}$ calculando seu rotacional $\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$:

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}) = \nabla \times \left[\frac{\mu_0}{4\pi} \int_V \frac{\mathbf{J}(\mathbf{r}')}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|} dV' \right], \quad (2.30)$$

Podemos mover o operador rotacional ∇ para dentro da integral, pois a integral é sobre as coordenadas da fonte ($\mathbf{r}'$), enquanto o rotacional opera nas coordenadas do ponto de observação ($\mathbf{r}$):

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_V \nabla \times \left[\frac{\mathbf{J}(\mathbf{r}')}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|} \right] dV'. \quad (2.31)$$

Usamos a identidade do cálculo vetorial para o rotacional de um produto (um escalar vezes um vetor): $\nabla \times (f\mathbf{R}) = f(\nabla \times \mathbf{R}) + (\nabla f) \times \mathbf{R}$. No nosso caso, f é $1/|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|$ e $\mathbf{R}$ é $\mathbf{J}(\mathbf{r}')$. O primeiro termo da identidade será:

$$\frac{1}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|} [\nabla \times \mathbf{J}(\mathbf{r}')] = 0, \quad (2.32)$$

⁷⁰ Siméon Denis Poisson (1781 - 1840), matemático e físico francês.

Como $\mathbf{J}(\mathbf{r}')$ depende apenas das coordenadas da fonte $\mathbf{r}'$ e não das coordenadas do ponto $\mathbf{r}$, seu rotacional em relação a $\mathbf{r}$ é zero. O segundo termo é:

$$\nabla \left(\frac{1}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|} \right) \times \mathbf{J}(\mathbf{r}'), \quad (2.33)$$

logo temos:

$$\nabla \left(\frac{1}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|} \right) = -\frac{\mathbf{r} - \mathbf{r}'}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|^3}. \quad (2.34)$$

Substituindo esse resultado de volta na integral 2.31:

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \left[-\frac{\mathbf{r} - \mathbf{r}'}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|^3} \right] \times \mathbf{J}(\mathbf{r}') dV', \quad (2.35)$$

usando a propriedade do produto vetorial $\mathbf{R} \times \mathbf{G} = -(\mathbf{G} \times \mathbf{R})$, podemos inverter a ordem para eliminar o sinal negativo:

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{[\mathbf{J}(\mathbf{r}') \times (\mathbf{r} - \mathbf{r}')] }{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|^3} dV'. \quad (2.36)$$

Para o caso de um fio retilíneo, podemos substituir $\mathbf{J}(\mathbf{r}')dV'$ por $i\mathbf{dl}$, e obtemos a lei de Biot-Savart na forma mais conhecida:

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{i\mathbf{dl} \times (\mathbf{r} - \mathbf{r}')}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|^3}. \quad (2.37)$$

Vamos agora dar mais atenção à Lei de Gauss⁷¹ da Magnetostática e às suas consequências imediatas.

Ao utilizar o conceito de linhas de campo no estudo dos ímãs, percebemos que as linhas de campo magnético se fecham em si mesmas. Sendo assim, se calcularmos o divergente do campo magnético, é de se esperar que o resultado seja nulo. Ao pegar uma superfície gaussiana⁷² e posicioná-las próxima às linhas de campo magnético de um ímã, constataremos que o número de linhas que atravessam a superfície para fora é o mesmo número de linhas que atravessam para dentro, tornando o fluxo magnético através da superfície nulo. Matematicamente, podemos expressar essa conclusão da seguinte maneira:

$$\oint_S \mathbf{B} \cdot \hat{\mathbf{n}} dA = 0 \quad \text{ou} \quad \nabla \cdot \mathbf{B} = 0. \quad (2.38)$$

⁷¹ Carl Friedrich Gauss (1777 - 1855), matemático, astrônomo e físico alemão.

⁷² Superfície fechada imaginária no espaço tridimensional, utilizada para calcular o fluxo de um campo vetorial através dela.

Podemos obter a relação 2.38 tomando o divergente da equação 2.36, resultando em:

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = \nabla \cdot \left[\frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{[\mathbf{J}(\mathbf{r}') \times (\mathbf{r} - \mathbf{r}')]}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|^3} dV' \right] \quad (2.39)$$

ou, equivalentemente:

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \nabla \cdot \left[\frac{\mathbf{J}(\mathbf{r}') \times (\mathbf{r} - \mathbf{r}')}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|^3} \right] dV', \quad (2.40)$$

utilizando a relação vetorial $\nabla \cdot (\mathbf{R} \times \mathbf{G}) = (\nabla \times \mathbf{R}) \cdot \mathbf{G} - \mathbf{R} \cdot (\nabla \times \mathbf{G})$, obtemos:

$$\nabla \cdot \left[\mathbf{J}(\mathbf{r}') \times \frac{\mathbf{r} - \mathbf{r}'}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|^3} \right] = [\nabla \times \mathbf{J}(\mathbf{r}')] \cdot \frac{\mathbf{r} - \mathbf{r}'}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|^3} - \mathbf{J}(\mathbf{r}') \cdot \left[\nabla \times \frac{\mathbf{r} - \mathbf{r}'}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|^3} \right]. \quad (2.41)$$

Sabendo que $\mathbf{J}(\mathbf{r}')$ não é função de $\mathbf{r}$ e que o operador ∇ age apenas nas coordenadas de $\mathbf{r}$, o produto vetorial $\nabla \times \mathbf{J}(\mathbf{r}')$ será nulo, como já foi mencionado na relação 2.32. Assim, ficaremos com:

$$\nabla \cdot \left[\mathbf{J}(\mathbf{r}') \times \frac{\mathbf{r} - \mathbf{r}'}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|^3} \right] = \mathbf{J}(\mathbf{r}') \cdot \left\{ \nabla \times \nabla \left[\frac{1}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|} \right] \right\}, \quad (2.42)$$

mas a relação $\nabla \times \nabla \psi = 0$, para qualquer função escalar ψ . Ou seja, temos:

$$\nabla \cdot \left[\mathbf{J}(\mathbf{r}') \times \frac{\mathbf{r} - \mathbf{r}'}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|^3} \right] = 0, \quad (2.43)$$

isso faz com que se conclua:

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int 0 dV', \quad (2.44)$$

isto é:

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0. \quad (2.45)$$

Fisicamente, podemos interpretar o resultado acima como a não existência, na natureza, de monopolos magnéticos; em outras palavras, não existe o análogo de cargas elétricas para o magnetismo. Esse tema é profundo no que diz respeito aos fundamentos das leis físicas, de modo que achamos necessário uma discussão mais abrangente.

Em 1894, Pierre Curie⁷³, renomado por suas contribuições pioneiras em cristalografia, magnetismo e radioatividade, publicou um artigo intitulado *Sur la possibilité*

⁷³ Pierre Curie (1859 - 1906), físico francês.

*d’existence de la conductibilité magnétique et du magnétisme libre.*⁷⁴ Neste trabalho, Curie buscava levantar a hipótese de simetria nas leis do Eletromagnetismo: se existem cargas elétricas isoladas, devem existir “cargas magnéticas” isoladas, isto é, monopolos magnéticos que se comportariam de forma análoga às cargas elétricas. Embora sua conjectura fosse puramente teórica e baseada em considerações de simetria, ela plantou a semente para futuras investigações sobre o tema (JESUS; SCHMIDT; PORTUGAL, 2023).

A ideia de Curie ganhou uma base sólida e teórica com o trabalho de Paul Dirac⁷⁵, em 1931. Em seu artigo seminal *Quantised Singularities in the Electromagnetic Field*⁷⁶, Dirac abordou a questão da assimetria nas equações de Maxwell sob uma perspectiva quântica. Ele demonstrou que a existência de um monopolo magnético é perfeitamente consistente com os princípios da mecânica quântica, desde que, uma condição fundamental seja satisfeita: a quantização da carga elétrica (DIRAC, 1931). Essa condição de quantização estabelece que, se um único monopolo magnético existir em qualquer lugar do universo, todas as cargas elétricas deverão ser múltiplos inteiros de uma carga elétrica fundamental. Em outras palavras, a existência de um monopolo magnético explicaria por que a carga elétrica não pode assumir qualquer valor, mas sim valores discretos; um resultado de enorme impacto, já que a quantização da carga elétrica é um fato experimentalmente verificado.

Embora aparada na base teórica sólida de Dirac, a existência de monopolos magnéticos continua sendo um desafio para a física experimental desde os anos de 1930. Até o momento, nenhuma evidência conclusiva da existência de monopolos magnéticos elementares foi encontrada. Dentre os experimentos mais relevantes realizados nesse período, podemos citar o conduzido por uma equipe liderada por Price⁷⁷, da Universidade da Califórnia em Berkeley, que, em 1975, utilizou um arranjo de detectores - incluindo um detector Cherenkov e emulsões nucleares - a bordo de um balão de alta altitude (PRICE et al., 1975). O experimento levou os envolvidos a acreditarem na detecção de um monopolo magnético de carga magnética $g = 137e$ (sendo e a carga elétrica elementar) e massa $m > 200m_p$, (sendo m_p a massa de repouso do próton) (JESUS; SCHMIDT; PORTUGAL, 2023). O problema foi que a falta de confirmação por outros experimentos e a ausência de eventos semelhantes em buscas subsequentes diminuíram a credibilidade dessa observação inicial.

Existiu também o experimento realizado por Cabrera⁷⁸ em 1982, no qual ele utilizou um detector supercondutor, projetado para detectar a variação quantizada do fluxo

⁷⁴ Sobre a possibilidade de existência da condutividade magnética e do magnetismo livre, em tradução livre.

⁷⁵ Paul Adrien Maurice Dirac (1902 - 1984), físico teórico inglês.

⁷⁶ Singularidades Quantizadas no Campo Eletromagnético, em tradução livre

⁷⁷ Paul Buford Price (1932 - 2021), professor de pós-graduação na Universidade da Califórnia, Berkeley e membro da Academia Nacional de Ciências dos Estados Unidos da América.

⁷⁸ Blas Cabrera Navarro (1946 - atual, professor de física estadunidense.)

magnético que seria induzida pela passagem de um monopolo magnético. Em 14 de fevereiro daquele ano, o detector registrou um evento perfeitamente consistente com a passagem de um monopolo magnético com a carga prevista por Dirac (CABRERA, 1982). No entanto, assim como no caso de Price, o evento de Cabrera foi único e isolado, perdendo gradualmente sua credibilidade ao longo do tempo.

A partir desse ponto, outras abordagens para a detecção de monopolos magnéticos surgiram, como por exemplo, a ideia de utilizar aceleradores de partículas de alta energia, como o LHC⁷⁹, no CERN. A teoria prevê que, se os monopolos magnéticos forem suficientemente massivos, eles poderiam ser produzidos em colisões de partículas. Vários experimentos no LHC, como o MoEDAL⁸⁰, são dedicados especificamente à busca por monopolos magnéticos e outras partículas exóticas. A questão permanece em aberto na física e constitui um tópico na fronteira do conhecimento atual, com robusta relevância também para as teorias de grande unificação.

Retornando à discussão da teoria eletromagnética clássica, a Lei de Gauss para a magnetostática não nos possibilita, de forma clara calcular o campo magnético gerado por fios condutores em diferentes configurações. Para isso, utilizaremos outra importante lei, a Lei de Ampère, já mencionada neste texto.

A Lei de Ampère, formulada por André-Marie Ampère entre 1820 e 1827, representa um dos pilares fundamentais do eletromagnetismo clássico; ela estabelece uma relação quantitativa precisa entre as correntes elétricas e os campos magnéticos que elas produzem, fornecendo uma ferramenta poderosa para o cálculo de campos magnéticos em configurações com alta simetria. Essa lei surgiu em um contexto especial do século XIX, no qual novos experimentos e teorias sobre a eletricidade e o magnetismo estavam emergindo, como o experimento fundamental de 1820, realizado por Ørsted, já mencionado neste texto. Segundo Dias e Dias (2015), James Clerk Maxwell afirma o seguinte a respeito da Lei de Ampère:

O todo, teoria e experimento, parece ter saltado, inteiramente pronto e com o instrumental completo, do cérebro do “Newton da Eletricidade”. Ela é perfeita em forma e inatingível em acuracidade; e é sumariada em uma fórmula da qual todos os fenômenos podem ser deduzidos e que deve sempre permanecer a fórmula cardinal da eletrodinâmica.

Para a obtenção da Lei de Ampère matematicamente, vamos considerar a Figura 3.

Podemos ampliar uma parte da figura para compreender melhor o que está acontecendo com as grandezas relevantes:

⁷⁹ Large Hadron Collider.

⁸⁰ Monopole and Exotics Detector at the LHC.

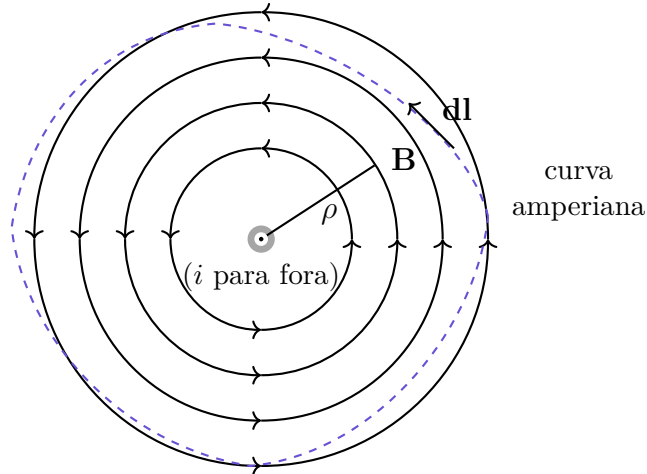


Figura 3 – Um curva qualquer envolvendo um fio condutor.

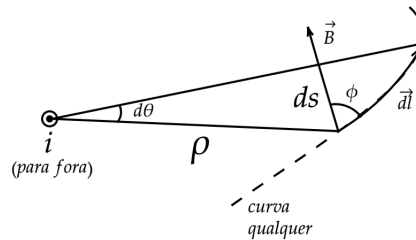


Figura 4 – Um curva qualquer envolvendo um fio condutor.

Podemos extrair a seguinte informação da Figura 4:

$$\mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = B dl \cos \phi \quad \text{e} \quad ds = dl \cos \phi \quad (2.46)$$

e pela definição de ângulo em radiano:

$$ds = \rho d\theta, \quad (2.47)$$

chegamos à relação:

$$\mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = B ds = B \rho d\theta. \quad (2.48)$$

Realizando a integral ao longo de um caminho fechado, obtemos:

$$\oint_C \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \oint_C B \rho d\theta, \quad (2.49)$$

aplicando os limites de integração adequados e utilizando o resultado da Lei de Biot-Savart, segundo o qual o campo magnético ao redor de um fio retilíneo infinito percorrido

por corrente elétrica dado $B = \mu_0 i / 2\pi\rho$, temos que:

$$\int_0^{2\pi} \frac{\mu_0 i}{2\pi\rho} \rho d\theta = \frac{\mu_0 i}{2\pi} \int_0^{2\pi} d\theta = \frac{\mu_0 i}{2\pi} [\theta]_0^{2\pi}, \quad (2.50)$$

obtendo, finalmente⁸¹:

$$\oint_C \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 i. \quad (2.51)$$

A equação 2.51 é conhecida como Lei de Ampère na forma integral, e permite relacionar o campo magnético produzido pelo fio com a corrente i que o percorre. Podemos afirmar que essa lei é análoga à Lei de Gauss para a eletrostática; em outras palavras, dada uma certa simetria, é possível calcular campos magnéticos para diversas configurações.

2.3.4 Motor *brushless*

2.3.4.1 Brevíssimo histórico

Um motor *brushless*, também conhecido como motor BLDC (*Brushless Direct Current*), é um tipo de motor elétrico de corrente contínua que não possui escovas⁸² em sua composição. Nos motores convencionais, a comutação das bobinas é realizada pelas escovas de carvão; já nos motores BLDC, a comutação síncrona ocorre por meio de um controlador eletrônico. A ausência das escovas promove uma série de benefícios, como alta durabilidade, baixo nível de ruídos, maior potência e eficiência energética, além de um *design* mais compacto e de menor massa (XIE, 2023).

Historicamente, uma série de acontecimentos tornou possível o desenvolvimento dessa tecnologia. Um deles ocorreu durante a Segunda Guerra Mundial, quando, em aeronaves norte-americanas observou-se um desgaste rápido das escovas ao operarem em grandes altitudes — cerca de 9.144 metros. Com os iminentes programas de exploração espacial sendo desenvolvidos, esse não era um bom indício de que a utilização de motores com escovas seria viável para essa tarefa, já que o vácuo tornava a vida útil desses motores extremamente curta, limitada a minutos. Na década de 1950, o surgimento de transistores e os avanços significativos no desenvolvimento de tecnologias que utilizavam materiais magnéticos permitiram teoricamente a comutação eletrônica das correntes dos motores (Midwest Research Institute, 1975).

Todos esses avanços culminaram no trabalho de Wilson e Trickey, de 1962, um artigo intitulado “*D-C machine with solid-state commutation*”, no qual introduziram o conceito de comutação de estado sólido, utilizando a eletrônica para realizar a função que

⁸¹ A demonstração foi baseada em (MACHADO, 2020).

⁸² O termo “*brushless*” pode ser traduzido livremente para o português como “sem escova”.

antes era executada pelo comutador mecânico, resolvendo, assim, problemas de desgaste, atrito e manutenção (NAGEL, 2023). É interessante notar que a adoção dessa nova tecnologia só se consolidou, de fato, na década de 1980, quando as melhorias contínuas nos ímãs permanentes e na eletrônica de potência tornaram os sistemas *brushless* competitivos em custo e desempenho em relação às tecnologias existentes. Hoje a aplicação desses motores abrange uma ampla gama de áreas da engenharia elétrica, incluindo veículos elétricos, ferramentas domésticas, *drones* e até componentes do Telescópio Espacial James Webb (TRAN, 2016).

A modelagem matemática do funcionamento de motores *brushless* insere-se em um domínio conceitualmente complexo, que envolve fundamentos avançados tanto da engenharia elétrica quanto da engenharia mecânica. A formulação teórica que descreve o comportamento dinâmico e eletromagnético desses motores requer a análise simultânea de fenômenos acoplados como a conversão eletromecânica de energia, o controle de torque e velocidade, e as interações entre campos magnéticos e correntes induzidas, já mencionados anteriormente. Dada essa amplitude de aspectos físicos e matemáticos, opta-se, no presente trabalho, por não desenvolver detalhadamente tais modelagens, mas reconhecer sua relevância e indicar fontes de referência na literatura especializada. Assim, recomenda-se a leitura de Hanselman (2003) e Miller (1989), cujas obras apresentam uma abordagem abrangente sobre os princípios teóricos e práticos que fundamentam a modelagem e o controle de motores *brushless*.

Cabe ressaltar que as simplificações adotadas neste trabalho preservam os princípios eletromagnéticos centrais que constituem o objetivo pedagógico da sequência didática: o campo magnético de ímãs permanentes, o campo produzido por correntes elétricas em fios condutores, o torque sobre espiras percorridas por corrente e a interação entre eletricidade e magnetismo. Os aspectos de eletrônica de potência e de controle de comutação, embora essenciais para a engenharia do motor, situam-se fora do escopo do ensino de Física no nível médio e não comprometem a compreensão dos fenômenos eletromagnéticos aqui investigados.

3 Metodologia

Neste capítulo, serão apresentadas as etapas de realização da pesquisa. Serão expostos dados referentes à caracterização do local de aplicação, dos estudantes participantes da pesquisa e todos os processos envolvidos na aplicação do referido produto educacional. Tendo em vista a relevância deste tópico para qualquer pesquisa, seja ela de caráter científico ou não, introduziremos o conceito de metodologia, enquadrando-o na perspectiva do produto educacional. A socióloga e pesquisadora brasileira Maria Cecília de Souza Minayo define metodologia da seguinte forma:

(...) a) como a discussão epistemológica sobre o “caminho do pensamento” que o tema ou o objeto de investigação requer; b) como a apresentação adequada e justificada dos métodos, técnicas e dos instrumentos operativos que devem ser utilizados para as buscas relativas às indagações da investigação; c) e como a “criatividade do pesquisador”, ou seja, a sua marca pessoal e específica na forma de articular teoria, métodos, achados experimentais, observacionais ou de qualquer outro tipo específico de resposta às indagações específicas. (MINAYO, 2014, pg. 44)

A análise presente neste trabalho configura-se, prioritariamente, como qualitativa, embora, em alguns momentos, sejam utilizados dados numéricos para interpretação mais precisa de determinadas partes das atividades propostas. Segundo Bauer e Gaskell (2017), a pesquisa qualitativa é considerada *soft*, pois não lida de forma explícita com dados numéricos, enquanto a quantitativa seria do tipo *hard*, na qual a análise numérica está presente. Abaixo apresenta-se uma tabela exemplificando as diferenças entre as duas abordagens.

Tabela 2 – Diferenças entre pesquisa quantitativa e qualitativa

	Estratégias	
	Quantitativas	Qualitativas
Dados	Números	Textos
Análise	Estatística	Interpretação
Protótipo	Pesquisas de opinião	Entrevista em profundidade
Qualidade	<i>Hard</i>	<i>Soft</i>

Fonte: Bauer e Gaskell (2017)

Ao utilizar a abordagem qualitativa, é necessário estar atento às possíveis patologias existentes nesse método as quais podem comprometer a análise fidedigna dos dados obtidos. Neste trabalho, será empregada uma modalidade de pesquisa qualitativa conhecida como Análise de Conteúdo, tendo como uma de suas principais expoentes intelectuais

a pesquisadora e professora de Psicologia Laurence Bardin. como uma das principais expoentes intelectuais. Minayo define essa modalidade de pesquisa qualitativa da seguinte forma:

(...) análise de conteúdo diz respeito a técnicas de pesquisa que permitem tornar replicáveis e válidas inferências sobre dados de um determinado contexto, por meio de procedimentos especializados e científicos. (MINAYO, 2014, pg. 303)

Como a nossa perspectiva teórica recai sobre o caráter realístico via Bunge da teoria eletromagnética clássica, esse tipo de método contribuirá para a análise dos dados obtidos. Nesse sentido, a Análise de Conteúdo mostra-se adequada, pois permite identificar, nas produções escritas dos estudantes, os elementos conceituais mobilizados ao longo do processo de aprendizagem.

O embasamento das ideias psico-pedagógicas é feito a partir da teoria de aprendizagem por descoberta de Jerome Bruner. Na perspectiva dele, o processo de ensino e aprendizagem constitui-se como uma abordagem de caráter indutivo, na qual o estudante parte de situações particulares para alcançar noções mais abrangentes. O estudante será convidado a desenvolver o raciocínio indutivo, ou seja, estimulado a mobilizar sua intuição, imaginação e criatividade, elementos essenciais para a construção autônoma do princípio almejado. Essa concepção fornecerá ferramentas adequadas para que o estudante consiga atingir o objetivo de construir uma explicação sobre o funcionamento do motor *brushless*.

Tomaremos como corpus três atividades escritas desenvolvidas ao longo da sequência didática, as quais evidenciam como os estudantes construíram e reformularam suas explicações sobre o funcionamento do motor brushless. A partir desse material, será possível categorizar as respostas, observar a evolução do entendimento conceitual e verificar em que medida os alunos conseguiram articular os princípios da teoria eletromagnética clássica com a interpretação realista defendida neste trabalho.

3.1 Caracterização do público-alvo

O produto educacional intitulado “*Abordagem inicial ao Eletromagnetismo: conceitos fundamentais com motor brushless*” foi aplicado no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba (IFPB), *campus* Guarabira, em uma turma da terceira série do Ensino Médio Técnico Integrado do curso de Edificações. A turma possui um total de trinta e dois estudantes regularmente matriculados, sendo 68,75% do sexo feminino e 31,25% do sexo masculino. Todos eles foram submetidos à aplicação do produto.

É importante destacar que a escolha da turma deveu-se ao fato de ser uma turma que cursa a disciplina de Física 3, a qual, no contexto escolar, tem contato com os conceitos de eletricidade e magnetismo, protagonistas da pesquisa. Outra motivação clara reside

no fato de que a turma, teoricamente, já estudou os conceitos de torque e conservação da energia mecânica em anos anteriores, conceitos estes de extrema importância para a consolidação da aprendizagem proposta neste trabalho.

Figura 5 – IFPB - *Campus* Guarabira



Fonte: Informação (2019)

3.2 Estratégia de pesquisa

Inicialmente definiu-se o problema a ser abordado no que concerne à transposição didática. A escolha do conteúdo de Eletromagnetismo Clássico baseou-se em alguns motivos. O primeiro é a relevância histórica no desenvolvimento das sociedades modernas, impactando em diversos setores, como economia, política, saúde, comunicação e cultura. O segundo motivo reside no fato de que a teoria eletromagnética clássica, como formulada por Maxwell e posteriores, possui um caráter matemático demasiadamente abstrato para estudantes de Ensino Médio, carecendo de abordagens didáticas que contribuam para seu ensino.

O terceiro motivo refere-se ao contexto do Exame Nacional do Ensino Médio (ENEM). Como porta de ingresso ao Ensino Superior, o ENEM contribui para reduzir desigualdades e fornece ao estudante do Ensino Médio uma oportunidade de melhoria de vida econômica e social. O conteúdo abordado nesta pesquisa está presente na prova de Física do ENEM tem se mantido de maneira relevante nos últimos anos. A seguir, apresentamos uma tabela com os assuntos mais recorrentes no ENEM entre 2016 e 2024, segundo dados levantados pelo site *Aprova Total*; o assunto de Eletrodinâmica é o predominante, abrangendo o conteúdo físico desta pesquisa.

Tabela 3 – Assuntos de Física mais cobrados no ENEM

Assunto	Percentual
Eletrodinâmica	20,0%
Termologia	16,4%
Ondulatória	13,3%
Cinemática	10,9%
Óptica	9,1%

Fonte: Aprova Total (2025)

Um outro motivo é o caráter experimental da Física e como a teoria eletromagnética clássica se beneficiou disso, principalmente nos séculos XVIII¹ e XIX. Os experimentos de Ørsted, Faraday e Ampère foram determinantes para que Maxwell e outros conseguissem formular a teoria. Dessa forma, utilizar um motor *brushless* como ferramenta para investigação de princípios físicos não se limita ao ensino do conteúdo, mas configura-se como uma imersão em como a teoria foi formulada e em como se constrói conhecimento em ciência natural.

3.3 Estrutura didática

A sequência didática consiste em três encontros de 1h30min cada, totalizando seis aulas – cada uma com cinquenta minutos – distribuídas ao longo de três semanas, considerando a particularidade de a disciplina de Física 3 possuir apenas um encontro semanal nesta turma. A estrutura está esquematizada abaixo:

- Primeiro encontro: motor *brushless*
- Segundo encontro: Fenômenos eletromagnéticos
- Terceiro encontro: Consolidação de aprendizagem

A tabela abaixo exhibe a ordem sequencial de aplicação do produto.

¹ Para uma discussão histórica, ver Nardi e Silva (2020)

Tabela 4 – Ordem sequencial de aplicação do produto

Momentos	Conteúdos	Duração
Primeiro encontro: Motor <i>brushless</i>		
1º momento	Apresentação	10 minutos
2º momento	Funcionamento e características	30 minutos
3º momento	Atividade 1	30 minutos
4º momento	Socialização das repostas	20 minutos
Segundo encontro: Fenômenos eletromagnéticos		
1º momento	O que são ímãs?	10 minutos
2º momento	O que é corrente elétrica?	15 minutos
3º momento	Revisão de torque	10 minutos
4º momento	Revisão de conservação da energia	10 minutos
5º momento	Atividade 2	45 minutos
Terceiro encontro: Consolidação de aprendizagem		
1º momento	Princípios de funcionamento do motor <i>brushless</i>	30 minutos
2º momento	Dúvidas	30 minutos
3º momento	Atividade 3	30 minutos

Fonte: Autor (2025)

3.4 Aplicação do produto educacional

O primeiro encontro foi o momento em que o professor apresentou a proposta da sequência didática à turma e colocou o motor *brushless* em funcionamento. Inicialmente explicou que a atividade iria ter duração de três semanas e faria parte de uma pesquisa voltada ao Ensino de Física. Após essa conversa introdutória, os estudantes foram convidados a se dirigir ao laboratório de Física do *campus*, um espaço equipado com bancadas, ideal para a realização das atividades práticas. O professor pode optar por realizar o encontro no laboratório ou em sala de aula, já que o protagonista da atividade é um motor *brushless* convencional, ou seja, é relativamente leve e pequeno.

Após a chega ao laboratório, pedi que os estudantes formassem grupos com, no máximo, quatro integrantes. Considera-se importante o trabalho em grupo nesse contexto, pois favorece a troca de ideias e a construção coletiva do conhecimento. Com os grupos já formados, apresentei em detalhes os componentes mecânicos do motor *brushless* por meio de *slides* em *power point*, sem fornecer quaisquer pistas sobre o papel de cada elemento no funcionamento do motor. As figuras abaixo ilustram os slides utilizados.

Figura 6 – Slide 1 - Motor *brushless*

Motor *Brushless*



Fonte: Autor

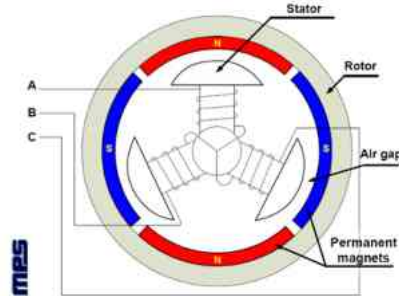
O primeiro *slide* apresentava o modelo de motor *brushless* utilizado. Foi comentando com os estudantes que existe uma grande diversidade de tipologias de motores, variando em tamanho, materiais utilizados na fabricação das peças e finalidades específicas. Esse momento mostrou-se oportuno para o professor abordar a respeito de aplicações tecnológicas atuais que utilizam o motor *brushless* em sua composição. Durante a aula, foram citados exemplos como drones e aeromodelos, *coolers* e ventiladores de computador, patinetes e bicicletas elétricas, eletrodomésticos modernos como máquinas de lavar, aspiradores de pó e ar-condicionado. No contexto industrial, também foram mencionados os carros elétricos e híbridos, a robótica, as máquinas CNC e impressoras 3D, os sistemas de satélites e os equipamentos médicos.

Neste momento, alguns estudantes questionaram por que o motor *brushless* está presente em tantas aplicações e em áreas tão distintas. Foi uma boa oportunidade para explicar a tradução direta do inglês da palavra *brushless*, ou seja, é um motor que não possui escovas em sua composição, fato este que não é encontrado em motores elétricos convencionais. Devido à ausência de escovas para fazer o motor funcionar, o desgaste das peças é praticamente eliminado, o que aumenta a vida útil do equipamento e reduz a necessidade de manutenção constante. Além disso, a ausência desse contato físico diminui as perdas de energia por atrito, tornando o motor mais eficiente e com menor geração de calor. Outra consequência positiva é a operação mais silenciosa, já que não há vibrações ou ruídos provocados pelas escovas. Também vale destacar que, sem a limitação imposta pelas escovas, o motor *brushless* consegue atingir rotações mais elevadas, sendo ideal para aplicações que exigem alta velocidade.

Esses foram os pontos levantados para responder ao questionamento dos estudantes, sempre tomando o cuidado necessário para não fornecer pistas do papel de cada componente no funcionamento do motor.

Figura 7 – Slide 2 - Motor *brushless*: por dentro

Motor *Brushless*: por dentro



Fonte: Autor

Em seguida, foi o momento de exibir o *slide 2*, mostrado na Figura 7. O objetivo dele era evidenciar a configuração mecânica do motor. Na parte interna, há uma estrutura que abriga as bobinas de cobre; Na parte externa, há uma carcaça de metal onde ficam dispostos ímãs de neodímio, que a preenchem completamente. Comentei que essa configuração recebe o nome de *outrunner*, que ocorre quando as bobinas de cobre estão dispostas mais internamente, enquanto que os ímãs ficam mais externamente.

Figura 8 – Slide 3 - *Eletronic Speed Controller*

Eletronic Speed Controller



Fonte: Autor

No *slide 3*, exibido na Figura 8, temos a aparição do ESC². Foi informado que é um dispositivo semicondutor, composto por circuitos de potência (como MOSFETs) e circuitos de controle. Esse dispositivo apresenta uma clara limitação de corrente elétrica suportada; no modelo utilizado essa informação estava visivelmente indicada na carcaça

² Controlador Eletrônico de Velocidade em tradução livre.

do aparelho. O motor *brushless* varia em tamanho e peso de acordo com a aplicação, desde versões miniaturizadas para *drones* até modelos robustos para veículos elétricos.

Figura 9 – *Slide 4* - Servo Teste

Servo Teste



Fonte: Autor

O próximo *slide* exibiu o componente conhecido como servo teste, ou regulador de ESC. Neste momento, foi dito que ele seria conectado ao ESC e que é capaz de emitir sinais eletrônicos.

Figura 10 – *Slide 5* - Bateria

Bateria



Fonte: Autor

O último *slide*, mostrado na Figura 10, exibe a bateria que seria utilizada para conectar ao ESC.

Esses são todos os equipamentos eletromecânicos que foram utilizados na aplicação do referido produto educacional. Em cada momento de exibição, pelos *slides* desses componentes, o professor deve exemplificar com o objeto em mãos, a fim de elucidar as características físicas, como, por exemplo, o tamanho.

O momento subsequente foi dedicado à montagem do aparato experimental, com a devida conexão dos componentes necessários ao funcionamento adequado do motor. Inicialmente, a hélice foi acoplada ao motor *brushless* e, em seguida, suas três entradas de fase foram conectadas ao ESC. Posteriormente, estabeleceu-se a ligação entre o ESC e o servo tester, concluindo-se o processo com a conexão da bateria ao ESC. Considerando que a maior parte dos componentes opera por meio de comandos eletrônicos, o sistema realizou automaticamente sua configuração após o estabelecimento das conexões. A partir desse momento, tornou-se possível controlar a velocidade do motor por meio do servo tester.

Em seguida, dirigi-me a cada grupo e disponibilizei o motor *brushless*, previamente configurado para uso e investigação. Após orientações referentes aos cuidados necessários, os grupos tiveram autonomia para manipular o motor, observá-lo em funcionamento, bem como registrar vídeos e fotografias, com o intuito de elaborar uma explicação acerca de seu princípio de operação. Cada grupo dispôs de um tempo máximo de cinco minutos em contato com o motor. Nesta etapa eles tiveram a oportunidade de desfazer as conexões que julgassem necessárias para investigação. A única restrição era a não possibilidade de abertura do motor, caso o professor julgue esse procedimento como importante, pode fazê-lo.

Figura 11 – Investigação do funcionamento do motor - fase inicial



Fonte: Autor

Figura 12 – Investigação do funcionamento do motor - em funcionamento



Fonte: Autor

Depois que todos os grupos finalizaram essa etapa, foi entregue uma folha a cada grupo com perguntas direcionadas ao entendimento do funcionamento do motor. A seguir, detalharemos as questões que eles responderam e o objetivo didático de cada uma delas.

Quadro 1 – Questão 1 da primeira atividade

Questão 1

Por que precisamos de ímãs? Um só não bastaria? Qual o motivo deles estarem dispostos dessa forma ao redor do eixo de rotação?

Fonte: Autor

A primeira questão tem como finalidade instigar os estudantes a refletirem sobre a função dos ímãs permanentes na estrutura do motor *brushless*. Por se tratar do questionamento inicial, proposto antes de uma explicação detalhada acerca do funcionamento físico do dispositivo, a intenção é identificar os conhecimentos prévios mobilizados pelos estudantes diante da problemática apresentada. As respostas que indicarem compreensão de que a disposição e a quantidade dos ímãs não se configuram de maneira aleatória, mas decorrem da necessidade de estabelecer um campo magnético distribuído uniformemente ao redor do rotor, aproximam-se do entendimento esperado no contexto da atividade.

Quadro 2 – Questão 2 da primeira atividade

Questão 2

Para que serve os fios de cobre? A quantidade de voltas no enrolamento influencia em alguma coisa?

Fonte: Autor

A questão presente no Quadro 2 foi incluída na atividade inicial de análise do motor *brushless* com o propósito de investigar as concepções prévias dos estudantes sobre o papel dos condutores metálicos em dispositivos dessa natureza. Ao explorar respostas espontâneas, busca-se identificar possíveis concepções alternativas ou lacunas conceituais, tais como a associação dos fios de cobre apenas à transmissão de energia elétrica, sem considerar o impacto do número de espiras na intensidade do campo magnético induzido ou no torque do motor.

Quadro 3 – Questão 3 da primeira atividade

Questão 3

Os ímãs poderiam estar dispostos externamente? Ou seja, eles poderiam trocar de lugar com as bobinas?

Fonte: Autor

Como foi mostrado nesse encontro apenas as características físicas do motor utilizado na prática, os estudantes ao responder a pergunta não possuíam, a priori, o conhecimento sobre os tipos de motor *brushless* que são classificados como *inrunner* e *outrunner*³. Essa questão objetiva levar o estudante à reflexão sobre a relação existente entre as bobinas de cobre e os ímãs permanentes para o funcionamento do motor. Aqui temos a primeira “intervenção” didática do professor, servindo como um guia e direcionando o aprendizado para os objetivos propostos.

Quadro 4 – Questão 4 da primeira atividade

Questão 4

A quantidade de enrolamentos dos fios influencia em alguma coisa? Se sim, em que?

Fonte: Autor

A questão 4 visa identificar qual relação eles estabelecem entre números de enrolamentos na bobina e alguma outra grandeza, como por exemplo, energia elétrica, corrente elétrica, etc. Como ainda não foi comentado sobre o experimento de Ørsted e nem as descobertas posteriores de Faraday e Ampère, a expectativa de resposta não recai sobre a noção da intensidade do campo magnético.

Quadro 5 – Questão 5 da primeira atividade

Questão 5

Por que existe o controlador ESC?

Fonte: Autor

A inclusão da questão “Por que existe o controlador ESC?” na primeira atividade busca compreender sobre como os estudantes entendem a função desse componente essencial no funcionamento do motor. Essa abordagem permite identificar se os participantes

³ Essa distinção e suas consequências é explorada no Apêndice B.

associam o ESC a um mero elemento de ligação elétrica ou se conseguem reconhecer, ainda que de forma intuitiva, sua função de controlar a corrente elétrica que percorre os fios de cobre.

Quadro 6 – Questão 6 da primeira atividade

Questão 6

Produza um texto descritivo sobre o funcionamento do motor, atribua a cada componente uma função e explique o funcionamento geral.

Fonte: Autor

A questão 6 é a última da primeira atividade e visa estimular os estudantes a organizar e integrar as concepções elaboradas ao longo da atividade. Trata-se de um momento de fechamento, no qual o foco não é a exatidão técnica do funcionamento do motor *brushless*, mas a capacidade de articular as ideias construídas acerca de cada elemento ímãs permanentes, fios de cobre, ESC e bateria em uma explicação que evidencie o encadeamento entre eles. Ao solicitar que descrevam o papel de cada componente e a dinâmica do conjunto, pretende-se analisar como os alunos compreendem o sistema de forma global, verificando se conseguem perceber a interdependência entre os diferentes elementos e como estes colaboram para transformar energia elétrica em movimento mecânico. Após todos os grupos terminarem a atividade, é o momento de compartilhar as respostas com os demais e verificar pontos de convergência e divergência. Este último momento terá duração de vinte minutos.

O segundo encontro tem início com o estudo dos fenômenos de atração e repulsão observados ao aproximarmos um ímã de outro. Essa etapa da aula deve durar, no máximo, 10 minutos. Utilizando ímãs de neodímio em formato retangular, como mostrado na Figura 13, o professor realizará uma demonstração prática para que os estudantes percebam, de forma clara, a atração e a repulsão em diferentes disposições dos ímãs. Esse é um momento oportuno para comentar a teoria do magnetismo vigente na Física, destacando que o ímã é formado por dois polos norte e sul e que, quando aproximados polos iguais, ocorre repulsão, enquanto polos diferentes se atraem. Também é pertinente uma breve discussão introdutória sobre o fato de que, até hoje, não foram detectados monopolos magnéticos na natureza. Caso disponha de equipamentos adequados, o professor pode ainda quebrar um dos ímãs para ilustrar essa verificação experimental.

Figura 13 – Ímãs de neodímio



Fonte: Peças (s.d.)

No segundo momento será explorado o conceito de corrente elétrica. Considere uma superfície S que secciona transversalmente um condutor. Definimos $Q(t)$ como a carga líquida que atravessa S no sentido positivo convencional desde um instante de referência até o instante t . A intensidade de corrente elétrica instantânea é definida como a derivada temporal dessa grandeza (MACHADO, 2020):

$$i(t) = \frac{dQ(t)}{dt}. \quad (3.1)$$

Essa definição é geral: para uma corrente que varia no tempo, a razão finita $\Delta Q/\Delta t$ fornece apenas a corrente média no intervalo Δt , e somente no limite $\Delta t \rightarrow 0$ recupera-se a corrente instantânea. Entretanto, no regime de corrente estacionária — que é o caso de interesse neste trabalho, uma vez que o motor *brushless* opera em regime permanente — a intensidade i é, por definição, constante no tempo. Nessa condição, a carga que atravessa a seção S cresce linearmente:

$$Q(t) = i \cdot t. \quad (3.2)$$

Sendo $Q(t)$ uma função linear de t , sua derivada coincide exatamente — e não de forma aproximada — com a razão entre variações finitas. Assim, para qualquer intervalo de tempo Δt :

$$i = \frac{dQ}{dt} = \frac{\Delta Q}{\Delta t}. \quad (3.3)$$

Essa igualdade exata é o que permite apresentar, sem perda de rigor, a expressão $i = \Delta Q/\Delta t$ como forma operacional da definição de corrente estacionária no contexto do

Ensino Médio, onde o cálculo diferencial ainda não faz parte do repertório matemático dos estudantes. Ressalte-se que nos livros didáticos do Ensino Médio é comum a notação $i = Q/\Delta t$, na qual Q representa não a carga total do sistema, mas sim a carga líquida ΔQ que atravessa a seção transversal do condutor no intervalo Δt — uma convenção notacional simplificada, porém consistente no regime estacionário.

Neste momento, a definição numérica da corrente elétrica não será o foco da atividade, embora seja mencionada. O objetivo central é que o estudante compreenda que a corrente elétrica se manifesta quando há movimento ordenado de portadores de carga elétrica — ou seja, quando portadores se deslocam preferencialmente em uma mesma direção e sentido ao longo do condutor.

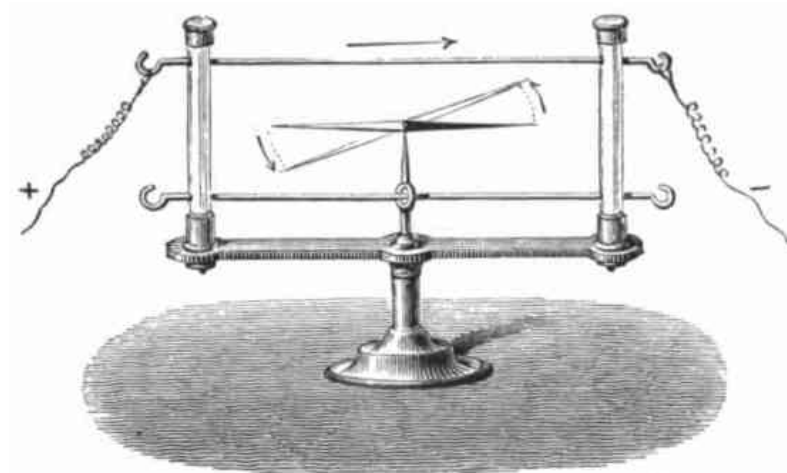
Nesta etapa é questionado aos estudantes como o movimento em um campo, como o gravitacional, pode acontecer. Utilizando qualquer objeto portátil, como apagador, pincel, caneta, o professor pode soltar o objeto de determinada altura, fazendo com que eles percebam a relação entre a diferença de altura existente entre o chão e o objeto e seu movimento. Consideramos esse exemplo ótimo do ponto de visto didático, já que a noção de potencial elétrico e diferença de potencial elétrico é demasiado abstrato a nível médio. O objetivo dessa discussão é que o estudante perceba, que para que exista movimento de portadores de carga, é necessário uma “altura”, não mais do ponto de visto gravitacional, mas sim elétrico.

Próximo passo é mostrar que, em 1820, o físico e químico dinamarquês Christian Ørsted, descobriu uma relação íntima entre campos magnéticos e corrente elétrica. A Figura 14 é exibida por meio de um projetor, mostrando uma espécie de modelo supostamente utilizado por Ørsted em seus experimentos. O professor deverá explicar em detalhes o que mostra a figura, seus elementos e funções. No momento em que ocorre a passagem de corrente elétrica pelo metal acima da agulha imantada, esta sofre uma deflexão, evidenciando a conexão existente entre eletricidade e magnetismo. Em seguida, será exibido um vídeo⁴ do experimento sendo reproduzido com equipamentos modernos.

A etapa anterior possui uma duração aproximada de 15 minutos. Em seguida, será feita uma revisão de conceitos supostamente já estudados pelos estudantes em anos anteriores e que são relevantes para a compreensão do funcionamento do motor *brushless*. O primeiro deles é o conceito de torque de uma força, ou momento de uma força, a primeira reflexão proposta aos estudantes é: pense em como é muito mais fácil abrir uma porta empurrando a maçaneta, que fica longe das dobradiças (o eixo de rotação), do que empurrando perto delas. Este exemplo se torna interessante, pois pode ser exemplificado com a porta da sala de aula ou de algum laboratório. Podemos expandir o mesmo princípio ao usar uma chave de roda para apertar ou soltar os parafusos de um pneu: quanto mais longo o braço da ferramenta, menos força você precisa fazer. Esse exemplo será ilustrado

⁴ O vídeo pode ser acessado em Verheyden (2020).

Figura 14 – Esquema do experimento de Ørsted



Fonte: Commons (2013)

no quadro branco.

Essa “força de rotação⁵” é o torque, e ele não depende apenas da intensidade da força aplicada, mas também da distância do ponto de aplicação até o eixo e do ângulo de aplicação. A partir desses exemplos, é o momento de introduzir a equação que expressa o módulo⁶ do torque, $\mathfrak{T} = r \cdot F \cdot \sin(\theta)$ onde θ é o ângulo entre o braço de alavanca e a força, destacando que o torque é máximo quando a força é aplicada perpendicularmente ao braço de alavanca ($\theta = 90^\circ$). O fato de que o seno é uma função delimitada entre $-1 < \sin(\theta) < 1$ e que quando temos o ângulo de 90° ou $\pi/2$ radiano, obtemos seu valor máximo que é 1, precisa ser explanado durante a explicação da equação, tendo em vista que os exemplos fornecidos corroboram para essa ideia.

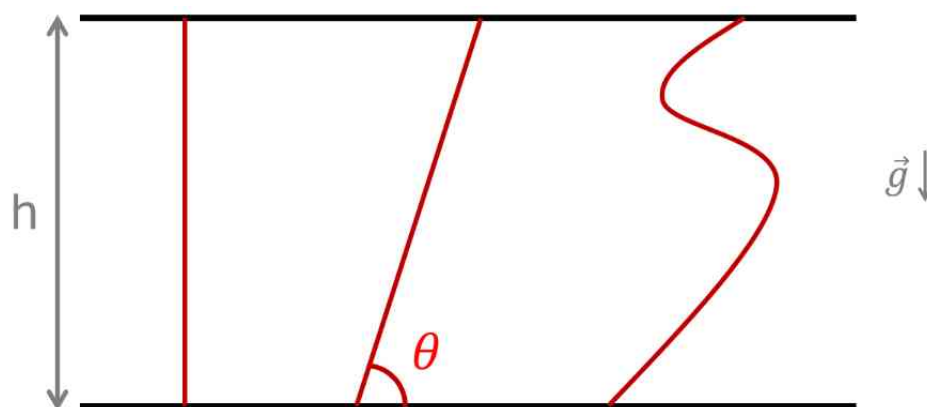
O próximo conceito físico a ser revisado é o de conservação da energia em sistemas conservativos, como estudantes da terceira série, já tiveram contato com a conservação da energia mecânica no âmbito do campo gravitacional, será esse ponto o revisado. Será exibida em um projetor, a imagem que aparece na Figura 15.

O objetivo é calcular o trabalho realizado pela força gravitacional sobre um corpo de massa m nos dois primeiros caminhos: o da linha reta vertical e o outro da linha reta diagonal, e generalizar o resultado para qualquer caminho, desde que as diferenças de altura entre os dois pontos (partida e chegada) sejam as mesmas. Utilizando a expressão para o cálculo do trabalho de uma força constante $W = F \cdot d \cdot \cos(\theta)$, onde F é a força gravitacional exercida pela Terra, dada por $F = mg$: d é a distância percorrida pelo corpo

⁵ Embora o torque não seja uma força, poderíamos pensar como um análogo de força para a rotação, decidimos definir assim, pois acreditamos que não temos perdas conceituais relevantes para nosso contexto.

⁶ A definição de torque como $\mathfrak{T} = r \times F$ e depois seu módulo $\mathfrak{T} = r \cdot F \cdot \sin(\theta)$ não foi abordada em virtude do contexto em que se encontram os estudantes.

Figura 15 – Exemplo da conservação da energia no campo gravitacional



Fonte: Autor (2025)

de massa m , que no caso do nosso exemplo é dado por h ; e θ é o ângulo formado entre a força e o deslocamento do corpo. Para dos dois primeiros caminhos (retas), o resultado obtido é dado por $W = mgh$. O professor deve comentar que o resultado é o mesmo para qualquer caminho, desde que as diferenças de altura sejam as mesmas, independentemente da trajetória percorrida pela corpo.

Quando isso acontece, temos o que chamamos de sistema conservativo. A esse sistema, podemos associar uma energia potencial, que, no caso, seria a energia potencial gravitacional. Mais do que isso, o sistema conserva no tempo uma quantidade chamada de energia mecânica, que é dada pela soma entre energia cinética e energia potencial. A explicação deve girar em torno de que o princípio da conservação da energia é um dos princípios fundamentais e gerais da física, mostrando que, para que movimento exista, é necessária a “perda” de outra quantidade. Neste sentido, os estudantes saberão que, embora o sistema fechado do motor *brushless* não seja um sistema que conserve energia, devido a perdas por atrito e calor, o fato de não possuir escovas em sua composição o torna mais eficiente e duradouro do que motores elétricos que possuem esse componente.

O último momento do encontro será dedicado ao desenvolvimento de uma atividade escrita, com o objetivo de verificar a evolução na explicação dos estudantes sobre o funcionamento do motor *brushless*. Munidos dos conhecimentos novos e revisados, os mesmos grupos formados no primeiro encontro terão a oportunidade de elaborar uma explicação para o funcionamento do motor, agora de forma mais consistente, já que os fenômenos físicos fundamentais para seu funcionamento básico foram previamente explorados.

A primeira questão tem como objetivo verificar se o estudante compreende a origem da energia cinética de rotação do motor. A primeira parte da questão busca observar como ele entende o conceito de sistema conservativo. Durante a aula, o aspecto não conservativo do campo magnético não será explorado; portanto, espera-se que a justificativa para a não conservação do sistema esteja relacionada às perdas de energia por som, calor e atrito,

Quadro 7 – Questão 1 da segunda atividade

Questão 1

O motor pode ser considerado um sistema conservativo? Por que? Existe conversão de uma forma de energia em outra?

Fonte: Autor

que são explícitas no motor. Verificar se eles conseguem distinguir sistemas conservativos de sistemas abertos com conversão de energia é um ponto relevante na discussão. Ao final, é importante que percebam que a energia elétrica fornecida pela bateria é utilizada tanto na geração de energia mecânica (rotação) quanto nas perdas.

Quadro 8 – Questão 2 da segunda atividade

Questão 2

Existe corrente elétrica no motor? Se sim, onde está a diferença de potencial responsável por causar o movimento ordenado de portadores de carga elétrica?

Fonte: Autor

A segunda questão tem como objetivo levar os estudantes a refletir sobre a presença efetiva de corrente elétrica no funcionamento do motor *brushless*. Muitos, ao observarem a utilização de ímãs permanentes no rotor, podem ter a impressão equivocada de que o dispositivo funciona apenas devido ao magnetismo, sem a necessidade de corrente elétrica. Ao problematizar a origem dessa corrente, a questão leva os alunos a reconhecer que os enrolamentos do estator são percorridos por portadores de carga elétrica em movimento, impulsionados por uma diferença de potencial aplicada pela fonte de alimentação; que, no nosso aparato experimental é a bateria.

Quadro 9 – Questão 3 da segunda atividade

Questão 3

Existe torque no motor? Se sim, onde e qual objeto que causa e qual o objeto que sofre a ação dele?

Fonte: Autor

Como foi definido ao longo do encontro o torque é a “força” responsável pela rotação, e o estudante precisa relacionar esse conceito com os componentes do motor. Com o motor em mãos e em funcionamento, eles podem observar que a parte externa,

onde estão dispostos os ímãs, gira em torno do eixo. A partir dessa constatação, a questão conduz o estudante a identificar que o torque é resultado da ação do campo magnético gerado pelas correntes nos enrolamentos do estator sobre os ímãs permanentes do rotor. Assim, torna-se possível compreender qual elemento causa o torque (o estator, por meio de seus enrolamentos energizados) e qual elemento recebe sua ação (o rotor com os ímãs).

Essa análise, ao mesmo tempo em que conecta o conceito abstrato de torque a um dispositivo concreto, reforça a importância do princípio da ação e reação de Newton, já que o rotor também exerce reação sobre o estator, ainda que este esteja fixo. Dessa forma, a questão foi formulada para que os estudantes consigam perceber o torque como uma manifestação direta da interação eletromagnética, e não como um efeito espontâneo da rotação do motor.

Quadro 10 – Questão 4 da segunda atividade

Questão 4

Qual o papel do campo magnético dos ímãs?

Fonte: Autor

Ao analisar a questão 4, o estudante é levado a reconhecer que o campo magnético dos ímãs desempenha o papel de interagir com o campo magnético rotativo gerado eletricamente, estabelecendo as forças que resultam no torque sobre o rotor. Dessa forma, a questão contribui para consolidar a compreensão de que o ímã, por si só, não “move” o motor, mas tem papel essencial na interação magnética que possibilita a rotação.

Quadro 11 – Questão 5 da segunda atividade

Questão 5

Elabore um texto descritivo sobre os princípios físicos envolvidos no funcionamento do motor. No texto relacione o conceito físico com os componentes.

Fonte: Autor

O último item da atividade foi proposto com a intenção de favorecer a integração conceitual. Essa produção escrita exige que o aluno deixe de tratar os conceitos de forma fragmentada e passe a compreendê-los em conjunto, identificando como cada componente do motor está vinculado a uma lei ou princípio físico. Assim, a questão funciona como uma etapa de síntese e avaliação da aprendizagem, na qual o estudante demonstra sua capacidade de articular a teoria física à aplicação tecnológica do motor.

O encontro final da sequência didática é destinado à consolidação dos conhecimentos construídos ao longo de todas as etapas anteriores. Nesse momento, o professor assume um papel central na orientação dos estudantes quanto à aplicação dos conceitos trabalhados. Para isso, inicialmente, propõe-se a demonstração do processo de construção de um motor brushless, utilizando materiais de acesso relativamente simples e viáveis para o contexto escolar⁷ com o auxílio de *slides*. Essa atividade tem como objetivo não apenas reforçar o aprendizado teórico, mas também favorecer a integração entre teoria e prática, estimulando a autonomia investigativa dos estudantes e permitindo que reconheçam a aplicabilidade concreta dos princípios físicos discutidos ao longo da sequência.

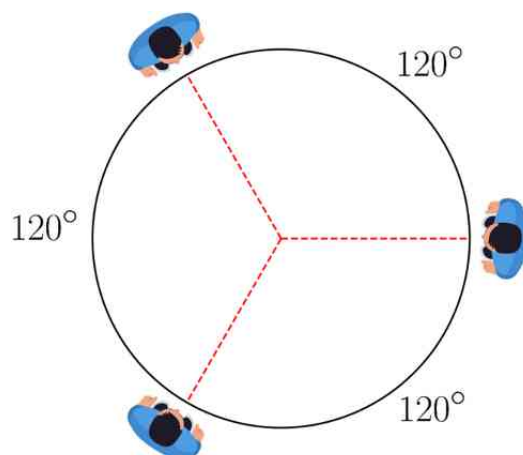
Posteriormente inicia-se o momento de explicação das relações entre as características físicas do motor e seu funcionamento. Com o motor em mãos, deve ficar claro para os estudantes que, caso alguma conexão entre os terminais das bobinas seja interrompida, o motor deixará de funcionar, evidenciando a importância de se manter uma corrente elétrica. Como foi discutido no encontro anterior, essa corrente é sustentada pela diferença de potencial fornecida pela bateria.

Após esse momento, o foco deve recair sobre a descoberta de Ørsted, segundo a qual fios condutores percorridos por corrente elétrica geram, ao seu redor, um campo magnético. Como as bobinas funcionam como ímãs, elas exercem atração sobre os ímãs presentes no rotor promovendo a rotação do motor. O professor deve comentar sobre o número de voltas em cada bobina e questionar os estudantes se esse fato influencia ou não no giro do rotor. Outra curiosidade a ser explorada é a quantidade de bobinas e a relação múltipla de três com as entradas ligadas ao ESC; ou seja, o motor é trifásico, o professor deve estimular a reflexão dos estudantes sobre esse aspecto antes de apresentar a explicação. Após o momento de reflexão, deve ser explicado que o termo “trifásico” refere-se ao número de sistemas de correntes independentes e defasadas — três correntes defasadas de 120° .

Uma analogia possível para essa situação é imaginar três pessoas empurrando um carrossel em posições separadas por 120° ; Utilizando o pincel e o quadro branco, o professor deve representar essa situação no quadro. Se cada uma empurrar sozinha (três bobinas), o movimento ocorrerá “aos trancos”; se cada uma contar com “assistentes” empurrando junto (seis, nove, doze bobinas), o esforço será melhor distribuído e o movimento se tornará mais contínuo. Deve ficar claro que existe um trabalho conjunto dos “assistentes” para que o movimento seja dessa forma, e no caso do motor *brushless*, as bobinas são controladas pelo ESC que as aciona e desliga nos momentos adequados, garantindo o funcionamento correto do motor. Um esquema ilustrativo pode ser observado na figura abaixo.

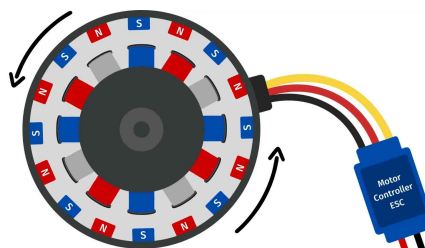
⁷ Os detalhes completos sobre os materiais e o procedimento encontram-se descritos no produto educacional.

Figura 16 – Analogia sobre o motor trifásico



Fonte: Autor (2025)

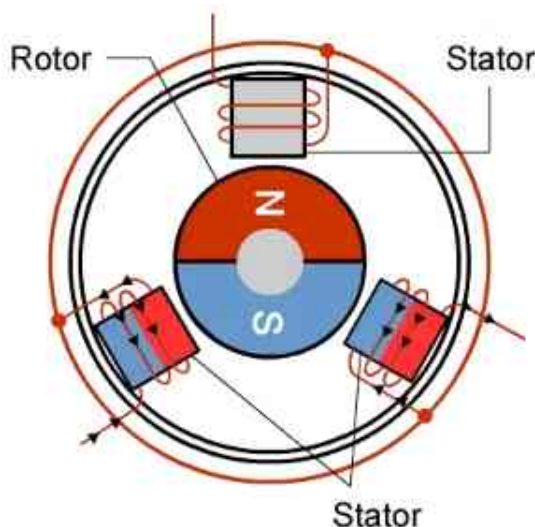
Existem diversos *GIF's*⁸ disponíveis na rede mundial de computadores que podem ser utilizados pelo professor para tornar explícito o processo de comutação entre as bobinas. Abaixo apresentam-se alguns exemplos que podem ser exibidos, acompanhados de seus respectivos endereços eletrônicos.

Figura 17 – *GIF* 1: Funcionamento do motor

Fonte: Nagel (2023)

⁸ *Graphics Interchange Format*

Figura 18 – GIF 2: Funcionamento do motor



Fonte: Xie (2023)

O momento seguinte, com duração de aproximadamente trinta minutos, será dedicado ao esclarecimento de dúvidas, possibilitando que os estudantes revisitem os conteúdos abordados ao longo da sequência e consolidem aspectos que eventualmente, tenham permanecido pouco claros. O terceiro e último momento, com duração de cerca de trinta minutos, será destinado à realização da atividade final. Essa etapa contemplará a resolução de questões que estimulem a construção e a sistematização de ideias em Física, como, por exemplo, a dedução de uma equação a partir do experimento desenvolvido. Além disso, será reservado um espaço para que os estudantes expressem suas impressões acerca da prática realizada, tanto positivas quanto negativas, favorecendo a reflexão crítica sobre o processo de aprendizagem.

Quadro 12 – Questão 1 da terceira atividade

Questão 1

Dada as grandezas R (distância média entre as bobinas e os ímãs), I (corrente elétrica nas bobinas), B (intensidade do campo magnético gerado pelas bobinas), N (número de ímãs) e L (comprimento dos fios nas bobinas), construa uma equação que forneça a intensidade do torque ($\mathfrak{T}$) sobre os ímãs.

Fonte: Autor

A questão um da atividade final tem por objetivo estimular o desenvolvimento e habilidade de modelagem no contexto da física, que consiste em traduzir um fenômeno físico para a linguagem matemática. Também é explorada a noção de proporcionalidade entre grandezas físicas, compreender quais relações existem nesse contexto é de suma

importância para a imersão no processo de criação na física. O estudante pode raciocinar de diferentes maneiras, como: “A corrente em um campo magnético gera uma força, e essa força aplicada a uma distância do eixo gera um torque. Como posso combinar essas ideias matematicamente?”, “Se dobrarmos a corrente, o que acontece com o torque?” e “Para obter um motor com mais torque, é melhor usar ímãs mais fortes ou aumentar o diâmetro do rotor? Por quê?”.

Isso estimula os estudantes a “lerem” uma equação, extraindo dela informações qualitativas sobre o funcionamento de um sistema. Uma possível resposta para essa questão seria o produto entre as grandezas⁹, ou seja, $\mathfrak{T} = INBLR$. Dadas as relações e conexões entre as grandezas que foram feitas ao longo da atividade, é possível esperar esse tipo de resposta dos estudantes. Uma maneira de verificar a consistência dessa equação é por meio da análise dimensional.

O torque de uma força é dado pela equação:

$$\mathfrak{T} = \mathbf{r} \times \mathbf{F}, \quad (3.4)$$

realizando a análise dimensional, obtemos

$$[\mathfrak{T}] = [\mathbf{r}] \cdot [\mathbf{F}] = L \cdot MLT^{-2}. \quad (3.5)$$

Por fim, obtém-se:

$$[\mathfrak{T}] = ML^2T^{-2}. \quad (3.6)$$

Agora vamos verificar a análise da equação proposta. Utilizando as unidades fundamentais, as grandezas envolvidas possuem as seguintes dimensões:

$$\begin{aligned} [N] &= 1 \\ [B] &= MT^{-2}A^{-1} \\ [I] &= A \\ [L] &= L \\ [R] &= L, \end{aligned} \quad (3.7)$$

logo, temos

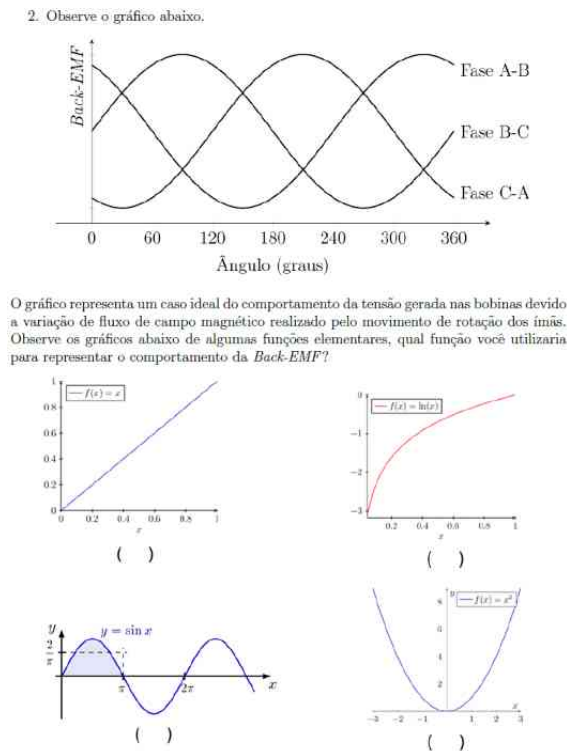
$$[\mathfrak{T}] = 1MT^{-2}A^{-1}ALL = ML^2T^{-2}. \quad (3.8)$$

⁹ Lembrando que o contexto aqui é de análise simplificada do funcionamento do motor *brushless*, sem a intenção de aprofundar em detalhes de eletrônica.

Portanto, a equação proposta é dimensionalmente correta.

A questão 2 da terceira atividade é mostrada na figura abaixo.

Figura 19 – Questão 2 da terceira atividade



Fonte: Autor (2025)

Nesta questão, busca-se verificar dois pontos importantes no contexto de ensino de Física. O primeiro deles refere-se ao reconhecimento de padrões: o estudante não precisa saber o que é “*Back-EMF*”; ele precisa observar a curva apresentada, identificar suas características (é oscilatória, periódica, suave, sobe e desce em torno de um eixo central) e, em seguida, comparar esse padrão visual com os gráficos de funções elementares que já conhece. O segundo ponto é observar que existe defasagem entre os gráficos senoidais e relacioná-la ao exemplo explorado anteriormente, podendo assim estimar que a defasagem observada entre as fases é de $2\pi/3$ *radiano*.

Na terceira questão, ao solicitar a concepção de uma ferramenta prática e a definição de seu objetivo, a questão demanda que o estudante mobilize e sintetize sua compreensão sobre o funcionamento e as vantagens do motor brushless para aplicá-la em um cenário de inovação. Dessa forma, a questão avalia efetivamente a capacidade de transferência do conhecimento para contextos inéditos e estimula a mentalidade de resolução de problemas, posicionando o estudante como um potencial criador de tecnologia, em vez de um mero receptor de informações, o que representa que é um dos principais objetivos da sequência didática proposta.

Quadro 13 – Questão 3 da terceira atividade

Questão 3

Sabemos que o motor brushless pode ser utilizado para diversas aplicações, como drones, ferramentas domésticas e industriais (parafusadeira, serra circular, etc), coolers de computador e etc. Tendo em vista seu funcionamento mecânico, o utilizaria para a construção de qual ferramenta prática? E com que objetivo?

Fonte: Autor

Quadro 14 – Questão 4 da terceira atividade

Questão 4

Vimos que a corrente elétrica que atravessa as bobinas, faz surgir um campo magnético ao seu redor. O efeito inverso seria possível? Ou seja, campos magnéticos poderiam dar origem a correntes elétricas?

Fonte: Autor

A questão quatro visa introduzir, de maneira investigativa, um dos pilares da teoria eletromagnética clássica: a lei de Faraday da indução. Partindo de um fenômeno já estabelecido na atividade (corrente gerando campo magnético), a pergunta convida o estudante a hipotetizar sobre a simetria e a reversibilidade das leis físicas. A conexão com a questão 2, que apresenta o gráfico, é direta, já que o fenômeno de indução é a base teórica para a compreensão da Força Contra-Eletromotriz (*Back-EMF*).

Quadro 15 – Questão 5 da terceira atividade

Questão 5

A prática realizada despertou em você um papel ativo na consolidação do seu aprendizado? Você se sentiu protagonista no processo de construir conhecimento? Justifique.

Fonte: Autor

A quinta questão tem por objetivo estimular a reflexão sobre a própria aprendizagem, um componente essencial para o desenvolvimento da autonomia intelectual. Ao indagar sobre o "papel ativo" e o "protagonismo", a pergunta convida o aluno a tomar consciência de sua própria jornada de construção de conhecimento, alinhando a atividade aos princípios do construtivismo. Tal princípio está em consonância com os pressupostos da teoria de Bruner.

Quadro 16 – Questão 6 da terceira atividade

Questão 6

Este espaço é destinado para sua avaliação sobre a sequência de aulas que tivemos, disserte brevemente sobre aspectos positivos e negativos.

Fonte: Autor

O propósito da sexta e última questão é estabelecer um canal de diálogo direto e transparente, no qual o estudante é convidado a assumir um papel de avaliador crítico e construtivo do processo de ensino-aprendizagem.

4 Resultados e discussões

Neste capítulo, apresentam-se e discutem-se os resultados obtidos a partir da aplicação da proposta pedagógica, centrada no estudo inicial do eletromagnetismo por meio de um motor *brushless*. As análises foram realizadas com base na técnica de Análise de Conteúdo, permitindo identificar, categorizar e interpretar padrões recorrentes nas respostas e interações dos estudantes durante as atividades propostas. O enfoque na Análise de Conteúdo possibilita compreender não apenas os acertos conceituais, mas também as dificuldades e estratégias cognitivas emergentes, fornecendo subsídios para refletir sobre a eficácia da abordagem adotada no ensino de conceitos fundamentais de eletromagnetismo.

Vamos realizar uma discussão breve do que seria a Análise de Conteúdo e como essa técnica pode colaborar para analisar de forma eficaz as respostas dos estudantes nas atividades escritas. Segundo Caregnato e Mutti (2006),

(...) técnica de pesquisa que trabalha com a palavra, permitindo de forma prática e objetiva produzir inferências do conteúdo da comunicação de um texto replicáveis ao seu contexto social. Na Análise de Conteúdo o texto é um meio de expressão do sujeito, onde o analista busca categorizar as unidades de texto (palavras ou frases) que se repetem, inferindo uma expressão que as representem. (CAREGNATO; MUTTI, 2006, pg. 682)

Nesse sentido, a Análise de Conteúdo mostra-se uma ferramenta importante para compreender as produções escritas dos estudantes, pois possibilita identificar padrões de pensamento, concepções recorrentes e até mesmo dificuldades de aprendizagem expressas em suas respostas. Ao categorizar palavras, expressões ou ideias, o pesquisador consegue organizar os dados de forma sistemática, permitindo uma interpretação mais aprofundada dos significados atribuídos pelos alunos às atividades propostas. Dessa maneira, a técnica contribui para revelar não apenas o que os estudantes respondem, bem como estruturam suas ideias e constroem seus conhecimentos.

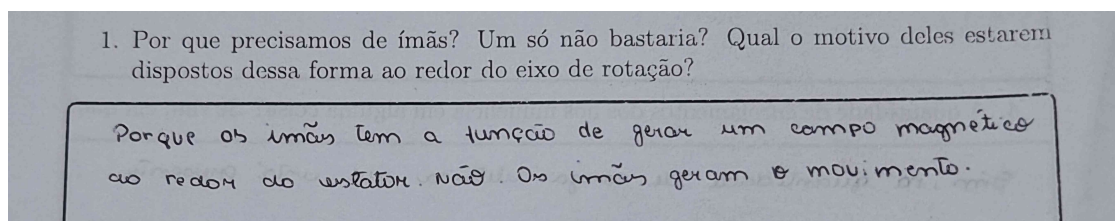
A estratégia de análise a ser adotada será a seguinte: inicialmente, apresentaremos as respostas de alguns grupos por meio de imagem e, em seguida, realizaremos a transcrição das repostas com o objetivo de garantir maior clareza do conteúdo. Após essa etapa, verificaremos quais padrões de resposta surgem em cada questão da respectiva atividade. A ideia é mapear quais concepções os estudantes possuem e como eles evoluem nos conceitos na tentativa de explicar o funcionamento do motor *brushless*. Pretende-se identificar os termos e conceitos-chave recorrentes, principalmente na Atividade 1, na qual os estudantes foram desafiados a fornecer explicações sem a introdução de novas informações

conceituais. A partir dessa análise, será possível traçar uma estratégia mais consistente para a examinar as demais atividades.

4.1 Respostas da Atividade 1

4.1.1 Questão 1

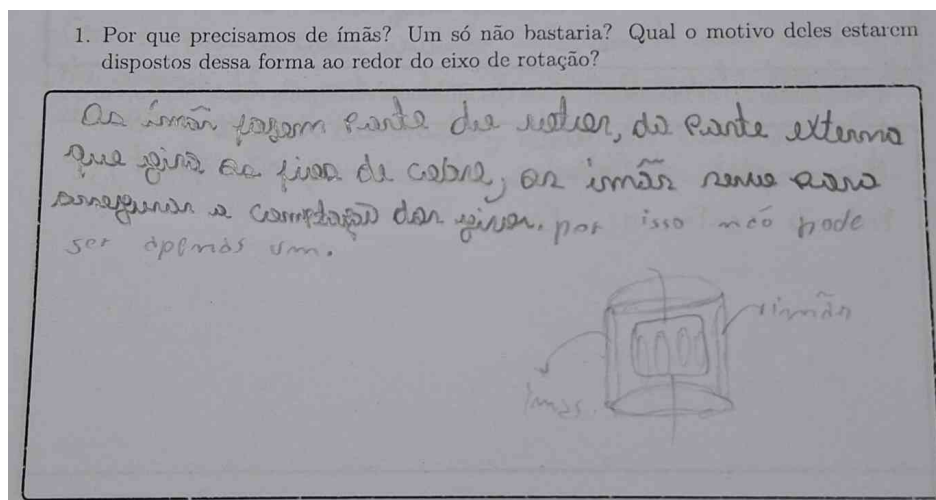
Figura 20 – Resposta 1 à questão 1 da primeira atividade



Fonte: Autor (2025)

TRANSCRIÇÃO: *Porque os ímãs tem a função de gerar um campo magnético ao redor do estator. Não. Os ímãs geram o movimento.*

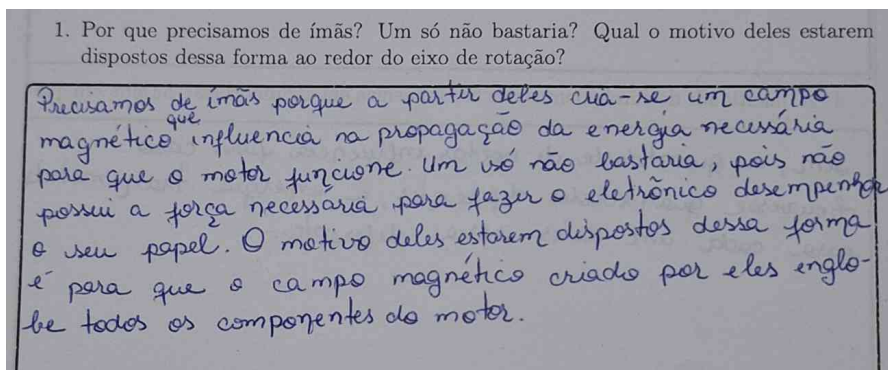
Figura 21 – Resposta 2 à questão 1 da primeira atividade



Fonte: Autor (2025)

TRANSCRIÇÃO: *Os ímãs fazem parte do rotor, da parte externa que gira os fios de cobre, os ímãs serve para assegurar a comutação do giro. Por isso não pode ser apenas um. Desenho.*

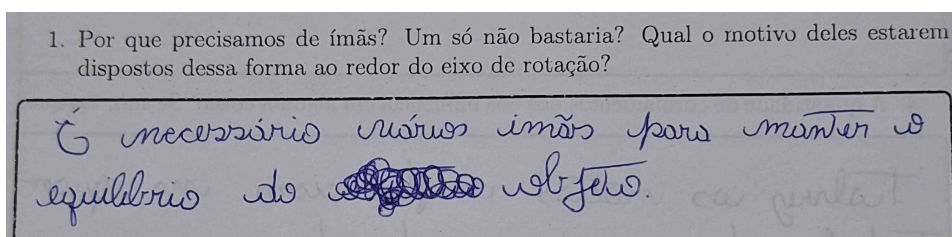
Figura 22 – Resposta 3 à questão 1 da primeira atividade



Fonte: Autor (2025)

TRANSCRIÇÃO: *Precisamos de ímãs porque a partir deles cria-se um campo magnético que influencia na propagação da energia necessária para que o motor funcione. Um só não bastaria, pois não possui força necessária para fazer o eletrônico desempenhar o seu papel. O motivo deles Estarem dispostos dessa forma é para que o campo magnético criado por eles englobe todos os componentes do motor.*

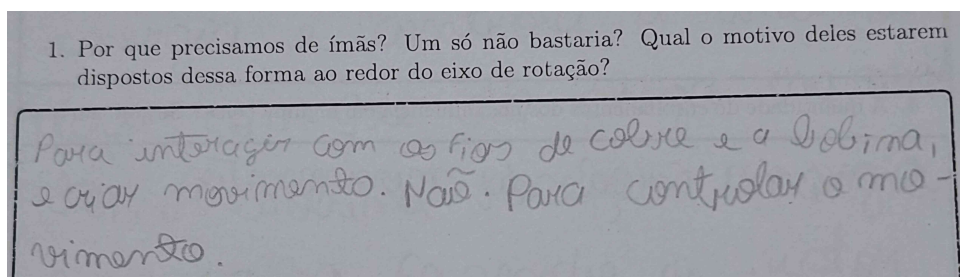
Figura 23 – Resposta 4 à questão 1 da primeira atividade



Fonte: Autor (2025)

TRANSCRIÇÃO: *É necessário várias ímãs para manter o equilíbrio do objeto.*

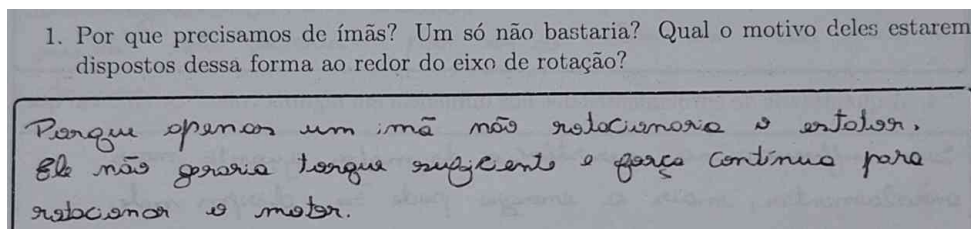
Figura 24 – Resposta 5 à questão 1 da primeira atividade



Fonte: Autor (2025)

TRANSCRIÇÃO: *Para interagir com os fios de cobre e a bobina, e criar movimento. Não. Para controlar o movimento.*

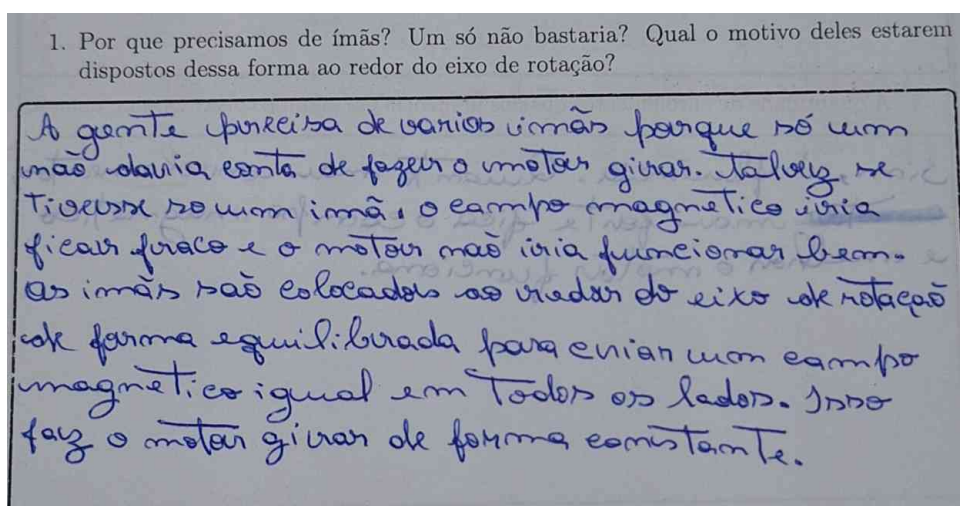
Figura 25 – Resposta 6 à questão 1 da primeira atividade



Fonte: Autor (2025)

TRANSCRIÇÃO: *Porque apenas um ímã não rotacionaria o estator. Ele não geraria torque suficiente e força contínua para rotacionar o motor.*

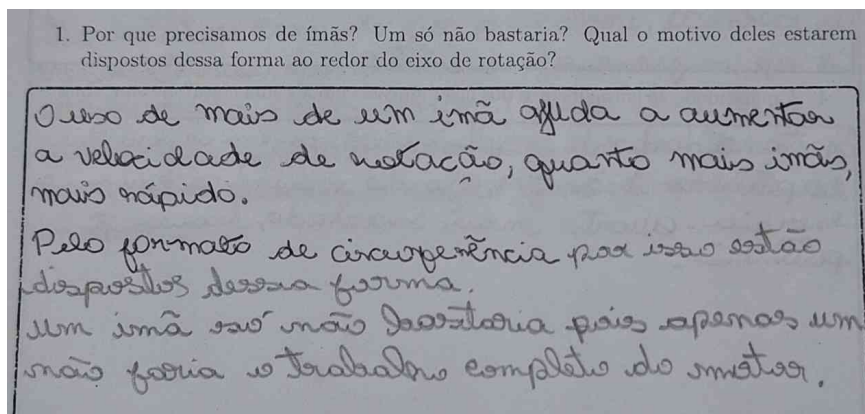
Figura 26 – Resposta 7 à questão 1 da primeira atividade



Fonte: Autor (2025)

TRANSCRIÇÃO: *A gente precisa de vários ímãs porque só um não daria conta de fazer o motor girar. Talvez se tivesse só um ímã, o campo magnético iria ficar fraco e o motor não iria funcionar bem. Os ímãs são colocados ao redor do eixo de rotação de forma equilibrada para enviar um campo magnético igual em todos os lados. Isso faz o motor girar de forma constante.*

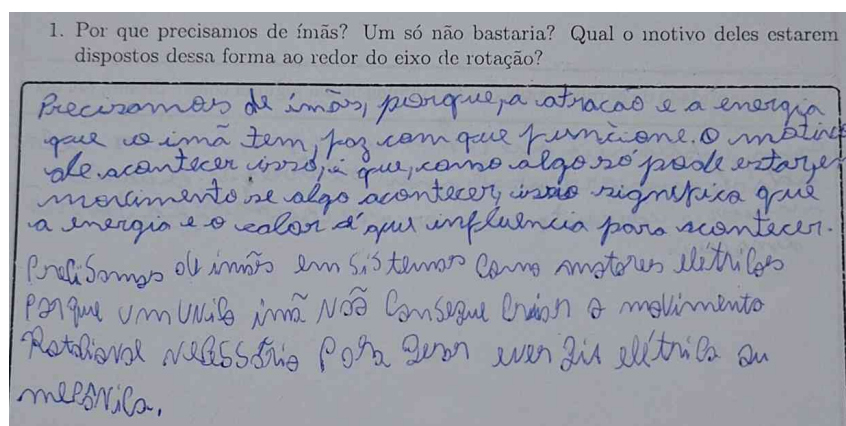
Figura 27 – Resposta 8 à questão 1 da primeira atividade



Fonte: Autor (2025)

TRANSCRIÇÃO: O uso de mais de um ímã ajuda a aumentar a velocidade de rotação, quanto mais ímãs, mais rápido. Pelo formato de circunferência por isso estão dispostos dessa forma. Um ímã só não bastaria pois apenas um não faria o trabalho completo do motor.

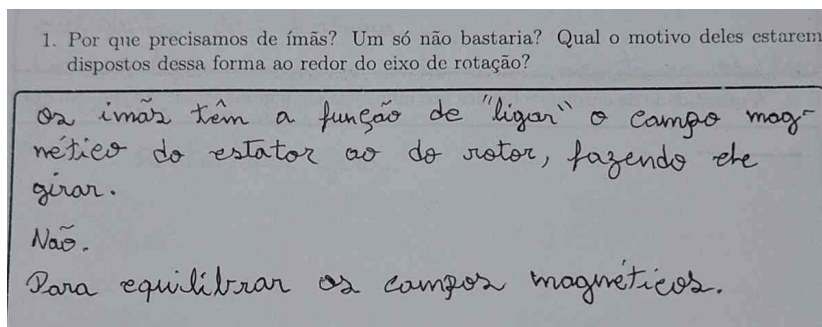
Figura 28 – Resposta 9 à questão 1 da primeira atividade



Fonte: Autor (2025)

TRANSCRIÇÃO: Precisamos de ímãs, porque, a atração e a energia que o ímã tem, faz com que funcione. O motivo de acontecer isso, é que, como algo só pode estar em movimento se algo acontecer, isso significa que a energia e o calor é que influencia para acontecer. Precisamos de ímãs em sistemas como motores elétricos porque o um único ímã não consegue criar movimento rotacional necessário para gerar energia elétrica ou mecânica.

Figura 29 – Resposta 10 à questão 1 da primeira atividade



Fonte: Autor (2025)

TRANSCRIÇÃO: *Os ímãs têm a função de “ligar” o campo magnético do estator ao do rotor, fazendo ele girar. Não. Para equilibrar os campos magnéticos.*

Uma concepção presente e relevante nas respostas dos estudantes é a de que um único ímã seria insuficiente para gerar o movimento de rotação do motor. Os estudantes argumentam que um só ímã “não faria o trabalho completo do motor”, “não possuiria a força necessária” ou “não geraria torque suficiente e força contínua”. Essa percepção aponta para uma compreensão intuitiva da necessidade de um campo magnético robusto e uniformemente distribuído. Além disso, a ideia de que “quanto mais ímãs, mais rápido” também se destaca, associando diretamente a quantidade de ímãs à performance do motor.

Outro ponto que podemos destacar em nossa análise é a noção de “equilíbrio”. Vários estudantes mencionam que os ímãs são dispostos de forma “equilibrada” para “manter o equilíbrio do objeto” ou para “enviar um campo magnético igual em todos os lados”. A busca por um “campo magnético que englobe todos os componentes” e que permita ao motor “girar de forma constante” demonstra uma abstração relativamente sofisticada para a primeira atividade da sequência didática por parte dos alunos, relacionando a disposição espacial dos componentes a um funcionamento suave e eficiente do sistema.

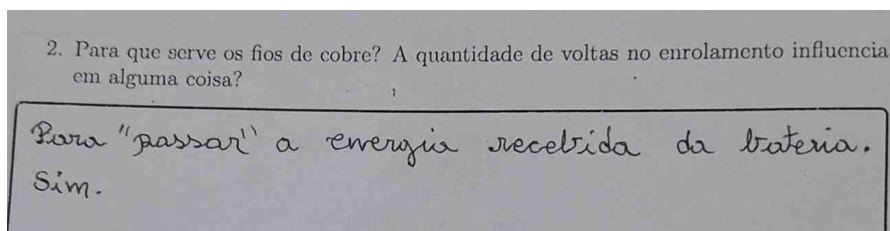
Nas repostas dos estudantes, identificamos corretamente o campo magnético como o mediador das interações no motor. Passagens como “gerar um campo magnético ao redor do estator” ou “ligar o campo magnético do estator ao do rotor” indicam a compreensão de que os ímãs não atuam por contato direto, mas por influência à distância. A menção à interação com os “fios de cobre e a bobina” para “criar movimento” também é um ponto crucial, mostrando que os alunos conseguem relacionar os três componentes fundamentais do motor *brushless*: ímãs, bobinas e corrente elétrica (implícita na menção aos fios de cobre).

Em uma das respostas é possível observar a utilização da frase “assegurar a comutação do giro”, aqui temos uma tentativa de utilização de um termo técnico, mas de maneira vaga e superficial. Outra resposta que associa o funcionamento à “atração e a

energia que o ímã tem”, e a menção de que “a energia e o calor é que influencia para acontecer”, aponta para um modelo explicativo mais genérico e menos preciso sobre as transformações de energia no motor.

4.1.2 Questão 2

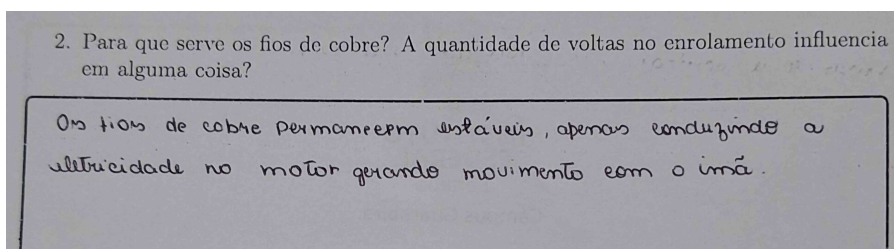
Figura 30 – Resposta 1 à questão 2 da primeira atividade



Fonte: Autor (2025)

TRANSCRIÇÃO: *Para “passar” a energia recebida da bateria.*

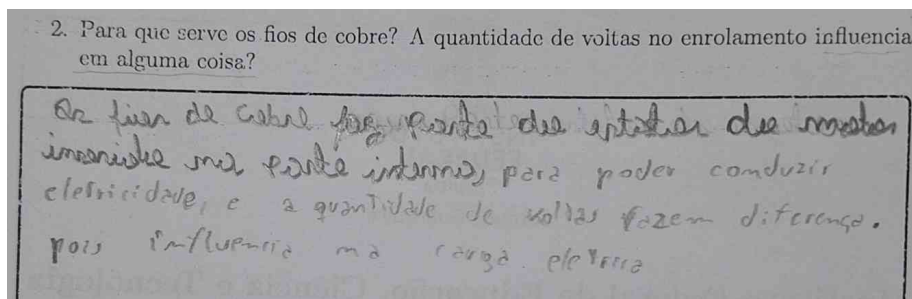
Figura 31 – Resposta 2 à questão 2 da primeira atividade



Fonte: Autor (2025)

TRANSCRIÇÃO: *Os fios de cobre permanecem estáveis, apenas conduzindo a eletricidade no motor gerando movimento com o ímã.*

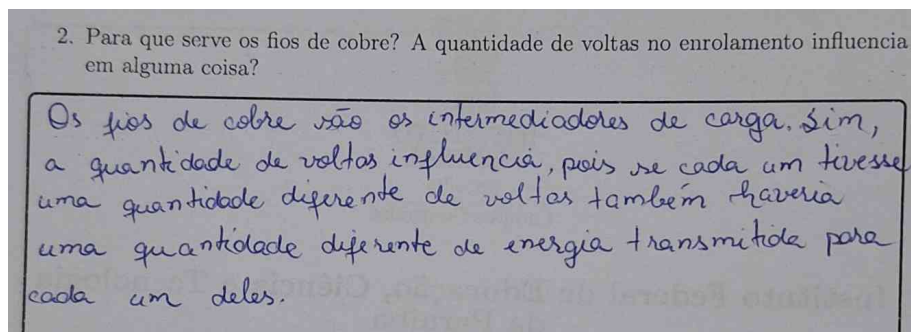
Figura 32 – Resposta 3 à questão 2 da primeira atividade



Fonte: Autor (2025)

TRANSCRIÇÃO: *Os fios de cobre faz parte do estator do motor inserido na parte interna, para poder conduzir eletricidade e quantidade de voltas fazem diferença pois influencia na carga elétrica.*

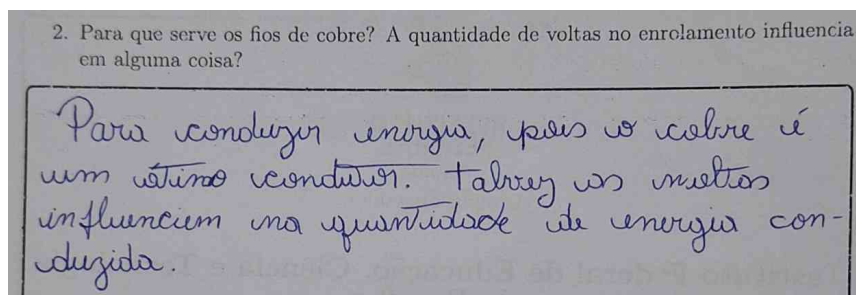
Figura 33 – Resposta 4 à questão 2 da primeira atividade



Fonte: Autor (2025)

TRANSCRIÇÃO: *Os fios de cobre são os intermediadores de carga. Sim, a quantidade de voltas influencia, pois se cada um tivesse uma quantidade diferente de voltas também haveria uma quantidade diferente de energia transmitida para cada um deles.*

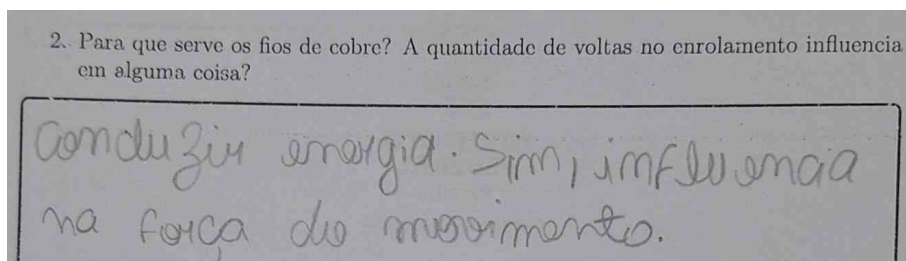
Figura 34 – Resposta 5 à questão 2 da primeira atividade



Fonte: Autor (2025)

TRANSCRIÇÃO: *Para conduzir energia, pois o cobre é um ótimo condutor. Talvez os metais influenciem na quantidade de energia conduzida.*

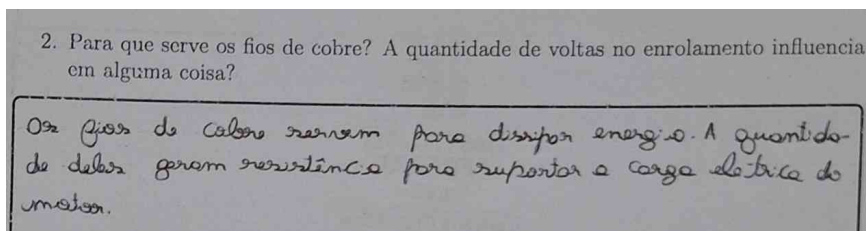
Figura 35 – Resposta 6 à questão 2 da primeira atividade



Fonte: Autor (2025)

TRANSCRIÇÃO: *Conduzir energia. Sim, influencia na força do movimento.*

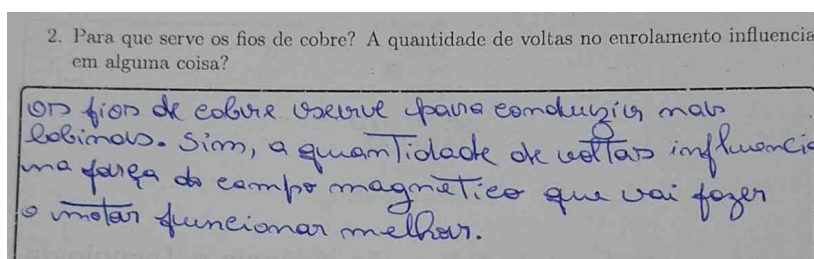
Figura 36 – Resposta 7 à questão 2 da primeira atividade



Fonte: Autor (2025)

TRANSCRIÇÃO: Os fios de cobre servem para dissipar energia. A quantidade deles geram resistência para suportar a carga elétrica do motor.

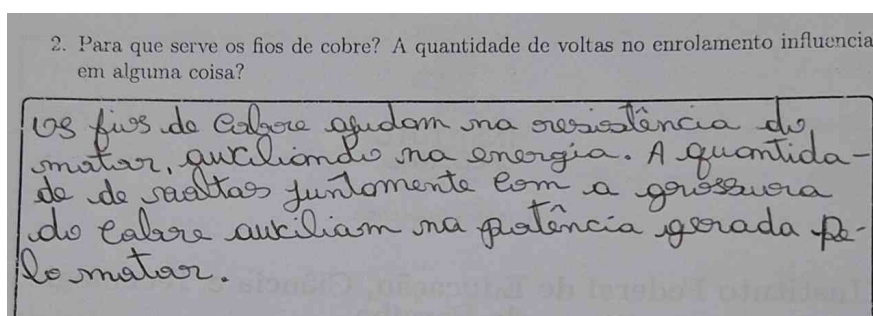
Figura 37 – Resposta 8 à questão 2 da primeira atividade



Fonte: Autor (2025)

TRANSCRIÇÃO: Os fios de cobre serve para conduzir nas bobinas. Sim, a quantidade de voltas influencia na força do campo magnético que vai fazer o motor funcionar melhor.

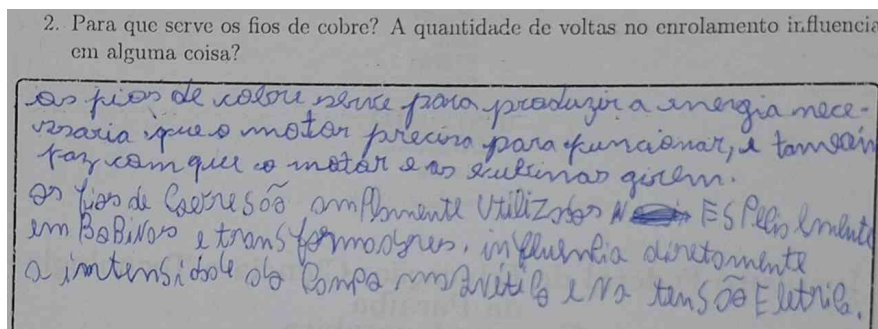
Figura 38 – Resposta 9 à questão 2 da primeira atividade



Fonte: Autor (2025)

TRANSCRIÇÃO: Os fios de cobre ajudam na resistência do motor, auxiliando na energia. A quantidade de voltas juntamente com a grossura do cobre auxiliam na potência gerada pelo motor.

Figura 39 – Resposta 10 à questão 2 da primeira atividade



Fonte: Autor (2025)

TRANSCRIÇÃO: *Os fios de cobre serve para produzir a energia necessária que o motor precisa para funcionar, e também faz com que o motor e as bobinas girem. Os fios de cobre são amplamente utilizados especialmente em bobinas e transformadores, influencia diretamente a intensidade do campo magnético e na tensão elétrica.*

Nas respostas da questão dois percebe-se uma predominância em tratar a função do cobre como um condutor. A maioria dos estudantes utiliza o termo “energia” para descrever o que é conduzido. Frases como “para conduzir energia”, “para produzir a energia necessária que o motor precisa” e para “passar a energia recebida da bateria” são recorrentes. Neste contexto, observa-se que os termos “energia” e “eletricidade” (ou corrente elétrica) são frequentemente utilizados como sinônimos. Embora não seja tecnicamente preciso, o raciocínio demonstra uma compreensão fundamental: os fios são o caminho para algo que alimenta o motor. A associação correta do cobre como um “ótimo condutor” também aparece, indicando o domínio de um conhecimento básico sobre condutores elétricos.

Sobre a relação existente entre a quantidade de voltas e a “força do motor”, os estudantes possuem uma clara intuição de que a quantidade de voltas no enrolamento não é trivial. Respostas como “a quantidade de voltas fazem diferença pois influencia na carga elétrica”, “a quantidade de voltas influencia na força do campo magnético” e “a quantidade de voltas juntamente com a grossura do cobre auxiliam na potência gerada pelo motor” são particularmente elucidativas. Essa categoria mostra que os alunos conseguem estabelecer uma relação de causa e efeito entre uma característica construtiva do motor — o enrolamento e sua performance — força, campo magnético, potência.

Existem algumas concepções alternativas nas respostas sobre a função dos fios de cobre. Alguns comentários como “dissipar energia” e “geram resistência para suportar a carga elétrica do motor” apresentam uma visão que embora incorreta em sua premissa principal — a função primária não é dissipar, mas gerar campo magnético — toca em conceitos físicos válidos como resistência elétrica e dissipação de energia — Efeito Joule.

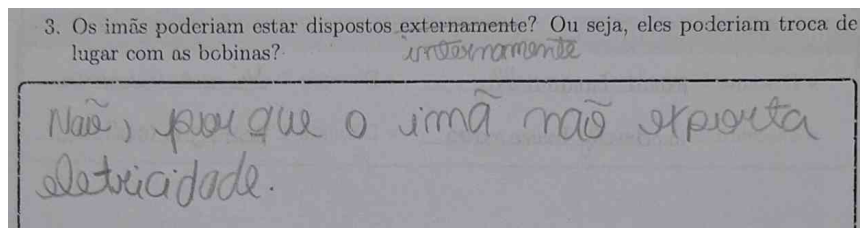
Outra resposta confusa afirma que os fios de cobre “também faz com que o motor e as bobinas girem”, atribuindo de forma imprecisa o movimento aos próprios fios. O aspecto mais relevante deste exemplo é que os estudantes são capazes de relacionar componentes distintos — fios, ímãs, estator — e compreender seus papéis na função geral do motor.

A partir das duas primeiras questões, já é possível obter uma noção intuitiva de como os estudantes atribuem a função dos componentes na dinâmica do motor *brushless* assim como identificar os tipos de concepções alternativas permeiam suas ideias. Em seguida, selecionaremos cinco respostas de cada questão para realizar a análise dos dados, com o objetivo de otimizar a fluidez das discussões dos resultados. A seleção se dará de maneira aleatória, visto que é interessante abranger as mais diversas linhas de pensamento garantindo que a amostra seja confiável e descreva de forma fidedigna a heterogeneidade das ideias presentes na turma.

4.1.3 Questão 3

Enunciado da questão 3: *Os ímãs poderiam estar dispostos internamente? Ou seja, eles poderiam trocar de lugar com as bobinas?*

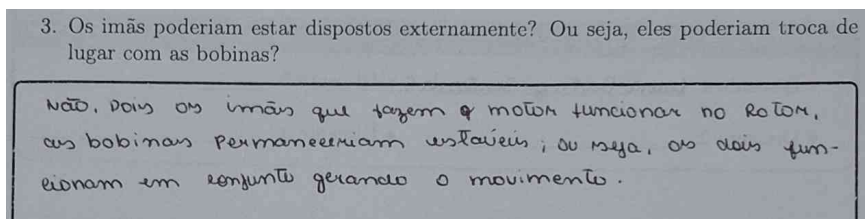
Figura 40 – Resposta 1 à questão 3 da primeira atividade



Fonte: Autor (2025)

TRANSCRIÇÃO: *Não, porque o ímã não exporta eletricidade.*

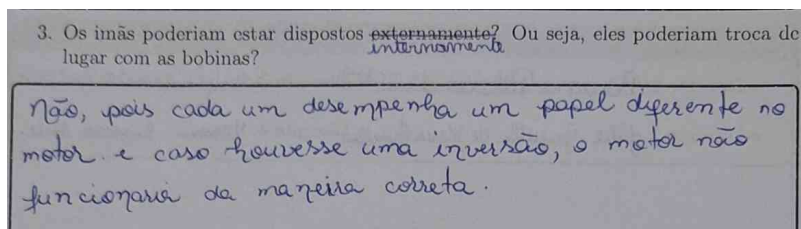
Figura 41 – Resposta 2 à questão 3 da primeira atividade



Fonte: Autor (2025)

TRANSCRIÇÃO: *Não, pois os ímãs que fazem o motor funcionar no rotor, as bobinas permaneceriam estáveis, ou seja, os dois funcionam em conjunto gerando movimento.*

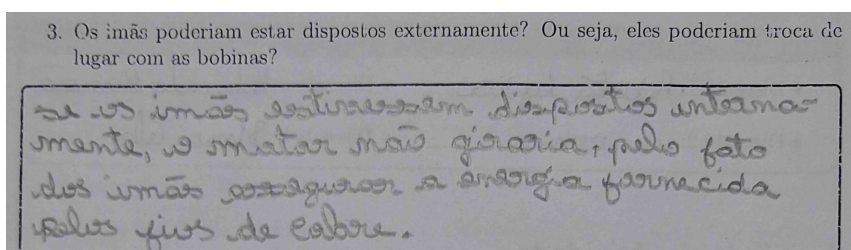
Figura 42 – Resposta 3 à questão 3 da primeira atividade



Fonte: Autor (2025)

TRANSCRIÇÃO: Não, pois cada um desempenha um papel diferente no motor e caso houvesse uma inversão, o motor não funcionaria de maneira correta.

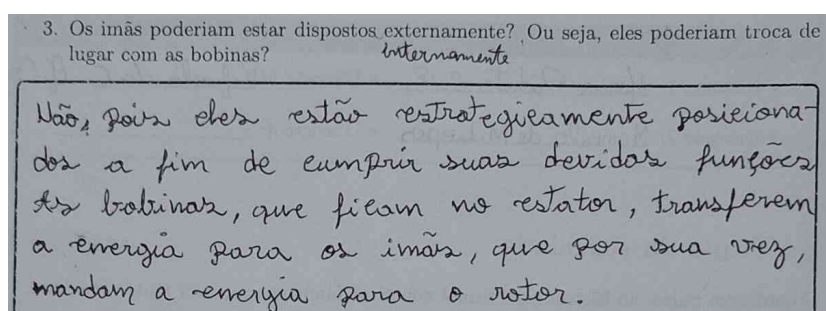
Figura 43 – Resposta 4 à questão 3 da primeira atividade



Fonte: Autor (2025)

TRANSCRIÇÃO: Se os ímãs estivessem dispostos internamente, o motor não giraria, pelo fato dos ímãs assegurar a energia fornecida pelos fios de cobre.

Figura 44 – Resposta 5 à questão 3 da primeira atividade



Fonte: Autor (2025)

TRANSCRIÇÃO: Não, pois eles estão estrategicamente posicionados a fim de cumprir suas devidas funções, as bobinas, que ficam no estator, transferem a energia para os ímãs, que por sua vez, mandam a energia para o rotor.

Nas repostas da terceira questão, observamos uma unanimidade: todos afirmaram que os ímãs não poderiam estar dispostos internamente, ou seja, ser um motor *brushless* do tipo *inrunner*. Do ponto de vista da física e engenharia, como vimos, essa premissa é

equivocada, mas revela nuances importantes sobre como os estudantes pensam a respeito da rigidez na relação função-posição dos componentes.

Podemos perceber, nas repostas, uma linha de pensamento que converge para um modelo de transferência linear de energia. Observamos isso na resposta 4, presente na Figura 43, e também na resposta 5, na Figura 44. Nesse modelo, a energia não é convertida de elétrica em mecânica por meio da interação de campos, mas sim transferida em etapas, como se fosse um objeto passando de mão em mão. Existe, portanto, uma hierarquia causal: os fios recebem e transferem a energia, e os ímãs a “asseguram” ou “mandam” para o rotor. Para eles, a posição atual é estratégica porque garante o fluxo nessa linha de montagem energética. Inverter os componentes quebraria essa sequência lógica, interrompendo o fluxo de energia e impedindo o funcionamento.

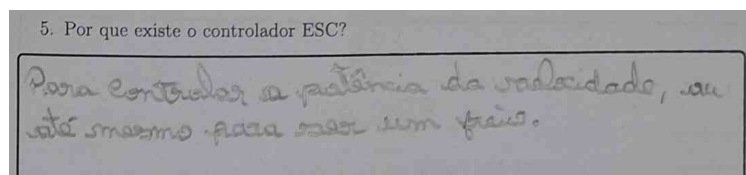
Em outras duas repostas, presentes nas Figuras 42 e 41, vemos ideia de que a função de cada componente determina um lugar fixo e imutável no sistema. O estudante sabe que ímãs e bobinas têm papéis distintos e que os ímãs estão no rotor — parte móvel. Com base nisso, conclui que essa é a única configuração possível. A função — “fazer o rotor funcionar” ou “permanecer estável” — está relacionada à sua localização física no motor estudado. A inversão é impossível porque violaria essa regra funcional que eles observaram.

Uma resposta curiosa e interessante para se analisar é a que consta na Figura 40. Nela os estudantes parecem acreditar que o componente que fica na posição interna, onde originalmente estão as bobinas no modelo utilizado, precisa ter a propriedade de conduzir ou “exportar” eletricidade. Como sabem que a função do ímã não é essa, concluem que o ímã não pode ocupar aquele espaço.

4.1.4 Questão 4

Embora, nas imagens abaixo as respostas estejam numeradas como questão 5, trata-se, na verdade, da questão 4, uma vez que, na atividade impressa, a questão 4 era uma repetição da questão 3.

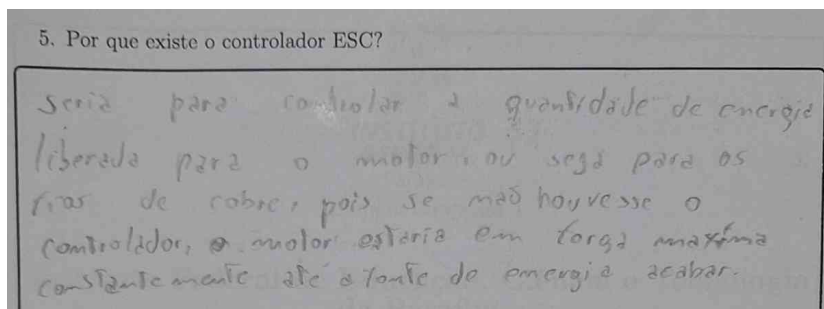
Figura 45 – Resposta 1 à questão 4 da primeira atividade



Fonte: Autor (2025)

TRANSCRIÇÃO: *Para controlar a potência da velocidade, ou até mesmo para ser um freio.*

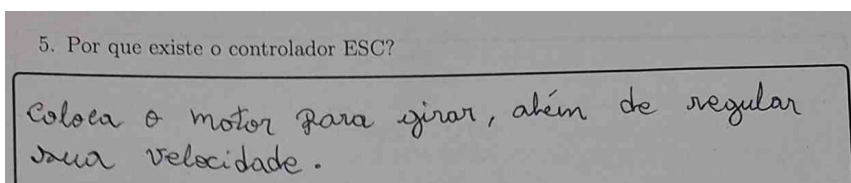
Figura 46 – Resposta 2 à questão 4 da primeira atividade



Fonte: Autor (2025)

TRANSCRIÇÃO: *Seria para controlar a quantidade de energia liberada para o motor, ou seja, para os fios de cobre, pois se não houvesse o controlador, o motor estaria em força máxima constantemente até a fonte de energia acabar.*

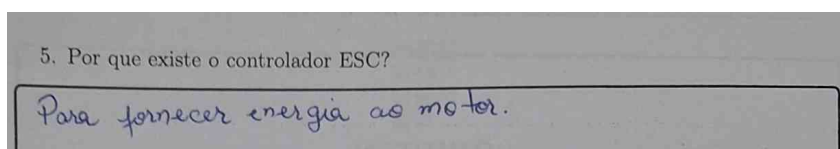
Figura 47 – Resposta 3 à questão 4 da primeira atividade



Fonte: Autor (2025)

TRANSCRIÇÃO: *Coloca o motor para girar, além de regular sua velocidade.*

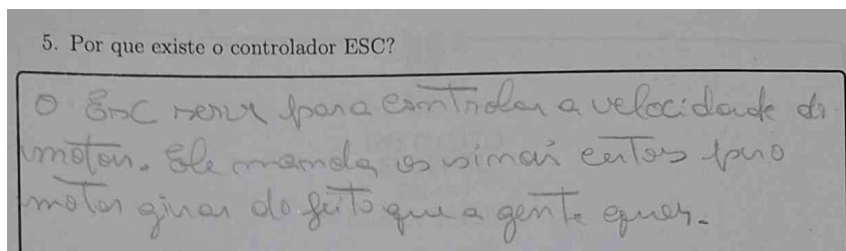
Figura 48 – Resposta 4 à questão 4 da primeira atividade



Fonte: Autor (2025)

TRANSCRIÇÃO: *Para fornecer energia ao motor.*

Figura 49 – Resposta 5 à questão 4 da primeira atividade



Fonte: Autor (2025)

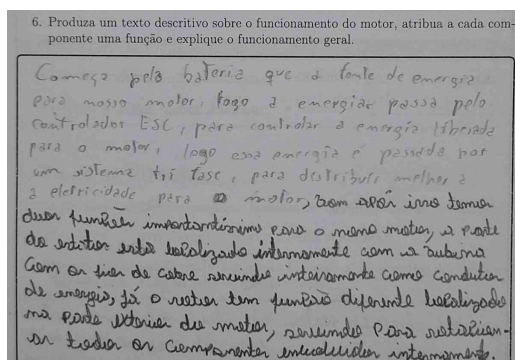
TRANSCRIÇÃO: *O Esc serve para controlar a velocidade do motor. Ele manda os sinais certos pro motor girar do jeito que a gente quer.*

A predominância das respostas nesta questão indica que os estudantes atribuíram ao controlador ESC a função de controlar a velocidade e o movimento, o que está de acordo com a física do objeto. Uma possível explicação para essa compreensão está relacionada à demonstração prática com o motor *brushless*, ao girar a peça contida no servo teste, que é conectado diretamente ao ESC poderiam verificar a variação da velocidade do motor. Isso evidencia que a atividade prática desperta conexões significativas na forma de pensar um fenômeno.

A resposta apresentada na Figura 48 representa uma concepção correta, porém incompleta, pois não contempla a função de controle. Embora seja verdadeiro que a energia passe pelo ESC antes de chegar ao motor, o estudante omite seu papel principal de regulação. Em uma escala de complexidade conceitual, essa seria uma visão mais elementar: o estudante identifica o ESC como um elo na cadeia de alimentação, mas não como o gestor inteligente dessa cadeia.

4.1.5 Questão 5

Figura 50 – Resposta 1 à questão 5 da primeira atividade

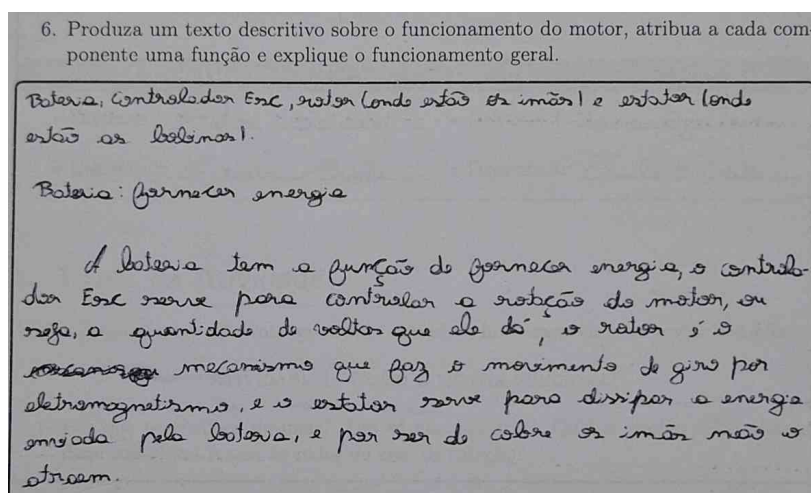


Fonte: Autor (2025)

TRANSCRIÇÃO: *Começa pela bateria que é a fonte de energia para nosso motor, logo a energia passa pelo controlador ESC, para controlar a energia liberada para o motor, logo essa energia é passada por um sistema tri fase, para distribuir melhor a eletricidade para o motor, bem assim isso tem duas funções importantes para o nosso motor, a parte da rotação está localizada internamente com a subunidade e a parte de controle está localizada internamente com a subunidade. Com a sua função de controle internamente como condutor de energia, já o rotor tem função diferente localizada na parte externa do motor, servindo para estabilizar e rodar os componentes localizados internamente.*

a energia passa pelo controlador ESC, para controlar a energia liberada para o motor, logo essa energia é passada por um sistema trifase, para distribuir melhor a eletricidade para o motor. Bom, após isso temos duas funções importantíssimo para o nosso motor, a parte do estator está localizado internamente com a bobina com os fios de cobre servindo inteiramente como condutor de energia, já o rotor tem a unção diferente localizado na parte exterior do motor, servindo para rotacionar todos os componentes envolvidos internamente.

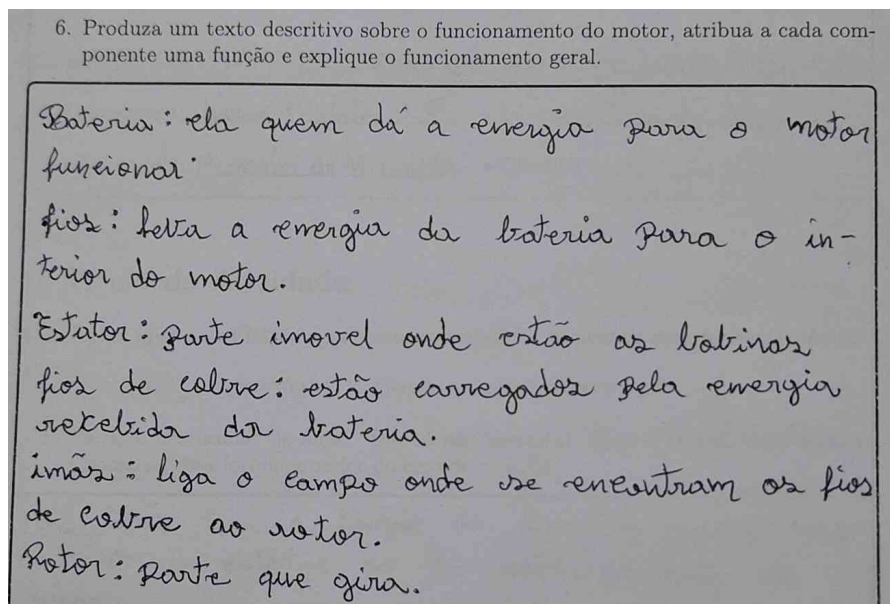
Figura 51 – Resposta 2 à questão 5 da primeira atividade



Fonte: Autor (2025)

TRANSCRIÇÃO: Bateria, controlador ESC, rotor (onde estão os imãs) e estator (onde estão as bobinas). Bateria: fornecer energia. A bateria tem a unção de fornecer energia, o controlador ESC serve para controlar a rotação do motor, ou seja, a quantidade de voltas que ele dá, o rotor é o mecanismo que faz o movimento de giro por eletromagnetismo, e o estator serve para dissipar a energia enviada pela bateria, e por ser de cobre os imãs não o atraem.

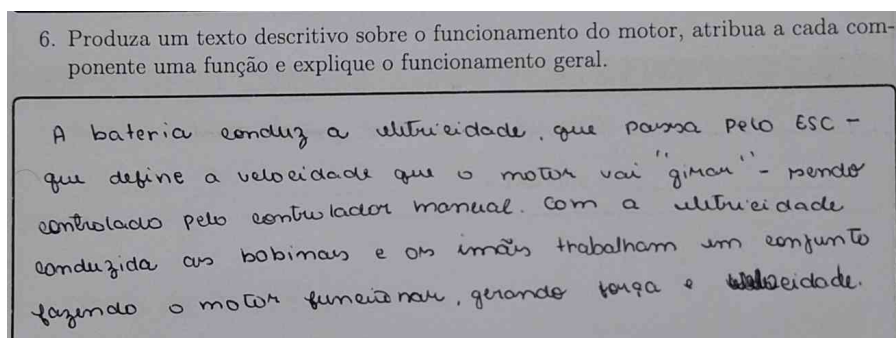
Figura 52 – Resposta 3 à questão 5 da primeira atividade



Fonte: Autor (2025)

TRANSCRIÇÃO: Bateria: ela quem dá a energia para o motor funcionar. Fios: leva a energia da bateria para o interior do motor. Estator: Parte móvel onde estão as bobinas. Fios de cobre: estão carregados pela energia recebida da bateria. Ímãs: liga o campo onde se encontram os fios de cobre ao rotor. Rotor: parte que gira.

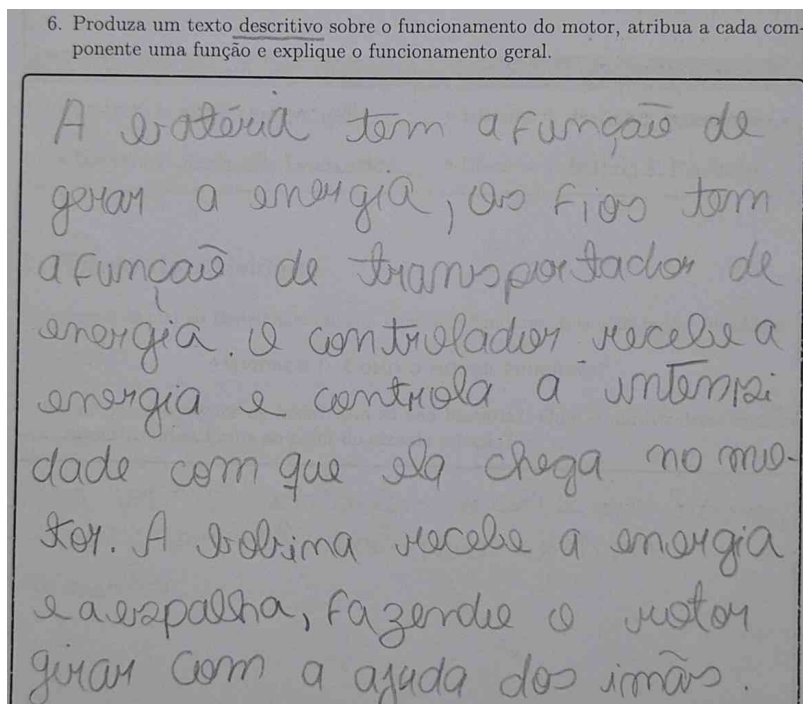
Figura 53 – Resposta 4 à questão 5 da primeira atividade



Fonte: Autor (2025)

TRANSCRIÇÃO: A bateria conduz a eletricidade que passa pelo ESC que define a velocidade que o motor vai "gitar"- sendo controlado pelo controlador manual. Com a eletricidade conduzida as bobinas e os ímãs trabalham em conjunto fazendo o motor funcionar, gerando força e velocidade.

Figura 54 – Resposta 5 à questão 5 da primeira atividade



Fonte: Autor (2025)

TRANSCRIÇÃO: *A bateria tem a função de gerar energia, os fios tem a função de transporte de energia. O controlador recebe a energia e controla a intensidade com que ela chega no motor. A bobina recebe a energia e a espalha, fazendo o rotor girar com ajuda dos ímãs.*

Nas repostas à última questão da primeira atividade identificam-se algumas categorias de pensamento que merecem destaque. A primeira é o modelo de fluxo sequencial da energia: os estudantes descrevem o funcionamento do motor como um percurso linear, em que a energia é a protagonista que percorre os componentes, sendo transformada em cada etapa. Essa forma de pensar demonstra que os alunos conseguem organizar os componentes em uma ordem lógica e causal. A linguagem, embora por vezes imprecisa — utilizando “energia” como sinônimo de “corrente elétrica” — descreve uma sequência coerente de eventos: Fonte (bateria) → Controle (ESC) → Interação (bobinas e ímãs) → Efeito (rotação). Esse modelo causal de pensamento é bastante comum em teorias físicas no contexto clássico, nas quais causa e efeito possuem uma ligação intrínseca com o determinismo de Laplace, essa forma de pensar sofre mudanças, em certo nível, com a Teoria Quântica no século XX.

A segunda categoria é a atribuição correta das funções de cada componente. Fica explícito nas repostas a noção de que a bateria fornece, o ESC controla e define e o rotor, ímãs e bobinas possuem as funções de girar, gerar forças e trabalhar em conjunto. Isso indica que os objetivos de aprendizagem referentes a cada componente individual foram,

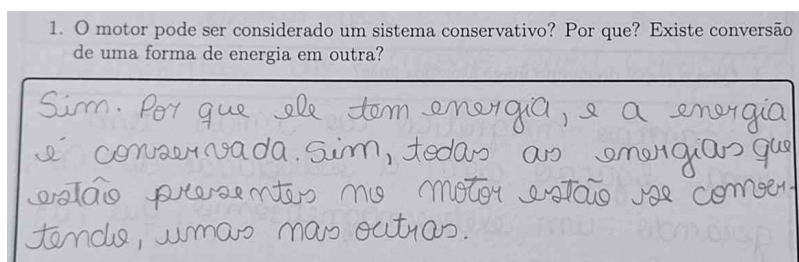
em grande parte, alcançados, com o detalhe de que os estudantes não receberam nenhuma informação técnica do ponto de vista físico para o funcionamento do motor. Tal resultado evidencia o potencial da abordagem experimental tem no ensino de física.

Por fim, a terceira categoria diz respeito à persistência de concepções alternativas e confusões conceituais, algo esperado por se tratar da mesma atividade. Em uma das respostas, o estator é descrito como dissipador de energia — ideia já mencionada na questão sobre os fios de cobre —, agora apresentada de forma mais elaborada. Os estudantes atribuem ao estator a função primária de dissipar energia, uma função secundária e indesejada — perdas por efeito Joule —, em vez de sua função primária de criar um campo magnético. Em outra resposta, é possível identificar a descrição da função dos ímãs como “liga o campo onde se encontram os fios de cobre ao rotor.”, mostrando dificuldade em compreender o princípio da interação entre os campos magnéticos.

4.2 Repostas da Atividade 2

4.2.1 Questão 1

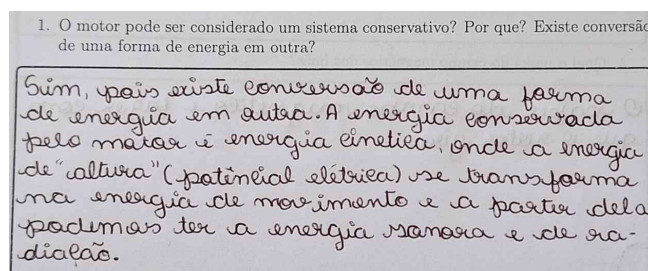
Figura 55 – Resposta 1 à questão 1 da segunda atividade



Fonte: Autor (2025)

TRANSCRIÇÃO: *Sim. Por que ele tem energia, e a energia é conservada. Sim, todas as energias que estão presentes no motor estão se convertendo, umas nas outras.*

Figura 56 – Resposta 2 à questão 1 da segunda atividade

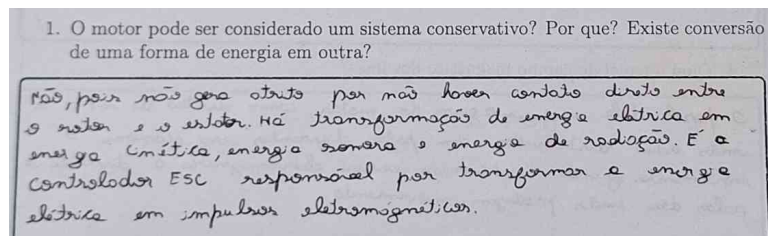


Fonte: Autor (2025)

TRANSCRIÇÃO: *Sim, pois existe conversão de uma forma de energia em outra. A energia conservada pelo motor é a energia cinética, onde a energia de “altura” (potencial*

elétrica) se transforma na energia de movimento e a partir dela podemos ter a energia sonora e a de radiação.

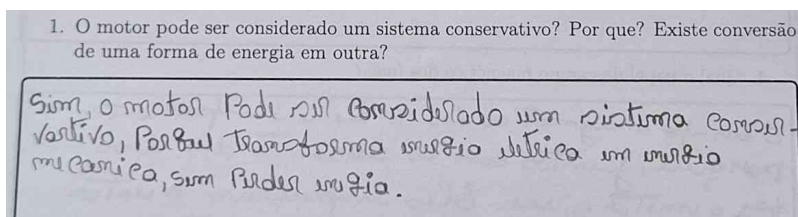
Figura 57 – Resposta 3 à questão 1 da segunda atividade



Fonte: Autor (2025)

TRANSCRIÇÃO: Não, pois não gera atrito por não haver contato direto entre o rotor e o estator. Há transformação de energia elétrica em energia cinética, energia sonora e energia de radiação. É o controlador ESC responsável por transformar a energia elétrica em impulsos eletromagnéticos.

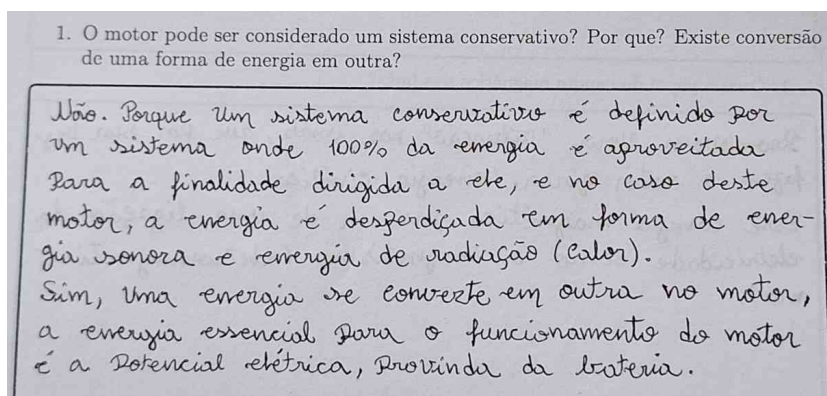
Figura 58 – Resposta 4 à questão 1 da segunda atividade



Fonte: Autor (2025)

TRANSCRIÇÃO: Sim, o motor pode ser considerado um sistema conservativo, porque transforma energia elétrica em energia mecânica, sem perder energia.

Figura 59 – Resposta 5 à questão 1 da segunda atividade

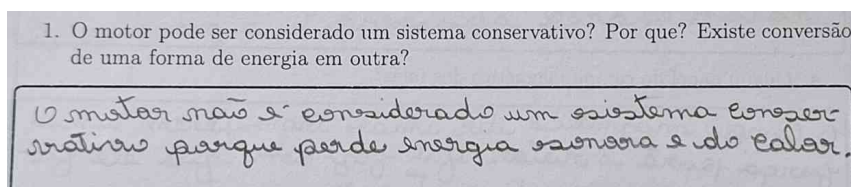


Fonte: Autor (2025)

TRANSCRIÇÃO: Não. Porque um sistema conservativo é definido por um sistema onde 100% da energia é aproveitada para a finalidade dirigida a ele, e no caso deste motor,

a energia é desperdiçada em forma de energia sonora e energia de radiação (calor). Sim, uma energia se converte em outro no motor, a energia essencial para o funcionamento do motor é a potencial elétrica, provinda da bateria.

Figura 60 – Resposta 6 à questão 1 da segunda atividade



Fonte: Autor (2025)

TRANSCRIÇÃO: *O motor não é considerado um sistema conservativo porque perde energia sonora e de calor.*

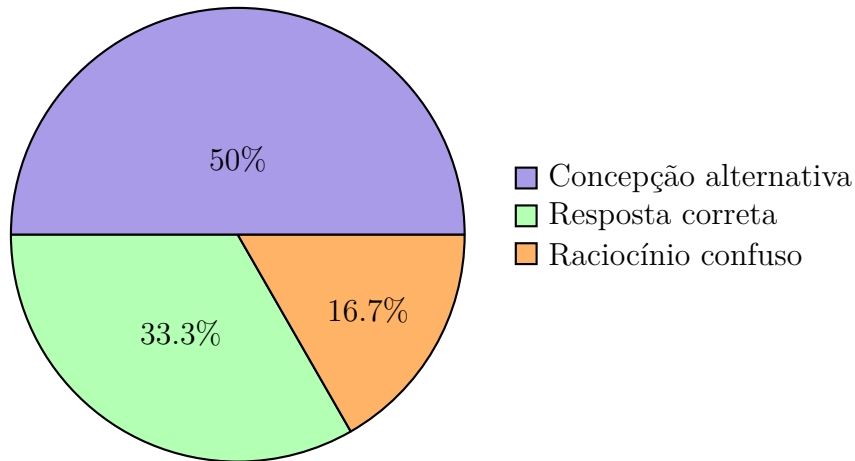
Ao responder a essa questão, os estudantes já possuíam em seu repertório recente a revisão do conceito de sistemas conservativos; logo torna-se tarefa reflexiva e imprescindível a aplicação desse conceito a um sistema real e não ideal. Observa-se uma clara distinção de perspectiva e de assimilação desse conceito. Nas respostas presentes nas Figuras 59 e 60, verifica-se que os estudantes concluem que o motor não é um sistema conservativo. Eles demonstram um entendimento conceitual correto sobre o que define a não conservação, isto é, a dissipação de energia.

Já nas respostas das Figuras 55, 56 e 58 os estudantes concluem que o motor é um sistema conservativo. Percebe-se aqui uma concepção alternativa, na qual os estudantes estabelecem uma relação direta entre a ideia de que “a energia total se conserva no universo” e a definição de sistema mecânico conservativo. O raciocínio empregado é de que “se a energia se transforma, mas não desaparece, então ela se conserva, e o sistema é conservativo”. A resposta presente na Figura 58 é o exemplo mais claro dessa confusão, pois o grupo afirma que o sistema é conservativo e, na mesma frase, justifica com a premissa incorreta de que a transformação ocorre “sem perder energia”, ignorando as perdas evidentes por som e calor. Eles focam no fato de a conversão existir como prova de conservação.

A resposta presente na Figura 57 merece um destaque. O grupo conclui corretamente que o sistema não é conservativo, mas a primeira justificativa que apresenta — “pois não gera atrito” — é, na verdade, um argumento a favor de o sistema ser mais próximo de um sistema conservativo. Em seguida, elaboram uma lista correta de transformações de energia, incluindo as formas dissipadas, o que contradiz sua justificativa inicial sobre a ausência de atrito. Na parte final da resposta, o grupo atribui ao ESC o papel de realizar as transformações de energia do sistema, quando, na verdade, ele funciona como um controlador do fluxo de energia, e a transformação principal ocorre nas bobinas do motor. A

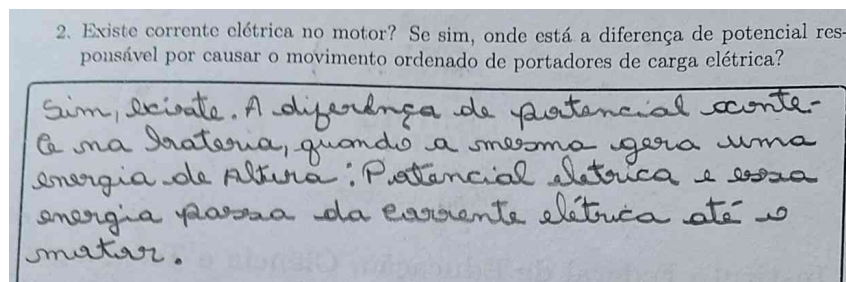
Figura 61, exibe de forma visual, o percentual correspondente a cada categoria analisada nesta amostra.

Figura 61 – Distribuição das concepções dos estudantes sobre sistemas conservativos



4.2.2 Questão 2

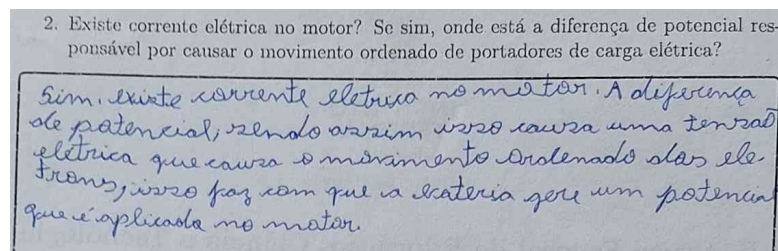
Figura 62 – Resposta 1 à questão 2 da segunda atividade



Fonte: Autor (2025)

TRANSCRIÇÃO: *Sim, existe. A diferença de potencial acontece na bateria, quando a mesma gera uma energia de altura: potencial elétrica e essa energia passa da corrente elétrica até o motor.*

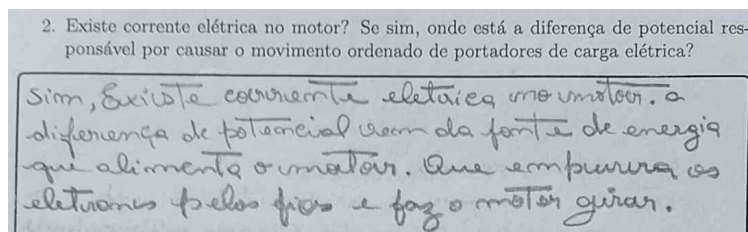
Figura 63 – Resposta 2 à questão 2 da segunda atividade



Fonte: Autor (2025)

TRANSCRIÇÃO: *Sim, existe corrente elétrica no motor. A diferença de potencial, sendo assim isso causa uma tensão elétrica, que causa o movimento ordenado dos elétrons, isso faz com que a bateria gere um potencial que é aplicada no motor.*

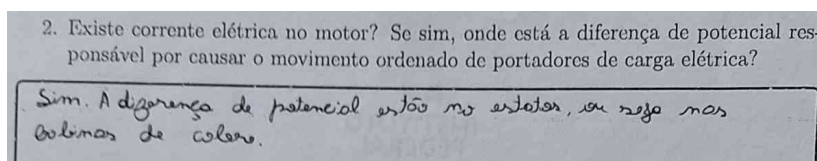
Figura 64 – Resposta 3 à questão 2 da segunda atividade



Fonte: Autor (2025)

TRANSCRIÇÃO: *Sim, existe corrente elétrica no motor. a diferença de potencial vem da fonte de energia que alimenta o motor. Que empurra os elétrons pelos fios e faz o motor girar.*

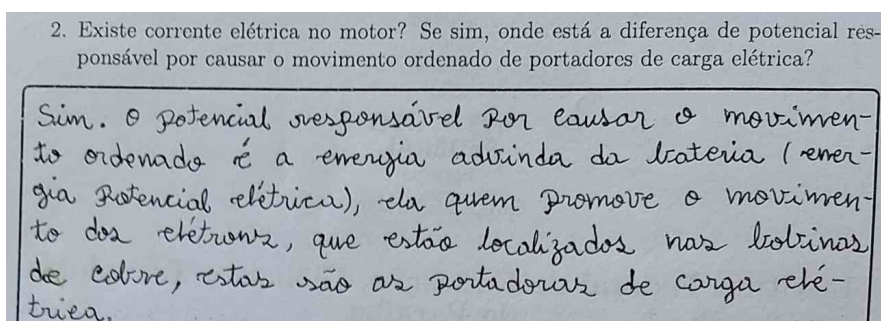
Figura 65 – Resposta 4 à questão 2 da segunda atividade



Fonte: Autor (2025)

TRANSCRIÇÃO: *Sim. A diferença de potencial estão no estator, ou seja nas bobinas de cobre.*

Figura 66 – Resposta 5 à questão 2 da segunda atividade



Fonte: Autor (2025)

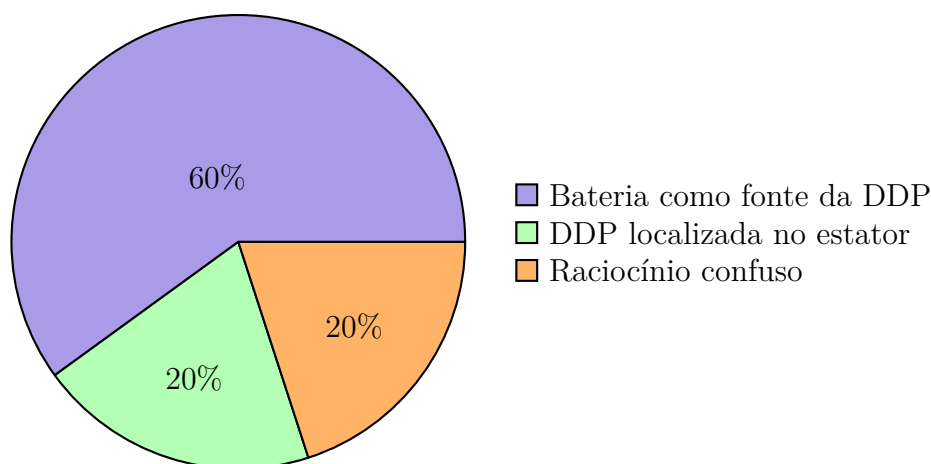
TRANSCRIÇÃO: *Sim. O potencial responsável por causar o movimento ordenado é a energia advinda da bateria (energia potencial elétrica), ela quem promove o movimento dos elétrons, que estão localizados nas bobinas de cobre, estas são as portadoras de carga elétrica.*

As respostas da questão 2 indicam que todos os grupos compreenderam que, para ter o motor funcionando — sendo este, um equipamento eletrônico — é necessária a presença de uma corrente elétrica. Essa reflexão é esperada, considerando as diversas tecnologias com as quais os estudantes têm contato direto no cotidiano. O ponto crucial da análise reside na segunda parte da pergunta: a localização e a natureza da diferença de potencial.

Nas respostas apresentadas nas Figuras 62, 64 e 66, observa-se que os estudantes identificam corretamente a bateria como a origem da diferença de potencial que impulsiona todo o processo. A primeira resposta evidencia que o grupo conseguiu aplicar diretamente uma analogia em relação ao potencial gravitacional que foi discutido durante o momento de revisão nesse mesmo encontro. A abstração conceitual, nesse caso, foi robusta e desejável.

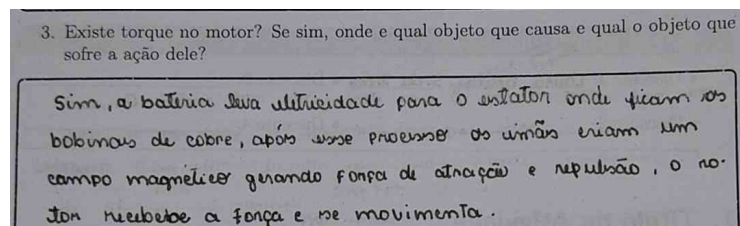
Na resposta 4, identifica-se uma concepção alternativa interessante. O grupo entende que a diferença de potencial está relacionada às bobinas, mas a localiza fisicamente nelas, em vez de vê-la como uma condição aplicada a elas pela bateria. Já na resposta 2, percebe-se tanto um raciocínio circular, quanto uma confusão entre conceitos. O grupo afirma que a “diferença de potencial... causa uma tensão elétrica”. Na prática, esses termos são sinônimos no contexto de um circuito elétrico. Apesar disso, os estudantes atribuem corretamente a relação causal de que a da tensão é responsável pelo movimento “ordenado” dos elétrons. A Figura 67 ilustra graficamente a distribuição percentual das categorias identificadas na análise da amostra.

Figura 67 – Distribuição das concepções dos estudantes sobre a corrente elétrica



4.2.3 Questão 3

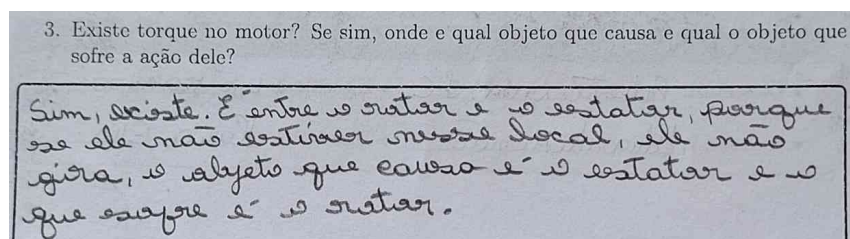
Figura 68 – Resposta 1 à questão 3 da segunda atividade



Fonte: Autor (2025)

TRANSCRIÇÃO: *Sim, a bateria leva eletricidade para o estator onde ficam as bobinas de cobre, após esse processo os ímãs criam um campo magnético gerando força de atração e repulsão, o rotor recebe a força e se movimenta.*

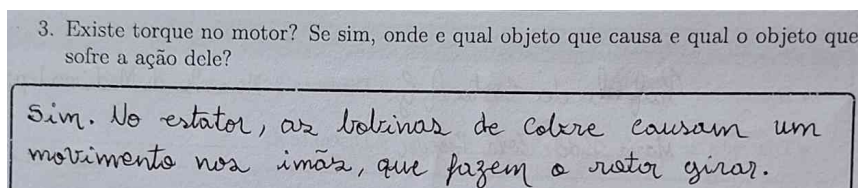
Figura 69 – Resposta 2 à questão 3 da segunda atividade



Fonte: Autor (2025)

TRANSCRIÇÃO: *Sim, existe. É entre o rotor e o estator, porque se ele não estiver nesse local, ele não gira, o objeto que causa é o estator e o que sofre é rotor.*

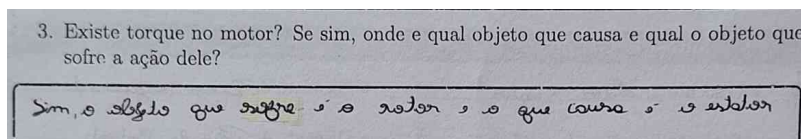
Figura 70 – Resposta 3 à questão 3 da segunda atividade



Fonte: Autor (2025)

TRANSCRIÇÃO: *Sim. No estator, as bobinas de cobre causam um movimento nos ímãs, que fazem o rotor girar.*

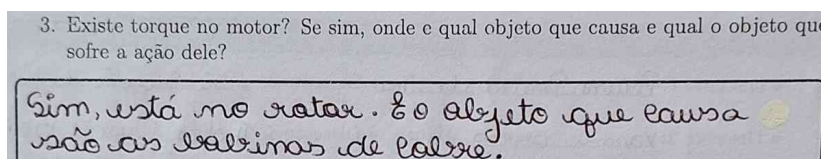
Figura 71 – Resposta 4 à questão 3 da segunda atividade



Fonte: Autor (2025)

TRANSCRIÇÃO: *Sim, o objeto que sofre é o rotor e o que causa é o estator.*

Figura 72 – Resposta 5 à questão 3 da segunda atividade



Fonte: Autor (2025)

TRANSCRIÇÃO: *Sim, está no rotor. E o objeto que causa são as bobinas de cobre.*

Em nossa amostra da questão 3 todos os grupos afirmam que sim, existe torque no motor. A ideia de que, para haver rotação em torno de um eixo fixo, é necessário um torque foi consolidada durante a revisão no mesmo encontro. A riqueza da análise, no entanto, está em como os estudantes identificam o agente causador e o objeto que sofre a ação.

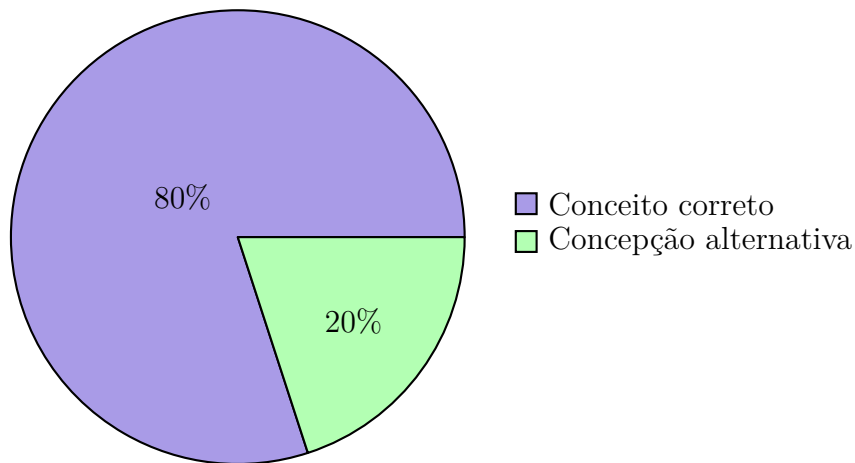
As respostas 2, 4 e 5 demonstram uma compreensão estrutural e funcional do motor. Os termos “causa” e “sofre” utilizados na formulação da pergunta, foram internalizados de maneira satisfatória para descrever a interação. A resposta 5 é particularmente precisa, pois especifica que o agente causador, dentro do estator, são as bobinas de cobre, o componente ativo.

Outra categoria de resposta presente nos textos dos estudantes da questão 3 é o entendimento do torque como consequência da interação eletromagnética. Particularmente, a resposta 3, que consta na Figura 70, articula a cadeia causal de forma clara: as bobinas — no estator — agem sobre os ímãs — no rotor — e essa ação resulta no giro do rotor. O torque está implícito na “causa do movimento” dos ímãs.

Uma resposta que, embora demonstre uma compreensão adequada do torque no motor, traz consigo uma concepção alternativa que merece destaque é a resposta 1 da Figura 68. O trecho “após esse processo os ímãs criam um campo magnético” sugere que o grupo acredita que o campo magnético dos ímãs permanentes é criado ou ativado pelo fluxo de eletricidade nas bobinas. A compreensão de que os ímãs possuem um campo magnético permanente não foi assimilada por esse grupo. Abaixo, segue um gráfico que apresenta de forma quantitativa as concepções identificadas entre os estudantes nesta

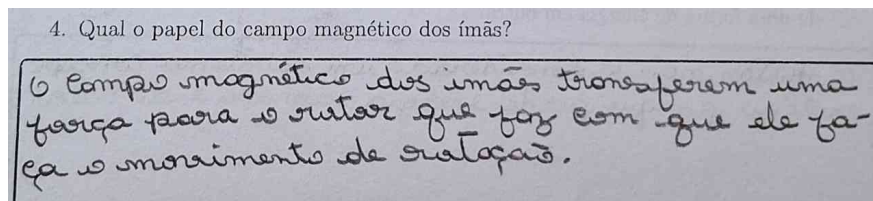
questão.

Figura 73 – Distribuição das concepções dos estudantes sobre o torque no motor



4.2.4 Questão 4

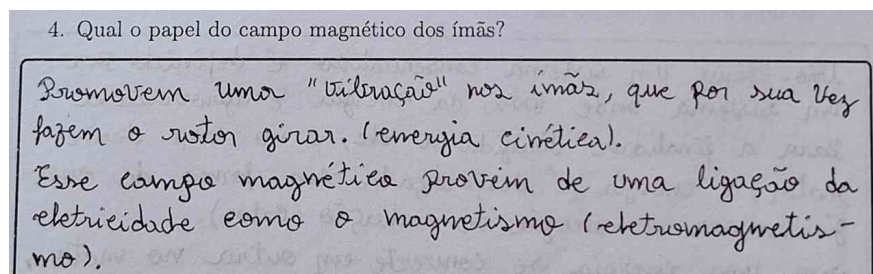
Figura 74 – Resposta 1 à questão 4 da segunda atividade



Fonte: Autor (2025)

TRANSCRIÇÃO: O campo magnético dos ímãs transferem uma força para o rotor que faz com que ele faça o movimento de rotação.

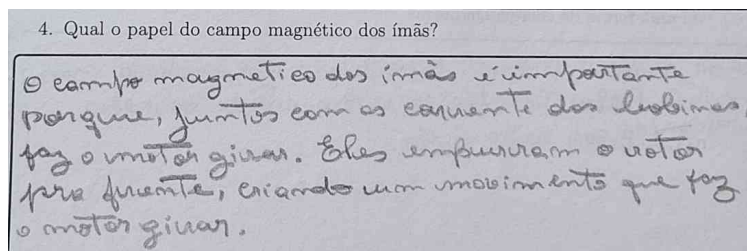
Figura 75 – Resposta 2 à questão 4 da segunda atividade



Fonte: Autor (2025)

TRANSCRIÇÃO: Promovem uma "vibração" nos ímãs, que por sua vez fazem o rotor girar. (energia cinética). Esse campo magnético provém de uma ligação da eletricidade com o magnetismo (eletromagnetismo).

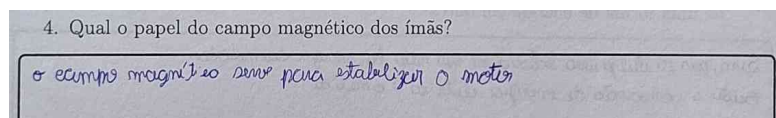
Figura 76 – Resposta 3 à questão 4 da segunda atividade



Fonte: Autor (2025)

TRANSCRIÇÃO: *O campo magnético dos ímãs é importante porque, juntos com as corrente das bobinas, faz o motor girar. Eles empurram o rotor pra frente, criando um movimento que faz o motor girar.*

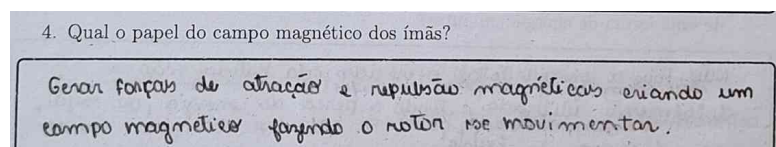
Figura 77 – Resposta 4 à questão 4 da segunda atividade



Fonte: Autor (2025)

TRANSCRIÇÃO: *O campo magnético serve para estabilizar o motor.*

Figura 78 – Resposta 5 à questão 4 da segunda atividade



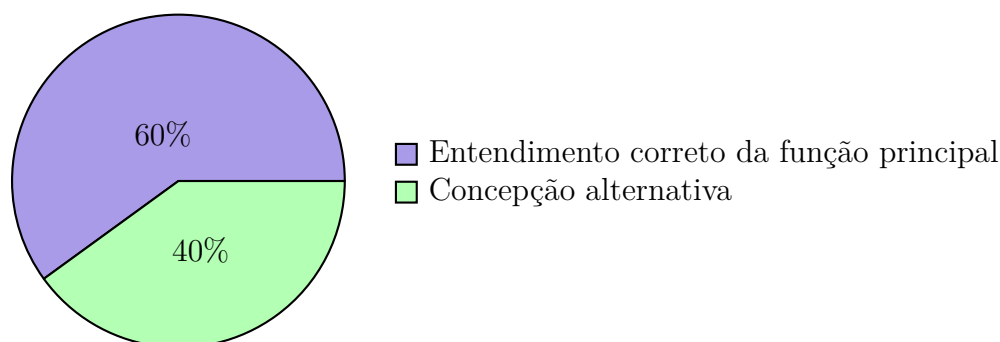
Fonte: Autor (2025)

TRANSCRIÇÃO: *Gerar forças de atração e repulsão magnéticas criando um campo magnético fazendo o rotor se movimentar.*

As repostas para a questão 4 — Qual o papel do campo magnético dos ímãs? — mostram diferentes níveis de profundidade na compreensão do mecanismo de funcionamento do motor, variando entre descrições da interação fundamental e concepções mais vagas ou alternativas. As respostas 1, 3 e 5 identificam corretamente o campo magnético como o agente que, em conjunto com outros elementos, produz a força necessária para a rotação, ou seja, o torque. A resposta 3, particularmente, é a mais completa, pois menciona explicitamente a interação com as “correntes das bobinas”, evidenciando um entendimento do sistema como um todo e usa uma boa analogia ao afirmar que elas “empurram o rotor”.

As respostas 2 e 4 possuem ideias, que embora não totalmente incorretas, usam uma linguagem imprecisa ou recorrem a modelos explicativos alternativos para descrever a função do campo magnético. A resposta 4 atribui ao campo a função de estabilizar, o que não é uma ideia totalmente desprovida de sentido — um campo magnético bem distribuído é crucial para um giro suave e estável — mas omite a função primária e fundamental de gerar o torque. Considera-se a resposta 2 como uma ideia em construção, um dos objetivos desta proposta didática é fazer com que os estudantes construam os conceitos a partir da experiência, e é exatamente o que ocorre nesta resposta. O grupo utiliza a palavra vibração para descrever a rápida sucessão de forças de atração e repulsão que impulsionam o motor. Embora vibração não seja o termo técnico, ele captura a natureza dinâmica do funcionamento do motor *brushless*.

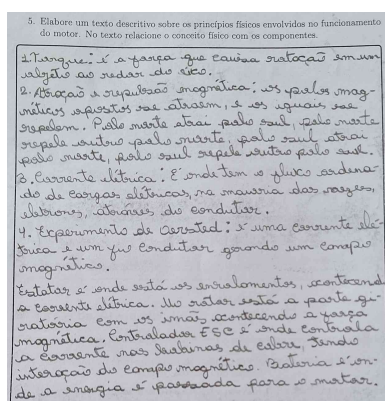
Figura 79 – Distribuição das concepções dos estudantes sobre o papel do campo magnético dos ímãs



A Figura 79 exhibe o comportamento estatístico das concepções dos estudantes nesta questão.

4.2.5 Questão 5

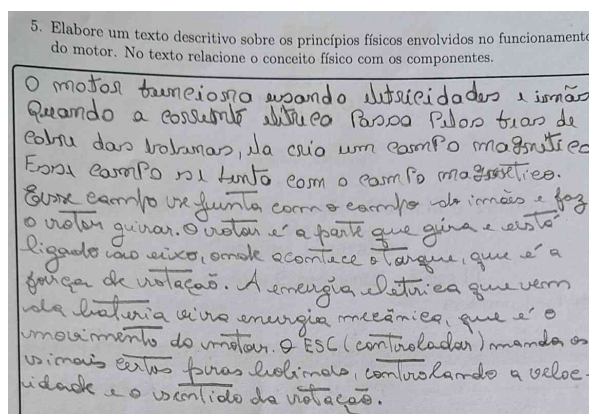
Figura 80 – Resposta 1 à questão 5 da segunda atividade



Fonte: Autor (2025)

TRANSCRIÇÃO: 1. Torque: é a força que causa rotação em um objeto ao redor do eixo. 2. Atração e repulsão magnética: os polos magnéticos opostos se atraem, e os iguais se repelem. Polo norte atrai polo sul, polo norte repele outro polo norte, polo sul atrai polo norte, polo sul repele outro polo sul. 3. Corrente elétrica: É onde tem o fluxo ordenado de cargas elétricas, na maioria das vezes, elétrons, através do condutor. 4. Experimento de Ørsted: é uma corrente elétrica e um fio condutor gerando um campo magnético. Estator é onde está os enrolamentos, acontecendo a corrente elétrica. No rotor está a parte giratória com os ímãs acontecendo a força magnética. Controlador ESC é onde controla a corrente nas bobinas de cobre, tendo interação do campo magnético. Bateria é onde a energia é passada para o motor.

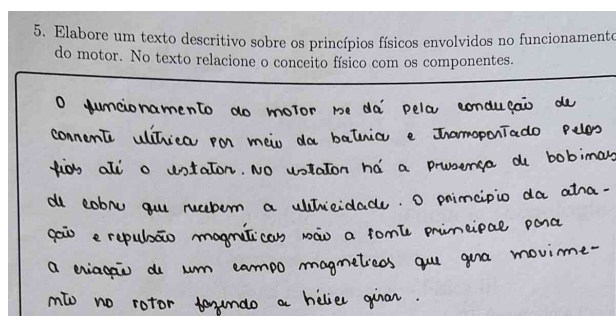
Figura 81 – Resposta 2 à questão 5 da segunda atividade



Fonte: Autor (2025)

TRANSCRIÇÃO: O motor funciona usando eletricidades e ímãs. Quando a corrente elétrica passa pelos fios de cobre das bobinas, ela cria um campo magnético. Esse campo se junta com o campo dos ímãs e faz o rotor girar. O rotor é a parte que gira e está ligado ao eixo, onde acontece o torque, que é a força de rotação. A energia elétrica que vem da bateria vira energia mecânica, que é o movimento do motor. O ESC (controlador) manda os sinais certos para as bobinas, controlando a velocidade e o sentido da rotação.

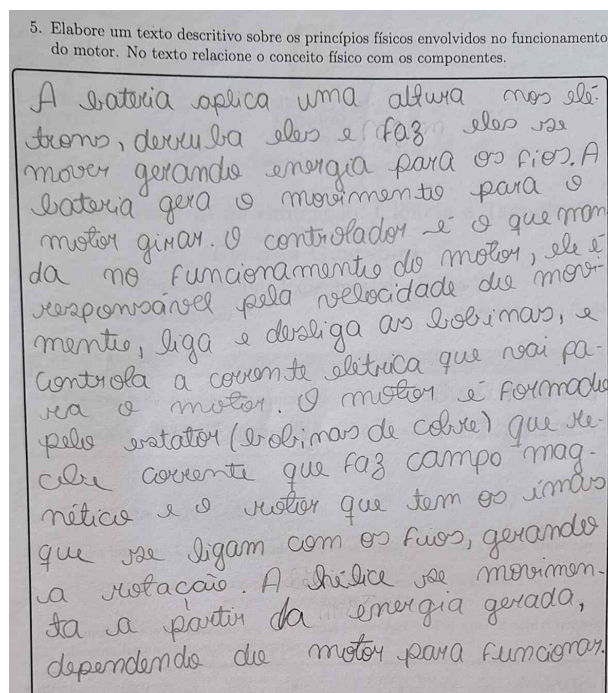
Figura 82 – Resposta 3 à questão 5 da segunda atividade



Fonte: Autor (2025)

TRANSCRIÇÃO: O funcionamento do motor se dá pela condução de corrente elétrica por meio da bateria transportado pelos fios até o estator. No estator há a presença de bobinas de cobre que recebem a eletricidade. O princípio da atração e repulsão magnéticas são a fonte principal para a criação de um campo magnético que gera movimento no rotor fazendo a hélice girar.

Figura 83 – Resposta 4 à questão 5 da segunda atividade



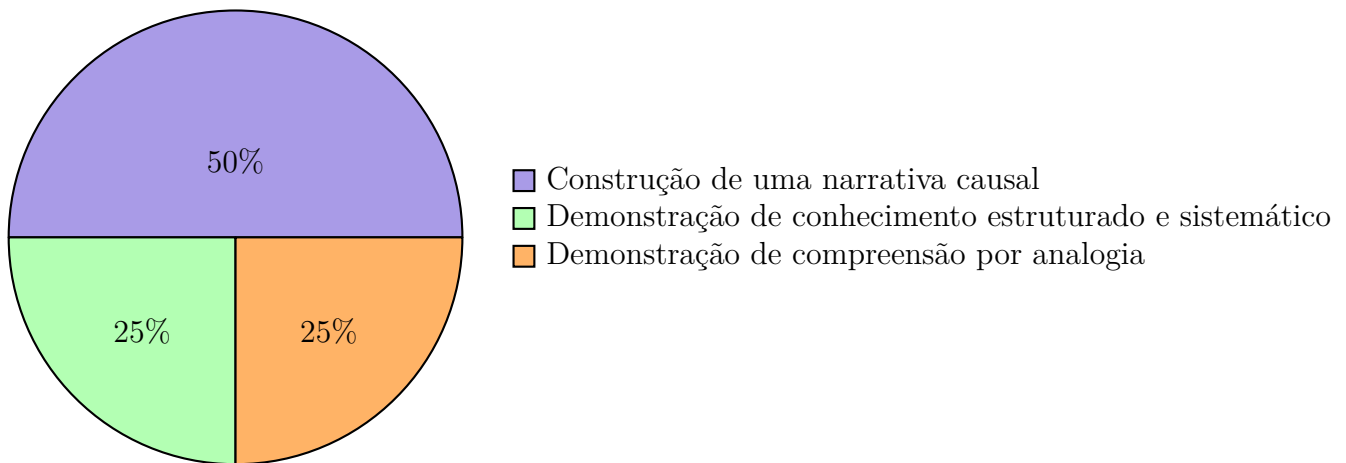
Fonte: Autor (2025)

TRANSCRIÇÃO: A bateria aplica uma altura nos elétrons, derruba eles e faz eles se mover gerando energia para os fios. A bateria gera o movimento para o motor girar. O controlador é o que manda no funcionamento do motor, ele é responsável pela velocidade do movimento, liga e desliga as bobinas, e controla a corrente elétrica que vai para o motor. O motor é formado pelo estator (bobinas de cobre) que recebe corrente que faz campo magnético e o rotor que tem os ímãs que se ligam com os fios, gerando a rotação. A hélice se movimenta a partir da energia gerada, dependendo do motor para funcionar.

A última questão da segunda atividade revela a consolidação do aprendizado, unindo a capacidade de síntese ao entendimento geral básico do funcionamento do motor. Nas respostas das Figuras 81 e 82, os grupos articulam que o funcionamento do motor se deve à interação entre dois campos magnéticos — um criado pela corrente elétrica e outro pelos ímãs permanentes. A resposta 2 é particularmente elaborada tendo em vista o experimento de Ørsted apresentado na revisão, o que evidencia que os estudantes conseguiram, por meio dessa informação prévia estabelecer uma relação com o experimento realizado em sala.

Na resposta 5 verificam-se algumas ideias interessantes sobre os conceitos envolvidos. Primeiro, o grupo relaciona a diferença de potencial à altura em um campo gravitacional, elemento explorado em detalhes na primeira parte do encontro. Em seguida, atribui corretamente ao ESC a função de desligar e ligar as bobinas, que constitui a essência da comutação eletrônica. Já a resposta 1 é um exemplo de pensamento sistemático: o grupo demonstra dominar as definições de cada conceito-chave — torque, leis do magnetismo, corrente elétrica e experimento de Ørsted —, e em seguida, mapeia corretamente onde cada um está envolvido no funcionamento do motor. A Figura 84 mostra as estruturas elaborados pelos modelos explicativos dos estudantes para essa última questão da atividade.

Figura 84 – Estrutura dos modelos explicativos finais dos estudantes



4.3 Respostas da Atividade 3

4.3.1 Questão 1

A questão 1 da terceira e última atividade possui o seguinte enunciado: Dada as grandezas R (distância média entre as bobinas e os ímãs), I (corrente elétrica nas bobinas), B (intensidade do campo magnético gerado pelas bobinas), N (número de ímãs) e L (comprimento dos fios nas bobinas), construa uma equação que forneça a intensidade do torque ($\mathfrak{T}$) sobre os ímãs.

Figura 85 – Resposta 1 à questão 1 da terceira atividade

1. Dada as grandezas R (distância média entre as bobinas e os ímãs), I (corrente elétrica nas bobinas), B (intensidade do campo magnético gerado pelas bobinas), N (número de ímãs) e L (comprimento dos fios nas bobinas), construa uma equação que forneça a intensidade do torque ($\mathfrak{T}$) sobre os ímãs.

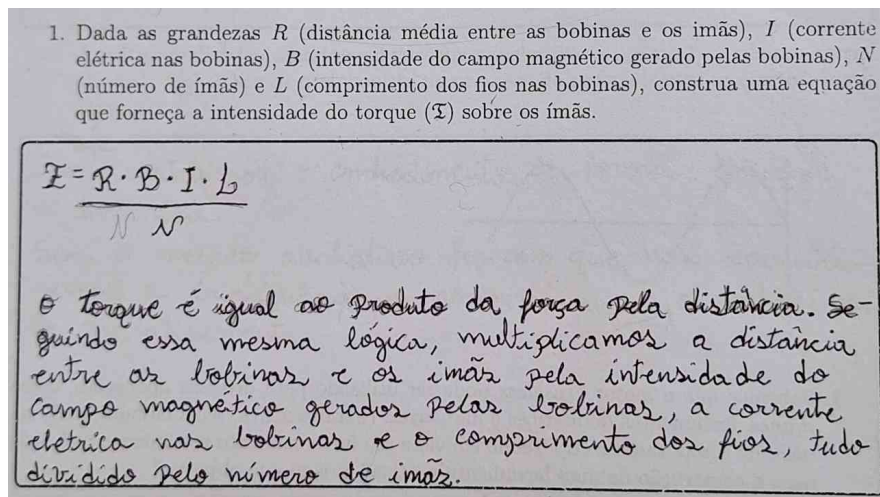
$$\mathfrak{T} = B \cdot L \cdot I$$

Logo, quanto maior o comprimento (L), maior a intensidade (B), então a corrente $R \cdot N$ também fica maior (I). Multiplicamos a distância entre bobinas e ímãs (R) por N e I , logo por ser o mesmo, multiplicamos e dividimos pelo fato de quanto maior a distância, menor seria a intensidade do torque.

Fonte: Autor (2025)

TRANSCRIÇÃO: $\tau = \frac{B \cdot L \cdot I}{R \cdot N}$. Logo, quanto maior o comprimento (L), maior a intensidade (B), então a corrente elétrica também fica maior (I). Multiplicamos a distância entre as bobinas e ímãs (R), porque (N) é o número de ímãs, logo faz sentido ambos serem multiplicados. E dividiu pelo fato de quanto maior a distância, menos será a intensidade do torque.

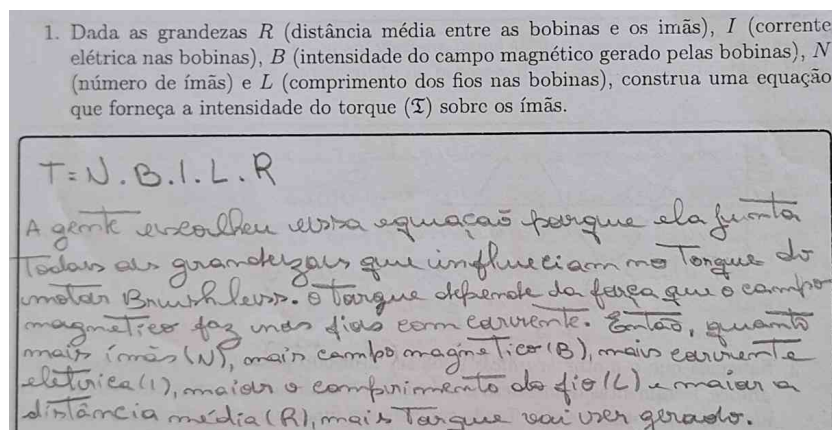
Figura 86 – Resposta 2 à questão 1 da terceira atividade



Fonte: Autor (2025)

TRANSCRIÇÃO: $\tau = \frac{R \cdot B \cdot I \cdot L}{N}$. O torque é igual ao produto da força pela distância. Seguindo essa mesma lógica, multiplicamos a distância entre as bobinas e os ímãs pela intensidade do campo magnético gerados pelas bobinas, a corrente elétricas nas bobinas e o comprimento dos fios, tudo dividido pelo número de ímãs.

Figura 87 – Resposta 3 à questão 1 da terceira atividade

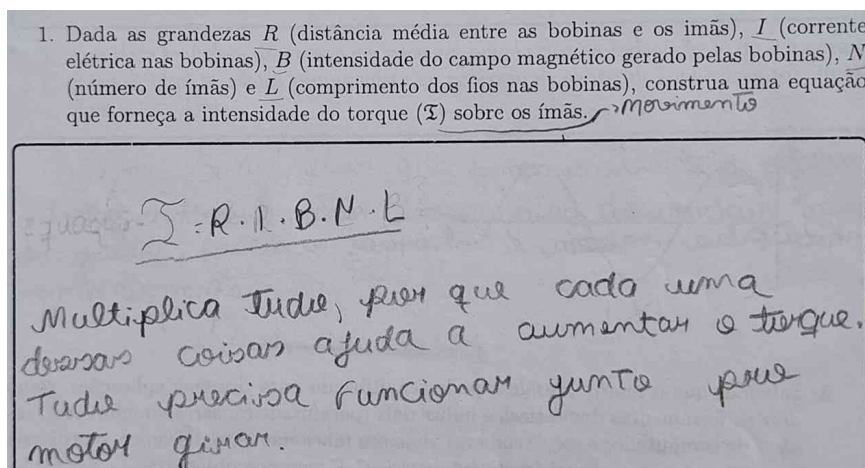


Fonte: Autor (2025)

TRANSCRIÇÃO: $T = N \cdot B \cdot I \cdot L \cdot R$. A gente escolheu essa equação porque ela junta todas as grandezas que influenciam no torque do motor brushless. O torque depende da força que o campo magnético faz nos fios com a corrente. Então quanto mais ímãs (N),

mais campo magnético (B), mais corrente elétrica (I), maior o comprimento do fio (L) e maior a distância média (R), mais torque vai ser gerado.

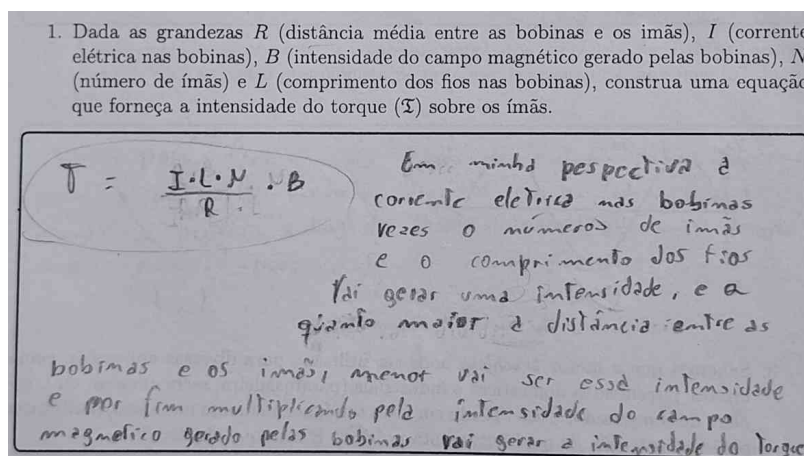
Figura 88 – Resposta 4 à questão 1 da terceira atividade



Fonte: Autor (2025)

TRANSCRIÇÃO: $T = R \cdot I \cdot B \cdot N \cdot L$. Multiplica tudo, por que cada uma dessas coisas ajuda a aumentar o torque. Tudo precisa funcionar junto pro motor girar.

Figura 89 – Resposta 5 à questão 1 da terceira atividade



Fonte: Autor (2025)

TRANSCRIÇÃO: $T = \frac{I \cdot L \cdot N}{R} \cdot B$. Em minha perspectiva a corrente elétrica nas bobinas vezes o número de ímãs e o comprimento dos fios vai gerar uma intensidade, e quanto maior a distância entre as bobinas e os ímãs, menor vai ser a intensidade e por fim multiplicando pela intensidade do campo magnético gerado pelas bobinas vai gerar intensidade do torque.

O objetivo dessa questão é analisar como os estudantes pensam a respeito das relações de proporcionalidade, sejam elas diretas ou inversas. As grandezas envolvidas

não formam a equação completa do ponto de vista da engenharia de motores elétricos, uma vez que, os aspectos da eletrônica foram omitidos; conseqüentemente, a expressão mais próxima da realidade é mais complexa do que aquela que se pode obter com essas grandezas. Como já foi mencionado neste trabalho, uma equação que respeita a dimensionalidade do torque é dada pelo produto entre todas as grandezas envolvidas. Assim, busca-se compreender quais motivações levaram os estudantes a formular respostas que se afastam desse modelo.

Ao analisar as respostas, nota-se que as de número 3 e 4 seguem essa linha de obter a expressão do torque por meio do produto entre as grandezas apresentadas. Essa categoria de resposta mostra que os estudantes partem da premissa de que todas as grandezas listadas contribuem positivamente para o torque e, portanto, devem ser multiplicadas.

Nas respostas 1 e 5, observa-se uma tentativa de criar um modelo mais complexo, ou mesmo uma intuição equivocada, sobre os conceitos estudados anteriormente. A justificativa de que o torque diminui com a distância parece resultar de uma confusão com o conceito de intensidade de campo, que de fato decresce com a distância. A resposta 1 ainda inclui o número de ímãs no denominador junto com a distância, o que indica uma confusão conceitual maior que a observada na resposta 5, sendo esta relativamente mais difícil de justificar.

A resposta 2 pode ser agrupada em uma categoria intermediária, representando um modelo híbrido com estrutura confusa. O grupo inicia corretamente ao definir o torque como o produto entre força e distância; no entanto, ao montar a equação, coloca o número de ímãs no denominador, sem apresentar uma justificativa clara para essa divisão. Isso sugere uma tentativa de completar a fórmula sem possuir um modelo conceitual bem definido sobre o papel de N . Uma possível explicação seria a ideia de que o torque total exercido seria distribuído uniformemente entre os ímãs. A Figura 90 ilustra a predominância de modelos matemáticos que apresentam alguma relação inversa entre as grandezas.

4.3.2 Questão 2

A questão 2 da terceira atividade (Figura 19) tem como objetivo estabelecer uma relação direta visual entre o gráfico apresentado da tensão *Back-EMF* e os gráficos de funções elementares. A tensão *Back-EMF* surge pelo fato dos ímãs estarem em rotação e isso induz nas bobinas uma força eletromotriz que se opõe à tensão de alimentação. Esse aspecto não foi explorado nas aulas; contudo, não foi abordado nas aulas; portanto, a questão tem caráter puramente de reconhecimento de padrões. A seguir, apresentamos uma tabela contendo as respostas dos estudantes.

O percentual de 90% mostra que a grande maioria dos grupos conseguiu estabelecer

Figura 90 – Estrutura das equações do torque criadas pelos estudantes

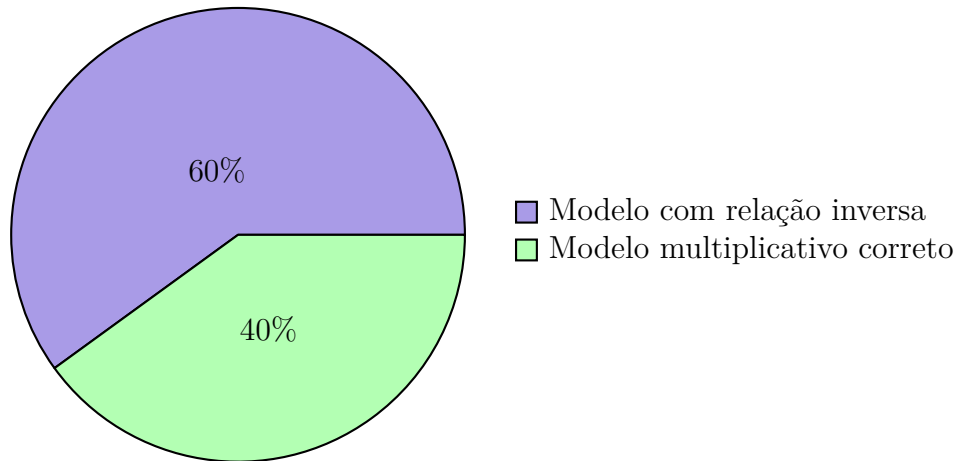


Tabela 5 – Percentual correspondente a cada alternativa marcada na questão 2

Alternativa	Quantidade	Percentual
Gráfico de $f(x) = x$	0	0%
Gráfico de $f(x) = \ln(x)$	1	10%
Gráfico de $f(x) = \sin(x)$	9	90%
Gráfico de $f(x) = x^2$	0	0%

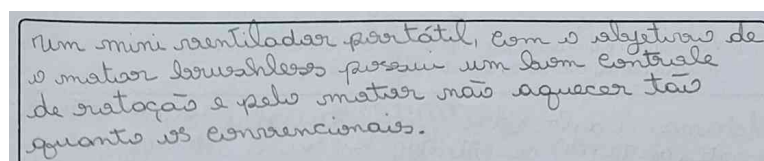
Fonte: Autor (2025)

uma associação direta entre o gráfico da tensão *Back-EMF* e o gráfico da função seno. Uma alternativa possível para essa questão também seria questionar sobre a diferença entre os gráficos das fases, já que o motor *brushless* é um motor trifásico e, portanto, apresenta uma defasagem entre elas, o que é visível no gráfico.

4.3.3 Questão 3

A questão 3 da terceira atividade possui o seguinte enunciado: “Sabemos que o motor *brushless* pode ser utilizado para diversas aplicações, como *drones*, ferramentas domésticas e industriais (parafusadeira, serra circular, etc), *coolers* de computador e etc. Tendo em vista seu funcionamento mecânico, o utilizaria para a construção de qual ferramenta prática? E com que objetivo?”

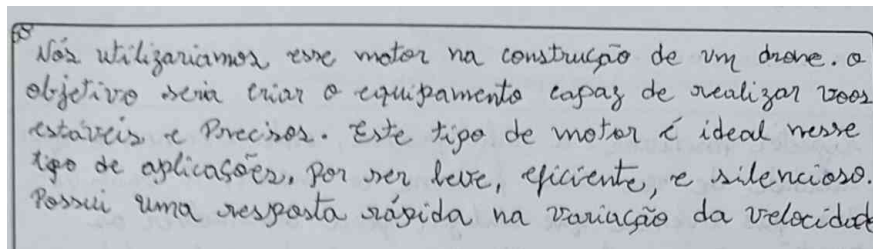
Figura 91 – Resposta 1 à questão 3 da terceira atividade



Fonte: Autor (2025)

TRANSCRIÇÃO: *Um mini ventilador portátil, com o objetivo de o motor brushless possui um bom controle de rotação e pelo motor não aquecer tão quanto os convencionais.*

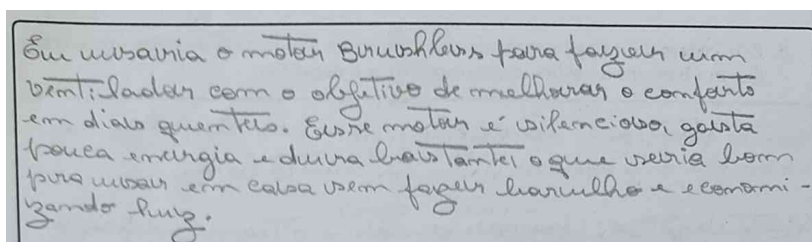
Figura 92 – Resposta 2 à questão 3 da terceira atividade



Fonte: Autor (2025)

TRANSCRIÇÃO: *Nós utilizaríamos esse motor na construção de um drone. O objetivo seria criar o equipamento capaz de realizar voos estáveis e precisos. Este tipo de motor é ideal nesse tipo de aplicações, por ser leve, eficiente e silencioso. Possui uma resposta rápida na variação da velocidade.*

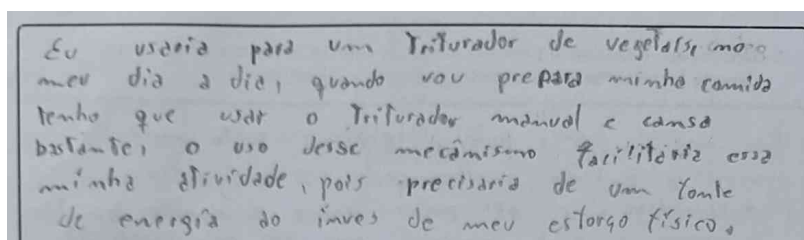
Figura 93 – Resposta 3 à questão 3 da terceira atividade



Fonte: Autor (2025)

TRANSCRIÇÃO: *Eu usaria o motor brushless para fazer um ventilador com o objetivo de melhorar o conforto em dias quentes. Esse motor é silencioso, gasta pouca energia e dura bastante, o que seria bom para usar em casa sem fazer barulho e economizar luz.*

Figura 94 – Resposta 4 à questão 3 da terceira atividade

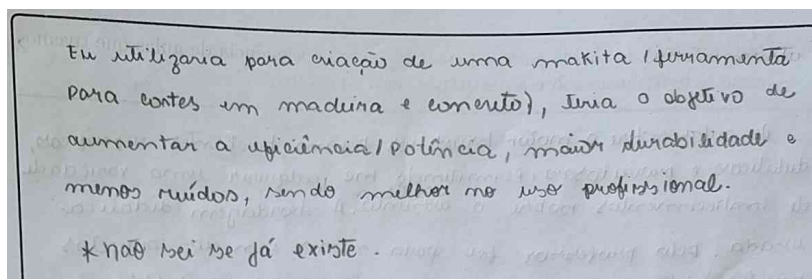


Fonte: Autor (2025)

TRANSCRIÇÃO: *Eu usaria para um triturador de vegetais, no meu dia a dia, quando vou prepara minha comida tenho que usar o triturador manual e cansa bastante, o uso*

desse mecanismo facilitaria essa minha atividade, pois precisaria de uma fonte de energia ao invés de meu esforço físico.

Figura 95 – Resposta 5 à questão 3 da terceira atividade



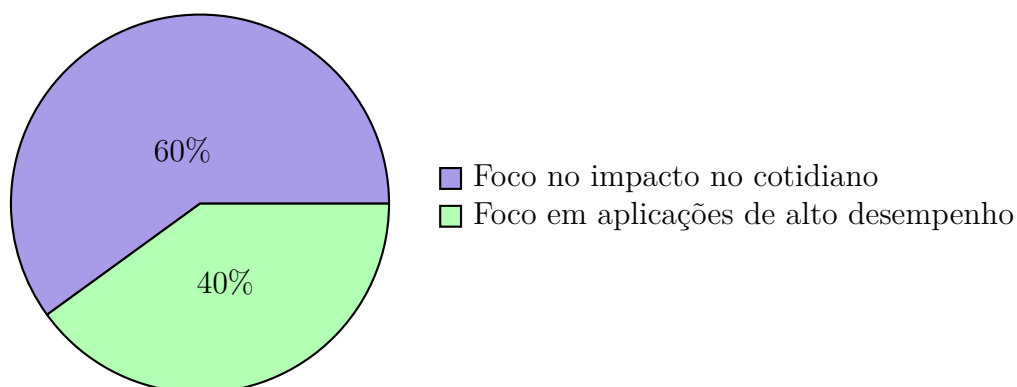
Fonte: Autor (2025)

TRANSCRIÇÃO: *Eu utilizaria para criação de uma makita/ferramenta para cortes em madeira e concreto, teria o objetivo de aumentar a eficiência/potência, maior durabilidade e menos ruídos, sendo melhor no uso profissional. *não sei se já existe.*

A questão 3 visa entender o lado criativo e inovador dos estudantes em relação à utilização de tecnologias, em especial o uso do motor *brushless*. As respostas 1, 3 e 4 são aplicações que visam o conforto no cotidiano, utilizando o motor para substituir tarefas manuais. Nelas podemos identificar as principais vantagens de se utilizar esse tipo de motor em relação aos motores convencionais com escovas, ou seja, eficiência energética, menor ruído, durabilidade, controle preciso e baixa geração de calor.

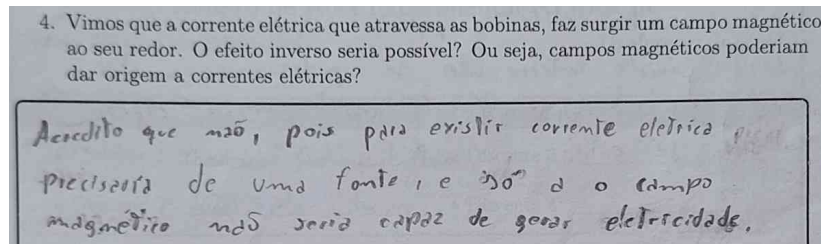
As respostas 2 e 5, por sua vez, enfatizam a performance e precisão nas aplicações práticas. As escolhas foram na utilização em *drones* e em ferramenta de corte como uma serra mármore. A resposta 2 destacou com precisão as características que tornam os motores *brushless* a opção padrão para *drones* — leveza, eficiência, baixo ruído, e resposta rápida na variação de velocidade. O gráfico da Figura 96, apresentado a seguir, exhibe de forma quantitativa os dados discutidos acima.

Figura 96 – Aplicações práticas propostas para o motor *brushless*



4.3.4 Questão 4

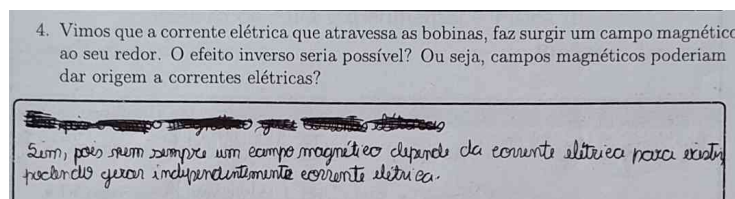
Figura 97 – Resposta 1 à questão 4 da terceira atividade



Fonte: Autor (2025)

TRANSCRIÇÃO: *Acredito que não, pois para existir corrente elétrica precisaria de uma fonte, e só o campo magnético não seria capaz de gerar eletricidade.*

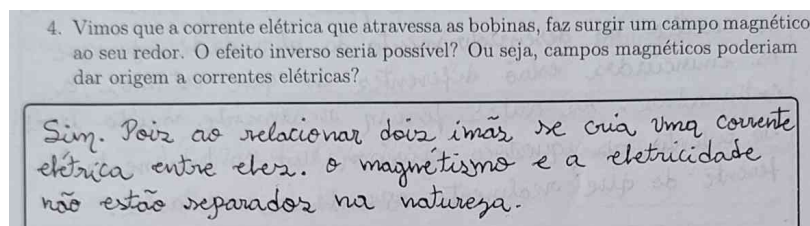
Figura 98 – Resposta 2 à questão 4 da terceira atividade



Fonte: Autor (2025)

TRANSCRIÇÃO: *Sim, pois nem sempre um campo magnético depende da corrente elétrica para existir, podendo gerar independentemente corrente elétrica.*

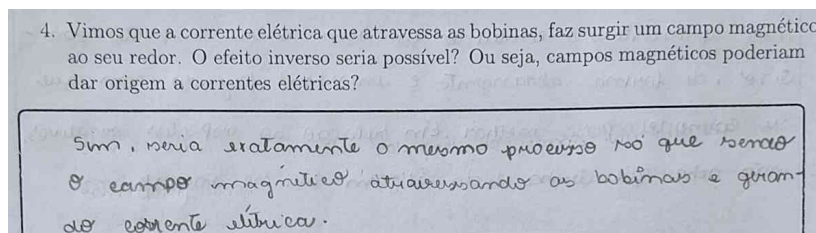
Figura 99 – Resposta 3 à questão 4 da terceira atividade



Fonte: Autor (2025)

TRANSCRIÇÃO: *Sim. Pois ao relacionar dois ímãs se cria uma corrente elétrica entre eles. O magnetismo e a eletricidade não estão separados na natureza.*

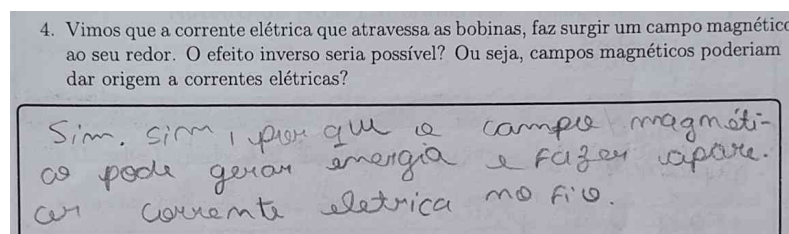
Figura 100 – Resposta 4 à questão 4 da terceira atividade



Fonte: Autor (2025)

TRANSCRIÇÃO: *Sim, seria exatamente o mesmo processo só que sendo o campo magnético atravessando as bobinas e gerando corrente elétrica.*

Figura 101 – Resposta 5 à questão 4 da terceira atividade



Fonte: Autor (2025)

TRANSCRIÇÃO: *Sim, sim, por que o campo magnético pode gerar energia e fazer aparecer corrente elétrica no fio.*

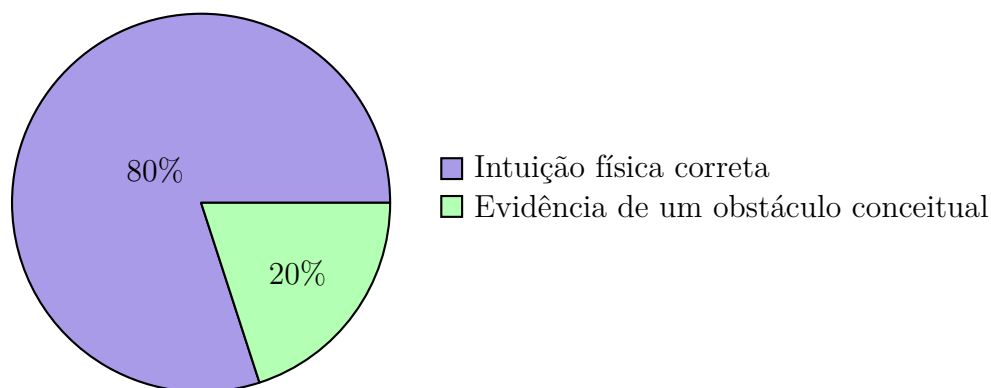
Os estudantes não haviam tido nenhum contato formal com o fenômeno da indução eletromagnética, portanto, essa pergunta teve como objetivo verificar como eles constroem hipóteses com base nos conhecimentos que já possuem e retirar se simetrias fazem parte de seus modelos mentais. A primeira categoria de resposta identificada é a de raciocínio por simetria e inversão, ou seja, se A gera B, consequentemente B gera A. Observa-se a predominância dessa visão nas respostas 4 e 5.

Em seguida, temos as respostas que se enquadram na categoria de unificação entre eletricidade e magnetismo. A resposta 3, embora contenha uma imprecisão — “ao relacionar dois ímãs se cria uma corrente” — chega à conclusão correta com base em uma premissa fundamental: a de que a eletricidade e o magnetismo não estão separados na natureza. A resposta 2 enfatiza que um campo magnético pode, independentemente, gerar corrente elétrica. Com o conhecimento do fenômeno da indução essa resposta se tornaria mais completa, tendo em vista que são campos magnéticos variantes no tempo que produzem correntes elétricas.

A resposta 1 pode ser compreendida dentro da categoria de modelo da fonte necessária. O grupo demonstra a visão de que, para haver corrente elétrica é indispensável uma fonte de tensão, como uma bateria ou uma tomada. Nesse caso, o campo magnético

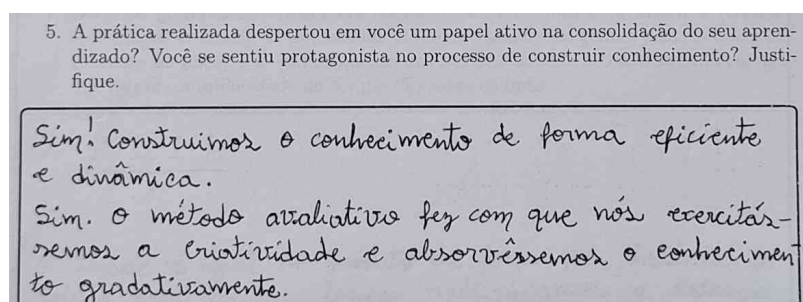
é visto como um efeito, e não como uma causa potencial para uma corrente elétrica, o que impede o que impede os estudantes de imaginarem uma nova forma de gerá-la. Dessa forma, o gráfico abaixo (Figura 102) mostra que a maioria dos estudantes apresentam uma intuição física correta sobre a existência de uma simetria entre eletricidade e magnetismo.

Figura 102 – Análise da simetria entre a eletricidade e o magnetismo



4.3.5 Questão 5

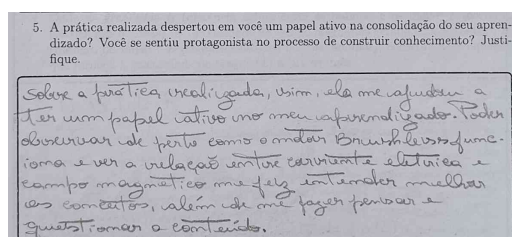
Figura 103 – Resposta 1 à questão 5 da terceira atividade



Fonte: Autor (2025)

TRANSCRIÇÃO: *Sim! Construímos o conhecimento de forma eficiente e dinâmica. Sim. O método avaliativo fez com que nós exercitássemos a criatividade e absorvêssemos o conhecimento gradativamente.*

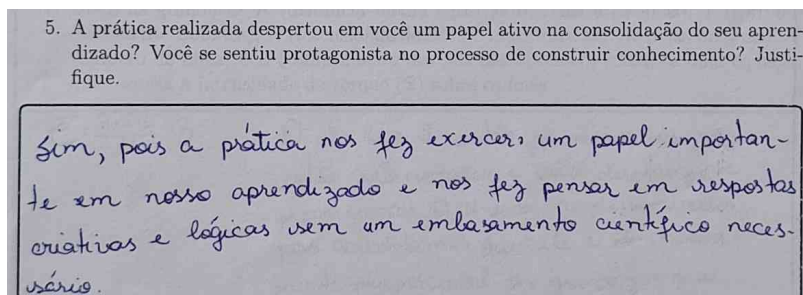
Figura 104 – Resposta 2 à questão 5 da terceira atividade



Fonte: Autor (2025)

TRANSCRIÇÃO: *Sobre a prática realizada, sim, ela me ajudou a ter um papel ativo no meu aprendizado. Poder observar de perto como o motor brushless funciona e ver a relação entre corrente elétrica e campo magnético me fez entender melhor os conceitos, além de me fazer pensar e questionar o conteúdo.*

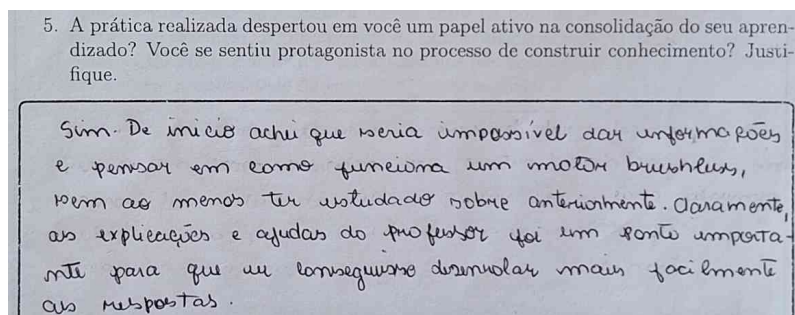
Figura 105 – Resposta 3 à questão 5 da terceira atividade



Fonte: Autor (2025)

TRANSCRIÇÃO: *Sim, pois a prática nos fez exercer um papel importante em nosso aprendizado e nos fez pensar em respostas criativas e lógicas sem um embasamento científico necessário.*

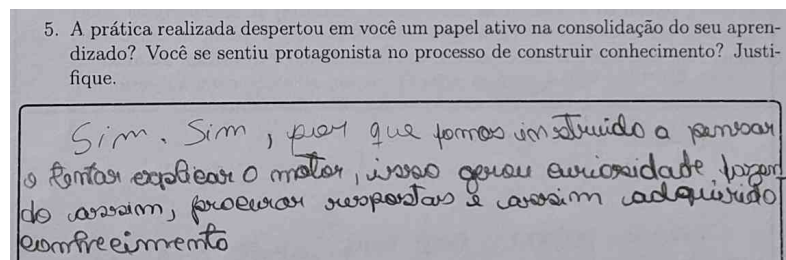
Figura 106 – Resposta 4 à questão 5 da terceira atividade



Fonte: Autor (2025)

TRANSCRIÇÃO: *Sim. De início achei seria impossível dar informações e pensar em como funciona um motor brushless, sem ao menos ter estudado sobre anteriormente. Claramente, as explicações e ajudas do professor foi um ponto importante para que eu conseguisse desenvolver mais facilmente as respostas.*

Figura 107 – Resposta 5 à questão 5 da terceira atividade



Fonte: Autor (2025)

TRANSCRIÇÃO: *Sim. Sim, por que fomos instruído a pensar e tentar explicar o motor, isso gerou curiosidade fazendo assim, procurar respostas e assim adquirido conhecimento.*

A terceira e última atividade se encerra com uma questão que busca identificar quais percepções os estudantes tiveram acerca de toda a prática experimental com o motor *brushless*. As respostas afirmativas sobre sentimento de protagonismo no processo de aprendizagem e suas justificativas fornecem evidências diretas da implementação bem-sucedida dos princípios da aprendizagem por descoberta, proposta por Bruner.

Uma das principais características da teoria de Bruner é que o aprendizado é um processo ativo, no qual o estudante constrói seu próprio conhecimento, em vez de recebê-lo passivamente. As respostas 1, 2 e 3 seguem nessa linha, quando o grupo diz “ela me ajudou a ter um papel ativo” ou “nós construímos o conhecimento”, é porque eles se veem como agentes, ou seja, como os protagonistas do processo. A afirmação de que a prática os fez “pensar e questionar” é a descrição exata do estudante engajado em um processo de descoberta, em oposição a um processo de memorização.

Para Bruner, a aprendizagem por descoberta é naturalmente motivadora. Em vez de aprender para passar em uma prova escrita, utilizando procedimentos puramente mecânicos, o estudante aprende para satisfazer sua própria curiosidade e resolver um problema. A resposta 5 é um exemplo disso, este grupo não viu a atividade como uma tarefa a ser cumprida, mas como um gatilho para a sua própria investigação intelectual. Em partes, podemos dividir essa resposta em algumas categorias alinhadas com a teoria de Bruner. O grupo identificou o desafio, que era pensar e tentar explicar o motor, isso gerou curiosidade; em seguida sentiram-se motivados a buscar as respostas, e o resultado foi o conhecimento adquirido.

A resposta 4 versa sobre o papel do professor nesse processo de descoberta. Para Bruner, esse processo precisa ser guiado; ou seja, o professor atua como um mediador, fornecendo o suporte necessário para que o estudante construa seu próprio conhecimento. A frase inicial “achei que seria impossível”, mostra uma ansiedade inicial diante do desafio e o que representa um risco dentro da aprendizagem por descoberta. No entanto, o grupo

reconhece que não estava desamparado; o suporte do professor foi o “andaime” que lhe deu segurança e ferramentas para, então, construir seu próprio caminho no conhecimento do funcionamento do motor *brushless*.

Considerando os objetivos iniciais da sequência didática e os resultados discutidos ao longo deste capítulo, entende-se que a aplicação logrou êxito didático e pedagógico. Constata-se, a partir das respostas dos estudantes, que a atividade conseguiu estimular a reflexão crítica a cerca de fenômenos que, muitas vezes, carecem de uma base sólida de técnicas para a sua plena compreensão, sendo possível enxergar um prelúdio para a aquisição de conhecimentos futuros, como o da indução eletromagnética, o que demonstra que uma base sólida foi construída.

Outro aspecto importante a ser mencionado é o pano de fundo filosófico e epistemológico da aplicação da sequência didática. Embora pouco explorado, esse aspecto constitui uma forma de pensar sobre a natureza: termos como “causa”, “conhecer a realidade” ou “entender o funcionamento” revelam o caráter realista das teorias físicas, em detrimento de uma visão antirrealista. Considerando as discussões contemporâneas sobre esse tema, tornou-se necessário explicitar aos estudantes a perspectiva filosófica que orientou a sequência didática o que também foi realizado de modo satisfatório.

5 Conclusão

Este trabalho teve como objetivo desenvolver e aplicar uma sequência didática de cunho investigativa voltada à introdução de conceitos fundamentais da teoria eletromagnética de Maxwell, utilizando um motor *brushless* como articulador entre teoria e prática. A proposta aqui apresentada buscou reduzir a distância existente entre a experiência estudantil cotidiana e os conceitos abstratos de campo magnético, corrente elétrica em fios condutores e interação entre magnetismo e eletricidade, oferecendo uma alternativa didático-pedagógica que favorecesse a compreensão conceitual por meio da experimentação, da modelagem e da construção ativa do conhecimento.

A utilização do motor *brushless* promoveu um ambiente propício para introduzir, de forma integrada, conceitos como torque, conservação da energia, campo magnético de ímãs, campos produzidos por correntes elétricas e a relação intrínseca entre eletricidade e magnetismo revelada pelo experimento de Ørsted em 1820. A sequência didática possibilitou aos estudantes avançar gradualmente da observação empírica do funcionamento do motor para a elaboração de modelos explicativos próprios, aprimorando suas descrições à medida que recebiam novas informações e revisavam conhecimentos prévios. Esse processo caracteriza precisamente o modelo hipotético defendido por Jerome Bruner, que orientou a base pedagógica da pesquisa e proporcionou uma imersão significativa no processo de fazer ciência.

A análise das respostas dos estudantes permitiu constatar uma evolução expressiva nas suas representações a cerca dos fenômenos investigados. Inicialmente o cenário era de concepções fragmentadas e intuitivas que se mostravam confusas. Ao longo das atividades, porém, os estudantes passaram a articular conceitos com maior coerência, fundamentando suas explicações em princípios físicos e propondo modelos progressivamente mais próximos daqueles considerados cientificamente formais. Esse avanço ficou evidente nas categorias de análise desenvolvidas a partir da técnica de Análise de Conteúdo, que revelou aumento na consistência, justificativa da abrangência das respostas.

Ao utilizar a perspectiva filosófica e epistemológica do realismo de Mário Bunge para fundamentar o escopo deste trabalho, deixou-se claro para os estudantes que os modelos são idealizações que representam entidades reais, e não meras convenções instrumentais. Essa postura se refletiu na prática: ao longo das atividades, os estudantes foram progressivamente construindo objetos-modelo como a relação entre campo magnético e corrente que, embora simplificados, mantinham compromisso com a realidade do funcionamento do motor. Assim, foram expostos a uma compreensão do fazer científico que envolve abstração, idealização, experimentação e compromisso com a realidade obje-

tiva, aspecto particularmente relevante diante das transformações provocadas pela teoria quântica no século XX.

Reconhecendo as limitações inerentes a um estudo qualitativo conduzido em uma única turma, apontam-se como desdobramentos possíveis: (i) a aplicação da sequência em outras turmas e instituições, de modo a ampliar a base de evidências e permitir análises comparativas; (ii) a expansão da proposta para incluir fenômenos como indução eletromagnética, força de Lorentz e correntes de Foucault; (iii) o desenvolvimento de materiais complementares que permitam ao professor integrar simulações computacionais, modelagem matemática e experimentação física; e (iv) a investigação mais aprofundada do impacto da abordagem realista na formação conceitual em Física dos estudantes — este último, de grande interesse pessoal.

Em síntese, conclui-se que, no contexto investigado, a utilização do motor *brushless* mostrou-se promissora como prática experimental no ensino e aprendizagem de conceitos de eletromagnetismo, com indícios consistentes de avanço conceitual evidenciados pela Análise de Conteúdo das respostas dos estudantes. Os resultados valorizam a construção ativa do conhecimento e a integração entre perspectivas teóricas, pedagógicas e epistemológicas do ensino de ciências. Por tratar-se de um estudo qualitativo e situado, a força dos achados reside não na generalização estatística, mas na replicabilidade da sequência didática — que constitui o produto educacional deste trabalho — e na possibilidade de sua aplicação em outros contextos. Espera-se que este trabalho contribua para a ampliação de abordagens investigativas no ensino de Física e incentive novas práticas que aproximem os estudantes da natureza experimental e da elaboração de modelos científicos.

Referências

- ACEVEDO, O.; PIMENTEL, B. Teoremas de n  ther: um estudo. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, SciELO Brasil, v. 45, p. e20230091, 2023.
- ALVES, T. M. de L. *Eletromagnetismo Clássico*. Natal: Editora IFRN, 2023. v. 1.
- APROVA TOTAL. *Física no Enem 2025: os assuntos que mais caem na prova*. 2025. Acessado em: 05 jun. 2025. Disponível em: <<https://aprovatotal.com.br/assuntos-fisica-enem/>>.
- ASHWORTH, W. *Scientist of the Day - Julius Robert von Mayer*. 2023. Acessado em: 2 fev. 2025. Disponível em: <<https://www.lindahall.org/about/news/scientist-of-the-day/julius-robert-von-mayer/#:~:text=and%20this%20one%20was%20published%2C,which%20we%20now%20call%20energy>>.
- BASSALO, J. M. F.; CARUSO, F.; MARQUES, A. J. *Introdu  o às bases filosóficas da Física: uma abordagem histórica*. 1. ed. São Paulo: Livraria da Física, 2021.
- BATISTA, C. *Um Curso de Mecânica Clássica*. São Paulo: Editora Blucher, 2023.
- BAUER, M. W.; GASKELL, G. *Pesquisa qualitativa com texto, imagem e som: um manual prático*. [S.l.]: Editora Vozes Limitada, 2017.
- BAUM, W. M. *Compreender o Behaviorismo - Comportamento, Cultura e Evolu  o*. [S.l.]: Artmed Editora, 2018.
- BORBA, F. I. M. de O.; GOI, M. E. J. Jerome bruner nos processos de aprender e ensinar ciências. *Research, Society and Development*, v. 10, n. 1, p. e1521019508–e1521019508, 2021.
- BRASIL. *Parâmetros Curriculares Nacionais: Ensino Médio Física*. Brasília: Ministério da Educa  o, 2000.
- BRASIL. *Base Nacional Comum Curricular*. Brasília: Ministério da Educa  o, 2018.
- BRUNER, J. S. *The process of education*. [S.l.]: Harvard university press, 2009.
- BUCUSSI, A. A. Introdu  o ao conceito de energia. *Porto Alegre: UFRGS, Instituto de Física, Programa de Pós-Gradua  o em Ensino de Física*, p. 23, 2007.
- BUNGE, M. *Em defesa do realismo e do cientificismo*. 2015. Acesso em: 12 fev. 2025. Disponível em: <<https://universoracionalista.org/em-defesa-do-realismo-e-do-cientificismo/>>.
- CABRERA, B. First results from a superconductive detector for moving magnetic monopoles. *Physical Review Letters*, APS, v. 48, n. 20, p. 1378, 1982.
- CAREGNATO, R. C. A.; MUTTI, R. Pesquisa qualitativa: análise de discurso versus análise de conteúdo. *Texto & Contexto-Enfermagem*, SciELO Brasil, v. 15, p. 679–684, 2006.

- COMMONS, W. *File:Oersted experiment.png*. 2013. <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Oersted_experiment.png>. Acesso em: 12 fev. 2025.
- DARTORA, C. A. *O Teorema de Poynting e Conservação da Energia*. s.d. Notas de aula, slides do curso TE053 - Ondas Eletromagnéticas. Acesso em: 11 fev. 2025. Disponível em: <https://www.eletrica.ufpr.br/cadartora/Documentos/TE053/04-Teorema_de_Poynting.pdf>.
- DIAS, P. M. C.; MORAIS, R. F. Os fundamentos mecânicos do eletromagnetismo. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, SciELO Brasil, v. 36, p. 1–14, 2014.
- DIAS, V. H. A.; DIAS, P. M. C. Escrevendo o livro da natureza na linguagem da matemática: A lei de ampère. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, SciELO Brasil, v. 37, n. 4, p. 4601–1, 2015.
- DIAS, V. S.; MARTINS, R. d. A. Michael faraday: o caminho da livraria à descoberta da indução eletromagnética. *Ciência & educação*, Graduação em Educação para a Ciência, v. 10, n. 03, p. 517–530, 2004.
- DION, S. M. Michael faraday e o manuscrito matter: uma solução metafísica para o problema da ação a distância. *Scientiae Studia*, SciELO Brasil, v. 4, p. 615–620, 2006.
- DIRAC, P. A. M. Quantised singularities in the electromagnetic field. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, The Royal Society London, v. 133, n. 821, p. 60–72, 1931.
- FARADAY, M. Xxxv. on the conservation of force. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, Taylor & Francis, v. 13, n. 86, p. 225–239, 1857.
- FONTES, D. T. M.; RODRIGUES, A. M. Fundamentação teórica no ensino de eletromagnetismo: uma revisão da literatura em periódicos nacionais. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 38, n. 2, p. 965–991, 2021.
- GOI, M. E. J.; SANTOS, F. M. T. d. Contribuições de jerome bruner: aspectos psicológicos relacionados à resolução de problemas na formação de professores de ciências da natureza. *Ciências & Cognição. Rio de Janeiro, RJ. Vol. 23, n. 2 (2018), p. 315–332*, 2018.
- HANSELMAN, D. C. *Brushless permanent magnet motor design*. [S.l.]: The Writers' Collective, 2003.
- HUNT, B. J. *The maxwellians*. New York: Cornell University Press, 1994.
- IFPB. *Plano Pedagógico do Curso Técnico em Edificações Integrado: Campus Guarabira*. Guarabira, 2013.
- INFORMAÇÃO, D.-G. de Tecnologia da. *Sobre o campus*. 2019. Acessado em: 05 jun. 2025. Disponível em: <<https://www.ifpb.edu.br/guarabira/institucional/sobre-o-campus>>.
- JESUS, A. L. d.; SCHMIDT, A. G.; PORTUGAL, L. L. Introdução à física do monopolo magnético: uma abordagem clássica. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, SciELO Brasil, v. 45, p. e20220335, 2023.

- LAZAROFF-PUCK, C. Empire-laden theory: The technological and colonial roots of maxwells theories of electromagnetism. *Historical Studies in the Natural Sciences*, University of California Press, v. 54, n. 1, p. 42–83, 2024.
- LEITE, P. K. Filosofia da mecânica quântica: cem anos de interrogações sobre o real, o possível e o saber. *Ciência e Cultura*, Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência, v. 77, n. 2, p. 14–20, 2025.
- LINDLEY, D. *Degrees Kelvin: A tale of genius, invention, and tragedy*. Washington, DC: Joseph Henry Press, 2004.
- LINO, A.; NEVES, M. C. D. Um debate separado por 17 séculos: tradução comentada de um trecho da obra questões sobre o oitavo livro de física de aristóteles, por joão buridan. *Revista Brasileira de História da Ciência*, v. 11, n. 2, p. 255–266, 2018.
- MACHADO, K. D. *Cálculo Vetorial e Aplicações*. Ponta Grossa: TODAPALAVRA Editora, 2014.
- MACHADO, K. D. *Eletromagnetismo*. Ponta Grossa: TODAPALAVRA Editora, 2020. v. 2.
- MAGALHÃES, M. d. F.; SANTOS, W.; DIAS, P. Uma proposta para ensinar os conceitos de campo elétrico e magnético: uma aplicação da história da física. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, SciELO Brasil, v. 24, p. 489–496, 2002.
- MAHON, J. R. P. *Mecânica Clássica: fundamentos teóricos e aplicações*. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2020.
- MARTINS, A. A.; GARCIA, N. M. D.; BRITO, G. d. S. Ensino de física e novas tecnologias de informação e comunicação: uma análise da produção recente. *ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA E EDUCAÇÃO EM CIÊNCIAS*, VIII, 2011.
- MARTINS, R. d. A. O estudo experimental sobre o magnetismo na idade média, com uma tradução da carta sobre o magneto de petrus peregrinus. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, SciELO Brasil, v. 39, n. 1, p. e1601, 2017.
- MAXWELL, J. C. *A treatise on electricity and magnetism*. [S.l.]: Clarendon press, 1873. v. 1.
- MAXWELL, J. C. Introductory lecture on experimental physics. *The Scientific Paper of James Clerk Maxwell*, Cambridge University Press, v. 2, p. 241–255, 1890.
- Midwest Research Institute. *Brushless DC Motors*. Washington, D.C., 1975.
- MILLER, T. J. Brushless permanent-magnet and reluctance motor drives. New York, NY (USA); Oxford University Press, 1989.
- MINAYO, M. C. de S. *O desafio do conhecimento: Pesquisa qualitativa em saúde*. 14. ed. São Paulo: Hucitec, 2014.
- MOREIRA, M. A. *Teorias de aprendizagem*. [S.l.]: Editora pedagógica e universitária São Paulo, 1999. v. 2.

- NAGEL, L. *What is a Brushless Motor?* 2023. <https://www.tytorobotics.com/blogs/articles/what-is-a-brushless-motor?srsId=AfmBOopNNd_xzVWSulXIEtoL0S0-Zt1RIZKbHboajqPzLSK7Wu1IqNR>. Acesso em: 12 fev. 2025.
- NARDI, L. M. C.; SILVA, C. C. A matematização dos estudos elétricos antes de coulomb: as contribuições de johann euler no século xviii, acompanhada de uma tradução comentada de seu recherches sur la cause physique de lelectricité. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, SciELO Brasil, v. 43, p. e20200396, 2020.
- NETO, J. B. *Teoria Eletromagnética: parte clássica*. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2015.
- OLIVEIRA, D. R. A. de. *Mário Bunge 100 anos: um filósofo contra pseudociência*. 2019. Acesso em: 12 fev. 2025. Disponível em: <<https://www.revistaquestaoodeciencia.com.br/dossie-questao/2019/09/19/mario-bunge-100-anos-um-filosofo-contra-pseudociencia>>.
- PARAÍBA, S. da Educação do Estado da. *Proposta Curricular do Ensino Médio da Paraíba*. João Pessoa, PB: [s.n.], 2021. <<https://paraiba.pb.gov.br/arquivos/pdfs/PropostaCurricularDoEnsinoMdiodaParabaPCEMPB23.pdf>>. Disponível em: Acesso em: 14 abr. 2025.
- PESSOA, O. Modelo causal dos primórdios da ciência do magnetismo. *Scientiae Studia*, SciELO Brasil, v. 8, p. 195–212, 2010.
- PEÇAS, G. C. de. *Kit 10 Imãs Neodímio 30x10x4 Super Forte Retangular*. s.d. <https://www.geoberautopecas.com.br/kit-10-imas-imas-neodimio-30x10x4-super-forte-retangular?srsId=AfmBOooTVcCX0_EZ2uN0D5vZQ8BqTE1ScTP4sw_4XJN4gPmoq6kOZIDy>. Acesso em: 12 fev. 2025.
- PIEPER, F. C.; NETO, A. S. de A. Evidências da emergência de drivers hiperculturais durante o aprendizado de conceitos de eletromagnetismo em alunos do ensino médio após a utilização de simulações computacionais. *Acta Scientiae*, v. 17, n. 3, 2015.
- PIETROCOLA, M. Construção e realidade: o realismo científico de mário bunge e o ensino de ciências através de modelos. *Investigações em ensino de Ciências*, IFUFRGS Porto Alegre, v. 4, n. 3, p. 213–227, 1999.
- PONCZEK, R. L. A polêmica entre leibniz e os cartesianos: Mv ou mv^2 ? *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), v. 17, n. 3, p. 336–347, 2000.
- PRICE, P. B.; SHIRK, E.; OSBORNE, W.; PINSKY, L. Evidence for detection of a moving magnetic monopole. *Physical Review Letters*, APS, v. 35, n. 8, p. 487, 1975.
- ROVELLI, C. *A realidade não é o que parece: a estrutura elementar das coisas*. [S.l.]: Objetiva, 2017.
- SILVA, V. C. da; FONSECA, S.; VIDEIRA, A. A. P.; BEGALLI, M. *Filosofia da Física: problemas de ontologia e epistemologia da Física Moderna*. 1. ed. São Paulo: Livraria da Física, 2024.

TAVARES, G. W.; PRADO, A. G. Calorímetro de gelo: uma abordagem histórica e experimental para o ensino de química na graduação. *Química Nova*, SciELO Brasil, v. 33, p. 1987–1990, 2010.

THE PROJECT GUTENBERG. *James Clerk Maxwell and Modern Physics*. 2021. Acessado em: 10 fev. 2025. Disponível em: <https://www.gutenberg.org/cache/epub/65359/pg65359-images.html#toclink_148>.

TONIDANDEL, D. A. V.; ARAÚJO, A. E. A. d.; BOAVENTURA, W. d. C. História da eletricidade e do magnetismo: da antiguidade à idade média. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, SciELO Brasil, v. 40, p. e4602, 2018.

TRAN, A. N. James webb space telescope deployment brushless dc motor characteristics analysis. In: *43rd Aerospace Mechanisms Symposium*. [S.l.: s.n.], 2016.

UNIVERSITY, D. o. P. H. *Jerome Bruner*. s.d. Acesso em: 14 fev. 2025. Disponível em: <<https://psychology.fas.harvard.edu/people/jerome-bruner>>.

VERHEYDEN, T. *Oersted Experiment*. 2020. <<https://www.youtube.com/watch?v=bjRAfNSe1E0>>. Acesso em: 12 fev. 2025.

VINAIRE'S BLOG. *Faraday 1857: On the Conservation of Force*. 2017. Acessado em: 3 fev. 2025. Disponível em: <<https://vinaire.me/2017/10/27/comments-on-faradays-principle-of-force/#:~:text=There%20is%20no%20question%20which,most%20commonly%20referred%20to%2C%20namely>>.

WILLIAMS, R. *June 1849: James Prescott Joule and the Mechanical Equivalent of Heat*. 2015. Acessado em: 2 fev. 2025. Disponível em: <<https://www.aps.org/apsnews/2015/06/joule-mechanical-equivalent-heat>>.

XIE, R. *O que são motores DC sem escovas*. 2023. <<https://doncenmotor.com/br/what-are-brushless-dc-motors/>>. Acesso em: 12 fev. 2025.

APÊNDICE A – Produto Educativo



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO RIO
GRANDE DO NORTE - IFRN
CAMPUS NATAL-CENTRAL
DIRETORIA ACADÊMICA DE CIÊNCIAS - DIAC
MESTRADO NACIONAL PROFISSIONAL EM ENSINO DE FÍSICA
POLO 10

PRODUTO EDUCACIONAL

ABORDAGEM INICIAL AO ELETROMAGNETISMO: CONCEITOS
FUNDAMENTAIS COM MOTOR *BRUSHLESS*

João Paulo de Lima Silva
Tibério Magno de Lima Alves

Natal/RN
2026

Sumário

1	APRESENTAÇÃO	3
2	PRODUTO EDUCACIONAL	5
2.1	Sequência Didática	6
2.1.1	Primeiro encontro	8
2.1.2	Segundo encontro	10
2.1.3	Terceiro encontro	13
3	CONSIDERAÇÕES FINAIS	16
	REFERÊNCIAS	17
	APÊNDICE A – PRINCÍPIOS FÍSICOS, MECÂNICOS E CARACTERÍSTICAS DO FUNCIONAMENTO DO MOTOR <i>BRUSHLESS</i>	19
A.1	Estator	20
A.2	Rotor	20
A.3	Princípios básicos de funcionamento	21
	APÊNDICE B – TUTORIAL DE CONSTRUÇÃO DE MO- TOR <i>BRUSHLESS</i> COM MATERIAIS DE BAIXO CUSTO	22
B.1	Lista de materiais e ferramentas	22
B.2	Procedimento de Construção	23
B.2.1	Bobinamento	23
B.2.2	Rotor e fixação dos ímãs	23
B.2.3	Montagem mecânica	23
B.2.4	Conexão eletrônica e testes	24
B.3	Vídeos do <i>Youtube</i>	24
	APÊNDICE C – MODELO UTILIZADO DE MOTOR <i>BRUSH-</i> <i>LESS</i> : A2212 2200KV	25
	APÊNDICE D – SLIDES E FIGURAS UTILIZADAS DU- RANTE OS ENCONTROS	27
D.1	Primeiro encontro	27
D.2	Segundo encontro	28

D.3	Terceiro encontro	28
	APÊNDICE E – ATIVIDADE 1	29
	APÊNDICE F – ATIVIDADE 2	30
	APÊNDICE G – ATIVIDADE FINAL	31

1 Apresentação

O referido produto está alinhado com as competências e habilidades que os estudantes devem desenvolver segundo a Base Nacional Comum Curricular (BNCC). De modo específico, destaca-se a habilidade relacionada à competência 1 (EM13CNT107) no âmbito de Ciências da Natureza e suas Tecnologias no Ensino Médio, que afirma:

Realizar previsões qualitativas e quantitativas sobre o funcionamento de geradores, motores elétricos e seus componentes, bobinas, transformadores, pilhas, baterias e dispositivos eletrônicos, com base na análise dos processos de transformação e condução de energia envolvidos com ou sem o uso de dispositivos e aplicativos digitais, para propor ações que visem a sustentabilidade. (BRASIL, 2018, pg.555).

Além desse ponto, existe também a consonância com o eixo integrador de Ciências da Natureza e suas Tecnologias denominado *investigação e divulgação científica e tecnológica (RNCNFIS028)*, presente no Referencial Curricular do Ensino Médio Potiguar. Nele, o aluno deve compreender quais condições levam ao estabelecimento da corrente elétrica em um sistema físico, identificando grandezas relevantes para sua caracterização (BRASIL, 2021). Nesse sentido, propõe-se uma prática voltada para a aprendizagem de conteúdos, internalização de conceitos de forma eficiente, e não para a cultura de ensino voltada à testagem, na qual os alunos são treinados para dar respostas corretas em provas escritas (MOREIRA, 2021).

O motor *brushless*, ou motor BLDC (*brushless direct current*), é um motor de corrente contínua que não utiliza escovas em sua composição, diferentemente dos motores convencionais, nos quais esse componente está presente. Em motores com escovas, as bobinas localizam-se no rotor (parte girante), de modo que é necessário um contato mecânico deslizante — as escovas — para conduzir a corrente elétrica da fonte externa até as bobinas em rotação. No motor *brushless*, essa necessidade é eliminada: as bobinas estão fixas no estator, recebendo corrente diretamente do circuito externo, enquanto os ímãs permanentes estão dispostos no rotor. A comutação, isto é, a alternância sequencial de energização das bobinas, é realizada eletronicamente pelo controlador (ESC), sem desgaste mecânico, garantindo maior durabilidade, eficiência e confiabilidade ao equipamento. Cada vez mais presente em equipamentos elétricos, a tecnologia *brushless* apresenta um enorme potencial de crescimento e já atingiu velocidades altíssimas em aeromodelos com propulsão a hélice.

Este produto educacional tem como objetivo geral o desenvolvimento de uma atividade investigativa a partir de uma sequência didática que permita o estudo dos mecanismos e princípios que regem o funcionamento de um motor *brushless*. A partir disso, os

estudantes terão contato com um motor *brushless*¹ em funcionamento, serão instigados a elaborar uma explicação para o seu funcionamento, munidos de conhecimentos sobre fenômenos físicos, e compreender, ao final, os princípios básicos que regem esse tipo de motor. O público-alvo será uma turma da terceira série do Ensino Médio do Curso Técnico Integrado em Edificações do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba (IFPB), *Campus* Guarabira.

Dessa forma, ao utilizar um motor *brushless* por meio de uma prática guiada para a investigação do seu funcionamento, permitiu-se ao estudante contato direto e prático com os aspectos básicos da teoria eletromagnética, como a corrente elétrica em condutores, o campo magnético e a conservação da energia — conceitos fundamentais para a sociedade contemporânea em diversos contextos. Além disso, o trabalho fornecerá ao professor de Física uma poderosa ferramenta didático-pedagógica para enfrentar o desafio da aprendizagem de conceitos abstratos por parte dos estudantes.

¹ O modelo utilizado na prática será o A2212-2200KV. Mais detalhes no Apêndice C.

2 Produto Educacional

Alicerçado na teoria de aprendizagem de Jerome Bruner¹, validado pela concepção freiriana de superação da dicotomia existente entre teoria e prática no ensino, e sustentado pela epistemologia realista de Mario Bunge — que defende a existência objetiva e material dos fenômenos físicos como pressuposto para a investigação científica —, este produto consiste em uma sequência didática estruturada em torno da análise experimental e investigativa de um motor *brushless*. O principal objetivo é auxiliar professores por meio de uma metodologia investigativa voltada para o ensino de conceitos iniciais de eletromagnetismo, especificamente corrente elétrica, campo magnético e conservação de energia.

Nesta abordagem, a utilização de um motor *brushless* atua como um suporte cognitivo, permitindo que a manipulação e observação direta do dispositivo em funcionamento contribuam para a visualização concreta de fenômenos abstratos, facilitando a conexão imediata entre o objeto físico e os conceitos teóricos. A sequência foi planejada para desenvolver habilidades fundamentais, tais como o pensamento crítico, a formulação de hipóteses sobre o funcionamento de máquinas elétricas e a capacidade de interpretação de fenômenos físicos reais.

Alguns momentos da sequência fazem uso de recursos digitais disponíveis na internet, como simulações do PhET, vídeos demonstrativos e animações de comutação do motor. Recomenda-se que o professor, previamente à aplicação, realize o download desses materiais para uso offline, garantindo a autonomia do produto em contextos com conectividade limitada ou inexistente. A simulação do PhET pode ser baixada gratuitamente no próprio site do projeto (<https://phet.colorado.edu>), que oferece versão offline para todas as suas simulações. Para os vídeos, sugere-se o uso de ferramentas de download previamente à aula. As animações de comutação podem, alternativamente, ser substituídas por uma sequência de figuras estáticas impressas que representem as etapas da comutação trifásica, reproduzindo a mesma informação visual.

Espera-se que, após os encontros, os estudantes compreendam o princípio de funcionamento do motor e consigam explicar a interação entre correntes e campos magnéticos que gera o movimento, superando concepções de senso comum. A proposta será aplicada a uma turma da terceira série do Ensino Médio e será composta por três encontros de 1h30min (uma hora e trinta minutos) cada, realizados no laboratório de Física e em sala de aula.

¹ Jerome Seymour Bruner (1915-2016) - Psicólogo estadunidense.

2.1 Sequência Didática

A teoria de aprendizagem de Bruner fornece ao professor uma ferramenta capaz de auxiliar o estudante durante seu processo de descoberta do conhecimento, com o foco em seu protagonismo. Por meio de uma estratégia eficiente, o estudante desenvolve modelos explicativos para os fenômenos observados e, assim, constrói um conhecimento sólido.

Nesse contexto, a escolha do motor *brushless* como objeto de estudo não é aleatória; ela visa contextualizar os conceitos de eletromagnetismo de forma prática e atual, aproximando a Física do cotidiano dos estudantes. A relevância deste tema reside na presença disseminada desses dispositivos em tecnologias contemporâneas, desde *coolers* de computadores e drones até veículos elétricos. Compreender o funcionamento dessa máquina é, portanto, uma forma de fomentar o pensamento crítico e investigativo sobre o mundo tecnológico que cerca o estudante.

Para garantir o alinhamento com as diretrizes educacionais vigentes, esta sequência didática foi planejada para mobilizar competências e habilidades específicas da Base Nacional Comum Curricular (BNCC) da área de Ciências da Natureza e suas Tecnologias, com destaque para:

- Competência Específica 1: Analisar fenômenos naturais e processos tecnológicos, com base nas interações e relações entre matéria e energia.
- Competência Específica 3: Investigar situações-problema e avaliar aplicações do conhecimento científico e tecnológico e suas implicações.
 - Construir questões, elaborar hipóteses, previsões e estimativas, empregar instrumentos de medição e representar e interpretar modelos explicativos, dados e/ou resultados experimentais para construir, avaliar e justificar conclusões no enfrentamento de situações-problema sob uma perspectiva científica.

Além da citada na apresentação deste produto educacional.

Sabe-se que Física é uma ciência experimental e, como tal, seu aprendizado em nível básico requer contato com a realidade material. Essa realidade é considerada por Mário Bunge como objetiva e cognoscível à mente humana.

A avaliação será realizada de forma contínua, processual e formativa, privilegiando a análise da evolução conceitual dos estudantes ao longo da sequência didática. Serão aplicadas três atividades de escrita ao longo dos encontros. Essas produções têm o objetivo de registrar a construção gradual do modelo mental do estudante. Espera-se que, na primeira atividade, as explicações sejam baseadas no senso comum e, progressivamente, incorporem o vocabulário científico e as leis do eletromagnetismo (corrente, campo e

torque) até a explicação final do funcionamento do motor *brushless*. Também será avaliado o engajamento dos estudantes durante as situações de debate, observando-se a capacidade de formular hipóteses, a argumentação baseada em evidências observadas no experimento e a clareza na comunicação das ideias durante a mediação professor-aluno.

As principais características da sequência didática são:

- **Objetivo**

- Desenvolver uma atividade investigativa que permita o estudo dos mecanismos e princípios que regem o funcionamento de um motor *brushless*.

- **Público alvo**

- Estudantes da terceira série do Ensino Médio

- **Teoria de Aprendizagem**

- Teoria de aprendizagem por descoberta de Jerome Bruner

- **Estrutura didática**

- Três encontros de uma hora e 30 minutos cada

- **Conteúdos**

- Corrente elétrica em condutores
- Campo magnético de ímãs e bobinas
- Torque
- Conservação da energia

- **Recursos didáticos**

- Computador, projetor, pen drive
- Simuladores
- Papel A4
- Quadro branco, pincel, apagador
- Motor *brushless*

A Tabela 1 a seguir detalha o cronograma das atividades a serem realizadas.

Tabela 1 – Cronograma de atividades

Momentos	Conteúdos	Duração
Primeiro encontro: Motor <i>brushless</i>		
1º momento	Apresentação	10 minutos
2º momento	Funcionamento e características	30 minutos
3º momento	Atividade 1	30 minutos
4º momento	Socialização das respostas	20 minutos
Segundo encontro: Fenômenos eletromagnéticos		
1º momento	O que são ímãs?	10 minutos
2º momento	O que é corrente elétrica?	15 minutos
3º momento	Revisão de torque	10 minutos
4º momento	Revisão de conservação da energia	10 minutos
5º momento	Atividade 2	45 minutos
Terceiro encontro: Consolidação de aprendizagem		
1º momento	Princípios de funcionamento do motor <i>brushless</i>	30 minutos
2º momento	Dúvidas	30 minutos
3º momento	Atividade 3	30 minutos

Fonte: Autor (2025)

2.1.1 Primeiro encontro

A sequência didática iniciará com o objetivo de mostrar aos estudantes um motor *brushless* em funcionamento. O primeiro encontro será dividido em três momentos, começando com a apresentação do professor e do objeto de estudo. Inicialmente, os estudantes serão levados ao laboratório de Física do *campus* e orientados a formarem grupos de no máximo quatro integrantes. Logo após, busca-se motivá-los a compreender a importância do funcionamento do motor, destacando suas principais aplicações em dispositivos do cotidiano por meio do questionamento: “Você já pensou como funcionam os drones ou ventiladores modernos?” e assim, iniciar uma breve discussão introdutória. Nesse primeiro momento, também será explicitada a estrutura da sequência didática, detalhando o percurso das aulas e os objetivos a serem alcançados, os quais serão informados aos estudantes. Essa etapa ocorrerá nos primeiros dez minutos.

Os próximos trinta minutos serão dedicados ao estudo do motor *brushless*. O professor acionará o motor para demonstração. Após a primeira demonstração do motor em funcionamento, será exibida, por meio de slides, a composição mecânica do motor. Seus principais componentes são: o estator, onde estão localizadas as bobinas de fio de cobre; o rotor, que contém os ímãs; o controlador eletrônico e a haste de aço, responsável por permitir a rotação do rotor. Será entregue a cada grupo uma ficha ilustrativa com os nomes dos componentes para facilitar a identificação. Após orientações referentes aos

cuidados necessários, os grupos terão autonomia para manipular o motor, observá-lo em funcionamento, bem como registrar vídeos e fotografias, com o intuito de elaborar uma explicação acerca de seu princípio de operação. Cada grupo terá um tempo máximo de cinco minutos em contato com o motor. Nesta etapa, eles terão a oportunidade de desfazer as conexões que julgassem necessárias para investigação. A única restrição é a não possibilidade de abertura do motor; caso o professor julgue esse procedimento como importante, pode fazê-lo.

É de extrema importância que o professor consiga expor o máximo de detalhes possíveis sobre cada um dos componentes, sem fornecer pistas operacionais sobre o funcionamento do motor. Em seguida, cada grupo terá trinta minutos para elaborar uma explicação sobre o funcionamento do motor, atribuindo a cada componente mecânico uma tarefa necessária para que o motor funcione corretamente, sendo que não será permitido o acesso à internet durante essa atividade. A atividade² será realizada por meio da entrega de uma folha contendo todas as instruções, com o objetivo de estimular a curiosidade e reflexão dos estudantes sobre o fenômeno observado. Logo após, será o momento em que os grupos compartilharão as respostas que obtiveram na Atividade 1 com os demais, para que, assim, exista uma troca de ideias na construção da explicação do funcionamento do motor. Esta etapa terá uma duração de vinte minutos.

- **Objetivo geral**

- Visualizar um motor *brushless* em funcionamento.

- **Objetivos específicos**

- Conhecer os componentes de um motor *brushless* simples;
- Desenvolver uma explicação para o funcionamento do motor;
- Estimular a reflexão;
- Compartilhar respostas da Atividade 1 com os demais estudantes.

- **Estrutura do encontro:**

- O encontro será dividido em quatro momentos:
 - * **1º momento: Apresentação (10 minutos)**
 - Apresentação do professor e dos alunos.
 - Relevância do tema e do objeto de estudo.
 - Questionamentos pertinentes.
 - Apresentação da sequência didática.

² Esta é a Atividade 1 que consta no Apêndice D.

- Apresentação dos objetivos.
- * 2º momento: **Funcionamento e características (30 minutos)**
 - Formação de grupos de quatro estudantes.
 - Exibição do motor *brushless* em funcionamento.
 - Detalhamento dos componentes mecânicos do motor.
- * 3º momento: **Atividade 1 (30 minutos)**
 - Elaboração da explicação do funcionamento do motor utilizando papel e caneta.
- * 4º momento: **Socialização das respostas (20 minutos)**
 - Compartilhar com os demais grupos as respostas das questões da Atividade 1.
- **Recursos didáticos:**
 - Projetor
 - Computador
 - Atividade impressa
 - Motor *brushless*

2.1.2 Segundo encontro

Considerando que o objetivo desta sequência didática é proporcionar o primeiro contato com os fundamentos do eletromagnetismo, faz-se necessária a apresentação de novos conceitos, bem como a revisão de conteúdos pregressos. A etapa inicial, com duração de dez minutos, será dedicada ao estudo dos ímãs, utilizando peças de neodímio como recurso didático para sondar os conhecimentos prévios dos estudantes. O foco recairá sobre as propriedades de atração e repulsão magnéticas. Os materiais circularão entre os discentes para que possam vivenciar o fenômeno empiricamente. Ademais, um comentário breve será abordado a inexistência de monopolos magnéticos na natureza.

Em seguida, no segundo momento (quinze minutos), será explorado o conceito de corrente elétrica como movimento na mesma direção e sentido de portadores de carga elétrica. Será comentado que a corrente elétrica pode ser entendida como o fluxo de cargas ao longo do tempo (adaptando para $i = Q/\Delta t$ no contexto do Ensino Médio). O foco principal não será a conta em si, mas garantir que o estudante compreenda que a corrente é o movimento de cargas elétricas. Para explicar o que gera esse movimento e tornar o conceito de diferença de potencial (tensão) menos abstrato, usaremos uma analogia com a gravidade. Ao soltar um objeto em sala, mostramos que a diferença de altura é necessária para que haja movimento; a ideia é que o aluno perceba que, para as cargas

elétricas fluírem, também é preciso existir uma espécie de “altura” ou desnível elétrico. Com o objetivo de deixar essa noção mais visual ainda, utilizaremos uma animação do site PhET³. Após isso, o professor deve mostrar o experimento de Ørsted⁴ sobre fios condutores percorridos por corrente elétrica que geram campo magnético ao redor deles. Para isso, será utilizada uma figura por meio de um projetor, mostrando uma espécie de modelo supostamente utilizado por Ørsted em seus experimentos. O professor deverá explicar em detalhes o que mostra a figura, seus elementos e funções. Em seguida, será exibido um vídeo⁵ do experimento sendo reproduzido com equipamentos modernos.

Como se trata de uma turma da terceira série do Ensino Médio, para explorar as características do motor *brushless*, é importante fazer uma breve revisão do conceito de torque, destacando a relação com o giro em torno de um eixo fixo de um sistema físico (como gangorras, portas etc.). Utilizando a porta da sala, será solicitado uma demonstração da dificuldade de abri-la realizando força em diferentes posições: próxima ao eixo de rotação, no meio da porta e na maçaneta. Após isso, é o momento de introduzir a equação que expressa o módulo do torque $\mathfrak{T} = r \cdot F \cdot \sin(\theta)$, onde θ é o ângulo entre o braço de alavanca e a força, r é a distância em que se aplica a força e F é a força aplicada, destacando que o torque é máximo quando a força é aplicada perpendicularmente ao braço de alavanca. Este será o terceiro momento (dez minutos).

Nos próximos dez minutos (quarto momento), será realizada uma breve revisão do conceito de conservação da energia mecânica em um sistema conservativo, a fim de explorar a origem da energia cinética de rotação do motor. Como estudantes da terceira série já tiveram contato com a conservação da energia mecânica no âmbito do campo gravitacional, esse ponto será revisado. Será exibida, em um projetor, uma imagem contendo três trajetórias distintas em um campo gravitacional. O objetivo é demonstrar, através do cálculo do trabalho ($W = mgh$), que a energia despendida independe da trajetória, dependendo apenas do desnível vertical. Por fim, a discussão conectará esses princípios fundamentais ao funcionamento do motor *brushless*. Será esclarecido que, embora o motor real não seja um sistema isolado perfeito (devido a perdas térmicas e atrito), a ausência de escovas o torna significativamente mais eficiente e durável se comparado aos motores elétricos convencionais, aproximando-o mais dos ideais de conservação de energia.

No quinto e último momento (trinta minutos), será desenvolvida uma atividade com o objetivo de verificar a evolução da explicação dos estudantes sobre o funcionamento do motor *brushless*. Munidos dos conhecimentos novos e revisados, os mesmos grupos do primeiro encontro atribuirão a cada componente mecânico uma função específica, bem

³ A simulação pode ser encontrada em <https://phet.colorado.edu/pt/simulations/circuit-construction-kit-dc>. Recomenda-se realizar o *download* prévio da simulação para uso *offline*, opção disponível gratuitamente no próprio site do projeto.

⁴ Hans Christian Ørsted (1777 - 1851) - Físico e químico dinamarquês.

⁵ O vídeo pode ser encontrado em <https://www.youtube.com/watch?v=bjRAfNSe1E0>

como os fenômenos físicos que ocorrem para fazer o motor funcionar. Essa atividade tem o objetivo de verificar a evolução da compreensão dos estudantes sobre os fenômenos observados no motor *brushless*.

- **Objetivo geral**

- Elaborar uma explicação para o funcionamento do motor *brushless*, munidos de conhecimentos sobre os fenômenos físicos.

- **Objetivos específicos**

- Revisar os conteúdos de torque e de conservação da energia mecânica em um sistema conservativo;
- Adquirir conhecimentos introdutórios sobre corrente elétrica e campo magnético de ímãs;

- **Estrutura do encontro:**

- O encontro será dividido em cinco momentos:

- * **1º momento: O que são ímãs? (10 minutos)**

- Experimento demonstrativo com dois ímãs de neodímio.
 - Verificar atração e repulsão dos ímãs.
 - Introduzir a noção de campo magnético.

- * **2º momento: O que é corrente elétrica? (15 minutos)**

- Construir a noção de material condutor.
 - Definição de corrente elétrica como movimento ordenado de portadores de carga elétrica.
 - Exemplificação da possibilidade de movimento dos portadores de carga elétrica devido a uma diferença de potencial elétrico, fazendo analogia com o movimento em um campo gravitacional.

- * **3º momento: Revisão de torque (10 minutos)**

- Definir o torque como a medida da tendência de uma força em fazer um corpo girar em torno de um eixo fixo.
 - Explorar quantitativamente as características da equação do torque (também chamado de Momento Escalar em algumas referências), dada por: $\mathfrak{T} = r \cdot F \cdot \sin(\theta)$, onde r é o braço de alavanca (distância do ponto de rotação até o ponto de aplicação da força), F é a força aplicada e θ é o ângulo entre F e r .

- * **4º momento: Revisão de conservação da energia (10 minutos)**

- Comentar sobre as várias formas de energia, principalmente a energia de movimento e a energia elétrica.
- Discutir sobre transformação de energia e, conseqüentemente, o princípio da conservação da energia.

* 5º momento: Atividade (30 minutos)

- Com conhecimentos revisados e outros adquiridos, os estudantes farão novamente a tentativa de explicação do funcionamento do motor *brushless*.
- Explicar a função de todos os componentes mecânicos do motor, sem auxílio de conexão com a internet.

- Recursos didáticos:

- Ímãs de neodímio
- Projetor
- Computador
- Motor *brushless*
- Atividade impressa

2.1.3 Terceiro encontro

O último encontro tem como objetivo a consolidação dos conhecimentos obtidos durante toda a sequência didática. Com o motor *brushless* em mãos, é o momento para o professor ser o mais detalhista possível na explicação. Inicialmente, o professor explicará os detalhes e o passo a passo de como construir um motor *brushless* simples, esmiuçando cada detalhe e indicando onde conseguir as peças (principalmente o controlador eletrônico). Após esse procedimento, é o momento de explicar o formato físico do motor, a fim de explorar as características que contribuem para a sua otimização. Em seguida, deve ficar claro para os alunos que, se alguma conexão entre os terminais da bobina for desfeita, o motor deixa de funcionar, evidenciando a importância de se manter uma corrente elétrica. Como foi discutido no encontro anterior, a corrente elétrica é mantida pela diferença de potencial presente no controlador eletrônico.

Subseqüentemente, é o momento de explorar a importância e o papel das bobinas, que, ao serem percorridas por corrente elétrica, funcionam como ímãs. É necessário fazer um paralelo com a descoberta de Ørsted, de que fios condutores percorridos por corrente elétrica geram, ao seu redor, um campo magnético. Como as bobinas funcionam como ímãs, elas conseguem atrair os ímãs presentes no rotor e fazer o motor girar (mais detalhes sobre o funcionamento do motor *brushless* podem ser encontrados no Apêndice A). O professor deve comentar sobre o número de voltas em cada bobina e perguntar aos

estudantes se esse fato influencia ou não no giro do rotor. Outra curiosidade que pode ser explorada diz respeito à quantidade de bobinas e à relação múltipla de três presente nas entradas conectadas ao ESC. Em outras palavras, como o motor é trifásico, o professor deve levantar essa questão para que os estudantes reflitam por conta própria. Após esse momento de reflexão, é importante esclarecer que o termo “trifásico” se refere ao número de sistemas de correntes independentes e defasadas — três correntes com defasagem de 120° entre si.

Uma possível analogia para ilustrar essa situação consiste em imaginar três pessoas empurrando um carrossel em posições igualmente espaçadas por 120° . Utilizando o quadro branco, o professor pode desenhar essa cena para facilitar a compreensão. Se cada pessoa empurrar sozinha (equivalente às 3 bobinas), o movimento ocorrerá aos trancos. Já se cada uma contar com assistentes que ajudem no empurrão (6, 9, 12 bobinas), o esforço se distribui melhor e o movimento se torna mais contínuo. Deve-se deixar claro que é esse trabalho conjunto dos assistentes que garante a suavidade do movimento e que, no caso do motor brushless, as bobinas são controladas pelo ESC, que liga e desliga cada fase no momento correto para que o motor funcione adequadamente. Existem diversos GIFs e animações disponíveis na internet que ilustram como a comutação entre as bobinas ocorre⁶. Recomenda-se que o professor realize o *download* desses materiais antes da aula para garantir a aplicação independente de conexão.

O segundo momento (trinta minutos) é destinado para que os estudantes sanem quaisquer dúvidas a respeito do que foi trabalhado ao longo do tempo.

No terceiro e último momento (trinta minutos), será realizada a atividade final. Esta constará de questões pertinentes à construção de uma ideia na física, como, por exemplo, a obtenção de uma equação a partir do experimento realizado. Também haverá espaço para as impressões, positivas e/ou negativas, dos estudantes em relação à prática utilizada.

- **Objetivo geral**

- Compreender o funcionamento básico de um motor *brushless*.

- **Objetivos específicos**

- Saber construir passo a passo um motor *brushless* simples.
- Identificar a função de cada componente do motor.
- Sanar dúvidas pertinentes.
- Responder uma atividade com questões objetivas sobre os conteúdos estudados.

⁶ Um exemplo pode ser encontrado em <https://11nq.com/xORT4>. Caso não haja conexão disponível, o professor pode utilizar uma sequência de figuras estáticas que representem as seis etapas de comutação trifásica, desenhadas no quadro branco ou impressas previamente.

- **Estrutura do encontro:**

- O encontro será dividido em três momentos:

- * **1º momento: Princípios de funcionamento do motor *brushless***

- Como construir um motor *brushless* simples.
 - Explorar as características físicas do motor.
 - Conhecer o papel de cada componente do motor, bem como o princípio físico envolvido.

- * **2º momento: Dúvidas**

- Momento para que os estudantes discutam e debatam as principais dúvidas que surgiram durante a aplicação da sequência didática.

- * **3º momento: Atividade final**

- Atividade escrita contendo questões discursivas pertinentes e espaço para opinião sobre a prática didático-pedagógica.

3 Considerações Finais

O produto educacional aqui referido é resultado de pesquisas e estudos sobre práticas educacionais voltadas ao aprendizado de conceitos físicos por intermédio de objetos do cotidiano e experimentos, o que torna este trabalho relevante, visto que a Física é uma ciência experimental. Em última análise, constitui uma ferramenta que pode ser utilizada por professores no ensino de princípios físicos abstratos, como o campo magnético, a corrente elétrica e o fenômeno da indução eletromagnética. Adaptações podem ser realizadas com o objetivo de adequar a sequência à realidade de cada escola. Uma possível e interessante abordagem seria realizar uma oficina, na qual cada grupo de estudantes produza seu próprio motor *brushless* ou, caso a escola disponha de bons equipamentos de medição elétrica, realizar medições e aferições baseadas nas ferramentas teóricas da eletrônica.

Referências

- ABR Distribuidora. *Estator cancela Brushless*. n.d.a. Disponível em: <https://arbdistribuidora.com.br/categorias/acessorios-para-portoes-18/10840-estator-cancela-brushless-220v-50hz-60hz-78mm-ppa-553>. Acesso em: 31 de Agosto de 2024.
- BARBOSA, R. S.; TRISTÃO, L. G. d. O. Motor brushless dc: Análise teórica e projeto de controlador eletrônico sem a utilização de sensores. 2018.
- BRASIL. *Base Nacional Comum Curricular*. Brasília: Ministério da Educação, 2018.
- BRASIL. *Referencial Curricular do Ensino Médio Potiguar*. Natal: SEEC-RN, 2021.
- BROWN, W. Brushless dc motor control made easy. *Microchip Technology Inc*, v. 1, 2002.
- Etonm Motor. *Outrunner vs. Inrunner: Which Brushless DC Motor Fits Your Needs?* n.d.a. Disponível em: <https://etonmmotor.com/outrunner-vs-inrunner-choosing-the-right-brushless-dc-motor/>. Acesso em: 14 de setembro de 2024.
- MOREIRA, M. A. Desafios no ensino da física. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 2021.
- NOLAN, D. Sensorless six-step bldc commutation. *AN4220, STMicroelectronics*, 2013.
- Saravati - Materiais Técnicos. *Motor Brushless A2212 2200KV / 6T*. n.d.a. Disponível em: https://www.saravati.com.br/motor-brushless-a2212-2200kv-6t.html?srsltid=AfmBOoqE_Nuw35rnYJ3fHVVC9tpRbyLpi80U74VD8i9uKcDqGuoAQfTW. Acesso em: 02 de Março de 2025.
- Wikimedia Commons. *File:Oersted experiment.png*. 2013. Disponível em: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Oersted_experiment.png. Acesso em: 12 de fevereiro de 2025.
- YEDAMALE, P. Brushless dc (blde) motor fundamentals. *Microchip Technology Inc*, v. 20, n. 1, p. 3–15, 2003.

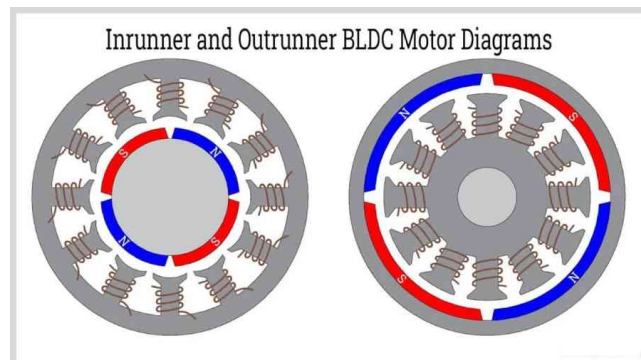
Apêndices

APÊNDICE A – Princípios físicos, mecânicos e características do funcionamento do motor *brushless*

Este apêndice tem como objetivo fornecer ao professor um conhecimento básico sobre o motor *brushless*, sem abordar detalhes específicos de eletrônica. Nos últimos anos, a popularidade desse tipo de motor tem aumentado significativamente em setores industriais de grande relevância social e econômica, como eletrodoméstico, automotivo, aeroespacial, médico e de instrumentação, entre outros. O motor *brushless*, como o nome sugere, é um motor elétrico de corrente contínua que não possui escovas em sua composição, assim, a comutação das bobinas é realizada por um controlador externo. A vantagem de se utilizar um motor *brushless* em detrimento de um motor com escovas ou um motor de indução convencional é a melhor relação entre velocidade e torque, alta resposta dinâmica, alta eficiência, longa vida útil, funcionamento silencioso e maior faixa de velocidade (YEDAMALE, 2003, p.1).

Sua composição básica é composta por um rotor e um estator. O estator é a parte fixa, onde se localizam as bobinas e o rotor é a parte girante, onde se encontram os ímãs permanentes. A figura 1 mostra um esquema simplificado desse modelo, com dois tipos possíveis de configuração, o motor *inrunner* à esquerda e o *outrunner* à direita.

Figura 1 – Esquema simplificado de motor *brushless* com estator interno



Fonte: Etonm Motor (n.d.a)

O motor *brushless* é um motor elétrico síncrono, isto é, sua frequência elétrica está associada à velocidade de rotação do rotor. Ele é alimentado através de um controlador responsável pela comutação das bobinas. Como essa comutação é realizada através de procedimentos eletrônicos, torna o processo desafiador, vista a gama de possibilidades e

complexidades. Atualmente em muitas ocasiões é utilizada a inteligência artificial para fazer esse trabalho.

A.1 Estator

O estator é a parte fixa do motor brushless, responsável por gerar um campo magnético rotativo através da corrente elétrica fornecida às bobinas, de acordo com a Lei de Ampère-Maxwell, que relaciona a corrente elétrica com o campo magnético gerado ao redor de um condutor. Esse campo interage com os ímãs permanentes do rotor, criando a força necessária para rotacioná-lo. Em motores de alta eficiência, o estator é composto de um núcleo laminado de aço e bobinas de cobre esmaltado. Ser laminado facilita a minimização de efeitos indesejáveis, como o surgimento das correntes de Foucault na estrutura do motor, perda de eficiência do fluxo de campo magnético e dificuldade de dissipação do calor. Na figura 2, temos um exemplo de um estator.

Figura 2 – Estator “cancela”



Fonte: ABR Distribuidora (n.d.a)

A.2 Rotor

É a parte móvel do motor *brushless* onde ficam localizados os ímãs permanentes. Sua principal função é girar em resposta ao campo magnético rotativo criado no estator pelas bobinas. Sua composição básica é composta por ímãs permanentes, um núcleo para a fixação dos ímãs e um eixo de rotação. Existem diversos tipos de ímãs, como os ímãs de neodímio (NdFeB), de samário-cobalto (SmCo), de ferrite (cerâmica), dentre outros. O rotor é configurado para ter polos alternados (um ímã com o polo norte na frente e outro com o sul, etc.). Isso cria um campo magnético que interage de maneira eficiente com as bobinas do estator. A figura 3 abaixo mostra seções transversais de diferentes arranjos de ímãs em um rotor.

Figura 3 – Rotor

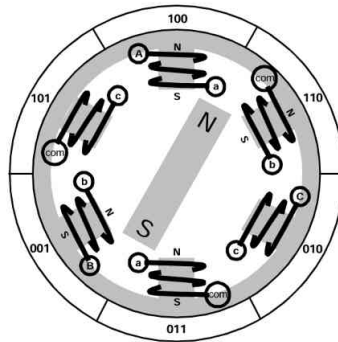


Fonte: Yedamale (2003)

A.3 Princípios básicos de funcionamento

O funcionamento do motor *brushless* é baseado na interação entre o campo magnético gerado pelas bobinas e o campo magnético dos ímãs permanentes. Para uma melhor visualização temos a figura 4, que é um diagrama simplificado.

Figura 4 – Diagrama simplificado do motor brushless



Fonte: Brown (2002)

No caso específico do diagrama acima, duas bobinas são energizadas por vez formando um campo magnético no estator, enquanto a outra bobina fica em estado flutuante. O campo magnético produzido pelas bobinas vai interagir com o campo magnético dos ímãs, produzindo um torque sobre eles. Sendo possível realizar comutações nas bobinas de maneira correta, ou seja, seguindo uma determinada sequência e no tempo adequado, é possível formar um campo magnético girante no estator. Este que será responsável por manter o rotor em giro contínuo. (NOLAN, 2013, p. 13).

Quando o rotor gira, seus ímãs permanentes criam um fluxo magnético variável através das bobinas do estator. De acordo com a Lei de Faraday-Neumann-Lenz, essa variação gera uma força eletromotriz induzida na bobina. O termo técnico para isso é *back-EMF* (Força Contra-Eletromotriz). Quando o motor *brushless* não dispõe de sensores de efeito Hall, o controlador externo utiliza a força Contra-Eletromotriz para estimar a posição do rotor e realizar a comutação necessária para a operação contínua. Para detalhes sobre o modelo matemático recomenda-se consultar Barbosa e Tristão (2018).

APÊNDICE B – Tutorial de construção de motor *brushless* com materiais de baixo custo

Este apêndice descreve o procedimento de construção de um motor *brushless* de corrente contínua caseiro, priorizando materiais de relativo acesso. O objetivo é propiciar ao professor uma alternativa à abordagem deste produto educacional, baseando-se em metodologias de “faça-você-mesmo”.

B.1 Lista de materiais e ferramentas

Para a construção de um motor trifásico com configuração sugerida de 12 ranhuras no estator e 16 polos magnéticos (12N16P), são necessários:

1. Ímãs de neodímio: 16 unidades (sugestão: 10mm x 5mm x 2mm ou similar).
2. Fio de cobre esmaltado: Diâmetro aproximado de 0,5 mm (AWG 24 ou 25). Pode ser reaproveitado de transformadores ou motores antigos.
3. Eixo metálico: Barra de aço de 5 mm de diâmetro (pode ser cortada de um eixo de impressora antiga ou ferrolho).
4. Rolamentos: 2 unidades (ex: MR95ZZ ou 608ZZ de skates, ajustando o eixo conforme necessário).
5. Estrutura do estator e rotor: Tubos de PVC, madeira ou a carcaça metálica de um motor DC escovado queimado (removendo-se o coletor e as bobinas originais).
6. Controlador (ESC): Um *Electronic Speed Controller* de 20A ou 30A e um testador de servo (ou microcontrolador Arduino) para gerar o sinal de controle.
7. Fonte de alimentação: Bateria LiPo (11.1V) ou fonte de bancada DC.
8. Cola: Adesivo instantâneo (cianoacrilato) e cola epóxi para fixação dos ímãs.

B.2 Procedimento de Construção

B.2.1 Bobinamento

A preparação do estator consiste em montar as bobinas. Se o estator utilizado for metálico (composto por lâminas de ferro reaproveitadas), o primeiro passo é garantir o isolamento das ranhuras. Para isso, recomenda-se revesti-las com papel isolante ou fita Kapton, evitando que o fio esmaltado encoste diretamente no metal e provoque curtos. Quando o estator é impresso em plástico, esse isolamento já é natural e nenhuma etapa adicional é necessária. Com o estator preparado, inicia-se o processo de enrolamento. Utiliza-se fio de cobre esmaltado de 0,5 mm e enrolam-se as bobinas sempre no mesmo sentido, seja horário ou anti-horário, para que todas produzam campos magnéticos coerentes entre si. É importante manter um padrão constante de voltas em cada ranhura para garantir o equilíbrio no funcionamento final do motor.

Para formar um motor trifásico, um estator de 12 ranhuras deve ser dividido em três grupos correspondentes às fases A, B e C. Cada fase será formada pelo enrolamento de bobinas em ranhuras separadas por intervalos regulares: a cada três ranhuras, inicia-se novamente a mesma fase. Por exemplo, ao enrolar as ranhuras 1, 4, 7 e 10, obtém-se a Fase A; o mesmo padrão é repetido para compor as fases B e C. Após o enrolamento das três fases, realiza-se o fechamento em estrela (configuração Wye). Para isso, une-se uma das extremidades de cada fase – final da Fase A, final da Fase B e final da Fase C – formando um ponto comum que atuará como neutro. Essa junção deve ser soldada e devidamente isolada. As outras três extremidades permanecem livres e funcionarão como os terminais de saída do estator, onde será conectado o controlador eletrônico de velocidade (ESC).

B.2.2 Rotor e fixação dos ímãs

O diâmetro interno do rotor deve ser devidamente calculado para acomodar os 16 ímãs com um espaçamento mínimo em relação ao estator, sem tocá-lo (aproximadamente 0,5 mm a 1 mm de folga). Feito esse dimensionamento, cole os ímãs na parede interna do rotor (ou externa, dependendo do *design*) alternando as polaridades: norte - sul - norte - sul. Para garantir que os ímãs não se soltarão quando o motor começar a girar, utilize cola epóxi para fixá-los no rotor.

B.2.3 Montagem mecânica

Inicia-se a montagem com os rolamentos sendo inseridos no centro do estator (ou na base de suporte). O eixo deve passar justo pelos rolamentos. Se necessário, faça ranhuras no eixo para anéis de retenção para evitar deslocamento axial. Em seguida, fixe o rotor solidamente ao eixo. Para garantir que o rotor gire livremente ao redor do

estator, é necessário controlar a folga axial do conjunto. Para isso, utilizam-se arruelas finas (espaçadores), posicionadas entre o rotor e os rolamentos, ou entre os rolamentos e o suporte do estator.

B.2.4 Conexão eletrônica e testes

Para o teste de funcionamento, solde conectores tipo *bullet* ou diretos, nos 3 fios que saem do estator e conecte-os às 3 saídas do ESC. A ordem dos fios determina apenas o sentido de rotação; para inverter, troque quaisquer dois fios. Conecte o cabo de sinal do ESC ao testador de servo (ou pino PWM do Arduino). Em seguida, alimente o sistema, conectando no ESC a bateria ou fonte. O motor pode precisar de um leve impulso manual se o estator não tiver núcleo de ferro (ferromagnético), pois o campo magnético inicial pode ser fraco para vencer a inércia em estatores de plástico.

B.3 Vídeos do Youtube

O tutorial descrito acima foi baseado em alguns vídeos disponíveis no YouTube. Abaixo seguem os links para cada vídeo; nos respectivos canais é possível encontrar outros tutoriais com variações de motor *brushless*. Recomenda-se que o professor realize o *download* dos vídeos previamente à aplicação, assegurando o acesso ao material mesmo em ambientes sem conexão com a internet.

- **Vídeo 1:** Making Jet Speed 50000RPM BLDC Motor Using PVC Pipe
 - <https://youtu.be/UfM2ujmw1ag?si=HkUFIFX4xF-AYoOi>
- **Vídeo 2:** Fazendo um motor sem escova poderoso a partir de um motor escovado DC - motor sem escova caseiro
 - https://www.youtube.com/watch?v=kAU_wBoUxKg
- **Vídeo 3:** Como fazer um motor sem escova potente - Super ideia para criar um motor sem escova
 - <https://www.youtube.com/watch?v=Ik-4dgXfhQ8>
- **Vídeo 4:** Making BLDC Motor | Brushless DC Motor
 - <https://www.youtube.com/watch?v=Wqr1b4mWDsE>
- **Vídeo 5:** The BLDC Motor
 - <https://www.youtube.com/shorts/Ujhx4hHET3U>

APÊNDICE C – Modelo utilizado de motor *brushless*: A2212 2200KV

O modelo escolhido para a aplicação da sequência didática é o modelo **A2212 2200KV**, amplamente utilizado em aeromodelismo, drones e outras aplicações de recreamento. Devido à sua compactação e baixa massa torna-se ideal para sistemas que requerem alta rotação, como drones de corrida e aviões elétricos de pequeno porte. O que facilita o manuseio por parte dos estudantes durante os encontros. Como seu modelo é *outrunner* (o rotor externo gira em torno do estator interno fixo), proporciona maior torque em comparação com motores *inrunner* de tamanho semelhante, o que é ideal para sistemas com hélices.

Figura 5 – Modelo A2212 2200KV



Fonte: Saravati - Materiais Técnicos (n.d.a)

Listamos abaixo algumas especificações técnicas de interesse fornecidas por Saravati - Materiais Técnicos.

- Modelo: A2212 2200KV
- Marca: OEM
- RPM/V: 2200 RPM/V
- Eficiência máxima: 80%
- Número de células: 2-3 Li-Po

- Tensão de operação: 7,4-11,1 V (2-3 Li-Po)
- Faixa de corrente para eficiência máxima: 7-16A (>75%)
- Corrente: 0,5A (10 V sem carga)
- Corrente máxima: 12A/60seg
- Resistência interna: 150 ohm
- Dimensão do estator: 22x10mm
- Diâmetro do eixo: 3mm
- Massa recomendada do modelo: 200-600g

A partir das especificações acima podemos tirar conclusões interessantes que potencializam a utilização desse modelo como prática pedagógica para a aprendizagem de elementos de Eletromagnetismo. O termo “KV” representa a constante de velocidade do motor, indicando quantas rotações por minuto (RPM) ele atinge por volt aplicado, como temos a especificação de 2200 KV, significa que a cada 1 V aplicado ele girará a aproximadamente 2200 RPM (sem hélice ou carga acoplada). Se, por exemplo, você usar uma bateria de 11.1 V (3S LiPo), o motor pode atingir aproximadamente 24.420 RPM ($2200 \cdot 11,1$). O termo A2212 significa que temos um motor *outrunner* (A) com um estator de 22 mm de diâmetro e 12 mm de altura.

APÊNDICE D – Slides e figuras utilizadas durante os encontros

D.1 Primeiro encontro

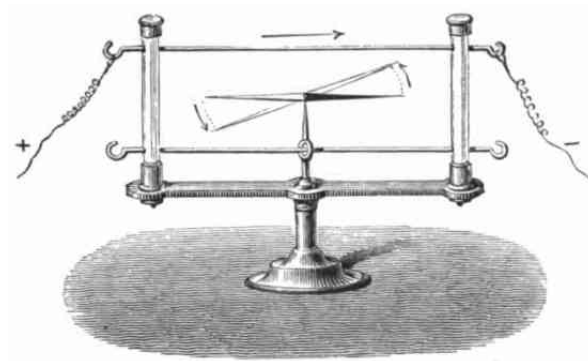
Figura 6 – Ficha ilustrativa para identificação dos componentes do motor *brushless*



Fonte: Autor (2025)

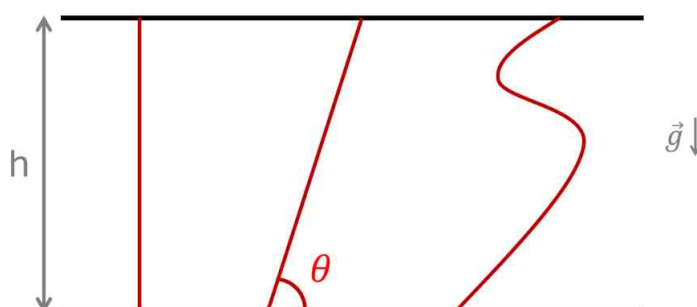
D.2 Segundo encontro

Figura 7 – Ilustração do aparato experimental utilizado por Oersted



Fonte: Wikimedia Commons (2013)

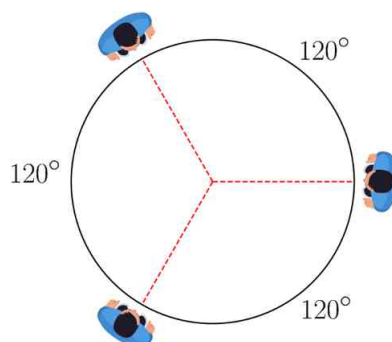
Figura 8 – Esquema de 3 trajetórias de um corpo solto em um campo gravitacional uniforme



Fonte: Autor (2025)

D.3 Terceiro encontro

Figura 9 – Analogia para o motor trifásico



Fonte: Autor (2025)

APÊNDICE E – Atividade 1

COMO O MOTOR FUNCIONA?

1. Por que precisamos de ímãs? Um só não bastaria? Qual o motivo deles estarem dispostos dessa forma ao redor do eixo de rotação?
2. Para que servem os fios de cobre? A quantidade de voltas no enrolamento influencia em alguma coisa?
3. Os ímãs poderiam estar dispostos externamente? Ou seja, eles poderiam trocar de lugar com as bobinas?
4. Por que existe o controlador ESC?
5. Produza um texto descritivo sobre o funcionamento do motor, atribua a cada componente uma função e explique o funcionamento geral.

APÊNDICE F – Atividade 2

EXPLICAÇÃO DOS CONCEITOS FÍSICOS PRESENTES NO FUNCIONAMENTO DO MOTOR

1. O motor pode ser considerado um sistema conservativo? Por quê? Existe conversão de uma forma de energia em outra?
2. Existe corrente elétrica no motor? Se sim, onde está a diferença de potencial responsável por causar o movimento ordenado de portadores de carga elétrica?
3. Existe torque no motor? Se sim, onde e qual é o objeto que o causa e qual é o objeto que sofre sua ação?
4. Qual o papel do campo magnético dos ímãs?
5. Elabore um texto descritivo sobre os princípios físicos envolvidos no funcionamento do motor. No texto, relacione cada conceito físico com os seus respectivos componentes.

APÊNDICE G – Atividade final

1. Dadas as grandezas R (distância média entre as bobinas e os ímãs), I (corrente elétrica nas bobinas), B (intensidade do campo magnético gerado pelas bobinas), N (número de ímãs) e L (comprimento dos fios nas bobinas), construa uma equação que forneça a intensidade do torque ($\mathfrak{T}$) sobre os ímãs.
2. Observe o gráfico abaixo.

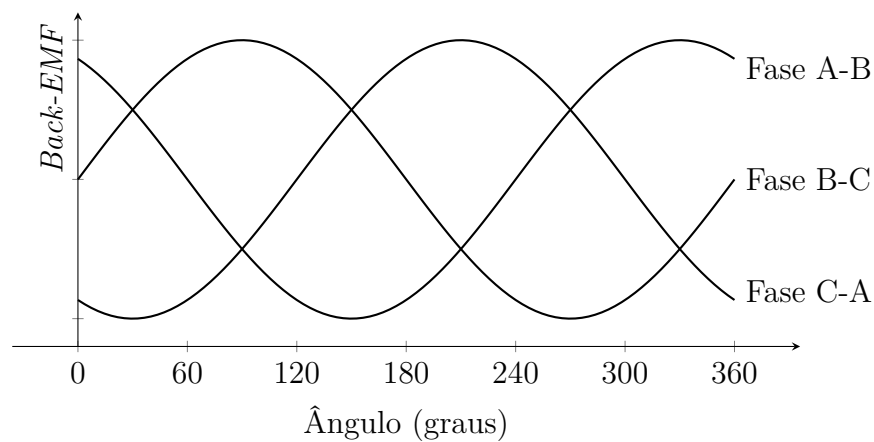
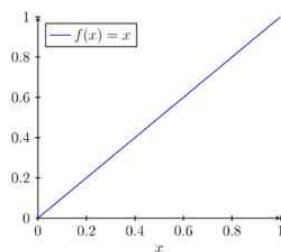
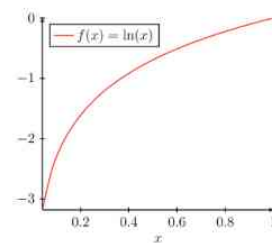


Figura 10 – Tensão gerada nas bobinas

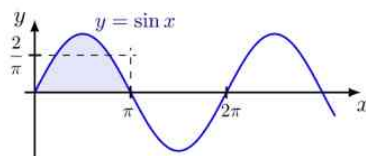
O gráfico representa um caso ideal do comportamento da tensão gerada nas bobinas devido à variação de fluxo de campo magnético provocado pelo movimento de rotação dos ímãs. Observe os gráficos abaixo de algumas funções elementares, que função você utilizaria para representar o comportamento da *Back-EMF*?



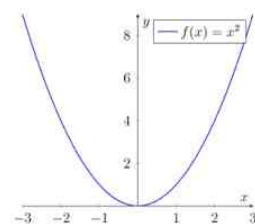
()



()



()



()

3. Sabemos que o motor *brushless* pode ser utilizado para diversas aplicações, como *drones*, ferramentas domésticas e industriais (parafusadeira, serra circular, etc), *coolers* de computador, etc. Tendo em vista seu funcionamento mecânico, você o utilizaria para a construção de qual ferramenta prática? E com qual objetivo?
4. Vimos que a corrente elétrica que atravessa as bobinas faz surgir um campo magnético ao seu redor. O efeito inverso seria possível? Ou seja, campos magnéticos poderiam gerar correntes elétricas?
5. A prática realizada despertou em você um papel mais ativo na consolidação do seu aprendizado? Você se sentiu protagonista no processo de construção de conhecimento? Justifique.
6. Este espaço é destinado à sua avaliação sobre a sequência de aulas que tivemos. Disserte brevemente sobre aspectos positivos e negativos.