



**MNPEF** Mestrado Nacional  
Profissional em  
Ensino de Física

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO SUL E SUDESTE DO PARÁ**  
**INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS**  
**MESTRADO NACIONAL PROFISSIONAL EM ENSINO DE FÍSICA**  
**POLO 29**

**Antonio Bruno dos Santos Cardoso**

**Desenvolvimento de um Aplicativo Android Voltado ao Ensino de Eletrostática**

Marabá-PA

2024

**Antonio Bruno dos Santos Cardoso**

**Desenvolvimento de um Aplicativo Android Voltado ao Ensino de Eletrostática**

Dissertação apresentada ao Polo 29 do Programa de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física da Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física. Área de concentração: Física no Ensino Médio.

Orientador: Prof. Dr. Tiago Carvalho Martins.

Marabá-PA

2024

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**  
**Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará**  
**Biblioteca Setorial Campus do Tauarizinho**

---

C268d Cardoso, Antônio Bruno dos Santos  
Desenvolvimento de um aplicativo android voltado ao ensino de eletrostática / Antônio Bruno dos Santos Cardoso. — 2024.

Orientador(a): Tiago Carvalho Martins.  
Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará, Instituto de Ciências Exatas, Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física, Marabá, 2024.

1. Física - Estudo e ensino. 2. Física (Ensino médio) - Estudo e ensino. 3. Eletromagnetismo. 4. Eletrostática. 5. Android (Recurso eletrônico). I. Martins, Tiago Carvalho, orient. II. Título.

CDD: 22. ed.: 530.07

**SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO SUL E SUDESTE DO PARÁ  
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS-ICE  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA  
MESTRADO NACIONAL PROFISSIONAL EM ENSINO DE FÍSICA**

**ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO**

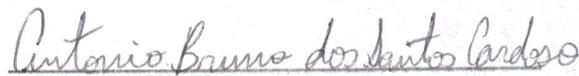
Ata da apresentação e defesa de dissertação de Mestrado intitulada **Desenvolvimento de um Aplicativo Android Voltado ao Ensino de Eletrostática**, para concessão do grau de Mestre em Ensino de Física, realizada às 14:00 horas do dia 11 de novembro de 2024, de forma remota, via Google Meet, link da defesa: <https://meet.google.com/kdi-pyfk-cwx>. A dissertação foi apresentada durante 50 minutos pelo mestrando **Antônio Bruno dos Santos Cardoso**, diante da banca examinadora aprovada pela Sociedade Brasileira de Física, assim constituída, membros: Prof. Dr. Tiago Carvalho Martins (Presidente), Prof. Dr. Narciso das Neves Soares (membro externo ao programa) e Prof. Dr. Antonio Maia de Jesus Chaves Neto (membro externo - UFPA). Em seguida, o mestrando foi submetida à arguição, tendo demonstrado suficiência de conhecimento no tema objeto da dissertação, havendo à banca examinadora decidido pela Aprovação da dissertação. Para constar, foram lavrados os termos da presente ata, que lida e aprovada recebe a assinatura dos integrantes da banca examinadora e do mestrando.

**Assinaturas:**

\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Tiago Carvalho Martins (Presidente)

\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Narciso das Neves Soares (membro externo ao programa)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Antonio Maia de Jesus Chaves Neto (membro externo - UFPA)

  
\_\_\_\_\_  
Antônio Bruno dos Santos Cardoso (Mestrando)



---

*Emitido em 11/11/2024*

**ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO Nº 80/2024 - PPGFIS (11.26.01)**

**(Nº do Protocolo: NÃO PROTOCOLADO)**

*(Assinado digitalmente em 29/11/2024 17:54 )*  
NARCISO DAS NEVES SOARES  
PROFESSOR DO MAGISTÉRIO SUPERIOR  
2190619

*(Assinado digitalmente em 29/11/2024 17:47 )*  
TIAGO CARVALHO MARTINS  
PROFESSOR DO MAGISTÉRIO SUPERIOR  
1683974

Para verificar a autenticidade deste documento entre em <https://sipac.unifesspa.edu.br/documentos/> informando seu número: **80**, ano: **2024**, tipo: **ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO**, data de emissão: **29/11/2024** e o código de verificação: **815d8f382d**

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço, primeiramente, a Deus por me guiar nesta jornada, pelas oportunidades concedidas a mim e por me dar sabedoria e discernimento ao longo da minha vida. Agradeço aos meus pais e irmãos que sempre me apoiaram e torceram por minhas conquistas, à minha esposa, Beatriz, que me apoiou e ajudou sempre que precisei.

Agradeço também ao Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física, ao Programa de Pós-Graduação e à Sociedade Brasileira de Física. E, por fim, agradeço enormemente ao meu orientador Prof. Dr. Tiago Carvalho Martins, por ter me orientado durante essa caminhada de maneira formidável, pela sua paciência e colaboração em todas as etapas.

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

## RESUMO

Em virtude da crescente utilização da tecnologia aliada às metodologias de ensino e da evidente necessidade de uma abordagem inovadora no ensino de física, o objetivo deste trabalho é criar um aplicativo para smartphone que apresente os conceitos físicos, relacionados à eletrostática, de forma dinâmica e ilustrada, apresentando um contexto didático e interativo para o usuário, que estimule o interesse dos estudantes e facilite a compreensão dos conceitos fundamentais da eletrostática, contribuindo para a formação de uma base sólida de conhecimento nessa área. Portanto, o desenvolvimento desse aplicativo representa uma oportunidade de aprimorar o ensino de física, alinhando-o às demandas atuais e explorando o potencial das tecnologias móveis. Tomaremos, como base, os Três Momentos Pedagógicos de Demétrio Delizoicov. Esses momentos são caracterizados por: Problematização inicial, Organização do conhecimento e Aplicação do conhecimento. Os resultados da aplicação do produto indicam que o ensino de física, acompanhado de uma boa metodologia em conjunto com novas tecnologias, trazendo para a realidade do aluno elementos do cotidiano, é satisfatório e eficaz, tornando o processo ensino-aprendizagem mais significativo, interdisciplinar e prático. Além disso, a criação desse aplicativo proporciona uma oportunidade de democratizar o acesso ao conhecimento, uma vez que a maioria dos estudantes possui smartphones. Ao oferecer uma abordagem interativa e contextualizada, espera-se engajar os alunos de forma mais efetiva, estimulando sua participação ativa e promovendo a autonomia no processo de aprendizagem.

Palavras-chave: Aplicativos móveis. Eletrostática. Momentos pedagógicos.

## **ABSTRACT**

Due to the increasing use of technology combined with teaching methodologies and the evident need for an innovative approach in physics education, the objective of this study is to create a smartphone application that dynamically and visually presents the physical concepts related to electrostatics, providing a didactic and interactive context for the user. The application aims to stimulate students' interest and facilitate their understanding of the fundamental concepts of electrostatics, contributing to the establishment of a solid knowledge base in this field. Therefore, the development of this application represents an opportunity to enhance physics education by aligning it with current demands and exploring the potential of mobile technologies. The Three Pedagogical Moments proposed by Demétrio Delizoicov will serve as the foundation for this study, characterized by Initial Problem Solving, Knowledge Organization, and Application of Knowledge. The results of the application of the product indicate that physics teaching, accompanied by effective methodologies and new technologies that bring elements from students' daily lives into the learning process, is satisfactory and efficient, making the teaching-learning process more meaningful, interdisciplinary, and practical. Moreover, the creation of this application provides an opportunity to democratize access to knowledge, as the majority of students own smartphones. By offering an interactive and contextualized approach, it is expected to engage students more effectively, stimulate their active participation, and foster autonomy in the learning process.

**Keywords:** Mobile applications. Electrostatics. Pedagogical moments.

# Lista de Figuras

1	Repulsão entre cargas de mesmo sinal. . . . .	32
2	Atração entre cargas opostas. . . . .	32
3	Metais como cobre, prata, ouro, alumínio, ferro, zinco, níquel, platina, chumbo e estanho são bons condutores. Aqui é mostrada uma tijela de ouro. . . . .	33
4	Isolantes como vidro, plástico, cerâmica, borracha, madeira e isopor fazem parte do cotidiano. Aqui é mostrada uma tijela de vidro. . . . .	34
5	Balança de Torção de Coulomb. . . . .	37
6	Linhas de campo: (a) as linhas saem da carga positiva; (b) as linhas entram na carga negativa; (c) e (d) linhas entre cargas de mesmo sinal; (e) linhas de campo num dipolo elétrico. . . . .	40
7	O funcionamento do para-raios baseia-se na eletrização por indução e no poder das pontas. . . . .	46
8	Telas de cadastro e de login. . . . .	61
9	Amostra do conteúdo sobre campo elétrico. . . . .	62
10	Ícone do aplicativo. . . . .	62
11	Amostra de questão e feedback. . . . .	63
12	Pêndulo eletrostático. . . . .	66
13	Realização do experimento Pêndulo Eletrostático durante o primeiro momento pedagógico. . . . .	68
14	Realização do uso do aplicativo durante o segundo momento pedagógico. . .	69
15	Questionamento 1: O uso do aplicativo ajudou você a compreender o conteúdo abordado? . . . . .	70
16	Questionamento 2: A interface do aplicativo (Janelas, botões e animações) é considerada atraente para sua utilização? . . . . .	71
17	Questionamento 3: Você aprova a utilização de simulações durante as aulas de física? . . . . .	72

18	Questionamento 4: O uso do aplicativo contribuiu para a solução das atividades proposta? . . . . .	73
19	Questionamento 5: Você apresentou dificuldades na utilização do aplicativo?	74
20	Questionamento 6: Você já utilizou outro software para aprender algum conteúdo em aulas de física? . . . . .	75
21	Questionamento 7: Durante a utilização do aplicativo ocorreram travamentos, ou defeitos? . . . . .	76
22	Questionamento 8: Como você avalia a experiência de aprendizado na aula que utilizou os três momentos pedagógicos e o aplicativo Eletrostática no Cotidiano? Compartilhe suas opiniões e percepções sobre como a abordagem contribuiu para o seu aprendizado, destacando pontos positivos e negativos e se você tem preferência ou não por esse tipo de metodologia. . . . .	77

# Lista de Quadros

1	Resumo das aplicações de smartphones no ensino de física . . . . .	21
2	Desenvolvimento de Simuladores e Ferramentas Digitais para o Ensino de Física . . . . .	21
3	Materiais necessários para a realização do experimento. . . . .	67

# Lista de Tabelas

1	Valores de constante dielétrica para diferentes meios. . . . .	37
---	--	----

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>14</b>
1.1	Justificativa . . . . .	16
1.2	Objetivo . . . . .	17
1.2.1	Objetivo Geral . . . . .	17
1.2.2	Objetivos Específicos . . . . .	17
1.3	Um Pouco da Trajetória Profissional e de Formação do Autor . . . . .	18
1.4	Estrutura da Dissertação . . . . .	19
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>20</b>
2.1	Uso de Aplicativos no Ensino de Física . . . . .	22
2.2	Desenvolvimento de Simuladores e Ferramentas Digitais para o Ensino de Física . . . . .	25
2.3	Aplicações de Tecnologia Móvel no Ensino de Física . . . . .	26
<b>3</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>28</b>
3.1	Referencial Teórico Pedagógico . . . . .	28
3.2	Os Três Momentos Pedagógicos de Demétrio Delizoicov . . . . .	28
3.2.1	Problematização Inicial . . . . .	29
3.2.2	Organização do Conhecimento . . . . .	29
3.2.3	Aplicação do Conhecimento . . . . .	30
3.3	Impactos na aprendizagem dos estudantes . . . . .	30
3.4	Eletrostática . . . . .	31
3.5	Cargas Elétricas . . . . .	31
3.6	Condutores, Isolantes, Semicondutores e Supercondutores . . . . .	32
3.7	Lei de Coulomb . . . . .	36
3.8	Quantização da Carga Elétrica . . . . .	37
3.9	Conservação da Carga Elétrica . . . . .	38
3.10	Campo Elétrico . . . . .	39

3.11 Linhas de Campo Elétrico . . . . .	39
3.12 Campo Elétrico Produzido por uma Carga Pontual . . . . .	40
3.13 Distribuição Contínua de Cargas . . . . .	41
3.14 Fluxo Elétrico e Lei de Gauss . . . . .	42
3.15 Divergência, Teorema de Gauss do Campo Elétrico e Equação de Poisson .	43
3.16 Poder das Pontas . . . . .	45
3.17 Trabalho, Energia Potencial e Potencial Elétrico . . . . .	46
3.18 Potencial de uma Distribuição de Cargas . . . . .	49
3.19 Dipolos Elétricos . . . . .	49
3.20 Circulação do Campo Elétrico, Rotacional e Teorema de Stokes . . . . .	51
3.21 Energia Eletrostática . . . . .	53
3.22 Capacitores . . . . .	54
<b>4 DESCRIÇÃO E IMPLEMENTAÇÃO DO PRODUTO</b>	<b>59</b>
4.1 Informações contextuais sobre o local de aplicação do produto educacional .	59
4.2 Apresentação do Produto . . . . .	60
4.3 Metodologia de Aplicação . . . . .	64
4.4 Descrição do experimento . . . . .	65
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>68</b>
<b>6 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>84</b>
<b>APÊNDICE A- PRODUTO EDUCACIONAL</b>	<b>90</b>
<b>APÊNDICE B- QUESTIONÁRIO DE AVALIAÇÃO DO APLICATIVO</b>	<b>113</b>

# Capítulo 1

## INTRODUÇÃO

A educação é um campo em constante evolução, e o ensino de física, em particular, apresenta desafios únicos para os educadores. Ao longo dos anos, desde a sua inserção no currículo da educação básica, o ensino de física foi pautado por aulas expositivas, voltadas para um ensino focado na transmissão de conteúdo e resolução de exercícios, com pouca associação com a prática ou com o cotidiano do aluno (ROSA; ROSA, 2005).

Segundo Rosa e Rosa (2005):

Hoje, no início do século XXI, mais de cem anos de história se passaram desde a introdução da Física nas escolas no Brasil, mas sua abordagem continua fortemente identificada com aquela praticada a cem anos atrás: ensino voltado para a transmissão de informações através de aulas expositivas utilizando metodologias voltadas para a resolução de exercícios algébricos. Questões voltadas para o processo de formação dos indivíduos dentro de uma perspectiva mais histórica, social, ética, cultural, permanecem afastadas do cotidiano escolar, sendo encontradas apenas nos textos de periódicos relacionados ao ensino de Física, não apresentando um elo com o ambiente escolar (ROSA; ROSA, 2005).

Se faz necessário uma aproximação entre a teoria e prática, no que tange às pesquisas sobre o ensino de física e aplicação dos seus resultados no dia a dia escolar. Tornar o ensino de física mais prazeroso, mais próximo da realidade do aluno, trazendo aplicações práticas e facilitando o seu acesso a recursos que possibilitem o seu contato com modelos e esquemas explicativos é de fundamental importância para garantir o sucesso do processo de ensino-aprendizagem.

Tal abordagem didática deve ser incrementada para todas as áreas do ensino de física, contemplando todos os conteúdos. Esta dissertação traz consigo um modelo didático para aplicação no ensino de eletrostática. Compreender os conceitos complexos relacionados à eletrostática e transmiti-los de forma eficaz aos alunos pode ser uma tarefa árdua.

No entanto, o uso de tecnologias educacionais, como aplicativos móveis, oferece novas oportunidades para aprimorar o processo de ensino-aprendizagem.

Nos dias atuais, em pleno século XXI, o uso da tecnologia em sala de aula deveria ser algo natural, alunos e professores interagindo com recursos tecnológicos para aprimorar a aprendizagem, porém, ainda se observa que, mesmo após muitos anos, o ensino ainda continua voltado para a transmissão de conteúdo bancária e direcionada para o treinamento de resolução de exercícios pensados para o vestibular (MOREIRA, 2018).

Simulações computacionais, modelagem computacional, laboratórios virtuais deveriam estar naturalmente integrados ao ensino de Física no século XXI. Celulares também poderiam fazer parte dessa tecnologia que deveria permear o ensino de Física nos dias de hoje. Mas não é assim. É claro que a escola pode não ter a instrumentação necessária, mas a principal razão da não incorporação das TIC no ensino de Física na atualidade é o foco no treinamento para as provas, a ênfase nas “respostas corretas”, no emprego de fórmulas para resolver problemas conhecidos. Isso é ensino de Física? Certamente não! (MOREIRA, 2018, p. 76)

Esta dissertação busca explorar o potencial de um aplicativo móvel como ferramenta de ensino para a eletrostática, com base nos Três Momentos Pedagógicos propostos por Demétrio Delizoicov. Os Três Momentos Pedagógicos, que compreendem a problematização inicial, organização do conhecimento e a aplicação do conhecimento, têm sido amplamente adotados como estratégias eficazes no ensino de ciências.

O objetivo deste estudo é verificar como um aplicativo móvel pode ser utilizado, no contexto de um recurso instrucional que compreende cada um dos Três Momentos Pedagógicos para promover uma compreensão mais aprofundada e significativa dos conceitos da eletrostática. Ao explorar o potencial dessa tecnologia educacional, espera-se melhorar a experiência de aprendizagem dos alunos e fornecer aos professores uma ferramenta eficaz para aprimorar suas práticas de ensino.

A dissertação será conduzida por meio de uma abordagem de pesquisa qualitativa e quantitativa, envolvendo a observação e análise de aulas de física que incorporam o uso do aplicativo móvel. Além disso, serão coletados dados por meio de questionários e entrevistas com alunos e professores participantes, a fim de compreender suas percepções sobre a eficácia do aplicativo como ferramenta de ensino.

Espera-se que os resultados desta pesquisa forneçam insights valiosos sobre o uso de aplicativos móveis no ensino de física, especificamente no contexto da eletrostática. Além disso, pretende-se contribuir para a discussão mais ampla sobre o papel das tecnologias educacionais no campo da educação científica, destacando a importância de estraté-

gias pedagógicas eficazes e inovadoras.

No decorrer desta dissertação, serão discutidos aspectos teóricos relacionados ao eletrostática, aos Três Momentos Pedagógicos de Delizoicov e às potencialidades do uso de aplicativos móveis no ensino. Serão apresentados estudos anteriores que abordam a integração de tecnologia no ensino de física, bem como a relevância dos Três Momentos Pedagógicos como estrutura metodológica.

Por fim, espera-se que esta dissertação contribua para o aprimoramento das práticas de ensino de física, fornecendo subsídios para a implementação de estratégias pedagógicas inovadoras e eficazes, que possam promover uma compreensão mais profunda dos conceitos de eletrostática por parte dos estudantes.

## **1.1 Justificativa**

O ensino de física, em particular da eletrostática, é um desafio complexo para educadores e estudantes. Os conceitos envolvidos nessa área são abstratos e exigem uma compreensão profunda para sua aplicação prática. Além disso, a forma tradicional de ensino, baseada em aulas expositivas e materiais didáticos convencionais, muitas vezes não consegue despertar o interesse dos alunos nem promover uma aprendizagem significativa.

Diante desse cenário, a utilização de tecnologias educacionais, como aplicativos móveis, torna-se uma opção promissora para superar esses desafios. Os aplicativos móveis oferecem recursos interativos, dinâmicos e adaptáveis, que podem facilitar a compreensão e a aplicação dos conceitos da eletrostática, ao mesmo tempo em que despertam o interesse e a motivação dos alunos.

A escolha dos Três Momentos Pedagógicos de Demétrio Delizoicov como referencial teórico para esta pesquisa se justifica pela sua abordagem construtivista, que promove a contextualização dos conceitos, a problematização das situações e a sistematização dos conhecimentos adquiridos. Essa abordagem tem se mostrado eficaz no ensino de ciências, pois permite aos alunos construir seu próprio conhecimento de forma ativa e significativa.

Esta pesquisa é relevante, pois contribui para o aprimoramento das práticas de ensino de física, especialmente no contexto da eletrostática, por meio do uso de tecnologias educacionais inovadoras. Ao investigar o uso de um aplicativo móvel nos Três Momentos Pedagógicos, busca-se fornecer subsídios para os professores utilizarem estratégias pedagógicas mais eficazes, que possam potencializar a aprendizagem dos alunos.

Além disso, essa dissertação também se justifica pelo seu potencial de impacto social. A formação de indivíduos com uma compreensão sólida dos princípios da eletrostática é fundamental para o avanço científico e tecnológico da sociedade. Ao promover uma aprendizagem mais significativa nessa área, por meio do uso de um aplicativo móvel, espera-se contribuir para a formação de estudantes mais preparados e engajados com a ciência.

Por fim, a justificativa dessa pesquisa está em sua contribuição para o avanço do conhecimento científico no campo da educação em física. Ao explorar o potencial do uso de aplicativos móveis nos Três Momentos Pedagógicos, essa dissertação pretende fornecer percepções e evidências empíricas que possam subsidiar futuras pesquisas e práticas educacionais na área.

## **1.2 Objetivo**

### **1.2.1 Objetivo Geral**

Analisar o potencial educacional de um aplicativo móvel no ensino de eletromagnetismo, com base nos Três Momentos Pedagógicos de Demétrio Delizoicov, visando promover uma compreensão mais aprofundada e significativa dos conceitos pelos alunos.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

Considerando o desenvolvimento do trabalho e o objetivo geral apresentado, destacam-se os seguintes objetivos específicos:

- Analisar a eficácia do aplicativo móvel como ferramenta de ensino no contexto da eletrostática, considerando os Três Momentos Pedagógicos de problematização inicial, organização do conhecimento e aplicação do conhecimento.
- Avaliar o impacto do uso do aplicativo móvel no engajamento e na motivação dos alunos no processo de aprendizagem de eletrostática.
- Investigar as percepções dos alunos e dos professores participantes sobre a utilização do aplicativo móvel no ensino de eletrostática, identificando os pontos positivos e os desafios encontrados durante sua implementação.

## **1.3 Um Pouco da Trajetória Profissional e de Formação do Autor**

O autor começou a experiência docente em 2008, aos 16 anos, quando ainda estava no segundo ano do ensino médio. Foi convidado para substituir professores de ciências e matemática do ensino fundamental em momentos necessários. Com o tempo, ministrando aulas para as séries finais do ensino fundamental, desenvolveu uma paixão pela profissão.

Em 2009, o autor teve a oportunidade de prestar vestibular para o curso de Licenciatura em Ciências com Habilitação em Física na Universidade Estadual do Maranhão - UEMA, polo Açailândia-MA. Embora seu sonho inicial fosse cursar Engenharia Mecânica, o autor se interessou pelo curso devido à sua paixão por lecionar. Os incentivos recebidos de seus professores, que reconheciam sua habilidade como educador, também foram fundamentais para essa decisão.

O autor prestou vestibular e foi aprovado, iniciando o curso em 2010. Sempre teve afinidade com a área de exatas, o que fez com que gostasse do curso desde o início. Paralelamente ao curso, continuou a dar aulas no ensino fundamental, substituindo outros professores nas disciplinas de ciências e matemática. Em 2012, quando havia completado cinquenta por cento do curso, teve a oportunidade de trabalhar como professor de física em uma escola particular da cidade. Embora tenha sido um período breve de apenas três meses, em um curso supletivo do ensino médio, proporcionou-lhe o primeiro contato com o ensino de física propriamente dito.

Em 2012, aos 20 anos, o autor participou de um processo seletivo para ser instrutor nos cursos profissionalizantes do Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial – SENAI, Unidade de Açailândia-MA, voltados para o ensino de eletricidade. Sua formação técnica em Eletromecânica, obtida no próprio SENAI entre 2008 e 2009, e o fato de estar cursando Física, uma área correlata, levaram à sua contratação. De 2012 a 2014, atuou nos cursos de Eletricidade Básica, Eletricista Residencial e Eletricista Industrial, ministrando aulas teóricas e práticas.

Em novembro de 2014, o autor concluiu sua graduação. Em 2016, foi promovido a Instrutor de Ensino Superior no SENAI, onde passou a ministrar aulas nas unidades curriculares relacionadas ao ensino de eletricidade nos cursos técnicos em Eletromecânica. No mesmo ano, tornou-se professor de Ciências para os anos finais do ensino fundamental (sétimo, oitavo e nono ano) em escolas da rede pública municipal, através de um processo

seletivo.

O autor também teve experiência no Instituto Estadual de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão-IEEMA, Unidade Vocacional de Açailândia. Atuou como Professor-Formador durante os meses de outubro a dezembro, nos anos 2018 e 2019, no curso de Eletricista Residencial (160h). Além disso, no ano de 2020, de novembro a dezembro, trabalhou no curso de Instalação e Manutenção de Ar Condicionado.

Em 2021, o autor decidiu prestar o exame para a turma de mestrado de 2022. Foi aprovado e, passou a se dedicar totalmente à docência do ensino básico, deixando de lado o ensino técnico. Desde o ingresso no mestrado até o presente momento, o autor tem ministrado aulas em uma escola estadual, mas também passou por escolas da rede privada e, recentemente, começou a atuar no Instituto Federal. Todas essas experiências reforçaram seu objetivo de tornar o processo de ensino-aprendizagem mais atraente para os estudantes. Com base nisso, a ideia de criar um aplicativo para o ensino de eletrostática surgiu naturalmente e se alinhou perfeitamente com a didática e as expectativas dos alunos.

## **1.4 Estrutura da Dissertação**

A dissertação aborda a aplicação de tecnologia móvel e ferramentas digitais no ensino de Física, com foco em Eletrostática. A introdução justifica a pesquisa e estabelece os objetivos gerais e específicos. A revisão bibliográfica explora o uso de aplicativos e simuladores no ensino de Física. A fundamentação teórica discute os Três Momentos Pedagógicos de Demétrio Delizoicov e conceitos de Eletrostática. A seção de descrição e implementação do produto apresenta o produto educacional desenvolvido e a metodologia de aplicação. Os resultados e discussões analisam as respostas qualitativas obtidas. A dissertação conclui com considerações finais e um apêndice contendo o produto educacional.

## Capítulo 2

# REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Uma investigação foi conduzida utilizando a *Revista Brasileira de Ensino de Física* como fonte de pesquisa, abrangendo o período de 2015 a 2024. Esta revista é reconhecida como a publicação brasileira mais proeminente no campo do ensino de física. Os artigos em português que incluíam os termos *Android*, *smartphone* ou *aplicativo* foram inicialmente selecionados. No entanto, qualquer artigo que, apesar de conter um desses termos, não abordava o tema de maneira significativa, foi posteriormente excluído da seleção.

A investigação conduzida revelou um conjunto de vinte e um estudos significativos, em que smartphones e aplicativos são utilizados como instrumentos didáticos. O exame cuidadoso desses documentos proporciona uma perspectiva enriquecedora sobre as direções emergentes e prospectivas na incorporação de tecnologias móveis no âmbito educacional.

Ao longo desta pesquisa, foram identificadas várias aplicações práticas e didáticas de smartphones no ensino de física. No quadro 1, essas aplicações foram categorizadas com base no aplicativo ou recurso específico do smartphone utilizado.

Durante a pesquisa, foi identificada uma categoria distinta de trabalhos focados no desenvolvimento de simuladores e ferramentas digitais para o ensino de física. Essas ferramentas variam desde simuladores de experimentos específicos até sistemas de votação para aulas interativas. O quadro 2 fornece um resumo dessas ferramentas e simuladores.

Essas aplicações demonstram a versatilidade dos smartphones como ferramentas de ensino e aprendizagem, oferecendo uma variedade de maneiras de explorar conceitos físicos de maneira prática e envolvente.

A integração de tecnologia no ensino de física, conforme evidenciado por meio do uso de uma variedade de aplicativos de smartphones, tem o potencial de melhorar significativamente a compreensão dos alunos sobre conceitos físicos. Aplicativos como “Physics

Quadro 1: Resumo das aplicações de smartphones no ensino de física

<b>Aplicativo/Recurso</b>	<b>Uso</b>
Physics Toolbox Accelerometer	Calcular a aceleração de um elevador
PhyPhox	Verificar a Lei de Malus; Medir a velocidade do som; Estudar o problema de rotação de líquidos; Criar um experimento didático relacionado à detecção de exoplanetas
PA Tone	Gerar ondas estacionárias em uma corda
Cronômetro e gravador de vídeo do smartphone	Determinar a aceleração gravitacional
Spectroid	Calcular a velocidade das ondas extensionais; Calcular o módulo de elasticidade de Young
Waze	Calcular a integral definida com base na distância percorrida
Isotope Browser	Estudar fissão nuclear e decaimento alfa
Lanterna do smartphone com um filtro azul	Emitir luz ultravioleta (proposta)
Câmera do smartphone	Capturar imagens usadas na videoanálise da propagação de um pulso em uma catenária
Acelerômetro do smartphone	Estudar forças impulsivas (em um experimento prático)
Frequência Doppler para ondas sonoras	Medir a frequência Doppler para ondas sonoras (em um experimento didático)

Fonte: Autor.

Quadro 2: Desenvolvimento de Simuladores e Ferramentas Digitais para o Ensino de Física

<b>Tipo de Ferramenta</b>	<b>Descrição</b>
Simulador	experimento de lei inverso do quadrado da distância, circuito de Chua-Matsumoto
Ferramenta de Análise de Vídeo	Análise de vídeos em aulas de física
Sistema de votação	Sistema de votação em aulas de Física com Peer Instruction
Plataforma com recursos de apoio em sala de aula	Plataforma para pesquisa e aprendizagem de Física

Fonte: Autor.

Toolbox Accelerometer”, “PhyPhox”, “PA Tone”, “Spectroid”, “Waze”, “Isotope Browser”, entre outros, permitem a realização de experimentos práticos e estudos em física. Além disso, O desenvolvimento de simuladores e ferramentas digitais, incluindo ferramentas de análise de vídeo, sistemas de votação e plataformas com recursos de apoio em sala de aula, oferecem um ambiente de aprendizagem mais envolvente e eficaz.

## 2.1 Uso de Aplicativos no Ensino de Física

Nesta seção, discutimos estudos que empregam aplicativos existentes, que não foram desenvolvidos pelos autores dos artigos, para enriquecer o ensino de física.

Franco, Marranghello e Rocha (2016) utilizaram o aplicativo Physics Toolbox Accelerometer, disponível para Android, que acessa o acelerômetro embutido no smartphone. O acelerômetro é o sensor que permite a detecção de movimentos do dispositivo. No contexto do experimento, ele foi usado para coletar dados sobre a aceleração do elevador.

Santos e Laia (2023) exploram o ensino prático da polarização da luz e da Lei de Malus usando o aplicativo PhyPhox<sup>1</sup>. Este aplicativo móvel aproveita os sensores de um smartphone para conduzir experimentos de física. Os sensores atualmente compatíveis com o aplicativo são: acelerômetro, magnetômetro, giroscópio, sensor de luz, sensor de pressão, sensor de proximidade, microfone, GPS/localização, bluetooth para dispositivos personalizados (por exemplo, um Arduino).

Ferreira e Almeida (2022) exploraram o uso do aplicativo móvel Phyphox para realizar a medição da velocidade do som através da análise dos modos acústicos ressonantes. O aplicativo Phyphox foi utilizado para adquirir dados do tipo espectro de áudio.

Guedes (2015) apresenta um estudo sobre a geração de ondas estacionárias em uma corda utilizando o aplicativo gratuito para smartphones “PA Tone”<sup>2</sup>, uma ferramenta de áudio que fornece tons de referência para projetos de pesquisa de frequência sonora e testes de áudio gerais. O estudo demonstrou que o aplicativo é uma alternativa viável a um gerador de ondas comercial, sendo utilizado em conjunto com um oscilador mecânico (alto-falante) para criar ondas estacionárias em uma corda. A densidade linear da corda pode ser inferida a partir deste experimento.

Rossini et al. (2024) utilizam os aplicativos de fábrica de um smartphone, especificamente o cronômetro e o gravador de vídeo, para realizar a determinação da aceleração

---

<sup>1</sup><[https://play.google.com/store/apps/details?id=de.rwth\\_aachen.phyphox&hl=pt\\_BR](https://play.google.com/store/apps/details?id=de.rwth_aachen.phyphox&hl=pt_BR)>

<sup>2</sup><[https://play.google.com/store/apps/details?id=com.dutchmatic.patone&hl=pt\\_BR](https://play.google.com/store/apps/details?id=com.dutchmatic.patone&hl=pt_BR)>

gravitacional. Os autores demonstram como um experimento simples de pêndulo, quando combinado com as capacidades de gravação e cronometragem de um smartphone, pode fornecer uma medida precisa da aceleração gravitacional.

Rossini et al. (2022) exploram a aplicação do aplicativo móvel Spectroid na física experimental. O Spectroid<sup>3</sup> é um analisador de espectro de áudio em tempo real que utiliza o microfone do dispositivo para capturar áudio. Neste estudo, o aplicativo foi usado para determinar as frequências ressonantes em hastes de alumínio e aço, permitindo calcular a velocidade das ondas extensionais.

Rossini et al. (2021) utilizam o aplicativo Spectroid para determinar o módulo de elasticidade de Young de hastes de aço e alumínio, com base nas frequências ressonantes dos harmônicos estabelecidos nelas.

Pereira (2021) usou um *fidjet spinner* para girar um recipiente de acrílico com água tingida de vermelho. Utilizando o aplicativo Phyphox, o sensor de giroscópio do smartphone foi usado para medir a velocidade angular do sistema e comparou-se os resultados experimentais com as previsões teóricas.

Thieghi (2021) explorou o uso do aplicativo móvel Waze<sup>4</sup> para coletar dados de velocidade em tempo real durante uma rota pré-definida. Esses dados foram então analisados para calcular a distância total percorrida através da aplicação do cálculo de integral definida com base na distância percorrida entre dois pontos ( $\text{distância entre } a \text{ e } b = \int_a^b v(t) dt$ ).

Orengo e Schäffer (2019) utilizaram o aplicativo móvel *Isotope Browser*<sup>5</sup> como uma ferramenta para acessar dados nucleares da Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA)<sup>6</sup>, os quais foram utilizados no ensino de Física Nuclear. O estudo se concentra nas áreas de fissão nuclear e decaimento alfa.

Soga, Ueno-Guimarães e Muramatsu (2020) investigaram a proposta de usar a lanterna de um smartphone com um filtro azul para emitir luz ultravioleta (UV) e realizar experimentos de fluorescência. Utilizando um espectrofotômetro, foi analisado o espectro de emissão da lanterna de três smartphones diferentes, comparando os resultados com uma lâmpada de luz negra. O filtro azul foi utilizado para tentar bloquear a luz branca da lanterna e permitir a passagem de luz azul e potencialmente UV. No entanto, os resultados mostraram que as lanternas dos smartphones, mesmo com o filtro azul, não emitem luz UV, mas apenas luz azul visível, tornando-as inadequadas para experimentos de fluorescência.

---

<sup>3</sup><[https://play.google.com/store/apps/details?id=org.intoorbit.spectrum&hl=pt\\_BR](https://play.google.com/store/apps/details?id=org.intoorbit.spectrum&hl=pt_BR)>

<sup>4</sup><<https://play.google.com/store/search?q=waze&c=apps>>

<sup>5</sup><[https://play.google.com/store/apps/details?id=iaea.nds.nuclides&hl=pt\\_BR](https://play.google.com/store/apps/details?id=iaea.nds.nuclides&hl=pt_BR)>

<sup>6</sup><<https://www.iaea.org/>>

Ferreira et al. (2020) exploraram o uso do jogo para smartphones “Glass”<sup>7</sup> como uma ferramenta didática para o ensino de óptica geométrica. O jogo permite aos estudantes manipular feixes de luz usando espelhos, lentes, prismas e outros dispositivos, proporcionando uma experiência de aprendizado interativa e envolvente. O estudo demonstra como a integração de tecnologias digitais no ensino pode facilitar a aprendizagem significativa de conceitos complexos de física.

Barroso, Oliveira e Jesus (2020) elaborou um experimento didático relacionado à detecção de exoplanetas. O estudo usou o aplicativo phyphox para coletar dados de iluminação por meio do sensor de luz embutido nos smartphones. A pesquisa se concentra na área da física que estuda exoplanetas, especificamente na detecção desses corpos celestes pelo método do trânsito. O experimento proposto no artigo é de fácil acesso e pode ser realizado em qualquer ambiente educacional, tornando-o uma ferramenta valiosa para o ensino de astrofísica.

Jesus e Sasaki (2016b) dedicaram-se à criação e análise de um experimento didático que explorou a relação entre a velocidade e a tensão de um pulso e a densidade linear de uma corda pesada que forma uma catenária. A coleta de dados foi realizada apenas com uma câmera de smartphone e o software gratuito de videoanálise para computador.

Fernandes et al. (2016) apresentam um experimento didático que permite a medida da frequência Doppler para ondas sonoras. A geração das ondas sonoras foi realizada com o aplicativo *frequency sound generator*<sup>8</sup> e a recepção do sinal foi realizada por meio do aplicativo *frequency analyzer*<sup>9</sup>.

Jesus e Sasaki (2016a) propuseram uma nova abordagem para o ensino de forças impulsivas por meio de um experimento prático usando o acelerômetro do smartphone, a fim de analisar o impulso produzido com os dedos sobre este dispositivo. O acelerômetro foi acessado com o uso do aplicativo *Accelerometer Monitor*<sup>10</sup>.

---

<sup>7</sup><<https://play.google.com/store/apps/details?id=com.cube3rd.glass&hl=pt&gl=US>>

<sup>8</sup><https://play.google.com/store/apps/details?id=com.luxdelux.frequencygenerator>

<sup>9</sup><<https://play.google.com/store/apps/details?id=fqan.frequencyanalyzer>>

<sup>10</sup><[https://play.google.com/store/apps/details?id=edu.ius.accolyze&hl=en\\_US](https://play.google.com/store/apps/details?id=edu.ius.accolyze&hl=en_US)>

## 2.2 Desenvolvimento de Simuladores e Ferramentas Digitais para o Ensino de Física

Silva, Cavalcante e Frota (2022) desenvolveram um experimento controlado remotamente e um simulador tridimensional, ambos voltados ao estudo prático da lei do inverso do quadrado da distância. O experimento permite mensurar a intensidade luminosa de uma fonte de luz que se afasta gradativamente de um fotoresistor (LDR). O simulador, por outro lado, é um aplicativo para dispositivos Android, desenvolvido em C# na ferramenta *Unity 3D*<sup>11</sup>, que reproduz o experimento real. O aplicativo, chamado “LDR vs Luz”<sup>12</sup>, não utiliza sensores do smartphone, mas simula o experimento real. A validação do protótipo foi realizada usando análise estatística e a propagação do erro, além de confrontar os dados obtidos com um luxímetro.

Martins (2016) desenvolveu um aplicativo Android, chamado “Circuit of Chua and Chaos”<sup>13</sup>, para a simulação do circuito de Chua-Matsumoto. O aplicativo, desenvolvido em Java, resolve o sistema de equações diferenciais não-lineares do circuito usando o método de Runge-Kutta-Fehlberg e permite aos usuários visualizar a trajetória da solução e calcular os expoentes de Lyapunov.

Bordin, França e Bezerra (2022) desenvolveram o aplicativo Android “Videoanalizando”<sup>14</sup>, em React Native<sup>15</sup> (uma biblioteca open-source JavaScript), para videoanálise no ensino de Física. O aplicativo permite aos usuários analisar vídeos de experimentos físicos em seus smartphones, abrangendo tópicos como queda livre, MRU, MRUV, movimento parabólico, pêndulos, oscilações, colisões e conservação de momento e energia. Como um recurso educacional aberto, o “Videoanalizando” está disponível para toda a comunidade de ensino.

Kielt, Silva e Miquelin (2017) desenvolveram uma ferramenta, em linguagem Java, que facilita a aplicação da metodologia *Peer Instruction* em sala de aula. O aplicativo permite que os estudantes respondam a questões durante as aulas, promovendo uma participação ativa e colaborativa.

Souza, Oliveira e Luiz (2024) descrevem o simuFísica®<sup>16</sup>, uma plataforma de simulação computacional para pesquisa e aprendizagem de Física e outras ciências, útil como

---

<sup>11</sup> <<https://docs.unity3d.com/>>

<sup>12</sup> <<https://play.google.com/store/apps/details?id=com.lzacPhysics.LDR>>

<sup>13</sup> <<https://www.amazon.com/Circuit-of-Chua-and-Chaos/dp/B012HNFJVC>>

<sup>14</sup> <<http://videoanalizando.org>>

<sup>15</sup> <<https://reactnative.dev/>>

<sup>16</sup> <<https://play.google.com/store/apps/details?id=com.simufisica>>

recurso de apoio em sala de aula para o Ensino Médio e Superior. No artigo é apresentado o simulador do “Motor elétrico”, com as equações que regem seu funcionamento, alguns estudos mostrando a dinâmica do dispositivo e, por fim, o uso do aplicativo nos ensinos Médio e Superior. As simulações foram desenvolvidas em HTML5, CSS e Javascript.

Claro, posso ajudar a criar uma seção para sua dissertação de mestrado com base nas seções fornecidas. Aqui está uma sugestão:

## **2.3 Aplicações de Tecnologia Móvel no Ensino de Física**

A evolução da tecnologia móvel tem proporcionado novas oportunidades para o ensino de física. Uma variedade de aplicativos de smartphones, que não foram desenvolvidos especificamente para fins educacionais, têm sido empregados de maneira inovadora para enriquecer o ensino de física. Estes aplicativos, que aproveitam os sensores embutidos nos smartphones, têm sido usados para realizar uma série de experimentos práticos e estudos em física.

Por exemplo, o aplicativo Physics Toolbox Accelerometer foi usado para coletar dados sobre a aceleração de um elevador, enquanto o aplicativo PhyPhox foi usado para explorar a polarização da luz e a Lei de Malus, bem como para medir a velocidade do som. Outros aplicativos, como o PA Tone e o Spectroid, foram usados para gerar ondas estacionárias em uma corda e calcular a velocidade das ondas extensionais, respectivamente.

Além disso, os aplicativos de fábrica de um smartphone, como o cronômetro e o gravador de vídeo, foram utilizados para realizar a determinação da aceleração gravitacional. O aplicativo Waze foi usado para coletar dados de velocidade em tempo real durante uma rota pré-definida, permitindo o cálculo da distância total percorrida através da aplicação do cálculo de integral definida.

Paralelamente ao uso de aplicativos existentes, também tem havido um aumento no desenvolvimento de simuladores e ferramentas digitais especificamente projetados para o ensino de física. Estas ferramentas digitais têm o potencial de proporcionar uma experiência de aprendizado mais interativa e envolvente para os alunos.

Por exemplo, um experimento controlado remotamente e um simulador tridimensional foram desenvolvidos para o estudo prático da lei do inverso do quadrado da distância. Além disso, um aplicativo Android foi desenvolvido para a simulação do circuito de Chua-Matsumoto, permitindo aos usuários visualizar a trajetória da solução e calcular os

expoentes de Lyapunov.

Outras ferramentas digitais, como o aplicativo Android "Videoanalizando", foram desenvolvidas para permitir a análise de vídeos de experimentos físicos em smartphones. Além disso, uma ferramenta foi desenvolvida para facilitar a aplicação da metodologia Peer Instruction em sala de aula, promovendo uma participação ativa e colaborativa dos alunos.

Estes exemplos ilustram como a tecnologia móvel e as ferramentas digitais estão sendo cada vez mais integradas ao ensino de física, proporcionando novas oportunidades para a aprendizagem prática e interativa de conceitos físicos. A contínua evolução destas tecnologias promete trazer ainda mais inovações para o campo no futuro.

# Capítulo 3

## FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 3.1 Referencial Teórico Pedagógico

Neste capítulo, exploramos os três momentos pedagógicos propostos por Demétrio Delizoicov: problematização inicial, organização do conhecimento e aplicação do conhecimento. Esses momentos representam uma abordagem reflexiva e participativa para o ensino e a aprendizagem, enfatizando a construção coletiva do conhecimento e o desenvolvimento de habilidades de pensamento crítico. Compreender sua relevância nos permite vislumbrar novas perspectivas para a prática educacional, promovendo a autonomia e o engajamento dos alunos, resultando em um ambiente de aprendizagem estimulante e enriquecedor.

### 3.2 Os Três Momentos Pedagógicos de Demétrio Delizoicov

O método didático-pedagógico de Delizoicov e Angotti (1990), Três Momentos Pedagógicos, nasceu da concepção teórica de Paulo Freire (FREIRE, 1988) e teve como foco principal a elaboração de um currículo de física baseado em temas geradores. Foi originalmente desenvolvido no início dos anos 80 como parte de um projeto de formação de professores na Guiné-Bissau.

Dentre as características da dinâmica dos 3MP, está a apresentação dos assuntos não como fatos a memorizar, mas como problemas a serem resolvidos, propostos a partir da experiência de vida dos educandos, possibilitando que, durante o período de escolarização, tais problemas sejam compreendidos por meio de conhecimentos que os alunos ainda não possuem, quais

sejam aqueles universais, tal como os das teorias da física. Ao se problematizar, de forma dialógica, pretende-se que os conceitos sejam integrados à vida e ao pensamento do educando (MUENCHEN; DELIZOICOV, 2014, p. 634).

É uma transição para um contexto educacional formal baseado na educação dialógica baseada na mediação entre a realidade vivenciada pelos alunos e o conteúdo formal veiculado pelo professor. Esses momentos são concebidos como etapas sequenciais do processo de ensino-aprendizagem, e cada um deles desempenha um papel importante na construção do conhecimento. Os Três Momentos Pedagógicos são:

- Problematização Inicial,
- Organização do Conhecimento e
- Aplicação do Conhecimento.

### **3.2.1 Problematização Inicial**

O primeiro momento pedagógico, denominado problematização inicial, consiste em apresentar aos alunos uma situação problemática relacionada ao conteúdo a ser estudado. Nessa etapa, o professor busca despertar o interesse e a curiosidade dos alunos, estimulando-os a refletir sobre o problema e a formular questões. A problematização inicial tem como objetivo inicializar o processo de construção do conhecimento, instigando a curiosidade e a busca por soluções por parte dos estudantes.

A problematização poderá ocorrer pelo menos em dois sentidos. Por um lado, o aluno já poderá ter noções sobre as questões colocadas, fruto da aprendizagem anterior na escola ou fora dela. (...) Por outro lado, a problematização pode permitir que o aluno sinta a necessidade da aquisição de outros conhecimentos que ainda não detém. (DELIZOICOV; ANGOTTI, 2003, p. 29)

Durante a problematização inicial, o professor atua como mediador, facilitando a identificação e a formulação das questões relevantes pelos alunos. Essa etapa envolve a contextualização do problema, a discussão em grupo e a busca por diferentes perspectivas e abordagens para solucioná-lo.

### **3.2.2 Organização do Conhecimento**

No segundo momento pedagógico, chamado de organização do conhecimento, os alunos têm a oportunidade de aprofundar seus conhecimentos sobre o problema apresen-

tado. Nessa etapa, o professor fornece os instrumentos teóricos e metodológicos necessários para que os estudantes possam compreender e analisar a situação-problema de forma mais sistemática.

Os conhecimentos selecionados como necessários para a compreensão dos temas e da problematização inicial são sistematicamente estudados neste momento, sob a orientação do professor [...] de modo que o professor possa desenvolver a conceituação identificada como fundamental para a compreensão científica das situações problematizadas. (DELIZOICOV; ANGOTTI; PERAMBUCO, 2003, p. 13)

Durante a organização do conhecimento, são apresentados aos alunos conceitos, teorias, métodos e recursos que os auxiliam na compreensão e na resolução do problema em questão. O professor desempenha um papel de facilitador, proporcionando orientação, recursos didáticos e estratégias de ensino que permitem aos alunos aprofundar seu entendimento e adquirir as habilidades necessárias para lidar com o desafio apresentado.

### **3.2.3 Aplicação do Conhecimento**

O terceiro momento pedagógico, denominado aplicação do conhecimento, tem como objetivo consolidar e refletir sobre as aprendizagens realizadas ao longo dos momentos anteriores. Nessa etapa, os alunos têm a oportunidade de expressar suas opiniões, compartilhar suas experiências e realizar sínteses das aprendizagens adquiridas.

Destina-se, sobretudo, a abordar sistematicamente o conhecimento que vem sendo incorporado pelo aluno para analisar e interpretar tanto as situações iniciais que determinam o seu estudo, como outras situações que não estejam diretamente ligadas ao motivo inicial, mas que são explicadas pelo mesmo conhecimento. (DELIZOICOV; ANGOTTI, 2003, p. 29)

Durante a aplicação do conhecimento, é promovida a discussão em grupo, a socialização das ideias e a valorização das contribuições individuais dos alunos. O professor estimula a reflexão crítica, incentiva a participação ativa de todos e promove a construção coletiva de significados.

## **3.3 Impactos na aprendizagem dos estudantes**

A abordagem dos Três Momentos Pedagógicos proposta por Demétrio Delizoicov tem se mostrado eficaz na promoção da aprendizagem significativa e no desenvolvimento das

habilidades cognitivas e socioemocionais dos alunos. Ao estimular a adoção de problematização inicial, organização do conhecimento e aplicação do conhecimento, essa abordagem possibilita que os estudantes se tornem sujeitos ativos no processo de construção do conhecimento, desenvolvendo a capacidade de pensar criticamente, argumentar, solucionar problemas e trabalhar em equipe.

Além disso, os Três Momentos Pedagógicos favorecem a conexão entre os conteúdos escolares e a realidade dos alunos, promovendo uma aprendizagem contextualizada e com significado. A interação social e a valorização das experiências individuais contribuem para a construção de conhecimentos mais amplos e para o fortalecimento da identidade dos estudantes como protagonistas de sua própria aprendizagem.

A aplicação dos Três Momentos Pedagógicos também estimula a autonomia dos alunos, incentivando-os a desenvolver habilidades de pesquisa, análise crítica e tomada de decisões. Além disso, essa abordagem favorece o desenvolvimento de competências socioemocionais, como o trabalho em equipe, a empatia, a comunicação efetiva e a resolução de conflitos.

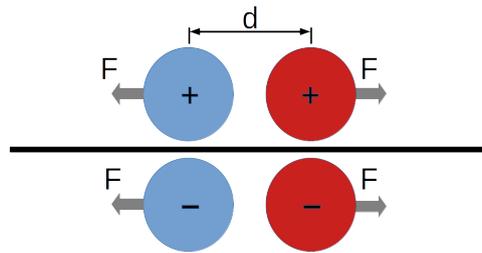
### **3.4 Eletrostática**

Neste capítulo, abordaremos em detalhes os principais conceitos relacionados às cargas elétricas e ao campo elétrico. O objetivo é fornecer uma compreensão aprofundada desses temas fundamentais. Os tópicos discutidos serão: cargas elétricas, condutores e isolantes, lei de Coulomb, quantização da carga elétrica, conservação da carga elétrica, campo elétrico, linhas de campo elétrico, campo elétrico produzido por uma carga pontual e capacitores.

### **3.5 Cargas Elétricas**

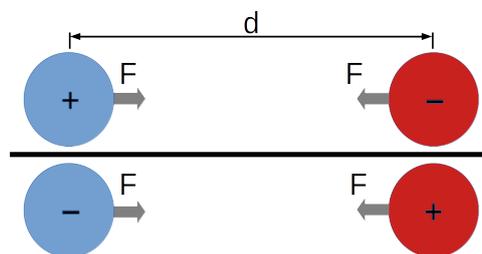
As cargas elétricas são propriedades fundamentais das partículas subatômicas, como prótons e elétrons. Elas são responsáveis pelas interações elétricas na natureza. Existem dois tipos de cargas elétricas: positivas e negativas. Os prótons possuem carga elétrica positiva, enquanto os elétrons possuem carga elétrica negativa. De acordo com o princípio fundamental da atração e repulsão, cargas opostas se atraem, enquanto cargas de mesmo sinal se repelem.

Figura 1: Repulsão entre cargas de mesmo sinal.



Fonte: Autor.

Figura 2: Atração entre cargas opostas.



Fonte: Autor.

A carga desempenha um papel crucial na interação eletromagnética e é responsável por uma ampla gama de fenômenos elétricos observados em nosso cotidiano. A escolha dos termos “positiva” e “negativa” foi feita por Benjamin Franklin, de forma totalmente arbitrária. Este poderia ter optado pela escolha inversa ou usado outros termos para diferenciar os dois tipos de eletricidade (HALLIDAY; RESNICK, 2009).

### 3.6 Condutores, Isolantes, Semicondutores e Supercondutores

A natureza elétrica dos materiais pode ser compreendida a partir da estrutura atômica e das propriedades elétricas dos átomos constituintes. Um átomo é composto por três tipos de partículas elementares: prótons, com carga elétrica positiva; elétrons, com carga elétrica negativa; e nêutrons, que são eletricamente neutros. Os prótons e nêutrons localizam-se no núcleo atômico, enquanto os elétrons orbitam ao redor deste núcleo.

Nos materiais condutores, como o cobre, a configuração eletrônica dos átomos permite que, ao formar um sólido, alguns elétrons externos se afastem do seu núcleo, transformando-

se em elétrons livres ou de condução. Esses elétrons móveis são responsáveis por transportar a corrente elétrica através do material. A movimentação desses elétrons resulta na formação de íons positivos no reticulado atômico, conferindo ao material a sua capacidade de conduzir eletricidade. Os elétrons de condução nesses materiais têm maior mobilidade e podem mover-se facilmente sob a influência de um campo elétrico. Exemplos comuns de condutores incluem metais, como cobre e alumínio.

*Figura 3: Metais como cobre, prata, ouro, alumínio, ferro, zinco, níquel, platina, chumbo e estanho são bons condutores. Aqui é mostrada uma tigela de ouro.*



Fonte: <[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bowl\\_or\\_Cup\\_MET\\_tem73862s2.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bowl_or_Cup_MET_tem73862s2.jpg)>.

Em contraste, os isolantes são materiais que dificultam ou impedem o movimento das cargas elétricas, pois a densidade de elétrons livres é insuficiente. Os elétrons nesses materiais estão mais fortemente ligados aos seus átomos e não podem mover-se facilmente. Como resultado, os isolantes não conduzem eletricidade tão facilmente quanto os condutores. Exemplos de isolantes incluem plástico, vidro e madeira.

As propriedades dos condutores e não condutores se devem à estrutura e à natureza elétrica dos átomos. Os átomos são formados por três tipos de partículas: os prótons, que possuem carga elétrica positiva, os elétrons, que possuem carga elétrica negativa, e os nêutrons, que não possuem carga elétrica. (HALLIDAY; RESNICK, 2009)

Por outro lado, os semicondutores são materiais que possuem propriedades intermediárias entre condutores e isolantes. A capacidade dos semicondutores de conduzir eletricidade pode variar muito, dependendo da temperatura, impurezas (conhecidas como dopantes) e campos elétricos. Exemplos comuns de semicondutores incluem silício e germânio, que são usados extensivamente na fabricação de dispositivos eletrônicos e circuitos integrados devido à sua capacidade de ter sua condutividade elétrica ajustada por dopagem.

Finalmente, os supercondutores são materiais que, quando resfriados a temperaturas extremamente baixas, podem conduzir eletricidade sem resistência ou perda de energia.

*Figura 4: Isolantes como vidro, plástico, cerâmica, borracha, madeira e isopor fazem parte do cotidiano. Aqui é mostrada uma tijela de vidro.*



Fonte: <[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Glass\\_bowl\\_shadow.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Glass_bowl_shadow.jpg)>.

Isso ocorre porque os elétrons se movem através do supercondutor em pares, conhecidos como pares de Cooper, que permitem que eles fluam sem colidir com átomos e causar resistência. Exemplos comuns de supercondutores incluem certos metais e ligas, como o nióbio-titânio e o óxido de ítrio-bário-cobre. Esses materiais têm aplicações importantes como em ressonância magnética. No entanto, a necessidade de resfriamento extremo limita a praticidade dos supercondutores em muitas aplicações. A descoberta de supercondutores de alta temperatura, que podem operar em temperaturas mais elevadas, é um tópico ativo de pesquisa na física dos materiais.

A distinção entre condutores, isolantes e semicondutores é importante em várias aplicações práticas. Por exemplo, os condutores são amplamente utilizados na construção de fios e cabos elétricos, que permitem a transmissão eficiente de eletricidade. Os isolantes são utilizados para o revestimento de cabos elétricos, garantindo que a eletricidade seja confinada e evitando curto-circuitos. Os semicondutores são a base da eletrônica moderna, permitindo o desenvolvimento de dispositivos como computadores, smartphones e circuitos integrados.

Na verdade, o fenômeno da condução possui natureza quântica como Nussenzveig (2013) esclarece:

Daí resulta que os estados quânticos dos elétrons na rede cristalina, além de discretos (em virtude do confinamento no interior do metal), agrupam-se em bandas ou faixas de energia, separadas por intervalos proibidos, que não contêm níveis. Diz-se que os elétrons têm um espectro de bandas. Com base nesse resultado e no princípio de Pauli, podemos entender a origem das diferenças entre isolantes, condutores e semicondutores. (NUSSENZVEIG, 2013, p. 115).

Em um condutor típico, a banda de energia mais alta onde há elétrons está apenas parcialmente preenchida. A energia térmica é suficiente para excitar os elétrons na vizinhança a níveis contíguos desocupados, que podem servir como portadores de corrente. A condutividade é diretamente proporcional ao tempo livre médio entre duas colisões.

Em um isolante típico, as bandas de energia mais baixas têm seus níveis totalmente preenchidos pelos elétrons. O nível mais alto preenchido está separado do nível mais baixo da camada seguinte por um intervalo proibido de largura  $E_g$  (energia de gap). Para isolantes típicos,  $E_g$  é da ordem de alguns eV. Assim, em um isolante, os elétrons permanecem ligados aos sítios da rede, não havendo portadores de corrente disponíveis.

Em um semiconductor intrínseco (material puro), a baixas temperaturas, a situação é análoga à de um isolante, com a banda de valência toda preenchida e a de condução vazia, mas o intervalo  $E_g$  que separa uma da outra é relativamente pequeno, da ordem de 0,5 eV. Assim, à temperatura ambiente, uma fração significativa dos elétrons é termicamente excitada para a banda de condução. Isso leva a condutividades típicas à temperatura ambiente pelo menos  $10^{10}$  vezes maiores que as dos isolantes.

## Processos de Eletrização

Existem três principais processos de eletrização: por atrito, por contato e por indução. Na eletrização por atrito, dois corpos são atritados entre si, resultando na transferência de elétrons de um corpo para o outro; o corpo que ganha elétrons adquire carga negativa, e o que perde elétrons adquire carga positiva. A eletrização por contato ocorre quando um corpo condutor eletricamente carregado entra em contato com um corpo condutor neutro, permitindo a equalização de cargas entre eles. Na eletrização por indução, um corpo eletricamente carregado (indutor) é aproximado de um corpo condutor neutro (induzido), sem contato físico, provocando a redistribuição das cargas no corpo neutro. Se o corpo condutor neutro for conectado por meio de um condutor elétrico ao chão (terra) durante o processo de indução, o aterramento fornece um caminho para que elétrons possam fluir para dentro ou para fora do condutor, deixando o induzido eletrizado com carga oposta à carga elétrica do indutor. Se o contato do induzido com a terra for desfeito antes do afastamento do indutor, o induzido permanecerá eletricamente carregado, enquanto permanecer eletricamente isolado.

### 3.7 Lei de Coulomb

A lei de Coulomb, formulada pelo físico francês Charles-Augustin de Coulomb no final do século XVIII, descreve a interação eletrostática entre duas cargas elétricas. Essa lei estabelece que a força eletrostática entre duas cargas é diretamente proporcional ao produto de suas magnitudes e inversamente proporcional ao quadrado da distância entre elas.

Por exemplo, se uma carga livre  $q$  esta incorporada a um grande dieletrico, o campo que ela produz é  $\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{q}{r^2} \hat{r}$  (4.36) (é  $\epsilon$ , e não  $\epsilon_0$ ), e a força que ela exerce sobre as cargas próximas é, conseqüentemente, reduzida. Mas não é que haja algo de errado com a lei de Coulomb; mais propriamente, a polarização do meio 'protege' parcialmente a carga, cercanda-a com carga ligada de sinal oposto (GRIFFITHS, 2011, p. 128)

A lei de Coulomb para um meio dielétrico de constante dielétrica  $\epsilon_r = \epsilon/\epsilon_0$ , onde  $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{F/m}$  é a permissividade do vácuo e  $\epsilon$  é a permissividade do dielétrico, é expressa pela seguinte equação:

$$\vec{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r} \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{r}, \quad (3.1)$$

onde  $\vec{F}$  é a força eletrostática,  $q_1$  e  $q_2$  são as magnitudes das cargas elétricas e  $\hat{r}$  é a distância entre elas. A Tabela 1 mostra os valores de  $\epsilon_r$  para alguns meios.

A lei de Coulomb, que já passou por vários testes experimentais, é válida em qualquer situação física, explicando até mesmo a força de atração no interior dos átomos, entre o seu núcleo, com carga positiva, e os elétrons, que apresentam carga negativa. O experimento original de Coulomb foi realizado com uma balança de torção. Além disso, descreve, também, as forças de união entre átomos e moléculas na formação de sólidos e líquidos (HALLIDAY; RESNICK, 2009).

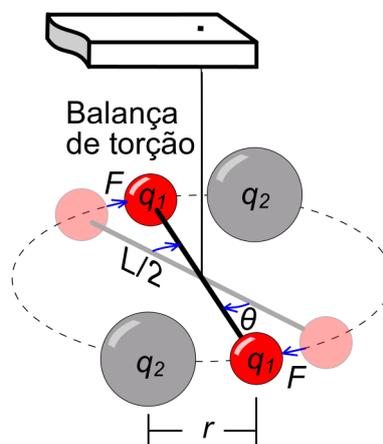
Essa lei fundamental nos permite entender como as cargas elétricas interagem entre si. Ela desempenha um papel crucial na compreensão de fenômenos eletrostáticos, como a atração e repulsão entre cargas. A Lei de Coulomb mostra que cargas de sinais opostos (uma positiva e outra negativa) se atraem, enquanto cargas do mesmo sinal se repelem. Quanto maior a magnitude das cargas envolvidas, maior será a força de interação entre elas. Além disso, à medida que a distância entre as cargas diminui, a força de interação aumenta significativamente. A Lei de Coulomb é aplicável a cargas elétricas pontuais, ou seja, quando as dimensões físicas das cargas são desprezíveis em relação à distância entre elas.

Tabela 1: Valores de constante dielétrica para diferentes meios.

Material	Constante Dielétrica
Vácuo	1
Ar	1,00059
Alumínio	8,1 - 9,5
Esteatita (MgO-SiO <sub>2</sub> )	5,5 - 7,2
Mica	5,4 - 8,7
Óleo	4,6
Papel	4 - 6
Papel parafinado	2,5
Plástico	3
Polistireno	2,5 - 2,6
Porcelana	6,0
Pyrex	5,1
Sílica fundida	3,8
Titanatos	50 - 10000
Vidro de cal de soda	6,9

Fonte: (NUSSENZVEIG, 2013)

Figura 5: Balança de Torção de Coulomb.



Fonte: Adaptado de

<[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cavendish\\_Torsion\\_Balance\\_Diagram.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cavendish_Torsion_Balance_Diagram.svg)>.

### 3.8 Quantização da Carga Elétrica

A quantização da carga elétrica é um princípio importante na física que afirma que a carga elétrica elementar é sempre um múltiplo inteiro da carga do elétron. Essa propriedade fundamental da natureza foi estabelecida por experimentos e evidências teóricas. Existe na

natureza um valor mínimo de carga: a carga do elétron é  $-e$  e a do próton  $+e$ . O valor de  $e$  é extremamente pequeno na escala macroscópica:

$$e = 1,602177 \times 10^{-19} C.$$

Levando em consideração a relação entre carga e número de elétrons, verifica-se que, quando um condutor é atravessado por uma corrente de 1 ampère, a carga total que o atravessa, por segundo, corresponde a carga de  $6,25 \times 10^{18}$  elétrons.

Todas as partículas chamadas elementares carregadas observadas até hoje têm cargas que são múltiplos inteiros pequenos de  $e$ , em geral  $\pm e$ . Sabe-se que a carga do próton é igual e contrária à do elétron com erro relativo inferior a uma parte em  $10^{21}$ , o que indica com que grau de precisão se verifica a neutralidade da matéria. No entanto, os quarks, que são partículas elementares e um dos dois constituintes fundamentais da matéria (o outro é o lépton), têm cargas elétricas fracionárias. Existem seis tipos de quarks, conhecidos como sabores: up, down, charm, strange, top e bottom. Os quarks up e down têm cargas elétricas de  $+2/3e$  e  $-1/3e$ , respectivamente. Os quarks charm e top têm cargas elétricas de  $+2/3e$ , enquanto os quarks strange e bottom têm cargas elétricas de  $-1/3e$  (NUSSENZ-VEIG, 2013). Como os quarks não podem ser observados isoladamente, os módulos das cargas elétricas que se pode medir sempre são múltiplos inteiros de  $e$ .

O fato de a carga elétrica ser quantizada tem implicações profundas na estrutura das partículas subatômicas e na compreensão da matéria em nível fundamental. A quantização da carga elétrica é uma das bases para a teoria eletromagnética e outras áreas da física moderna.

### 3.9 Conservação da Carga Elétrica

A conservação da carga elétrica é um princípio fundamental na física que estabelece que a carga elétrica total de um sistema isolado permanece constante ao longo do tempo. Isso significa que a carga elétrica não pode ser criada nem destruída, apenas transferida de um objeto para outro. Em outras palavras, a carga elétrica é uma quantidade conservada.

Quando um bastão de vidro é atritado com um pedaço de seda, o bastão adquire uma carga positiva e uma carga negativa, de mesmo valor absoluto, se acumula na seda. Portanto, isso sugere que o processo não cria cargas, mas apenas transfere cargas de um corpo para outro, fazendo com que ambos os corpos deixem de serem neutros. Essa hipótese de conservação da carga elétrica, proposta por Benjamin Franklin, foi extensivamente

comprovada, tanto em objetos macroscópicos quanto em átomos, núcleos e partículas elementares. Até o presente momento, não foi encontrada nenhuma exceção a essa regra. Portanto, podemos incluir a carga elétrica na lista de grandezas, juntamente com energia, momento linear e momento angular, que obedecem a uma lei de conservação (HALLIDAY; RESNICK, 2009).

A aniquilação de elétron-pósitron e a produção de pares são exemplos da conservação. Quando um elétron (carga  $-e$ ) encontra um pósitron (carga  $+e$ ), eles podem se aniquilar mutuamente, resultando em dois fótons. Aqui, a carga total antes e depois do evento é zero, demonstrando a conservação da carga. Por outro lado, um fóton de alta energia pode se transformar em um par elétron-pósitron, um processo conhecido como produção de pares. Neste caso, a carga total antes do evento (fóton com carga 0) é igual à carga total após o evento (elétron com carga  $-e$  e pósitron com carga  $+e$ ). Novamente, a carga é mantida.

### 3.10 Campo Elétrico

O campo elétrico é uma grandeza vetorial que descreve a influência de uma carga elétrica sobre outras cargas próximas a ela. Quando uma carga elétrica está presente em um ponto do espaço, ela cria um campo elétrico ao seu redor, que pode ser sentido por outras cargas de prova colocadas nesse campo. O campo elétrico é uma propriedade do espaço e está presente mesmo quando não há cargas de prova presentes.

Pelo princípio da superposição, a força sobre uma carga puntiforme  $q_i$ , devida a sua interação eletrostática com outras cargas puntiformes fixas em posições predeterminadas, é proporcional a  $q_i$  e pode ser escrita como  $\vec{F}_i = q_i \vec{E}_i$ , onde:  $\vec{E}_i = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{i \neq j} \frac{q_j}{(r_{ji})^2} \hat{r}_{ji}$ . (NUSSENZVEIG, 2013)

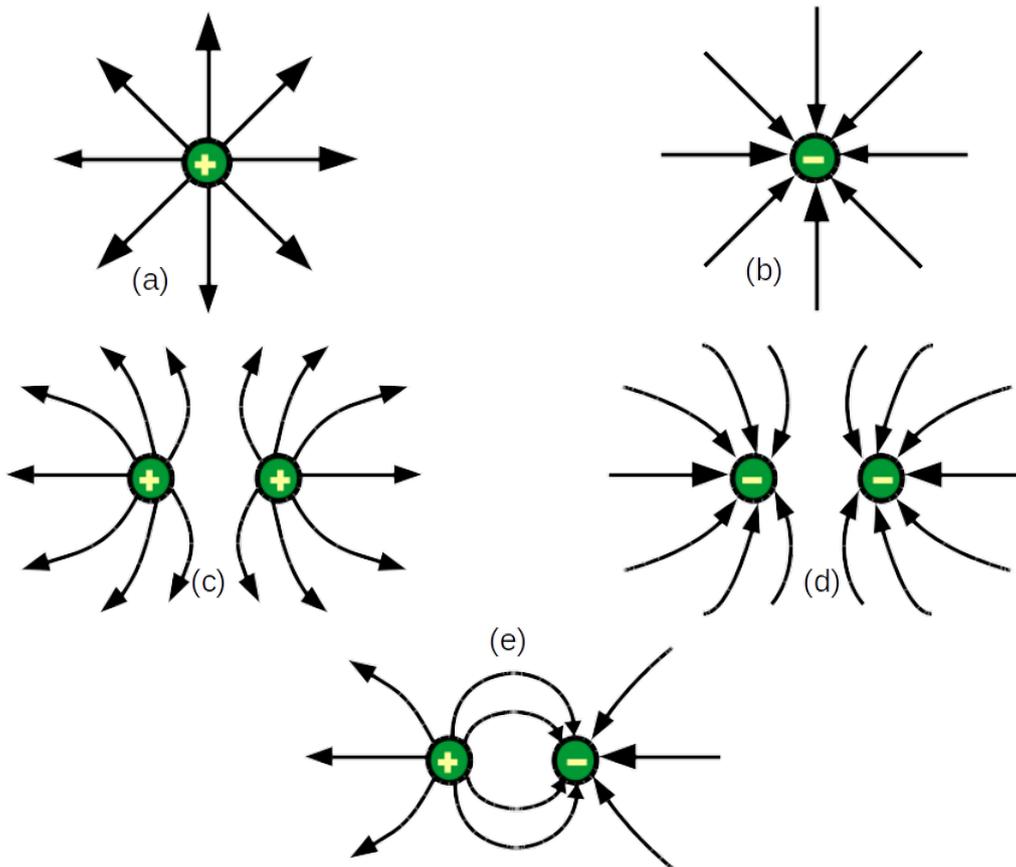
### 3.11 Linhas de Campo Elétrico

As linhas de campo elétrico são linhas imaginárias usadas para representar graficamente a direção e a intensidade do campo elétrico em um determinado ponto. Essas linhas são desenhadas tangentes ao campo em cada ponto e fornecem uma representação visual das propriedades do campo elétrico.

As linhas de campo elétrico são desenhadas de tal forma que a sua densidade é proporcional à intensidade do campo elétrico. Elas são direcionadas para longe das cargas positivas e em direção às cargas negativas. As linhas de campo elétrico nunca se cruzam,

pois isso implicaria em diferentes direções de campo elétrico em um único ponto, o que não é fisicamente possível.

Figura 6: Linhas de campo: (a) as linhas saem da carga positiva; (b) as linhas entram na carga negativa; (c) e (d) linhas entre cargas de mesmo sinal; (e) linhas de campo num dipolo elétrico.



Fonte: Autor.

### 3.12 Campo Elétrico Produzido por uma Carga Pontual

Uma carga pontual é uma carga concentrada em um único ponto. Quando uma carga pontual está presente, ela cria um campo elétrico ao seu redor. Esse campo elétrico é radialmente simétrico em relação à carga pontual e segue a lei do inverso do quadrado da distância. Isso significa que a intensidade do campo elétrico diminui à medida que nos afastamos da carga pontual, de acordo com uma relação inversa ao quadrado da distância.

A magnitude do campo elétrico produzido por uma carga pontual pode ser calculada usando a lei de Coulomb e a noção de campo elétrico. A direção do campo elétrico é sempre radial, apontando para fora da carga positiva e em direção à carga negativa.

O campo elétrico  $\vec{E}$  produzido num dado ponto P, que se encontra à uma distância  $r_i$  da carga  $q_i$ , por uma distribuição de cargas pontuais é dado pela seguinte soma vetorial:

$$\vec{E}_i = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^N \frac{q_i}{(r_i)^2} \hat{r}_i, \quad (3.2)$$

onde  $\hat{r}_i$  é o vetor unitário da direção entre a carga e o ponto P, apontando no sentido da carga para P. Se a carga for negativa, o campo devido a  $q_i$  aponta em sentido oposto (NUSSENZVEIG, 2013).

### 3.13 Distribuição Contínua de Cargas

Em uma grande quantidade de situações práticas, a quantidade de partículas carregadas é tão extensa que a distribuição de carga pode ser considerada contínua, ao invés de discreta. Este conceito é análogo ao tratamento de diversas outras grandezas na física. Por exemplo, ao se considerar um gás contido em um recipiente, o número de moléculas de gás é, de fato, um número discreto. Contudo, para uma ampla gama de cálculos, é muito mais prático considerar o gás como um contínuo.

Dado um volume específico,  $\Omega$ , com um volume total  $V$  e uma carga total  $q$ , é possível para um observador dividir esse volume em  $N$  partes distintas:  $\Delta V_1, \Delta V_2, \dots, \Delta V_i, \dots, \Delta V_N$ . A soma do volume de todas essas partes é igual ao volume total, ou seja,  $\sum_{i=1}^N \Delta V_i = V$ . Quando  $N$  tende ao infinito, a densidade de carga volumétrica,  $\rho_i$ , dentro de cada parte do volume  $\Delta V_i$  se torna uniforme. Isso implica que cada parte do volume  $\Delta V_i$  contém uma carga  $\Delta q_i$ . Portanto, a carga total  $q$  pode ser expressa como:

$$q = \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^N \Delta q_i = \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^N \rho_i \Delta V_i = \int_{\Omega} \rho dV. \quad (3.3)$$

Este resultado demonstra que a carga total em um volume pode ser calculada como a integral da densidade de carga sobre todo o volume.

Para uma distribuição linear de carga, onde a carga está distribuída ao longo de uma linha, usamos a densidade linear de carga, representada por  $\lambda$ . Se dividirmos a linha em pequenos segmentos  $\Delta l_i$ , cada um com uma carga  $\Delta q_i$ , a carga total ao longo da linha é dada por:

$$q = \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^N \Delta q_i = \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^N \lambda_i \Delta l_i = \int_l \lambda dl. \quad (3.4)$$

Para uma distribuição superficial de carga, onde a carga está distribuída sobre uma superfície, usamos a densidade superficial de carga, representada por  $\sigma$ . Se dividirmos a superfície em pequenas áreas  $\Delta A_i$ , cada uma com uma carga  $\Delta q_i$ , a carga total na superfície é dada por:

$$q = \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^N \Delta q_i = \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^N \sigma_i \Delta A_i = \int_A \sigma dA. \quad (3.5)$$

Um fio carregado e uma superfície carregada são representações aproximadas para objetos cujas dimensões em uma direção são muito menores do que nas outras. No caso do fio, o diâmetro é muito menor que o comprimento, enquanto na superfície, a espessura é muito menor que a área. Apesar dessas simplificações, na prática, tanto o fio quanto a superfície possuem um certo número de átomos ao longo de suas dimensões menores, as quais, não podem, portanto, ser fisicamente nulas.

Para concluir, considere um objeto  $\Omega$  com um volume  $v'$  e uma carga total  $q$ . Este objeto pode ser subdividido em elementos de volume infinitesimais  $dv'$ , cada um contendo uma carga infinitesimal  $dq$ . Cada elemento de volume  $dv'$  está localizado em uma posição  $\vec{r}'$ . O campo elétrico em  $\vec{r}$ , devido ao elemento  $dq$ , é dado por  $\frac{dq}{4\pi\epsilon_0 R^3} \vec{R}$ , onde  $\vec{R} = \vec{r} - \vec{r}'$  é o vetor distância da fonte ao ponto de observação. O campo elétrico total é a soma da contribuição de todos os elementos de volume:

$$\vec{E}(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_v \frac{dq}{R^2} \hat{R} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_v \frac{dq}{R^3} \vec{R}. \quad (3.6)$$

### 3.14 Fluxo Elétrico e Lei de Gauss

Segundo Feynman, Leighton e Sands (2019), o fluxo elétrico através de uma superfície gaussiana (superfície fechada) é o produto da componente normal média do campo elétrico pela área da superfície.

Para uma superfície arbitrária fechada, a quantidade de fluido que escoar – ou fluxo – é a média da componente normal da velocidade orientada para fora do volume limitado pela superfície vezes a área da superfície:

$$\text{Fluxo} = (\text{componente normal média}) \times (\text{área da superfície}). \quad (1.4)$$

No caso de um campo elétrico, podemos definir matematicamente algo análogo a um escoamento para fora e, novamente, chamarmos de fluxo, mas,

obviamente, este não é o escoamento de nenhuma substância, porque o campo elétrico não é a velocidade de coisa alguma. Entretanto, isto resulta que a quantidade matemática dada pela média da componente normal do campo ainda possui um significado útil. Falamos, então, do fluxo elétrico – também definido pela Eq. (1.4). (FEYNMAN; LEIGHTON; SANDS, 2019).

Seja uma superfície fechada  $\Omega$ . Se essa superfície for dividida em elementos de superfície  $d\vec{S} = dS\hat{n}$ , em que  $dS$  é a área e  $\hat{n}$  é o versor normal para fora de cada elemento, o campo elétrico nesse elemento pode ser decomposto em uma componente tangencial  $E_t\hat{t}$  e uma componente normal  $E_n\hat{n}$ , resultando num produto escalar  $\vec{E} \cdot d\vec{S} = (E_n\hat{n} + E_t\hat{t}) \cdot \hat{n}dS = E_ndS$ . Dessa forma a média das componentes perpendiculares (normais) é  $\langle E_n \rangle = \frac{\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S}}{\oint_S d\vec{S}} = \frac{\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S}}{\text{Área de } S}$ . Pela definição, o fluxo do campo  $\vec{E}$  através da superfície gaussiana  $S$  é  $\Phi_S = \langle E_n \rangle \times \text{Área de } S$ , portanto:

$$\Phi_S = \oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S}. \quad (3.7)$$

A **lei de Gauss** afirma que o fluxo através de uma superfície gaussiana  $S$  é proporcional a carga envolvida  $Q_{env}$  pela superfície  $S$ :

$$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{Q_{int}}{\epsilon_0}. \quad (3.8)$$

A **lei de Coulomb** pode ser obtida a partir da **lei de Gauss**. Seja a carga  $Q$  no centro de uma superfície gaussiana esférica  $S$  de raio  $r$ . Por uma questão de simetria, o campo elétrico num ponto qualquer da superfície gaussiana  $S$  depende apenas do raio  $r$ :

$$\begin{aligned} \oint_S E(r)dS = \frac{Q}{\epsilon_0} &\Rightarrow E(r) \oint_S dS = \frac{Q}{\epsilon_0} \Rightarrow E(r)4\pi r^2 = \frac{Q}{\epsilon_0} \Rightarrow E(r) = \\ &= \frac{Q}{4\pi r^2 \epsilon_0} \Rightarrow \vec{E} = \frac{Q}{4\pi r^2 \epsilon_0} \hat{r}. \end{aligned} \quad (3.9)$$

### 3.15 Divergência, Teorema de Gauss do Campo Elétrico e Equação de Poisson

Seja o fluxo  $\Phi$  de um campo elétrico  $\vec{E}$  através de uma superfície gaussiana  $S$  de volume  $\Delta V$  centrado no ponto  $P$ . Define-se divergência de  $\vec{E}$  no ponto  $P$  como a razão do fluxo  $\Phi$  pelo volume  $\Delta V$  quando esse volume tende a zero:

$$div \vec{E} = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Phi}{\Delta V}. \quad (3.10)$$

Seja um paralelepípedo de arestas  $\delta x, \delta y, \delta z \rightarrow 0$ , centrado no ponto  $(x, y, z)$ . O fluxo na superfície  $S$  do cubo é a soma dos fluxos em cada uma das faces:

$$\begin{aligned} \oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} &= E_x(x + \frac{\delta x}{2}, y, z)\delta y\delta z - E_x(x - \frac{\delta x}{2}, y, z)\delta y\delta z + \\ &+ E_y(x, y + \frac{\delta y}{2}, z)\delta z\delta x - E_y(x, y - \frac{\delta y}{2}, z)\delta z\delta x + \\ &+ E_z(x, y, z + \frac{\delta z}{2})\delta x\delta y - E_z(x, y, z - \frac{\delta z}{2})\delta x\delta y. \end{aligned} \quad (3.11)$$

Dessa forma, o fluxo dividido pelo volume é

$$\begin{aligned} \frac{\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S}}{\delta x\delta y\delta z} &= \frac{E_x(x + \frac{\delta x}{2}, y, z) - E_x(x - \frac{\delta x}{2}, y, z)}{\delta x} + \\ &+ \frac{E_y(x, y + \frac{\delta y}{2}, z) - E_y(x, y - \frac{\delta y}{2}, z)}{\delta y} + \frac{E_z(x, y, z + \frac{\delta z}{2}) - E_z(x, y, z - \frac{\delta z}{2})}{\delta z}. \end{aligned} \quad (3.12)$$

A divergência é obtida fazendo o volume tender a zero:

$$\text{div } \vec{E} = \lim_{\delta x, \delta y, \delta z \rightarrow 0} \frac{\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S}}{\delta x\delta y\delta z} = \frac{\partial E_x}{\partial x} + \frac{\partial E_y}{\partial y} + \frac{\partial E_z}{\partial z} = \nabla \cdot \vec{E}, \quad (3.13)$$

pois  $\nabla = \frac{\partial}{\partial x}\hat{i} + \frac{\partial}{\partial y}\hat{j} + \frac{\partial}{\partial z}\hat{k}$ .

Como  $\nabla \cdot \vec{E}$  é o fluxo por unidade de volume que sai de um elemento de volume  $dv$ , conclui-se que o fluxo total produzido por todos os pontos contidos numa superfície gaussiana  $S$  de volume  $v$  é  $\int_v (\nabla \cdot \vec{E})dv$ .

Ao posicionar dois paralelepípedos adjacentes com uma face em comum, observa-se que o campo elétrico na face compartilhada é idêntico para ambos. No entanto, os vetores  $d\vec{S}$ , que representam a orientação da superfície, são simétricos, ou seja, apontam em direções opostas. Como o fluxo elétrico é dado pelo produto escalar do campo elétrico e do vetor  $d\vec{S}$ , os fluxos através dessa face comum se cancelam, resultando em um fluxo total nulo.

Adicionalmente, se um objeto for subdividido em vários cubos adjacentes, os fluxos nas faces compartilhadas entre quaisquer dois cubos também se cancelam devido à simetria dos vetores  $d\vec{S}$ . Portanto, o fluxo elétrico total através do objeto é determinado apenas pelos fluxos através das faces na fronteira do objeto. Estas são as faces que não são compartilhadas com outro elemento de volume e, portanto, seus fluxos não se anulam.

Dessa forma, o fluxo do campo elétrico  $\vec{E}$  através de uma superfície  $S$  de volume  $v$  pode ser calculado de duas maneiras diferentes, que juntas numa mesma equação dá

origem ao teorema de Gauss:

$$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \int_v (\nabla \cdot \vec{E}) dv, \quad (3.14)$$

que combinado à lei de Gauss:

$$\varepsilon_0 \oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = Q \Rightarrow \int_v \varepsilon_0 (\nabla \cdot \vec{E}) dv = \int_v \rho dv \quad (3.15)$$

resulta na equação de Poisson:

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0}. \quad (3.16)$$

### 3.16 Poder das Pontas

A descarga corona, também conhecida como fogo de Santelmo, é um fenômeno elétrico que ocorre devido à presença de um campo elétrico intenso, acima de  $3 \text{ MV/m}$ , capaz de ionizar o ar ao seu redor, removendo elétrons do mesmo. Esse processo resulta na formação de íons positivos e elétrons livres, formando um estado de plasma.

(...) Uma delas relaciona-se ao potencial máximo atingido por um condutor no ar. Esse potencial é limitado pelo módulo do campo elétrico, aproximadamente igual a  $3 \times 10^6 \text{ V/m}$ , porque as moléculas do ar se ionizam e o ar se torna condutor. (...) Logo, quando  $E_{mx}$  representar o módulo do campo elétrico acima do qual o ar se torna condutor (conhecido como rigidez dielétrica do ar), o potencial máximo  $V_{mx}$  que um condutor esférico pode atingir será dado por  $V_{mx} = RE_{mx}$ . Para um condutor esférico com raio igual a 1 cm no ar,  $V_{mx} = (10^{-2} \text{ m})(3 \times 10^6 \text{ V/m}) = 30.000 \text{ V}$ . Nenhuma esfera pode ser "carregada" para atingir um potencial superior a 30.000 V no ar; quando tentamos elevar esse potencial acrescentando mais cargas, o ar circundante torna-se ionizado e condutor, e a carga extra se escoia para o ar. (YOUNG; FREEDMAN, 2008)

Um aspecto relevante a ser considerado é o poder das pontas, uma propriedade que diz respeito à capacidade de regiões pontiagudas concentrarem cargas elétricas, intensificando, assim, o campo elétrico nessas áreas específicas e, conseqüentemente, podendo influenciar na ocorrência de fenômenos elétricos, como a descarga corona. O campo elétrico intenso acelera os elétrons livres do plasma produzido pelo efeito corona. Esses elétrons livres acelerados colidem com os átomos presentes no ar, transferindo energia e excitando os elétrons desses átomos para níveis de energia mais elevados. Durante o retorno desses elétrons excitados aos seus níveis de energia mais baixos, ocorre a emissão de fótons de luz visível, originando o brilho característico associado ao efeito corona.

(...) Como o potencial máximo é proporcional ao raio, até mesmo um potencial relativamente pequeno, se aplicado em uma extremidade aguda situada no ar, gera um campo elétrico suficientemente elevado, capaz de produzir ionização nas vizinhanças do ar, tornando-o condutor. Esse fenômeno denomina-se efeito corona, e produz uma corrente resultante e uma luminosidade inerente (visível em uma sala escura). As impressoras a laser e as máquinas copiadoras usam o efeito corona em fios finos para carregar o tambor de imagem. (YOUNG; FREEDMAN, 2008)

*Figura 7: O funcionamento do para-raios baseia-se na eletrização por indução e no poder das pontas.*



Fonte: <<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Paratoner2.jpg>>.

Quando se trata de um para-raios, seu mecanismo de funcionamento baseia-se na indução eletrostática. Durante a presença de uma nuvem carregada eletricamente nas proximidades, o para-raios se eletriza por meio do processo de indução. Sua haste pontiaguda desempenha um papel fundamental ao gerar um campo elétrico intenso, resultando na ionização do ar circundante e na formação de descargas conhecidas como líderes ascendentes, os quais são responsáveis por direcionar a descarga do raio, oferecendo proteção às estruturas abaixo. Ao redirecionar a corrente elétrica proveniente da descarga para o solo, o para-raios desempenha um papel crucial na prevenção de danos causados por raios, preservando a integridade de edifícios e outras instalações.

### **3.17 Trabalho, Energia Potencial e Potencial Elétrico**

Uma força é dita conservativa se o trabalho realizado por ela depende apenas dos pontos inicial e final, independentemente do caminho percorrido. Matematicamente, isso

implica que a força  $\vec{F}$  pode ser expressa como o negativo do gradiente de uma função escalar  $U$ , conhecida como energia potencial:

$$\vec{F} = -\nabla U, \quad (3.17)$$

pois, nesse caso, o trabalho necessário para levar uma partícula do ponto  $A$  até o ponto  $B$  ao longo do caminho  $C$  é

$$\begin{aligned} W_{A \rightarrow B}^{(C)} &= \int_A^B \vec{F} \cdot d\vec{l} = \int_A^B -\nabla U \cdot d\vec{l} = - \int_A^B \left( \frac{\partial U}{\partial x} \hat{i} + \frac{\partial U}{\partial y} \hat{j} + \frac{\partial U}{\partial z} \hat{k} \right) \cdot (dx \hat{i} + dy \hat{j} + dz \hat{k}) = \\ &= - \int_A^B \left( \frac{\partial U}{\partial x} dx + \frac{\partial U}{\partial y} dy + \frac{\partial U}{\partial z} dz \right) = - \int_A^B dU = -U_A^B = U_A - U_B. \end{aligned} \quad (3.18)$$

Uma força central é uma força cuja magnitude depende apenas da distância ao centro e é direcionada ao longo da linha que une o ponto ao centro, isto é,  $\vec{F} = F(r)\hat{r}$ . O gradiente em coordenadas esféricas é  $\nabla U = \frac{\partial U}{\partial r} \hat{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial \theta} \hat{\theta} + \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial U}{\partial \phi} \hat{\phi}$ . Em fenômenos com simetria esférica  $U = U(r)$ , portanto,  $\nabla U = \frac{\partial U}{\partial r} \hat{r}$ . Logo, a força central é conservativa e pode ser expressa em termos de uma energia potencial que depende apenas da distância radial  $r$ :

$$\vec{F} = -\nabla U(r), \quad (3.19)$$

pois para qualquer força central é possível escrever  $F(r) = -\frac{\partial U}{\partial r}$ .

A força entre uma carga  $Q$  e uma carga de prova  $q$  é  $\vec{F} = -\nabla U(r) = \frac{qQ}{4\pi\epsilon_0 r^2} \hat{r}$ , portanto:

$$\nabla U(r) = \frac{qQ}{4\pi\epsilon_0} (-r^{-2}) \hat{r} = \frac{qQ}{4\pi\epsilon_0} \frac{\partial}{\partial r} (r^{-1}) \hat{r} = \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{qQ}{4\pi\epsilon_0 r} \right) \hat{r}. \quad (3.20)$$

Como  $\nabla U = \frac{\partial U}{\partial r} \hat{r}$ , é possível concluir que

$$U(r) = \frac{qQ}{4\pi\epsilon_0 r} + C. \quad (3.21)$$

Escolhendo a energia potencial de referência nula no infinito, tem-se:

$$U(r \rightarrow \infty) = \lim_{r \rightarrow \infty} \left( \frac{qQ}{4\pi\epsilon_0 r} + C \right) = 0 \Rightarrow C = 0 \quad (3.22)$$

O potencial eletrostático  $V$  em um ponto no espaço é a energia potencial por unidade de carga no ponto:

$$V = \frac{U}{q} \quad (3.23)$$

Para uma carga pontual  $Q$ , o potencial eletrostático a uma distância  $r$  é, portanto, dado por:

$$V(r) = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r}. \quad (3.24)$$

Como  $\vec{F} = -\nabla U$ , então:

$$\vec{F}/q = -\nabla(U/q) \Rightarrow \vec{E} = -\nabla V. \quad (3.25)$$

Como  $\int_A^B \vec{F} \cdot d\vec{l} = U_A - U_B$ , então:

$$\int_A^B \vec{F}/q \cdot d\vec{l} = U_A/q - U_B/q \Rightarrow \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{l} = V_A - V_B. \quad (3.26)$$

O trabalho ( $W$ ) realizado para mover uma carga  $q$  entre dois pontos  $A$  e  $B$  com uma diferença de potencial ( $V_A - V_B$ ) pode ser calculado usando a fórmula do trabalho elétrico:

$$W = q(V_A - V_B). \quad (3.27)$$

Se colocarmos uma carga positiva  $q_0$  em um campo elétrico  $\vec{E}$  e a soltarmos, ela será acelerada na direção e sentido de  $\vec{E}$ . Como a energia cinética da carga aumenta, sua energia potencial diminui. A carga, portanto é acelerada em direção à região onde sua energia elétrica é menor, assim como uma massa em um campo gravitacional é acelerada em direção à região onde sua energia potencial gravitacional é menor. A energia potencial elétrica  $U$  está relacionada ao potencial elétrico  $V$  por  $U = q_0 V$  e, assim, para uma carga positiva, a região onde a carga tem menor energia potencial  $U$  é, também, a região de menor potencial elétrico  $V$ . Resumindo, o campo elétrico  $E$  aponta na direção e sentido no qual o potencial  $V$  diminui mais rapidamente. (TIPLER; MOSCA, 2009)

A diferença de potencial (DDP) ou tensão elétrica entre dois pontos  $A$  e  $B$  é definida como a diferença entre os potenciais elétricos nesses pontos, ou seja,  $V = V_A - V_B$ . A DDP é uma medida da energia potencial elétrica por unidade de carga entre os dois pontos. É amplamente utilizada em análises de circuitos elétricos e é expressa em volts (V).

Como  $U(r) = -\int_{\infty}^r \vec{F} \cdot d\vec{l}$ , então:

$$U(r)/q = -\int_{\infty}^r \vec{F}/q \cdot d\vec{l} \Rightarrow V(r) = -\int_{\infty}^r \vec{E} \cdot d\vec{l}. \quad (3.28)$$

### 3.18 Potencial de uma Distribuição de Cargas

O potencial eletrostático em um ponto no espaço é influenciado pela presença de cargas elétricas. Para um conjunto de cargas pontuais  $q_1, q_2, \dots, q_N$  localizadas a uma distância  $r$  do ponto de interesse, o potencial eletrostático é dado pela soma dos potenciais devido a cada carga individual:

$$V(r) = \sum_{i=1}^N \frac{q_i}{4\pi\epsilon_0 r} \quad (3.29)$$

No caso de um objeto carregado, pode-se considerar o objeto como uma coleção de elementos de carga infinitesimais  $dq$ . Cada elemento contribui para o potencial no ponto de interesse, com um elemento de potencial  $dV$  dado por:

$$dV = \frac{dq}{4\pi\epsilon_0 r} \quad (3.30)$$

Assim, o potencial total devido ao objeto carregado em  $r$  é a integral do elemento de potencial sobre todo o objeto:

$$V = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{dq}{r} \quad (3.31)$$

A natureza da integral depende da distribuição de carga no objeto. Para uma distribuição volumétrica de carga, temos  $dq = \rho dv$ , onde  $\rho$  é a densidade de carga volumétrica e  $dv$  é um elemento de volume. Para uma distribuição superficial de carga, temos  $dq = \sigma dS$ , onde  $\sigma$  é a densidade de carga superficial e  $dS$  é um elemento de área. Para uma distribuição linear de carga, temos  $dq = \lambda dl$ , onde  $\lambda$  é a densidade de carga linear e  $dl$  é um elemento de comprimento.

### 3.19 Dipolos Elétricos

Um dipolo elétrico é um par de cargas elétricas de magnitude igual e sinal oposto separadas por uma distância. Seja um dipolo elétrico composto por uma carga positiva  $+q$  e uma carga negativa  $-q$ , separadas por um vetor de deslocamento  $\vec{l}$  que vai da carga negativa para a carga positiva. O vetor de posição  $\vec{r}$  se estende da carga negativa até um ponto de observação P, enquanto o vetor de posição  $\vec{r}'$  se estende da carga positiva até o mesmo ponto P. O ângulo entre o vetor de deslocamento  $\vec{l}$  e o vetor de posição  $\vec{r}$  é denotado por  $\theta$ .

O momento de dipolo elétrico, representado por  $\vec{p}$ , é definido como o produto da

carga  $q$  pelo vetor de deslocamento  $\vec{l}$ :

$$\vec{p} = q\vec{l} \quad (3.32)$$

O potencial elétrico devido a um dipolo em um ponto  $\vec{r}$  no espaço é dado por:

$$V(\vec{r}) = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \left( \frac{1}{r'} - \frac{1}{r} \right) \quad (3.33)$$

Onde  $r$  e  $r'$  são as distâncias do ponto de observação às cargas negativa e positiva, respectivamente. Esta expressão pode ser simplificada utilizando a aproximação para pequenos ângulos  $\theta$ , resultando em:

$$V(\vec{r}) = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \frac{l \cos\theta}{r^2} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \frac{\vec{l} \cdot \hat{r}}{r^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\vec{p} \cdot \vec{r}}{r^3}. \quad (3.34)$$

O campo elétrico produzido por um dipolo pode ser obtido a partir do gradiente negativo do potencial elétrico:

$$\vec{E} = -\nabla V = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{\vec{p} \cdot \vec{r}}{r^3} \right) \hat{r}. \quad (3.35)$$

Após algumas manipulações matemáticas, chegamos à expressão final para o campo elétrico de um dipolo:

$$\vec{E} = \frac{3\vec{p} \cdot \hat{r}}{4\pi\epsilon_0 r^3} \hat{r} - \frac{\vec{p}}{4\pi\epsilon_0 r^3} \quad (3.36)$$

Esta equação mostra que o campo elétrico de um dipolo diminui com o cubo da distância e depende tanto da magnitude do momento de dipolo quanto da orientação do dipolo em relação ao ponto de observação.

O que acontece a um átomo neutro quando ele é colocado em um campo elétrico  $\mathbf{E}$ ? Sua primeira suposição pode muito bem ser: 'Absolutamente nada' — como o átomo não está carregado, o campo não tem efeito sobre ele; Mas isso é incorreto. Embora o átomo como um todo seja eletricamente neutro, existe um cerne com carga positiva (o núcleo) e uma nuvem de elétrons com carga negativa que o cerca. Essas duas regiões de carga dentro do átomo são influenciadas pelo campo: o núcleo é empurrado no sentido do campo e os elétrons, no sentido oposto. Em princípio, se o campo for grande o suficiente, ele poderá despedaçar totalmente o átomo, 'ionizando-o' (a substância, então, torna-se condutora). Com campos menos radicais, porém, o equilíbrio logo se estabelece, já que se o centro da nuvem de elétrons não coincide com o núcleo, as cargas positiva e negativa se atraem e isso mantém os átomos inteiros. As duas forças opostas — E separando elétrons e núcleos enquanto sua atração mútua os une — chegam a um equilíbrio deixando o átomo polarizado, com a carga positiva ligeiramente deslocada para um lado e a negativa para o outro. O átomo agora tem um pequeno momento de di-

polo  $\mathbf{p}$ , que aponta na mesma direção que  $\mathbf{E}$ . Tipicamente, esse momento de dipolo induzido é aproximadamente proporcional ao campo (desde que este não seja forte demais):  $\mathbf{p}=\alpha\mathbf{E}$ .(GRIFFITHS, 2011, p. 113)

Moléculas polares, como a água, possuem momentos de dipolo elétrico permanentes devido à distribuição desigual de cargas. Esta distribuição desigual é resultado da diferença de eletronegatividade entre os átomos que compõem a molécula. Em contraste, moléculas apolares, como o hidrogênio, não apresentam momentos de dipolo permanentes. No entanto, podem exibir dipolos induzidos temporariamente devido a flutuações quânticas. Estas flutuações podem ocorrer como resultado da interação com um campo elétrico externo ou com outras moléculas.

Quando um dipolo é colocado em um campo elétrico externo, o campo exerce um torque sobre o dipolo. Este torque é descrito pela seguinte equação:

$$\vec{\tau} = \vec{p} \times \vec{E}, \quad (3.37)$$

onde  $\vec{p}$  é o momento de dipolo e  $\vec{E}$  é o campo elétrico. O torque resultante tende a alinhar o dipolo com o campo elétrico.

Além disso, o dipolo adquire uma energia potencial quando está em um campo elétrico. A energia potencial  $U$  do dipolo no campo elétrico é dada por:

$$U = -\vec{p} \cdot \vec{E} \quad (3.38)$$

Esta equação mostra que a energia potencial é mínima quando o dipolo está alinhado com o campo elétrico.

## 3.20 Circulação do Campo Elétrico, Rotacional e Teorema de Stokes

Segundo Feynman, Leighton e Sands (2019), a circulação ao redor de uma curva fechada é o produto da componente tangencial média do campo pelo perímetro da curva.

Definimos uma quantidade chamada de circulação como a velocidade resultante do líquido neste tubo, vezes a circunferência do tubo. Novamente, podemos estender esta idéia e definir a “circulação” para qualquer campo vetorial (mesmo quando não há nada se movendo). Para qualquer campo vetorial a circulação ao redor de qualquer curva imaginária fechada é definida como a média da componente tangencial do vetor (num sentido con-

sistente) multiplicada pela circunferência do circuito fechado. Circulação = (componente tangencial média)  $\times$  (distância percorrida) (1.4) (FEYNMAN; LEIGHTON; SANDS, 2019).

Seja um caminho fechado  $\Omega$ . Se esse caminho for dividido em elementos de comprimento  $d\vec{l} = dl\hat{t}$ , em que  $dl$  é o comprimento e  $\hat{t}$  é o versor tangencial a curva em cada elemento, o campo elétrico nesse elemento pode ser decomposto em uma componente tangencial  $E_t\hat{t}$  e uma componente normal  $E_n\hat{n}$ , resultando num produto escalar  $\vec{E} \cdot d\vec{l} = (E_n\hat{n} + E_t\hat{t}) \cdot \hat{t}dl = E_tdl$ . Dessa forma a média das componentes tangenciais é  $\langle E_t \rangle = \frac{\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l}}{\oint_C dl} = \frac{\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l}}{\text{comprimento de } C}$ . Pela definição, a circulação do campo  $\vec{E}$  ao redor da curva fechada  $C$  é  $\langle E_t \rangle \times \text{Comprimento de } C$ , portanto, a circulação é dada por:

$$\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l}. \quad (3.39)$$

O campo eletrostático é conservativo, pois  $\vec{E} = -\nabla V$ , portanto:

$$\begin{aligned} \oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} &= - \oint_C \nabla V \cdot d\vec{l} = - \oint_C \left( \frac{\partial V}{\partial x} \hat{i} + \frac{\partial V}{\partial y} \hat{j} + \frac{\partial V}{\partial z} \hat{k} \right) \cdot (dx\hat{i} + dy\hat{j} + dz\hat{k}) = \\ &= - \oint_{P \rightarrow P}^{(C)} dV = -V(P) + V(P) = 0. \end{aligned} \quad (3.40)$$

O rotacional é um operador vetorial que, quando aplicado a um campo vetorial, produz outro campo vetorial. Este novo campo vetorial, conhecido como rotacional, tem características notáveis. Por exemplo, suas componentes são a circulação do campo vetorial original por unidade de área quando as dimensões do caminho tendem a zero. O versor do rotacional é definido pela regra do parafuso à mão direita.

Para uma melhor compreensão, pode-se considerar um retângulo de dimensões  $\delta x$  e  $\delta y$  centrado em  $(x, y)$ . A componente  $z$  do rotacional em  $(x, y)$  é a circulação por unidade de área no sentido anti-horário (seguindo a regra do parafuso à mão direita):

$$[\text{rot } \vec{E}]_z = \frac{\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l}}{\text{área delimitada pelo caminho } C} \quad (3.41)$$

quando as dimensões do caminho fechado  $C$  tendem a zero. Se o caminho  $C$  é um retângulo de dimensões  $\Delta x$  e  $\Delta y$  centrado no ponto  $(x, y)$ , a componente  $z$  do rotacional

é

$$\begin{aligned}
& [\text{rot } \vec{E}]_z \\
&= \lim_{\Delta x, \Delta y \rightarrow 0} \frac{E_x(x, y - \Delta y/2)\Delta x + E_y(x + \Delta x/2, y)\Delta y - E_x(x, y + \Delta y/2)\Delta x - E_y(x - \Delta x/2, y)\Delta y}{\Delta x \Delta y} \\
&= \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{E_y(x + \Delta x/2, y) - E_y(x - \Delta x/2, y)}{\Delta x} - \lim_{\Delta y \rightarrow 0} \frac{E_x(x, y + \Delta y/2) - E_x(x, y - \Delta y/2)}{\Delta y} \\
&= [\text{rot } \vec{E}]_z = \frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y}. \tag{3.42}
\end{aligned}$$

O cálculo das outras componentes do rotacional são realizadas de forma análoga.

Logo:

$$\nabla \times \vec{E} = \left( \frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} \right) \hat{i} + \left( \frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x} \right) \hat{j} + \left( \frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} \right) \hat{k}. \tag{3.43}$$

Na circulação de elementos de superfície adjacentes, as integrais de linha internas cancelam-se, restando apenas as integrais de linha na fronteira da superfície total. Se uma superfície  $S$ , delimitada pela fronteira  $C$ , for dividida em vários elementos de superfície  $dS_i$ , delimitados pelas fronteiras  $C_i$ . As circulações em  $C_i$  cancelam as integrais de linha interiores a  $C$ , preservando apenas as integrais de linha na fronteira de  $C$ .

Para calcular a circulação na fronteira  $\partial S$  (ou  $C$ ) de uma superfície  $S$  de área  $A$ , existem duas abordagens principais. A primeira envolve a soma das contribuições de todos os pontos na superfície, enquanto a segunda considera apenas as contribuições dos pontos na fronteira. No primeiro caso, a circulação é dada pela integral de superfície do rotacional do campo elétrico  $\vec{E}$ , enquanto no segundo caso, é dada pela integral de linha do campo elétrico ao longo da fronteira. Essas duas abordagens são equivalentes, conforme expresso pelo Teorema de Stokes. Em termos matemáticos, isso pode ser escrito como:

$$\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = \int_S (\nabla \times \vec{E}) \cdot d\vec{S} \tag{3.44}$$

Como  $\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = 0$  para o campo eletrostático, então

$$\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = \int_S (\nabla \times \vec{E}) \cdot d\vec{S} = 0 \Rightarrow \nabla \times \vec{E} = 0. \tag{3.45}$$

## 3.21 Energia Eletrostática

Para configurar cargas em uma disposição específica, é necessário superar as forças elétricas entre elas. Isso envolve a realização de trabalho e a energia necessária para

posicionar as cargas  $q_1, q_2, \dots, q_N$  é dada por:

$$U = \sum_{i < j} q_i V_{i(j)} \quad (3.46)$$

Aqui,  $V_{i(j)}$  é o potencial na posição da carga  $q_i$ , devido à carga  $q_j$ . Portanto, a energia pode ser expressa como:

$$U = \sum_{i < j} \frac{q_i q_j}{4\pi\epsilon_0 r_{ij}} \quad (3.47)$$

onde  $r_{ij}$  é a distância entre  $q_i$  e  $q_j$ . No entanto, essa abordagem pode levar a uma dupla contagem da energia de interação. Para evitar isso, pode-se somar todas as interações e multiplicar por um fator de  $\frac{1}{2}$ , resultando em:

$$U = \frac{1}{2} \sum_{i \neq j} \frac{q_i q_j}{4\pi\epsilon_0 r_{ij}} \quad (3.48)$$

Essa equação pode ser estendida para o caso contínuo, resultando em:

$$U = \frac{1}{2} \int_v dq V(\vec{r}) \quad (3.49)$$

ou, em termos da densidade de carga  $\rho(\vec{r})$ :

$$U = \frac{1}{2} \int_v \rho(\vec{r}) V(\vec{r}) dv. \quad (3.50)$$

## 3.22 Capacitores

Na região central entre as placas paralelas de um capacitor plano, o campo elétrico é considerado uniforme, saindo da placa positiva e entrando na placa negativa, com módulo dado por:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0} = \frac{Q}{\epsilon_0 A} \quad (3.51)$$

onde  $\sigma = \frac{Q}{A}$ . A diferença de potencial entre as placas é:

$$V = V_+ - V_- = \int_+^- \vec{E} \cdot d\vec{l} = Ed = \frac{Qd}{\epsilon_0 A}. \quad (3.52)$$

A capacitância entre duas placas condutoras com cargas  $+Q$  e  $-Q$ , com diferença

de potencial  $V$  entre as placas, é definida como:

$$C = \frac{Q}{V}. \quad (3.53)$$

cuja unidade de medida é o Farad (F), definido de tal forma que, 1 Farad é igual a 1 Coulomb por Volt. Para o capacitor de placas paralelas, a capacitância é

$$C = \frac{\varepsilon_0 A}{d}. \quad (3.54)$$

Para um capacitor cilíndrico com dois condutores cilíndricos concêntricos de raios interno  $a$  e externo  $b$ , o campo elétrico é:

$$\vec{E} = \frac{\lambda}{2\pi\varepsilon_0\rho} \hat{\rho}. \quad (3.55)$$

A diferença de potencial entre os condutores é:

$$V = \frac{\lambda}{2\pi\varepsilon_0} \int_a^b \frac{d\rho}{\rho} = \frac{\lambda}{2\pi\varepsilon_0} \ln\left(\frac{b}{a}\right). \quad (3.56)$$

Como  $\lambda = \frac{Q}{L}$ , então:

$$V = \frac{Q}{2\pi\varepsilon_0 L} \ln\left(\frac{b}{a}\right). \quad (3.57)$$

A capacitância é:

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{2\pi\varepsilon_0 L}{\ln\left(\frac{b}{a}\right)}. \quad (3.58)$$

Para um capacitor esférico com dois condutores esféricos concêntricos de raios interno  $a$  e externo  $b$ , o campo elétrico é:

$$\vec{E} = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 r^2} \hat{r}. \quad (3.59)$$

A diferença de potencial entre os condutores é:

$$V = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0} \int_a^b r^{-2} dr = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0} \left(\frac{1}{a} - \frac{1}{b}\right). \quad (3.60)$$

A capacitância é:

$$C = \frac{Q}{V} = 4\pi\varepsilon_0 \frac{ab}{b-a}. \quad (3.61)$$

Para uma esfera condutora com  $b \rightarrow \infty$ , a capacitância é:

$$C = 4\pi\epsilon_0 a. \quad (3.62)$$

A energia armazenada em um capacitor é:

$$U = \frac{Q^2}{2C} = \frac{QV}{2} = \frac{CV^2}{2}. \quad (3.63)$$

Quando um capacitor está sendo carregado, elétrons são transferidos do condutor positivamente carregado para o condutor negativamente carregado. Isto deixa o condutor positivo com uma deficiência de elétrons e o condutor negativo com um excesso de elétrons. Alternativamente, a transferência de cargas positivas do condutor negativamente carregado para o positivamente carregado também pode carregar o capacitor. De qualquer forma, deve ser realizado trabalho para carregar o capacitor e, pelo menos parte deste trabalho, é armazenada como energia potencial eletrostática. (TIPLER; MOSCA, 2009)

Para um capacitor plano, a densidade de energia armazenada é:

$$u = \frac{\epsilon_0}{2} \vec{E}^2. \quad (3.64)$$

A energia armazenada no campo elétrico é:

$$U = \frac{\epsilon_0}{2} \int_v \vec{E}^2 dv. \quad (3.65)$$

A energia armazenada no campo elétrico é dada por:

$$U = \frac{1}{2} \int_v \rho(\vec{r}) V(\vec{r}) dv. \quad (3.66)$$

Usando a relação  $\epsilon_0 \nabla \cdot \vec{E} = \rho$ , temos:

$$U = \frac{\epsilon_0}{2} \int_v (\nabla \cdot \vec{E}) V(\vec{r}) dv. \quad (3.67)$$

Aplicando a identidade do divergente:

$$V \nabla \cdot \vec{E} = \nabla \cdot (V \vec{E}) - \vec{E} \cdot \nabla V = \nabla \cdot (V \vec{E}) + \vec{E}^2. \quad (3.68)$$

Portanto:

$$U = \frac{\varepsilon_0}{2} \int_v [\nabla \cdot (V\vec{E}) + \vec{E}^2] dv = \frac{\varepsilon_0}{2} \left[ \oint_S (V\vec{E}) \cdot d\vec{S} + \int_v \vec{E}^2 dv \right]. \quad (3.69)$$

Como  $\oint_S (V\vec{E}) \cdot d\vec{S} = 0$  no infinito, temos:

$$U = \frac{\varepsilon_0}{2} \int_v \vec{E}^2 dv. \quad (3.70)$$

Para um capacitor sem um isolante entre as placas condutoras, a capacitância, potencial e campo elétrico são  $C_0$ ,  $V_0$  e  $E_0$ . Para um capacitor com dielétrico de constante dielétrica  $\kappa$  entre as placas condutoras, a capacitância, potencial e campo elétrico são:

$$C = \kappa C_0, \quad V = \frac{V_0}{\kappa}, \quad E = \frac{E_0}{\kappa} \quad (3.71)$$

A polarização  $\vec{P}$  é o momento dipolar por unidade de volume:

$$\vec{P} = \frac{d\vec{p}}{dv} = \chi\varepsilon_0\vec{E} = (\kappa - 1)\varepsilon_0\vec{E}, \quad (3.72)$$

em que  $\chi$  é a susceptibilidade elétrica do dielétrico. A densidade volumétrica de cargas de polarização é:

$$\rho_P = -\nabla \cdot \vec{P}. \quad (3.73)$$

Partindo da definição de deslocamento elétrico, dada por:

$$\vec{D} = \varepsilon_0\kappa\vec{E}, \quad (3.74)$$

Conclui-se que

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0} - \chi\nabla \cdot \vec{E} \Rightarrow \nabla \cdot \vec{D} = \rho, \quad (3.75)$$

onde  $\rho$  são as cargas livres.

A energia armazenada no capacitor é:

$$U = \frac{1}{2}\kappa C_0 V^2 \quad (3.76)$$

A descontinuidade da componente normal do deslocamento elétrico na fronteira é:

$$\hat{n}_{12} \cdot (\vec{D}_2 - \vec{D}_1) = \sigma \quad (3.77)$$

As componentes tangentes do campo elétrico são contínuas nas interfaces entre meios:

$$\hat{t} \times (\vec{E}_2 - \vec{E}_1) = 0. \quad (3.78)$$

Dois capacitores estão em série quando possuem um único terminal em comum e uma tensão  $U$  aplicada entre seus terminais não comuns. Dois capacitores estão em paralelo quando possuem dois terminais em comum e uma tensão  $U$  aplicada entre esses terminais comuns. A capacitância equivalente de dois capacitores ( $C_1$  e  $C_2$ ) em série é calculada pela fórmula:

$$C = \frac{C_1 \times C_2}{C_1 + C_2}. \quad (3.79)$$

A capacitância equivalente de dois capacitores ( $C_1$  e  $C_2$ ) em paralelo é calculada pela fórmula:

$$C = C_1 + C_2. \quad (3.80)$$

## **Capítulo 4**

# **DESCRIÇÃO E IMPLEMENTAÇÃO DO PRODUTO**

O presente capítulo tem como objetivo descrever detalhadamente o desenvolvimento e a implementação do produto educacional, abordando desde o contexto de aplicação até os aspectos técnicos envolvidos. Será apresentado o ambiente escolar onde ocorreu a aplicação, incluindo as características institucionais e do público-alvo. Em seguida, será descrito o aplicativo "Eletrostática no Cotidiano", suas funcionalidades e como ele foi integrado ao processo pedagógico. A implementação seguiu uma metodologia estruturada, utilizando os Três Momentos Pedagógicos de Demétrio Delizoicov, proporcionando uma abordagem que combina tecnologia e educação para promover uma aprendizagem significativa.

### **4.1 Informações contextuais sobre o local de aplicação do produto educacional**

A aplicação do produto educacional foi realizada em três turmas do terceiro ano do ensino médio, totalizando 64 participantes, do Centro de Ensino Professor Antonio Carlos Beckman, uma escola estadual que conta hoje com mais de 680 alunos matriculados em turmas de ensino médio, totalizando três turmas de primeiro ano, três turmas de segundo ano e três turmas de terceiro ano no turno matutino e a mesma quantidade de turmas no turno vespertino.

A escola fica localizada no centro do município de Açailândia, no estado do Maranhão, na rua Marly Sarney S/N, em prédio próprio. Conta com todas as salas climatizadas, uma biblioteca, um laboratório onde se encontram materiais para aulas de física, biologia,

química e robótica educacional, além de recursos audiovisuais e internet para auxiliar o desenvolvimento das aulas e atividades pelos professores e alunos.

Açailândia é o oitavo município mais populoso do Maranhão, com uma população de 106.550 habitantes, conforme estimativa do IBGE em 2022. A cidade destaca-se como um importante polo agroindustrial, sendo a produção e exportação de ferro gusa sua principal fonte de renda. Além disso, Açailândia abriga diversos estabelecimentos comerciais de diferentes setores e possui o maior rebanho bovino do estado. O município abriga um total de 104 escolas, sendo 15 estaduais, 1 instituto federal, 70 municipais e 18 da rede privada, que juntas atendem 18.186 alunos matriculados.

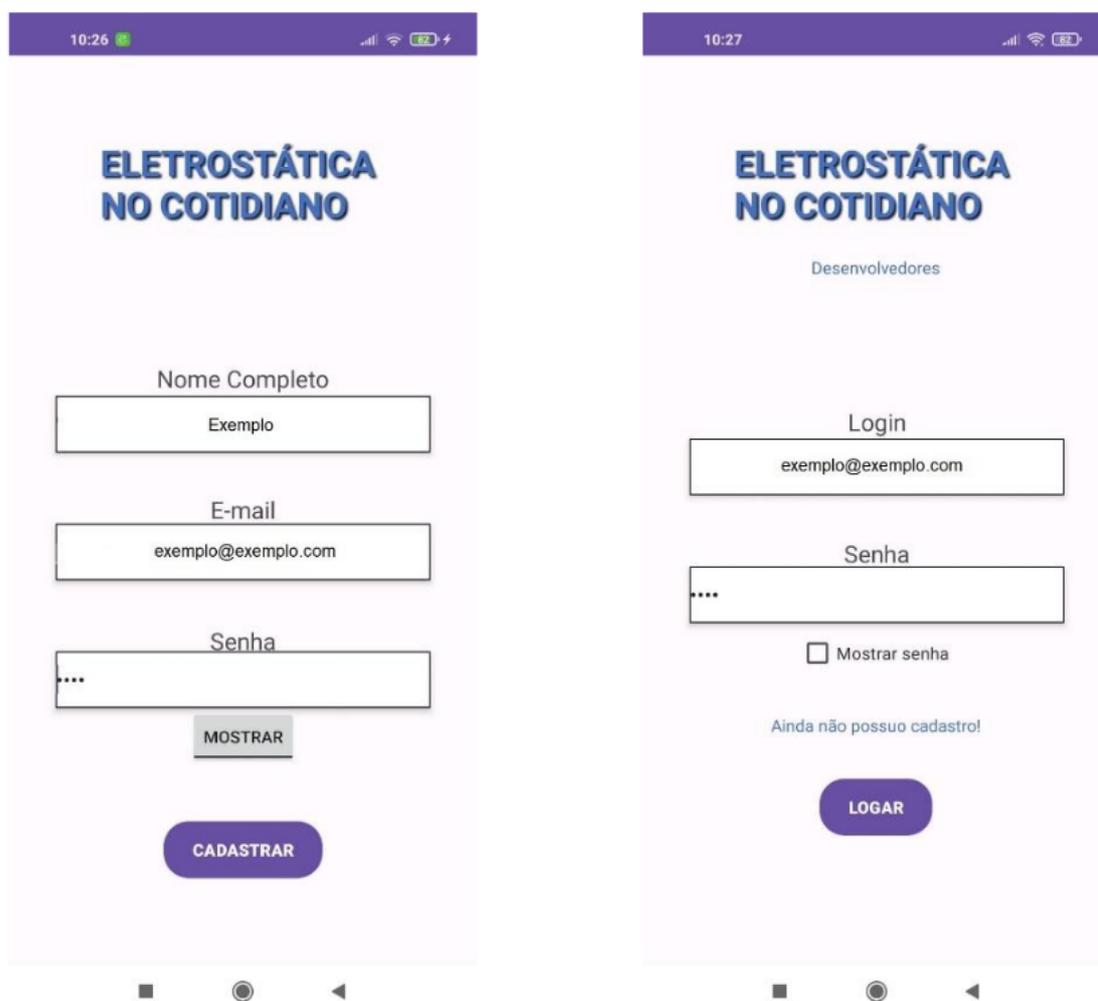
A implementação do produto ocorreu em agosto de 2023, entre o dia 07 e 25 do mês, durante cinco aulas em cada turma, sendo duas aulas por semana (na terceira semana foi utilizada apenas uma aula para finalizar a aplicação). Ao longo do desenvolvimento da abordagem didático-pedagógico, avaliou-se a abordagem e o produto educacional. Para esta análise, um questionário foi aplicado ao final da abordagem, via formulário eletrônico Microsoft forms, contendo oito questionamentos sobre a experiência do aluno com o aplicativo e com os três momentos pedagógicos utilizados. Esse questionário está disponível no Apêndice B. Também foi aplicado um questionário relacionado à observação do experimento do Pêndulo Eletrostático, via Microsoft forms, no Primeiro Momento Pedagógico (Problematização Inicial), questionário esse que foi reaplicado no Terceiro Momento Pedagógico (Aplicação do Conhecimento), para efeito de observação e comparação das respostas dos alunos. Esse questionário está disponível no produto educacional apresentado no Apêndice A.

## 4.2 Apresentação do Produto

Esta dissertação de mestrado descreve o desenvolvimento de um aplicativo para sistema Android, voltado para estudantes que desejam aprofundar seus conhecimentos em eletromagnetismo, especificamente no campo da eletrostática, chamado de **Eletrostática no Cotidiano**.

O aplicativo foi projetado de forma intuitiva e fácil de usar. Ao acessar o aplicativo, o usuário tem a opção de criar uma conta ou fazer login em uma conta existente. Após o login, o usuário tem acesso ao conteúdo completo do aplicativo, permitindo ao usuário acompanhar seu progresso e receber feedback personalizado sobre seu desempenho.

Figura 8: Telas de cadastro e de login.



Fonte: Autor.

O objetivo do aplicativo é proporcionar uma experiência de aprendizado interativa, por meio da disponibilização de conteúdo teórico, imagens, animações, simulações interativas e exercícios de fixação. O conteúdo teórico é apresentado de maneira clara e concisa, abrangendo os principais conceitos da eletrostática, contando com os diversos recursos supracitados, os quais proporcionam um aprendizado mais acessível e cativante.

No campo da educação, a incorporação de tecnologias móveis tem se mostrado uma ferramenta poderosa para auxiliar no processo de aprendizagem. Nesse contexto, o aplicativo Eletrostática no Cotidiano foi desenvolvido com o intuito de oferecer uma experiência de estudo envolvente e interativa para os usuários, ajudando-os a aprofundar seu conhecimento nessa área complexa da física.

Após a revisão do conteúdo teórico, o usuário é direcionado para a seção de exercícios de fixação. Nessa seção, são apresentadas diversas questões relacionadas ao tópico

Figura 9: Amostra do conteúdo sobre campo elétrico.

11:00 11:00

### Campo Elétrico

Exercícios

Uma carga  $Q$  gera um vetor campo elétrico em cada ponto  $P$  ao seu redor. A direção do vetor campo elétrico num ponto  $P$  é a mesma direção da força eletrostática atuando sobre uma carga de prova  $q$  colocada no ponto  $P$ . O sentido do vetor campo elétrico é o mesmo da força eletrostática, se a carga de prova for positiva ( $q > 0$ ). Caso contrário, se  $q < 0$ , então o sentido do vetor campo elétrico é contrário ao da força eletrostática. A intensidade do campo elétrico é  $E = kQ/d^2$  a uma distância  $d$ . A constante eletrostática é  $k = 9 \times 10^9 \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2$ . Se colocarmos uma carga de prova  $q > 0$  (positiva) num campo  $E$ , uma força  $F = qE$  atuará sobre  $q$  no mesmo sentido do campo  $E$ . Se colocarmos uma carga de prova  $q < 0$  (negativa) num campo  $E$ , uma força  $F = qE$  atuará sobre  $q$  no sentido contrário ao campo  $E$ . O campo elétrico no interior de bons condutores é igual a zero, pois os elétrons repelem-se entre si, e se distribuem uniformemente na superfície externa, resultando numa força total nula sobre qualquer carga de prova dentro do condutor. Blindagem eletrostática: a estrutura metálica de veículos como aeronaves e automóveis protege os passageiros e equipamentos eletrônicos em seu interior contra a ocorrência de descargas elétricas.

Recurso Interativo  Imagens

**Uma carga  $Q$  gera um vetor campo elétrico em cada ponto  $P$  ao seu redor. Se  $Q > 0$ , o vetor campo elétrico está ao longo do raio, com sentido para fora.**

Imagem 1

O diagrama mostra uma carga positiva  $Q$  representada por um círculo verde com um sinal de mais (+) e o símbolo  $Q$  abaixo. Uma linha horizontal com uma seta indica a distância  $d$  até um ponto. Nesse ponto, um vetor azul aponta para a direita, rotulado como  $E = kQ/d^2$ .

Fonte: Autor.

Figura 10: Ícone do aplicativo.

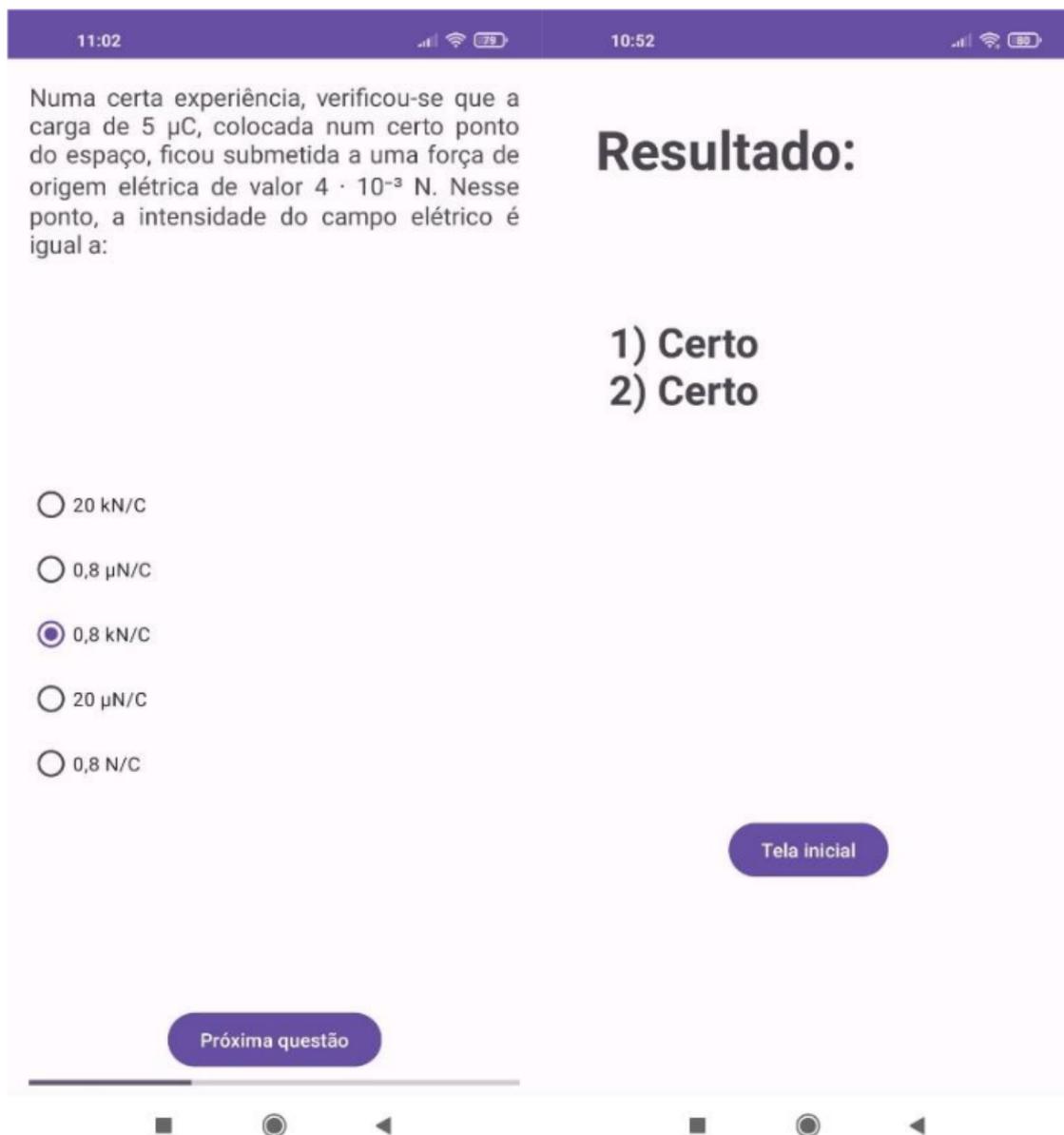


Fonte: Autor.

estudado. O usuário pode selecionar a resposta que considera correta e recebe um feed-

back após o término dos exercícios, indicando se sua resposta está correta ou não. Esse feedback personalizado auxilia o estudante a identificar áreas que precisam de maior atenção, reforçando o aprendizado adquirido.

Figura 11: Amostra de questão e feedback.



Fonte: Autor.

O aplicativo Eletrostática no Cotidiano oferece uma série de benefícios para os estudantes e entusiastas de física. Ele está disponível para dispositivos Android, permitindo o acesso ao estudo em qualquer lugar e a qualquer momento. Os recursos interativos tornam os conceitos abstratos da eletrostática mais tangíveis e fáceis de compreender. Os exercícios de fixação permitem ao usuário praticar e consolidar o conhecimento adquirido,

fortalecendo sua compreensão do assunto. O feedback imediato fornecido após a resolução dos exercícios permite ao usuário avaliar seu progresso e identificar áreas que precisam ser reforçadas.

O aplicativo de eletrostática oferece uma abordagem inovadora e interativa para o estudo dos princípios e conceitos fundamentais da eletrostática. Espera-se que esse aplicativo possa auxiliar estudantes do ensino médio a aprimorarem sua compreensão e desempenho em eletrostática contribuindo para o avanço da educação e do aprendizado de física, proporcionando uma ferramenta educacional eficaz e acessível para todos os interessados nesse campo.

### **4.3 Metodologia de Aplicação**

Este capítulo apresenta a metodologia utilizada para a aplicação do produto educacional, que tem como objetivo explorar a utilização de um aplicativo para o ensino de eletrostática, embasado nos Três Momentos Pedagógicos propostos por Demétrio Delizoicov. Busca-se investigar como a integração da tecnologia e da abordagem pedagógica pode contribuir para uma aprendizagem mais significativa e efetiva dos conceitos de eletrostática. Serão descritos os procedimentos adotados, as etapas de coleta e análise de dados, bem como a descrição do aplicativo utilizado.

O aplicativo apresenta uma interface de fácil acesso, cuja utilização visa dinamizar as aulas de física, sobre eletrostática, fazendo que o aluno interaja com o conteúdo ministrado por meio do tema abordado, lendo sobre este no aplicativo e observando as ilustrações e animações relacionadas, bem como respondendo aos exercícios propostos, que são aplicados a cada conteúdo que se finaliza para que o aluno possa aferir seus conhecimentos e, posteriormente, discutir e tirar dúvidas em sala de aula.

O uso do aplicativo, em sala de aula, está inserido em uma abordagem embasada pelos Três Momentos Pedagógicos de Demétrio Delizoicov. Portanto, o aplicativo, por si só, não constitui o método de aprendizagem, mas integra um, tendo papel fundamental em um dos momentos pedagógicos, intermediando e facilitando o aprendizado.

A abordagem apresenta cinco etapas, sendo distribuídas dentro dos três momentos pedagógicos, em cinco aulas de 45 a 50 minutos, cada. Correspondendo ao primeiro momento pedagógico (Problematização Inicial), estão inseridas as etapas um e dois, ambas sendo realizadas em apenas uma aula. A etapa 01 consiste na realização de um experi-

mento pelo professor, associado ao assunto abordado. O experimento a ser realizado é o pêndulo eletrostático. A etapa 02 se dá por meio da aplicação de um questionário com perguntas sobre os fenômenos observados na realização do experimento, visando instigar os alunos a compreenderem sobre o assunto abordado.

Para o segundo momento pedagógico (Organização do Conhecimento), serão necessárias duas aulas para a etapa 03 e uma aula para a etapa 04. Na etapa 03, os alunos farão uso do aplicativo para se aprofundarem no assunto abordado e entenderem os embasamentos físicos relacionados ao experimento apresentado. Durante a etapa 04, será feita a socialização do conteúdo estudado, por meio de uma sessão tira dúvidas, onde os alunos sanarão suas dúvidas relacionadas ao experimento e ao conteúdo estudado pelo aplicativo, sendo mediado pelo professor.

O terceiro momento pedagógico (Aplicação do Conhecimento) corresponde à etapa 05, necessitando de uma aula, apenas, onde será feita a verificação dos conhecimentos adquiridos pelos alunos, por meio da reaplicação do questionário aplicado inicialmente.

Abaixo, segue um exemplo de aplicação para o conteúdo de campo elétrico:

1º Momento: Problematização Inicial (uma aula de 45 a 50min)

- Etapa 01: realização do experimento Pêndulo Eletrostático (demonstração prática).
- Etapa 02: Aplicação do questionário sobre o experimento realizado, visando instigar os alunos a compreenderem sobre o assunto abordado.

2º Momento: Organização do Conhecimento (três aulas de 45 a 50 min)

- Etapa 03 (duas aulas): Utilização do aplicativo para o estudo do tema abordado.
- Etapa 04 (uma aula): Socialização do conteúdo estudado por meio do aplicativo (sessão tira dúvidas).

3º Momento: Aplicação do Conhecimento (uma aula de 45 a 50min)

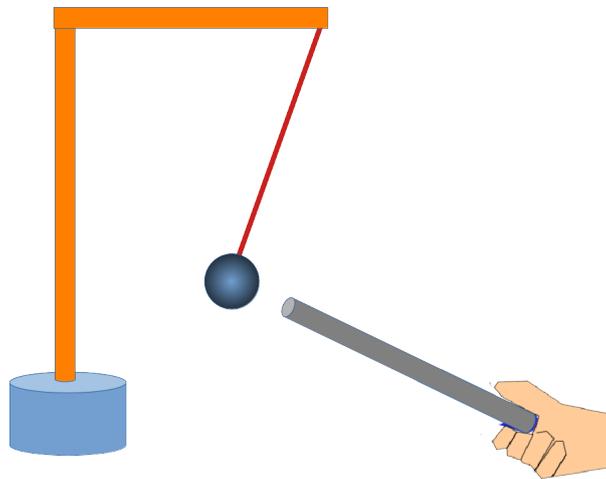
- Etapa 05: Reaplicação do questionário aplicado inicialmente, para que os alunos analisem suas conclusões iniciais e, se necessário, reformulem-nas.

## 4.4 Descrição do experimento

Através do experimento do pêndulo eletrostático poderá ser feita a visualização da interação entre corpos carregados eletricamente e seus campos elétricos gerados por suas

cargas. Para a realização deste experimento serão utilizados materiais de baixo custo e de fácil acesso. A seguir, tem-se uma ilustração do pêndulo e os materiais necessários.

*Figura 12: Pêndulo eletrostático.*



Fonte: Autor.

Construção e execução do experimento: Prenda a haste à base de madeira (aqui pode ser feito com parafuso ou cola adequada para os materiais). Em seguida, recorte um pequeno círculo de papel alumínio, cerca de 3cm de diâmetro, e o prenda à uma extremidade do fio de nylon, com fita. A outra extremidade do fio, prenda à ponta da haste, com fita.

Após a montagem, pegue o canudo de plástico e atrite-o com o papel toalha. Logo em seguida, aproxime este do pêndulo eletrostático. Observe o que acontece. Repita o procedimento, agora usando o cano de PVC e observe o que ocorre. Agora, após atritar o canudo, ou o cano de PVC, encoste-o no pêndulo e veja o que acontece.

*Quadro 3: Materiais necessários para a realização do experimento.*

<b>Material</b>	<b>Descrição</b>
Base de madeira	Uma base de madeira com dimensões de 15cm x 15cm para suportar o experimento.
Haste metálica ou isolante	Uma haste vertical que será fixada à base e terá 40cm de altura em relação à base do experimento. Pode ser feita de metal ou material isolante.
Fio de nylon	Um fio de nylon com 30cm de comprimento para pendurar o pêndulo e permitir o movimento oscilatório.
Papel alumínio	Um pedaço de papel alumínio com dimensões de 10cm x 10cm que será utilizado como massa suspensa no pêndulo.
Fita adesiva	Fita adesiva para fixar o fio de nylon na massa de papel alumínio e na haste.
Tesoura	Tesoura para cortar os materiais necessários no experimento.
Canudo de plástico	Um canudo de plástico que será eletrizado por atrito.
Pedaço de cano de PVC	Um pedaço de cano de PVC com 40cm de comprimento que será eletrizado por atrito.
Folhas de papel toalha	Duas folhas de papel toalha para atritar com o canudo de plástico e com o pedaço de cano de PVC.

Fonte: Autor.

## Capítulo 5

# RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão analisados os dados coletados com a pesquisa de campo, mediante a aplicação do produto educacional em três turmas do terceiro ano do ensino médio, com sessenta e quatro (64) participantes, no Centro de Ensino Professor Antonio Carlos Beckman, que é uma escola estadual localizada no município de Açailândia, no estado do Maranhão. No primeiro momento pedagógico, em que ocorreu a problematização inicial, o experimento do pêndulo eletrostático foi realizado, como ilustrado na Figura 13. No segundo momento pedagógico, em que ocorreu a organização do conhecimento, o uso do aplicativo foi realizado, como ilustrado na Figura 14.

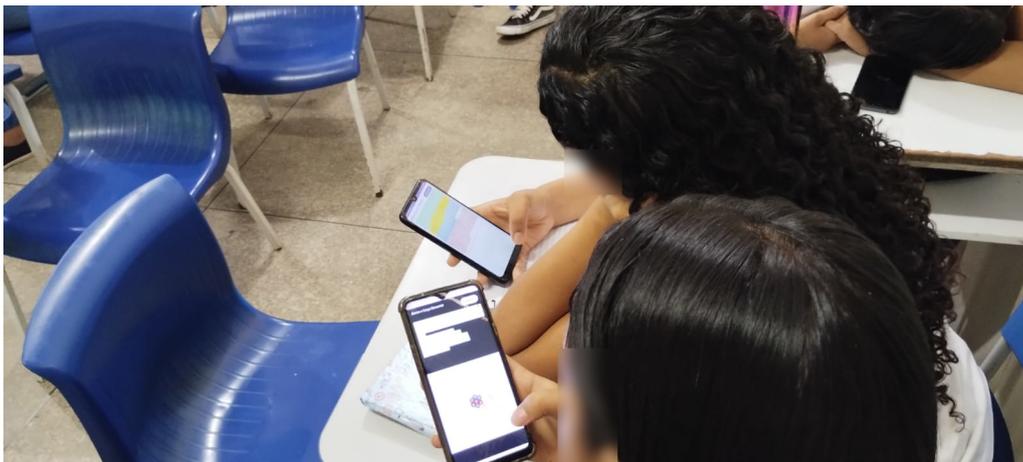
*Figura 13: Realização do experimento Pêndulo Eletrostático durante o primeiro momento pedagógico.*



Fonte: Autor.

A pesquisa científica demanda uma reflexão cuidadosa sobre o delineamento do problema, dos objetivos e das hipóteses, levando à escolha da melhor abordagem para sua execução. O design da pesquisa, similar ao planejamento meticuloso de uma casa, busca garantir que cada etapa conduza ao resultado desejado (SAMPIERI; COLLADO; LUCIO,

Figura 14: Realização do uso do aplicativo durante o segundo momento pedagógico.



Fonte: Autor.

2013). A decisão entre abordagens quantitativas, qualitativas ou mistas é crucial, sendo que os estudos quantitativos buscam validar hipóteses através da quantificação de dados, enquanto os qualitativos exploram o contexto do problema, proporcionando uma compreensão mais profunda das razões subjacentes (MALHOTRA, 2012). Atualmente, há uma tendência para a combinação dessas abordagens, reconhecendo sua complementaridade e contribuição para uma compreensão mais abrangente dos fenômenos estudados (DENZIN; LINCOLN; NETZ, 2006).

Para esta análise, um questionário foi aplicado ao final da realização dos três momentos pedagógicos, via formulário eletrônico Microsoft forms, contendo oito questionamentos sobre a experiência do aluno com o aplicativo e com a metodologia utilizada. Também foi aplicado um questionário relacionado à observação do experimento do Pêndulo Eletrostático, via *Microsoft forms*<sup>1</sup> (MICROSOFT, 2023), no Primeiro Momento Pedagógico (Problematização Inicial), questionário esse que foi reaplicado no Terceiro Momento Pedagógico (Aplicação do Conhecimento), para efeito de observação e comparação das respostas dos alunos.

Abaixo, destaca-se os resultados obtidos para os questionamentos realizados sobre o uso do aplicativo e dos três momentos pedagógicos, por meio de gráficos e da análise dos dados contidos neles.

A análise dos dados sobre o impacto do uso do aplicativo na compreensão do conteúdo abordado revela uma variedade de percepções entre os usuários. A maioria dos

---

<sup>1</sup>Microsoft Forms constitui uma aplicação integrante do conjunto de produtividade Office 365, projetada para facilitar a elaboração e distribuição de instrumentos de coleta de dados, como pesquisas, avaliações e questionários, permitindo análise e interpretação eficientes das respostas obtidas.

Figura 15: Questionamento 1: O uso do aplicativo ajudou você a compreender o conteúdo abordado?

### O uso do aplicativo ajudou você a compreender o conteúdo abordado?



Fonte: Autor.

participantes (76,56%) relatou que o aplicativo foi útil em ajudá-los a compreender o conteúdo, seja de forma completa (46,87%) ou parcial (29,68%). Esse resultado reflete uma percepção geral positiva sobre a eficácia do aplicativo como uma ferramenta de aprendizado.

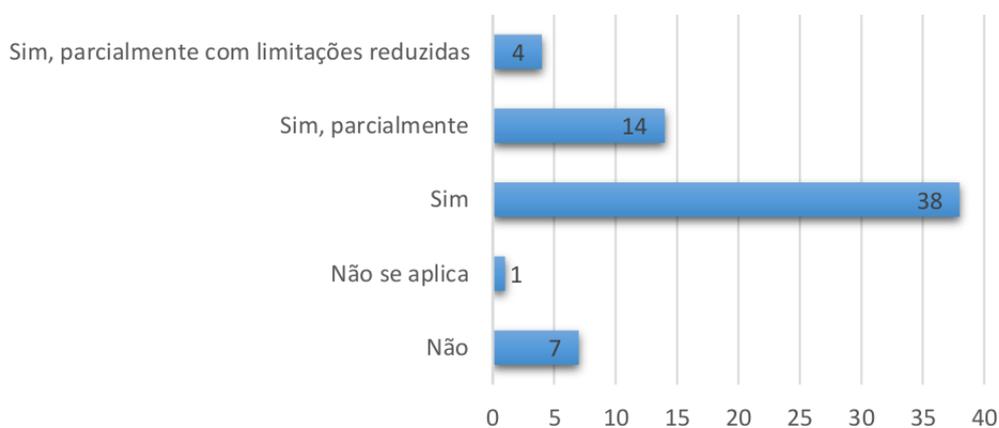
Entretanto, uma parcela dos usuários (17,18%) indicou que o aplicativo ajudou apenas parcialmente com limitações na compreensão do conteúdo, sendo que alguns deles (15,62%) mencionaram que essas limitações foram reduzidas, enquanto outro (1,5%) destacou que as limitações foram significativas. Essa porcentagem indica que, embora o aplicativo possa ter sido útil em alguns aspectos, ainda há espaço para melhorias para atender completamente às necessidades de aprendizado dos usuários.

Por outro lado, uma minoria dos participantes (4,68%) relatou que o aplicativo não os ajudou a compreender o conteúdo abordado. Essas respostas destacam a importância de uma análise detalhada das áreas em que o aplicativo pode não estar atendendo às expectativas dos usuários e onde podem ser necessárias melhorias. Em resumo, a análise desses dados oferece informações relevantes sobre a eficácia do aplicativo como uma ferramenta educacional, propiciando a oportunidade de melhorias quanto à experiência dos usuários.

Com base na análise dos dados fornecidos sobre a percepção dos usuários em relação à interface do aplicativo, pode-se observar que a maioria dos usuários (59,37%) expressou uma visão positiva, considerando a interface como atraente para sua utilização,

Figura 16: Questionamento 2: A interface do aplicativo (Janelas, botões e animações) é considerada atraente para sua utilização?

### A interface do aplicativo (Janelas, botões e animações) é considerada atraente para sua utilização?



Fonte: Autor.

seja de forma completa, ou parcial (21,87%). No entanto, uma pequena parcela (6,25%) indicou que a interface é considerada atrativa parcialmente com limitações reduzidas, possivelmente devido a algumas limitações identificadas.

Por outro lado, uma minoria dos usuários (10,93%) relatou que a interface do aplicativo não é considerada atraente para sua utilização. Essas respostas destacam a importância de uma análise detalhada da interface do aplicativo para identificar possíveis áreas de melhoria e garantir uma experiência do usuário mais satisfatória.

Essas informações podem orientar na implementação de ajustes e melhorias na interface do aplicativo, visando atender às expectativas e necessidades dos usuários. Isso inclui a revisão de elementos como janelas, botões e animações para garantir uma experiência visualmente atraente e intuitiva. Além disso, é essencial considerar *feedbacks* específicos dos usuários para abordar áreas identificadas como parcialmente atrativas ou com limitações.

A análise dos dados sobre a aprovação da utilização de simulações ou outros softwares durante as aulas de física revela uma percepção predominantemente positiva entre os participantes.

A maioria esmagadora dos entrevistados (82,81%) expressou sua aprovação em relação ao uso dessas ferramentas, reconhecendo o valor e a eficácia das simulações e

Figura 17: Questionamento 3: Você aprova a utilização de simulações durante as aulas de física?

### Você aprova a utilização de simulações, ou outros softwares, durante as aulas de física?



Fonte: Autor.

softwares no processo de ensino e aprendizado da física. Essa alta taxa de aprovação reflete a crescente aceitação e reconhecimento da importância das tecnologias educacionais no contexto da educação científica.

Além disso, algumas respostas (12,5%) indicaram uma aprovação parcial, com poucas ressalvas ou limitações percebidas. Essas opiniões sugerem uma abertura para o uso dessas ferramentas, embora possam existir aspectos específicos que precisam ser considerados ou melhorados para atender totalmente às expectativas dos usuários.

Por outro lado, uma minoria dos participantes (4,68%) expressou desaprovação em relação ao uso de simulações ou softwares durante as aulas de física. Embora representem uma proporção pequena, essas respostas destacam a existência de perspectivas divergentes em relação ao papel dessas ferramentas no contexto educacional, possivelmente refletindo preocupações sobre a dependência excessiva de tecnologia ou questões de acessibilidade.

Em resumo, a análise desses dados revela uma forte tendência positiva em relação à utilização de simulações e softwares durante as aulas de física, indicando um reconhecimento de seu potencial para enriquecer e aprimorar o processo de ensino e aprendizado nessa área.

A análise dos dados sobre o uso do aplicativo para a solução das atividades propostas revela uma tendência majoritariamente positiva entre os participantes.

Figura 18: Questionamento 4: O uso do aplicativo contribuiu para a solução das atividades proposta?

### O uso do aplicativo contribuiu para a solução das atividades propostas?



Fonte: Autor.

Para a grande maioria dos usuários (78,12%), o uso do aplicativo foi percebido como contribuinte para a resolução das atividades propostas. Essa alta taxa de percepção positiva sugere que o aplicativo desempenhou um papel eficaz como uma ferramenta auxiliar no processo de resolução de exercícios relacionadas ao conteúdo estudado.

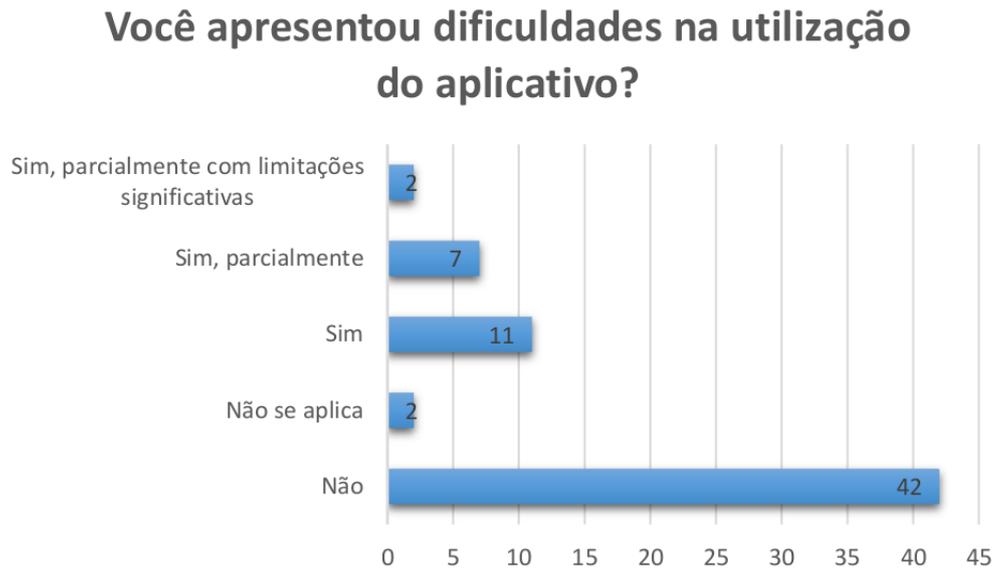
Além disso, algumas respostas (9,37%) indicaram que o aplicativo contribuiu parcialmente para a solução das atividades propostas. Embora tenha havido algum benefício percebido, algumas limitações podem ter sido observadas, sugerindo áreas em que o aplicativo pode ser aprimorado para melhor atender às necessidades dos usuários, como revela o pequeno número de usuários que indicaram que o aplicativo contribuiu parcialmente, mas com limitações reduzidas (6,25%).

Por outro lado, uma pequena minoria dos participantes (3,12%) relatou que o uso do aplicativo não contribuiu para a solução das atividades propostas. Essas respostas destacam a importância de uma análise mais aprofundada para entender os casos em que o aplicativo pode não ter sido eficaz ou relevante para o contexto das atividades.

Em resumo, a análise desses dados indica que o uso do aplicativo teve um impacto geral positivo na solução das atividades propostas, mas também ressalta a necessidade contínua de avaliação e aprimoramento para garantir sua eficácia e relevância contínuas no apoio ao aprendizado dos usuários.

A análise dos dados sobre as dificuldades na utilização do aplicativo revela uma

Figura 19: Questionamento 5: Você apresentou dificuldades na utilização do aplicativo?



Fonte: Autor.

perspectiva variada entre os participantes, mas em geral, aponta para uma experiência positiva de uso.

Para a maioria dos respondentes (65,62%), a experiência ao utilizar o aplicativo foi livre de grandes dificuldades. Isso sugere que a interface e o funcionamento do aplicativo foram intuitivos o suficiente para permitir uma navegação suave e eficiente, sem maiores obstáculos no caminho dos usuários.

Entretanto, uma parcela significativa dos participantes (17,18%) relatou ter enfrentado algumas dificuldades durante o uso do aplicativo. Estas dificuldades podem ter variado desde questões técnicas até desafios de usabilidade, como dificuldade em encontrar determinadas funcionalidades ou compreender instruções.

Por outro lado, uma parte dos respondentes (10,93%) mencionou ter encontrado algumas dificuldades, mas que estas não foram suficientemente impactantes para comprometer sua experiência geral. Isso sugere que, apesar dos obstáculos encontrados, os usuários conseguiram contorná-los e continuar utilizando o aplicativo com sucesso.

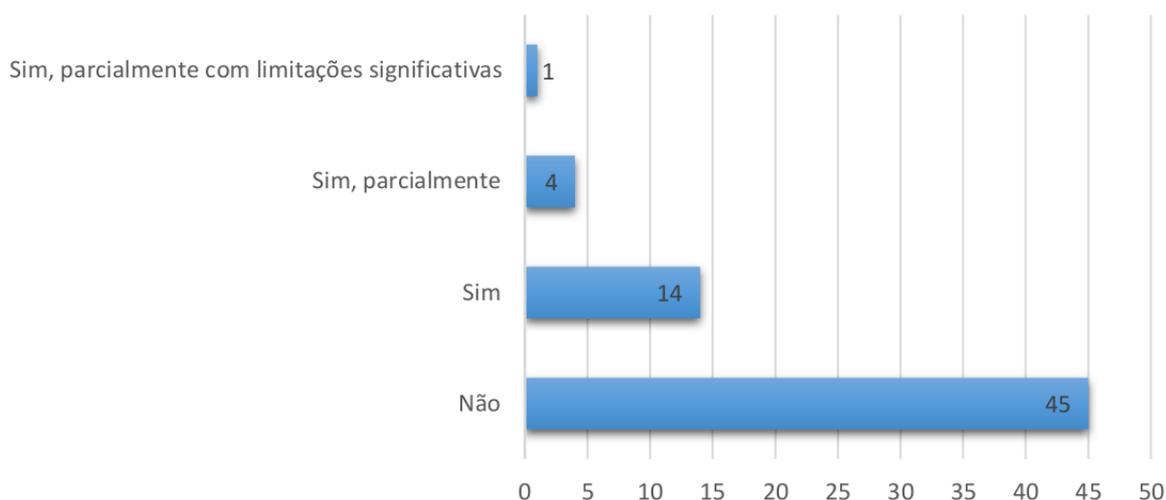
Por fim, uma minoria dos participantes (3,12%) enfrentou dificuldades com limitações significativas que afetaram negativamente sua experiência de uso. Estes relatos destacam a importância de uma análise mais aprofundada para identificar as áreas específicas que necessitam de melhorias, visando proporcionar uma experiência mais satisfatória para todos os usuários.

Em resumo, a análise desses dados aponta para uma experiência predominante-

mente positiva de utilização do aplicativo, embora haja espaço para melhorias para garantir que ele seja acessível e funcional para todos os usuários.

Figura 20: Questionamento 6: Você já utilizou outro software para aprender algum conteúdo em aulas de física?

### Você já utilizou outro software para aprender algum conteúdo em aulas de física?



Fonte: Autor.

A análise dos dados sobre a utilização de outros softwares para aprender conteúdos em aulas de física revela uma diversidade de experiências entre os participantes.

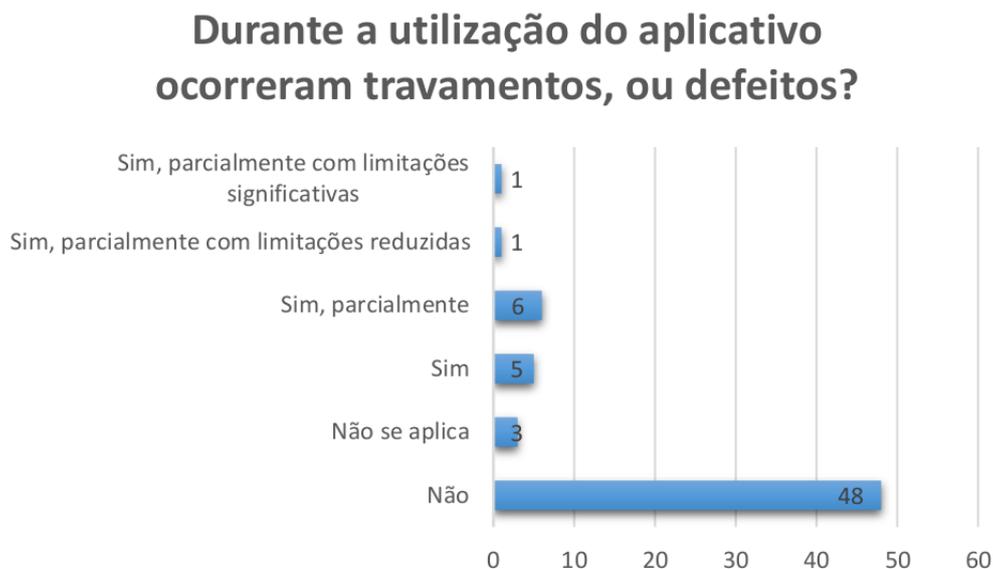
Para a maioria dos alunos (70,31%), a resposta foi negativa, indicando que nunca utilizaram outro software para aprender física. Esse resultado sugere uma predominância de métodos tradicionais de ensino, como livros didáticos e aulas expositivas, entre esse grupo de participantes.

No entanto, uma parcela significativa dos participantes (21,87%) relatou ter utilizado outros softwares para aprender conteúdos de física. Isso reflete uma abertura e disposição para explorar recursos tecnológicos como complemento à aprendizagem tradicional. Esses participantes podem ter se beneficiado de uma variedade de recursos disponíveis online, como simulações, vídeos explicativos e aplicativos educacionais.

Além disso, algumas respostas (6,25%) indicaram uma utilização parcial desses softwares, sugerindo que, embora tenham sido explorados, não foram a principal fonte de aprendizagem para esses participantes. Isso pode refletir uma preferência por métodos de ensino mais tradicionais ou uma falta de acesso ou familiaridade com esses recursos digitais.

Por fim, uma única resposta (1,56%) mencionou uma utilização parcial de outros softwares, mas com limitações significativas. Isso destaca a importância de considerar não apenas a disponibilidade de recursos digitais, mas também sua eficácia na prática, garantindo que eles atendam às necessidades dos alunos e contribuam efetivamente para sua aprendizagem.

Figura 21: Questionamento 7: Durante a utilização do aplicativo ocorreram travamentos, ou defeitos?



Fonte: Autor.

Em suma, a análise desses dados ressalta a importância de uma abordagem diversificada no ensino de física, que integre tanto métodos tradicionais quanto recursos digitais, levando em consideração as diferentes preferências e necessidades dos alunos. Essa variedade de abordagens pode enriquecer a experiência de aprendizagem e promover uma compreensão mais ampla e profunda dos conceitos físicos.

A análise dos dados sobre a ocorrência de travamentos ou defeitos durante a utilização do aplicativo revela uma panorâmica interessante sobre a experiência dos usuários.

Para a maioria esmagadora dos participantes (75,00%), a resposta foi negativa, indicando que durante o uso do aplicativo não ocorreram travamentos ou defeitos. Isso sugere uma experiência satisfatória e estável, onde os usuários puderam aproveitar o conteúdo sem interrupções significativas.

No entanto, uma pequena proporção dos participantes (7,81%) relatou que enfrentou travamentos ou defeitos durante a utilização do aplicativo. Esses problemas podem ter impactado negativamente a experiência desses usuários, causando frustração e prejudicando

a eficácia do aplicativo como ferramenta de aprendizado.

Além disso, outra parcela dos participantes (9,37%) indicou uma ocorrência parcial de travamentos ou defeitos. Isso sugere que, embora os problemas não tenham sido constantes, eles ainda foram percebidos em algum momento, afetando a fluidez da experiência de uso.

É interessante observar que houve casos em que os problemas foram mencionados com diferentes graus de gravidade. Enquanto uma resposta (1,56%) relatou travamentos ou defeitos com limitações reduzidas, outra (1,56%) destacou limitações significativas, sugerindo que os problemas enfrentados por esses usuários foram mais graves e impactaram mais substancialmente sua experiência.

Em resumo, embora a maioria dos participantes não tenha enfrentado problemas durante a utilização do aplicativo, a ocorrência de travamentos ou defeitos para alguns usuários destaca a importância de monitorar e resolver questões técnicas para garantir uma experiência satisfatória para todos.

*Figura 22: Questionamento 8: Como você avalia a experiência de aprendizado na aula que utilizou os três momentos pedagógicos e o aplicativo Eletrostática no Cotidiano? Compartilhe suas opiniões e percepções sobre como a abordagem contribuiu para o seu aprendizado, destacando pontos positivos e negativos e se você tem preferência ou não por esse tipo de metodologia.*

### Sobre a experiência com a metodologia e o aplicativo



Fonte: Autor.

Quando perguntado: “como você avalia a experiência de aprendizado na aula que utilizou os três momentos pedagógicos e o aplicativo Eletrostática no Cotidiano? Compartilhe

suas opiniões e percepções sobre como a abordagem contribuiu para o seu aprendizado, destacando pontos positivos e negativos e se você tem preferência ou não por esse tipo de metodologia". As respostas dos alunos puderam ser organizadas, por semelhança, em cinco categorias:

Grupo 1: Experiência limitada devido à incompatibilidade com dispositivos iOS.

Grupo 2: Reflexões sobre princípios físicos aplicados no cotidiano.

Grupo 3: Avaliações positivas da metodologia de ensino, com menção à exclusão de usuários de iPhone.

Grupo 4: Avaliações positivas da experiência com o aplicativo, destacando a eficácia na compreensão do conteúdo e a interatividade.

Grupo 5: Opiniões mistas sobre o aplicativo, com elogios à sua utilidade e críticas à sua compatibilidade com iPhones.

Segue abaixo uma análise de cada grupo:

Grupo 1: "Experiência limitada devido à incompatibilidade com dispositivos iOS." Neste grupo, os usuários expressaram uma falta de experiência direta com o aplicativo devido à incompatibilidade com dispositivos iOS, como iPhones. Suas opiniões refletem a frustração de não poderem utilizar o aplicativo devido a essa limitação técnica. Representando aproximadamente 9,37% das respostas.

Grupo 2: "Reflexões sobre princípios físicos aplicados no cotidiano." As respostas neste grupo refletem uma discussão sobre os princípios físicos aplicados no dia a dia, sem necessariamente abordar a experiência específica com o aplicativo. Os usuários destacaram exemplos do uso da física em eletrodomésticos e situações cotidianas, representando cerca de 3,12% das respostas.

Grupo 3: "Avaliações positivas da metodologia de ensino, com menção à exclusão de usuários de iPhone." Os usuários neste grupo elogiaram a metodologia de ensino proporcionada pelo aplicativo, destacando sua eficácia no aprendizado. No entanto, muitos também expressaram frustração com a exclusão de usuários de iPhone, destacando a necessidade de tornar o aplicativo acessível a uma variedade maior de dispositivos. Representando aproximadamente 21,87% das respostas.

Grupo 4: "Avaliações positivas da experiência com o aplicativo, destacando a eficácia na compreensão do conteúdo e a interatividade." As respostas neste grupo foram amplamente positivas, com os usuários elogiando a experiência com o aplicativo e sua eficácia na compreensão do conteúdo. Eles destacaram a interatividade, os recursos visuais e a facilidade de uso como pontos fortes do aplicativo, representando cerca de 48,43% das

respostas.

Grupo 5: "Opiniões mistas sobre o aplicativo, com elogios à sua utilidade e críticas à sua compatibilidade com iPhones." Neste grupo, encontramos uma variedade de opiniões, com alguns usuários elogiando a utilidade do aplicativo e outros expressando críticas à sua incompatibilidade com iPhones. Embora reconheçam os benefícios do aplicativo, eles também apontam suas limitações técnicas como um ponto de preocupação, representando aproximadamente 17,18% das respostas.

Essas categorias ajudam a entender melhor a diversidade de experiências e opiniões dos usuários em relação ao aplicativo, destacando áreas de satisfação e oportunidades de melhoria.

A análise dos dados coletados com as respostas dos alunos ao questionário sobre a observação do experimento do Pêndulo Eletrostático, que foi aplicado em dois momentos: no primeiro momento pedagógico (Problematização Inicial) e no terceiro momento pedagógico (Aplicação do Conhecimento), para fins de comparação entre as respostas dos alunos antes da aplicação da metodologia e do produto educacional e depois da aplicação destes, segue abaixo.

Vale ressaltar que buscou-se analisar qualitativamente as respostas dos alunos, com o objetivo de verificar as nuances contidas nas respostas dos alunos, o que não seria possível por meio da análise quantitativa, pois teríamos que classificar as respostas em certo ou errado com base em uma resposta padrão, não considerando o esforço individual de cada aluno em tentar descrever o fenômeno observado, com suas dificuldades, suas particularidades, e o seu modo de expressar suas ideias mediante o observado. Segundo Malhotra (2012), "a pesquisa qualitativa proporciona melhor visão e compreensão do contexto do problema [...]".

Inicia-se a análise pela questão 01, que aborda a observação de um fenômeno físico específico durante o experimento (Pêndulo Eletrostático), onde um círculo de papel alumínio é atraído por um pedaço de cano de PVC.

Os dados revelam que a maioria dos alunos respondeu de forma parcialmente correta, indicando uma compreensão superficial do fenômeno observado. No entanto, uma proporção significativa de respostas foi classificada como incorreta, destacando uma lacuna no entendimento conceitual dos alunos.

Aluno 1: "A eletricidade gerada no cano de PVC por ter sofrido atrito com um papel toalha, gerou uma eletricidade que atraiu o papel alumínio".

Aluno 2: "está sendo atraído pelo cano, que foi eletrizado com o papel".

A maioria dos alunos identificou corretamente que o cano de PVC atrai o papel alumínio devido à eletrização por atrito, que gera cargas elétricas. A resposta ideal deveria mencionar a transferência de elétrons durante o atrito entre o PVC e o papel toalha, resultando em um cano carregado negativamente. Isso causa, por indução, a redistribuição das cargas no papel alumínio, criando uma atração eletrostática.

Embora muitos estudantes tenham percebido corretamente a eletrização do cano de PVC por atrito com o papel toalha e a subsequente atração eletrostática, algumas respostas mencionaram incorretamente conceitos como "campo eletromagnético" ou "energia". Essas respostas podem confundir o entendimento correto do fenômeno eletrostático.

Aluno 3: "Ele está sendo influenciado pelo campo eletromagnético que está ilhe atraindo".

Aluno 8: "o cano está carregado de energia, isso é o que está influenciando esse caso".

Os resultados da análise indicam que, apesar de uma compreensão geral sobre o processo de eletrização por atrito, há uma necessidade de reforçar conceitos específicos para evitar confusões com outros fenômenos elétricos.

A questão 02 aborda as expectativas em relação ao comportamento de um pequeno objeto de plástico isolante quando aproximado de um pedaço de cano de PVC, em substituição ao círculo de papel alumínio, no experimento.

Os resultados revelam uma grande proporção de respostas classificadas como incorretas em ambas as respostas dadas pelos alunos, indicando uma compreensão inadequada ou ausente dos princípios físicos relacionados ao fenômeno. Esses dados destacam uma lacuna significativa no entendimento dos alunos sobre os conceitos relacionados à eletrostática.

A maioria dos alunos descreveu que um objeto de plástico isolante não seria atraído pelo cano de PVC eletrizado, explicando que isso ocorre porque materiais isolantes não permitem a livre movimentação de cargas e, portanto, não sofrem eletrização por indução.

Aluno 4: "Por ser isolantes não permitiram a circulação dessas cargas, então não iria acontecer nada".

Aluno 6: "Não aconteceria nada, pois, o plástico isolante não seria repellido nem atraído pelo cano".

As poucas respostas que estão corretas, também, não apresentam uma explicação completa sobre o que, de fato, ocorre com esse fenômeno.

Aluno 2: "que aconteça o mesmo, pois o plástico isolante pode ser atraído pelo

pedaço de cano”.

Aluno 5: “O objeto de plástico isolante da mesma forma será atraído, se houver o contato entre o pedaço de cano de pvc, pois havendo o atrito entre o pedaço de pvc e o papel”.

Aluno 11: “Muito provavelmente aconteceria a mesma situação do papel alumínio”.

A terceira questão focaliza a descrição das forças envolvidas quando um círculo de papel alumínio é atraído por um pedaço de cano de PVC, buscando compreender como os alunos percebem e relacionam essas forças.

Os resultados revelam que nenhuma resposta foi classificada como totalmente correta em ambos os momentos em que os alunos responderam à questão. A maioria dos alunos ofereceu respostas parcialmente corretas, indicando um entendimento limitado ou impreciso das forças envolvidas no fenômeno. Além disso, uma porcentagem significativa de respostas foi considerada incorreta, evidenciando uma falta de compreensão dos princípios físicos relacionados.

Os alunos identificaram corretamente a presença de forças de atração eletrostática. No entanto, houve confusão em alguns termos e conceitos, como forças positivas e negativas, ou a menção de forças irrelevantes ao contexto. A resposta ideal deveria focar nas forças de interação eletrostática entre cargas opostas, ressaltando que o cano de PVC fica carregado negativamente após a eletrização por atrito e atrai cargas opostas no papel alumínio.

Aluno 2: “força de interação elétrica, força de atração”.

Aluno 3: “as forças eletromagnéticas que um atrai o outro”.

Aluno 4: “Força de atrito, atração”.

Aluno 19: “Estão em jogo as forças de interação eletrostática de atração entre o cano PVC e o papel alumínio, e a força peso do papel alumínio”.

Os resultados indicam que, apesar de uma compreensão geral sobre as forças de atração eletrostática, há uma necessidade de reforçar conceitos específicos para evitar confusões com outros fenômenos físicos. É essencial que os alunos entendam claramente as interações entre cargas elétricas e distingam essas forças de outras interações subatômicas para aprimorar seu entendimento dos princípios físicos envolvidos.

A questão 04 visa investigar a compreensão dos alunos sobre como mudanças na carga do círculo de papel alumínio afetariam a interação com o pedaço de cano de PVC, com base nos resultados observados no experimento.

A maioria dos alunos ofereceu respostas parcialmente corretas ou incorretas no pri-

meiro momento. No segundo momento, observou-se um aumento no número de respostas parcialmente corretas e uma diminuição nas respostas incorretas, além de um aumento no número de respostas corretas. Os alunos demonstraram entender que a alteração da carga do círculo de papel alumínio afetaria a interação com o cano de PVC. Eles reconheceram que aumentar ou diminuir a carga influenciaria a força de atração ou repulsão. No entanto, muitas respostas careciam de detalhes específicos, mostrando uma compreensão superficial do fenômeno.

Aluno 16: “A força de atração seria menor ou maior dependendo das medidas de ambos”.

Aluno 17: “a atração seria maior ou menor dependendo das duas situações”.

Aluno 19: “Isso alteraria a força eletrostática, podendo até torná-la uma força de repulsão”.

Aluno 23: “Se a carga tiver o mesmo sinal o papel irá se afastar do cano PVC, se a carga ter o sinal diferente, ele irá se atrair "mais rápido”.

A resposta ideal deve explicar como o aumento ou a diminuição da carga influenciaria a força de atração ou repulsão entre o círculo de papel alumínio e o cano de PVC. As respostas indicam que, embora os estudantes tenham uma compreensão básica de que a quantidade de carga no círculo de papel alumínio afeta a interação com o cano de PVC, há confusão sobre como essas mudanças influenciam especificamente a interação. Isso sugere a necessidade de maior clareza sobre as leis de Coulomb e a interação de cargas.

Os resultados indicam um progresso na compreensão dos alunos, com um aumento nas respostas parcialmente corretas e corretas ao longo do tempo. No entanto, ainda existe uma necessidade de reforçar o entendimento específico das leis de Coulomb para que os alunos possam aplicar corretamente esses conceitos às interações eletrostáticas. É crucial que os alunos desenvolvam uma compreensão clara de como as mudanças na carga afetam a força de atração ou repulsão entre os objetos carregados.

A questão 05 visa investigar a compreensão dos alunos sobre como a distância entre o círculo de papel alumínio e o pedaço de cano de PVC pode afetar a intensidade da interação eletrostática observada durante o experimento.

Os dados mostram que uma parte significativa dos alunos ofereceu respostas parcialmente corretas, indicando uma compreensão geral do conceito, embora com algumas imprecisões. Uma porção menor forneceu respostas totalmente corretas, sugerindo um entendimento mais preciso e profundo. No entanto, ainda houve uma parcela considerável de respostas incorretas em ambas as opções, destacando áreas em que a compreensão dos

alunos pode ser aprimorada. Apesar disso, houve uma redução significativa no percentual de respostas erradas ao comparar as primeiras respostas com as últimas.

Aluno 7: “A distância e a força elétrica são grandezas inversamente proporcionais, ou seja, quanto maior a distância menor é a força, e vice-versa”.

Aluno 15: “Quanto mais perto o cano do papel maior a atração, quando mais longe menor”.

Aluno 19: “A força eletrostática é inversamente proporcional ao quadrado da distância”.

Os alunos geralmente entenderam que a distância afeta a intensidade da interação eletrostática, mas muitas respostas careciam de precisão científica. A resposta ideal deve mencionar a lei de Coulomb, que descreve a força entre duas cargas elétricas, e explicar a relação inversa entre a força eletrostática e o quadrado da distância entre as cargas. Os resultados indicam progresso na compreensão dos alunos, com uma redução significativa nas respostas incorretas ao longo do tempo. No entanto, para alcançar uma compreensão mais precisa, é necessário enfatizar a importância da lei de Coulomb e a relação matemática entre a força eletrostática e a distância.

## Capítulo 6

# CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente dissertação teve como objetivo primordial o desenvolvimento e a avaliação de um aplicativo educacional destinado ao ensino de eletrostática, intitulado "Eletrostática no Cotidiano", além de examinar seu impacto na aprendizagem dos estudantes. Ao longo do estudo, abordamos diversos aspectos relacionados ao processo de criação do aplicativo, sua implementação em ambiente educacional e a avaliação dos resultados por meio de pesquisa de campo.

No início do trabalho, delineamos a motivação e o contexto que impulsionaram a concepção desse projeto. Destacamos a crescente presença da tecnologia na educação e a necessidade de ferramentas inovadoras para o ensino de ciências físicas, como a eletrostática. Além disso, discutimos a importância das tecnologias móveis para oferecer uma experiência de aprendizado mais interativa e acessível aos alunos.

Ao longo da dissertação, detalhamos minuciosamente o processo de desenvolvimento do aplicativo, desde a definição dos requisitos até a implementação das funcionalidades e a criação do conteúdo educacional. O aplicativo foi concebido de maneira intuitiva e fácil de usar, com o objetivo de atender às necessidades dos estudantes e proporcionar uma experiência de aprendizado envolvente. Recursos como conteúdo teórico claro e conciso, simulações interativas, exercícios de fixação e feedback personalizado foram incorporados para enriquecer a experiência de aprendizado dos usuários.

Após a conclusão do desenvolvimento, conduzimos uma pesquisa de campo em três turmas do terceiro ano do ensino médio, totalizando 64 participantes. Através de questionários eletrônicos, coletamos dados sobre a percepção dos alunos em relação ao uso do aplicativo e sua contribuição para a aprendizagem. Os resultados foram analisados detalhadamente, evidenciando uma variedade de percepções entre os usuários sobre o impacto

do aplicativo, incluindo a atratividade da interface e a eficácia das simulações.

Embora a maioria dos participantes tenha relatado uma experiência positiva com o aplicativo, identificamos áreas que requerem atenção e melhorias, como a compatibilidade com dispositivos iOS e a ocorrência de travamentos. Além disso, categorizamos as respostas dos alunos em cinco grupos distintos, proporcionando insights valiosos sobre as preferências e experiências dos usuários, orientando potenciais aprimoramentos futuros.

Em suma, os resultados desta pesquisa confirmam a importância do desenvolvimento e uso de tecnologias educacionais inovadoras para enriquecer o ensino de física. O aplicativo "Eletrostática no Cotidiano" demonstrou potencial para aprofundar o conhecimento dos alunos em eletrostática e contribuir para o avanço da educação científica. No entanto, é crucial continuar avaliando e aprimorando o aplicativo com base no feedback dos usuários, garantindo sua eficácia e relevância contínuas no suporte à aprendizagem.

A análise qualitativa dos dados coletados revelou uma série de insights valiosos sobre a compreensão dos alunos do experimento do Pêndulo Eletrostático. Através da análise das respostas dos alunos, foi possível identificar tanto os pontos fortes quanto as áreas que precisam de reforço em seu entendimento dos conceitos físicos envolvidos.

Os resultados indicam um progresso na compreensão dos alunos, com uma redução significativa nas respostas incorretas ao longo do tempo. A análise também destacou a importância de considerar as nuances contidas nas respostas dos alunos, que não seriam capturadas por uma análise puramente quantitativa. Esses insights são valiosos para o desenvolvimento de futuras intervenções pedagógicas e materiais educacionais, com o objetivo de reforçar a compreensão dos alunos sobre os conceitos físicos fundamentais e melhorar sua capacidade de observar, descrever e explicar fenômenos físicos de maneira precisa e detalhada. Através de uma abordagem pedagógica cuidadosa é possível ajudar os alunos a superar suas dificuldades e aprimorar seu entendimento dos princípios físicos envolvidos em experimentos como o do Pêndulo Eletrostático, abordado neste trabalho.

Olhando para o futuro, vislumbram-se uma ampla gama de oportunidades para pesquisas adicionais e melhorias no aplicativo "Eletrostática no Cotidiano". Para começar, recomenda-se a realização de estudos longitudinais mais abrangentes e de longo prazo, visando avaliar não apenas o impacto imediato, mas também a evolução da aprendizagem dos alunos ao longo do tempo. Esses estudos poderiam incluir acompanhamento dos estudantes ao longo de vários anos letivos, permitindo uma compreensão mais profunda dos efeitos do uso contínuo do aplicativo em seu desempenho acadêmico e no desenvolvimento de habilidades conceituais.

Além disso, é essencial investigar e desenvolver estratégias mais eficazes de integração do aplicativo com o currículo escolar existente. Isso poderia envolver a criação de planos de aula específicos que incorporem o uso do aplicativo de maneira sinérgica com outras atividades educacionais, garantindo uma abordagem integrada e complementar ao ensino de eletrostática. Da mesma forma, seria valioso explorar parcerias com instituições educacionais para promover a adoção mais ampla do aplicativo e fornecer suporte adicional aos educadores na sua implementação em sala de aula.

Outras possibilidades de pesquisa incluem a adaptação do aplicativo para diferentes contextos educacionais, levando em consideração as particularidades de cada ambiente de ensino. Isso poderia envolver a personalização do conteúdo e das atividades do aplicativo para atender às necessidades específicas de diferentes currículos escolares, faixas etárias ou níveis de proficiência dos alunos. Além disso, seria interessante explorar a eficácia do aplicativo em grupos demograficamente diversos, considerando variáveis como gênero, etnia, nível socioeconômico e localização geográfica, a fim de garantir sua relevância e acessibilidade para todos os estudantes.

Por fim, a exploração de tecnologias emergentes, como realidade aumentada e inteligência artificial, oferece oportunidades emocionantes para aprimorar ainda mais a experiência de aprendizado proporcionada pelo aplicativo. A integração de recursos de realidade aumentada poderia permitir aos alunos visualizar conceitos abstratos de eletrostática de forma mais tangível e imersiva, enquanto a implementação de técnicas de inteligência artificial poderia personalizar o conteúdo e o feedback do aplicativo com base no progresso e nas necessidades individuais de cada aluno.

# Bibliografia

- BARROSO, R. R.; OLIVEIRA, A. L. d.; JESUS, V. L. d. Simulação da detecção de exoplanetas pelo método do trânsito utilizando o pêndulo cônico e o smartphone. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, SciELO Brasil, v. 42, p. e20200161, 2020.
- BORDIN, G. D.; FRANÇA, I. H.; BEZERRA, A. G. Desenvolvimento e utilização de um aplicativo móvel brasileiro para videoanálise: "videoanalizando". *Revista Brasileira de Ensino de Física*, SciELO Brasil, v. 44, p. e20220058, 2022.
- DELIZOICOV, D.; ANGOTTI, J. *Metodologia do ensino de ciências*. São Paulo, Brasil: Cortez, 1990.
- DELIZOICOV, D.; ANGOTTI, J. A. *Física*. 2. ed. São Paulo, Brasil: Cortez, 2003.
- DELIZOICOV, D.; ANGOTTI, J. A. P.; PERNAMBUCO, M. M. *Ensino de Ciências: fundamentos e métodos*. 1. ed. São Paulo, Brasil: Cortez, 2003.
- DENZIN, N. K.; LINCOLN, Y. S.; NETZ, S. R. *Planejamento da pesquisa qualitativa*. Porto Alegre: Artmed, 2006.
- FERNANDES, A. et al. Efeito doppler com tablet e smartphone. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, Sociedade Brasileira de Física, v. 38, n. 3, p. e3504, 2016. ISSN 1806-1117. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2016-0006>>.
- FERREIRA, G. C.; ALMEIDA, G. F. B. Medida da velocidade do som através da análise dos modos acústicos ressonantes utilizando um celular. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, SciELO Brasil, v. 44, p. e20220207, 2022.
- FERREIRA, M. et al. Unidade de ensino potencialmente significativa sobre óptica geométrica apoiada por vídeos, aplicativos e jogos para smartphones. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, SciELO Brasil, v. 42, p. e20200057, 2020.
- FEYNMAN, R.; LEIGHTON, R.; SANDS, M. *Lições de Física - 3 Volumes - 2.ed.: A Edição do Novo Milênio*. Bookman Editora, 2019. ISBN 9788582605011. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=FCmPDwAAQBAJ>>.
- FRANCO, R. d. S.; MARRANGHELLO, G. F.; ROCHA, F. S. d. Medindo a aceleração de um elevador. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, SciELO Brasil, v. 38, n. 1, p. 1308, 2016.
- FREIRE, P. *Pedagogia do oprimido*. 18. ed. São Paulo, Brasil: Paz e Terra, 1988.
- GRIFFITHS, D. J. *Eletrodinâmica*. 3rd. ed. São Paulo, Brasil: Pearson Education, 2011. 424 p.
- GUEDES, A. G. Estudo de ondas estacionárias em uma corda com a utilização de um aplicativo gratuito para smartphones. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, SciELO Brasil, v. 37, p. 2502–1, 2015.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R. *Fundamentos de física: eletromagnetismo*. 8. ed. Rio de Janeiro, Brasil: LTC, 2009. v. 03.

JESUS, V. d.; SASAKI, D. Uma visão diferenciada sobre o ensino de forças impulsivas usando um <i>smartphone</i>. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, Sociedade Brasileira de Física, v. 38, n. 1, p. 1303, 2016. ISSN 1806-1117. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S1806-11173812075>>.

JESUS, V. d.; SASAKI, D. G. G. Uma abordagem por videoanálise da propagação de um pulso em uma catenária. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, SciELO Brasil, v. 38, n. 3, p. e3301, 2016.

KIELT, E. D.; SILVA, S. d. C. R. d.; MIQUELIN, A. F. Implementação de um aplicativo para smartphones como sistema de votação em aulas de física com peer instruction. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, SciELO Brasil, v. 39, p. e4405, 2017.

MALHOTRA, N. K. *Pesquisa de marketing: uma orientação aplicada*. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2012.

MARTINS, T. C. Desenvolvimento de um aplicativo android para a análise do circuito de chua-matsumoto. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, SciELO Brasil, v. 38, p. 1302, 2016.

MICROSOFT. *Microsoft Forms*. 2023. <<https://forms.microsoft.com>>. Acessado em 26 de Junho de 2023.

MOREIRA, M. A. Uma análise crítica do ensino de física. *Estudos avançados*, v. 32, p. 73–80, 2018.

MUENCHEN, C.; DELIZOICOV, D. Os três momentos pedagógicos e o contexto de produção do livro "física". *Ciênc. educ. (Bauru)*, v. 20, n. 3, p. 617–638, Setembro 2014. ISSN 1980-850X.

NUSSENZVEIG, H. M. *Curso de Física Básica 3: Eletromagnetismo*. 5th. ed. [S.l.]: Editora Edgard Blucher, 2013.

ORENGO, G.; SCHÄFFER, D. Os dados nucleares da agência internacional de energia atômica (iaea) como aporte científico no ensino de física nuclear. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, SciELO Brasil, v. 42, p. e20190174, 2019.

PEREIRA, E. Experiência de baixo custo para determinar a forma da superfície de um líquido em rotação usando o smartphone. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, SciELO Brasil, v. 43, p. e20210168, 2021.

ROSA, C. W.; ROSA, A. B. Ensino de física: objetivos e imposições no ensino médio. *Revista Eletrônica de Enseñanza de las ciencias*, v. 4, n. 1, 2005.

ROSSINI, M. R. et al. Análise gravimétrica por meio de smartphones e aprimoramentos nas equações do experimento do pêndulo simples como subterfúgio para o ensino de física clássica. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, SciELO Brasil, v. 46, p. e20230327, 2024.

ROSSINI, M. R. et al. Determinação da velocidade das ondas extensionais em hastes metálicas delgadas. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, SciELO Brasil, v. 44, p. e20220076, 2022.

- ROSSINI, M. R. et al. Determinação do módulo de elasticidade de young por meio de um smartphone. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, SciELO Brasil, v. 43, p. e20210194, 2021.
- SAMPIERI, R. H.; COLLADO, C. F.; LUCIO, P. B. *Metodologia de pesquisa*. 5. ed. Porto Alegre: Penso, 2013.
- SANTOS, M. F. da S.; LAIA, A. S. Abordagem quantitativa da polarização da luz: Explorando a lei de malus com o aplicativo phyphox. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, SciELO Brasil, v. 45, p. e20220320, 2023.
- SILVA, I. M. d.; CAVALCANTE, M. A.; FROTA, V. B. d. Desenvolvimento de um experimento controlado remotamente e um simulador tridimensional para demonstrar a lei do inverso do quadrado. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, SciELO Brasil, v. 44, 2022.
- SOGA, D.; UENO-GUIMARÃES, M. H.; MURAMATSU, M. Um estudo experimental sobre a luz negra com smartphone. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, SciELO Brasil, v. 42, p. e20190107, 2020.
- SOUZA, M. P. M. d.; OLIVEIRA, S. P.; LUIZ, V. L. Motor elétrico – simufísica<sup>®</sup>: um aplicativo para o ensino de eletromagnetismo. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, Sociedade Brasileira de Física, v. 46, p. e20230219, 2024. ISSN 1806-1117. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2023-0219>>.
- THIEGHI, L. T. Utilização do aplicativo “waze” no cálculo de distância através da integral definida. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, SciELO Brasil, v. 43, p. e20210020, 2021.
- TIPLER, P. A.; MOSCA, G. *Física para Cientistas e Engenheiros Vol.2 - Eletricidade e Magnetismo, Óptica: Volume 2*. Rio de Janeiro, Brasil: LTC, 2009. ISBN 9788521617112.
- YOUNG, H. D.; FREEDMAN, R. A. *Física de Sears & Zemansky: Volume III: Eletromagnetismo: Volume 3*. São Paulo, Brasil: Pearson, 2008.