

ABORDAGEM AUSUBELIANA PARA O ENSINO DE ELETRICIDADE, USANDO A
VERSÃO PARA CARTAS DO JOGO *EM BUSCA DO PRÊMIO NOBEL* *

Francisco Napoleão Freire Netto

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal Rural do Semiárido, no Mestrado Profissional em Ensino de Física (MNPEF), polo 9, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Orientador

Prof. Dr. Geovani Ferreira Barbosa

Co-Orientador

Prof. Dr. Carlos Alberto dos Santos

Mossoró

2025

* Trabalho parcialmente financiado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES). Código de financiamento 001.

FRANCISCO NAPOLEÃO FREIRE NETTO

**ABORDAGEM AUSUBELIANA PARA O ENSINO DE ELETRICIDADE,
USANDO A VERSÃO PARA CARTAS DO JOGO EM BUSCA DO PRÊMIO
NOBEL**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal Rural do Semi-Árido, no Mestrado Profissional em Ensino de Física (MNPEF), polo 9, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Orientador:

Prof. Dr. Geovani Ferreira Barbosa

Co-Orientador:

Prof. Dr. Carlos Alberto dos Santos

MOSSORÓ

2025

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata.

A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

Dados Internacionais de Catalogação na publicação (CIP)

Biblioteca Central da Universidade Federal Rural do Semiárido, RN, Brasil.

Código Freire Netto, Francisco Napoleão

bibliog. Abordagem ausubeliana para o ensino de eletricidade, usando a versão para cartas do jogo Em Busca do Prêmio Nobel / Francisco Napoleão Freire Netto; orientador Geovani Ferreira Barbosa; co-orientador Carlos Alberto dos Santos. -- Mossoró, 2025.
230 p.

Dissertação (Mestrado – Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física) – Universidade Federal Rural do Semiárido, 2025.

1. Ensino de Física. 2. Eletricidade. 3. Teoria de Ausubel. 4. Jogo educacional. I. Barbosa, Geovani Ferreira, orientador II. Santos, Carlos Alberto dos, co-orientador. III. Título.

FRANCISCO NAPOLEÃO FREIRE NETTO

**ABORDAGEM AUSUBELIANA PARA O ENSINO DE ELETRICIDADE,
USANDO A VERSÃO PARA CARTAS DO JOGO EM BUSCA DO PRÊMIO
NOBEL**

Dissertação de Mestrado apresentada ao
Programa de Pós-Graduação da Universidade
Federal Rural do Semi-Árido, no Mestrado
Profissional em Ensino de Física (MNPEF),
polo 9, como parte dos requisitos necessários à
obtenção do título de Mestre em Ensino de
Física.

Defendida em: 28 / 03 / 2025.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Geovani Ferreira Barbosa (UFERSA)
Presidente

Prof. Dr. Taciano Amaral Sorrentino (UFERSA)
Membro Examinador

Prof. Dr. Ciclamio Leite Barreto (UFRN)
Membro Examinador

MOSSORÓ

2025

IN MEMORIAM

Quero dedicar esta dissertação a meu avô Francisco Napoleão Freire e a minha avó Filomena Geralda dos Santos Mesquita e ao meu tio Rodolfo Magno Freire e a minha grande amiga Evangelina Andrade de Sousa que estão em outro plano, mas que com toda certeza estariam felizes com essa conquista que também é deles.

AGRADECIMENTOS

Quero neste pequeno espaço manifestar de forma grandiosa ao carinho ao tempo e ao esforço e dedicação dispensada a mim para aquelas pessoas que de uma forma ou de outra se dedicaram se doaram em prol dessa conquista; por este motivo quero agradecer primeiramente a minha família que soube compreender a importância de alguns momentos de reclusa; agradecer a CAPES, ao Programa de Pós-Graduação MNPEF, UFRSA, pela acolhida. Agradecer aos colegas do carro. E, para não fazer desfeita citarei nominalmente cada um: Hamilton; Andreazio; Felipe; não posso esquecer e agradecer, também, aos meus amigos Ronaldo; Laerte; Maxuel pessoas que contribuíram de forma direta com o desenvolvimento do trabalho. Agradecer de forma muito respeitosa a Hyago, Francisco Carlos que contribui com algumas ideias e incentivaram essa empreitada. Agradecer de forma Especial a todos docentes da UFRSA na pessoa do meu orientador Prof. Dr. Geovane Ferreira Barbosa e ao meu coorientador Prof. Dr Carlos Alberto dos Santos. A todas essas pessoas quero desejar meus mais sinceros votos de gratidão, estima e de reconhecimento no mesmo momento em que peço excusas por uma, outra desavença. Deixando aqui meu abraço e tendo a certeza de que poderei contar com cada um desses citados em um futuro próximo. MUITO OBRIGADO!!!

RESUMO

Nesta dissertação relata-se a adaptação e o uso da versão para cartas do jogo digital *Em busca do Prêmio Nobel*. Embora o jogo possa ser adaptado a diferentes referenciais pedagógicos, optamos por utilizar a teoria de aprendizagem significativa de Ausubel. Para essa abordagem, foi usado um texto complementar ao livro didático da escola, com organizadores prévios alinhados ao tema estudado. A validação do produto foi realizada por meio de um questionário de reação de acordo com o modelo Kirkpatrick. Nesta versão de cartas mantivemos a estrutura básica da versão digital, com as mesmas questões e regras semelhantes para o progresso no jogo. A principal diferença é que essa versão é jogada entre dois competidores ou duas equipes, promovendo uma dinâmica mais interativa e competitiva. A intervenção didática foi implementada em uma turma do noturno da Escola de Ensino Médio Tempo Integral Professor Antônio Martins Filho (EEMTI-PAMF). Como geralmente ocorre em turmas do noturno, essa turma é constituída de alunos na faixa etária que vai dos 17 aos 56 anos, com diferentes dificuldades para as atividades escolares usuais. Apesar disso, os resultados obtidos indicam que o material desenvolvido tem potencial para contribuir significativamente para a melhoria da aprendizagem, reforçando a eficácia da combinação entre tecnologia, ludicidade e teorias pedagógicas consolidadas.

Palavras-chave: Jogo de cartas; Eletricidade; Ausubel; Concepções alternativas.

ABSTRACT

This dissertation reports on the adaptation and use of the card version of the digital game *In Search of the Nobel Prize*. Although the game can be adapted to different pedagogical frameworks, we chose to use Ausubel's theory of meaningful learning. For this approach, we used a text complementary to the school's textbook, with previous organizers aligned with the studied theme. The product was validated through a reaction questionnaire according to the Kirkpatrick model. In this card version, we maintained the basic structure of the digital version, with the same questions and similar rules for progressing in the game. The main difference is that this version is played between two competitors or two teams, promoting a more interactive and competitive dynamic. The didactic intervention was implemented in a night class at the Escola de Ensino Médio Tempo Integral Professor Antônio Martins Filho (EEMTI-PAMF). As is usually the case in night classes, this class is made up of students aged between 17 and 56, with varying degrees of difficulty in performing normal school activities. Despite this, the results obtained indicate that the material developed has the potential to contribute significantly to improving learning, reinforcing the effectiveness of the combination of technology, playfulness and consolidated pedagogical theories.

Keywords: Card game; Electricity; Ausubel; Misconceptions.

LISTA DE FIGURAS

Figura 4.1 – Ilustração de cartas nas categorias (a) graduação (resposta: d); (b) mestrado (resposta: a); (c) doutorado (resposta: b); (d) pesquisador (resposta: a).	20
Figura 4.2 – Disposição das cartas na mesa. Abaixo das cartas de perguntas são colocadas as cartas com as respostas.	21
Figura 4.3 – Mapa conceitual para eletricidade no ensino médio. Conceitos em retângulos escuros pertencem à eletrostática, enquanto aqueles em retângulos claros pertencem à eletrodinâmica.	24
Figura 4.4 – Amostra de sangue vista em microscópio eletrônico de varredura, com aumento de 2.858 vezes. Disponível em https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Blood_clot_in_scanning_electron_microscopy.jpg . Acesso em 1/1/2025.	25
Figura 4.5 – a) – Bloco de espuma de alumínio. Disponível em https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Aluminium_foam.jpg . Acesso em 1/1/2025. (b) – Parte de um bloco de espuma de alumínio visto com um microscópio eletrônico, com ampliação de 10 vezes. Disponível em https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Image-Metal_Foam_in_Scanning_Electron_Microscope,_magnification_10x_b.GIF . Acesso em 1/1/2025.	26
Figura 4.6 – (a) estrutura do quartzo (SiO_2); (b) distribuição dos elétrons em torno do núcleo, em condições normais; (c) distribuição dos elétrons após aplicação de um campo elétrico no sentido indicado; (d) desenho esquemático de um material dielétrico polarizado.	29
Figura 4.7 – Modelo da estrutura eletrônica de um metal, com um mar, ou um gás de elétrons em volta dos íons positivos.	30
Figura 4.8 – Ilustração do processo de transferências de elétrons entre dois condutores em contato.	31
Figura 4.9 – Ilustração do processo de eletrização por indução em condutores.	33
Figura 4.10 – Campo variável em um capacitor sendo carregado por uma corrente i .	35
Figura 4.11 – Linhas de campo de uma carga positiva (apontam para fora) e de uma carga negativa (apontam para dentro).	36
Figura 4.12 – Linhas de campo elétrico de duas esferas metálicas carregadas. (https://commons.wikimedia.org/wiki/File:VFpt_metal_balls_large_small.svg).	36
Figura 4.13 – Linhas de campo elétrico de duas esferas metálicas carregadas. (https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Electric-field-lines.svg).	37
Figura 4.14 – Ilustração esquemática para o cálculo do potencial de uma carga puntiforme.	39
Figura 4.15 – Diferença de potencial devido a um dipolo elétrico em dois pontos.	40
Figura 4.16 – Desenho esquemático de um capacitor.	41
Figura 4.17 – O trabalho realizado pela força F para levar um objeto do ponto i até o ponto f independe do caminho utilizado.	44
Figura 4.18 – Linha do tempo dos principais eventos da eletricidade.	46

Figura 4.19 – Tabela periódica. Os metais estão marcados em azul. (https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Simple_Periodic_Table_Chart-blocks.svg). Acessado em 1/1/2025.	47
Figura 4.20 – Representação esquemática do espalhamento eletrônico no modelo de Drude.	49
Figura 4.21 – Desenho típico encontrado em livros didáticos para ilustrar a corrente elétrica através de um resistor de comprimento L , alimentado por uma bateria com voltagem V .	50
Figura 4.22 – Ilustração do movimento de elétrons no interior de um bom condutor (desenho superior) e no interior de um mau condutor (desenho inferior).	51
Figura 4.23 – Ilustração de uma célula unitária cúbica (A) e de uma hexagonal de corpo centrado (B).	52
Figura 4.24 – (a) circuito com resistências em série; (b) circuito em com resistências em paralelo.	56
Figura 4.25 – (a) circuito simples, uma bateria e três resistências. e é o símbolo geralmente usado para representar a força eletromotriz, fem.	58
Figura 4.26 – Circuito para ilustrar o uso das leis de Kirchhoff.	60
Figura 4.27 – Modelo ilustrativo para discutir a necessidade de gradiente na distribuição de cargas superficiais em circuitos elétricos. Fonte: (LIMA, 2018).	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 - Textos selecionados para a elaboração desta seção.	24
Tabela 5.1 - Resultados do teste de satisfação. Modelo Kirkpatrick com escala Lickert de 5 pontos.	52

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 2 – OBJETIVOS E JUSTIFICATIVAS	4
2.1 – POR QUE USAR O JOGO DE CARTAS?	4
2.2 – POR QUE USAR A TEORIA DA APRENDIZAGEM SIGNIFICATIVA DE AUSUBEL?	5
2.3 – POR QUE USAR O TESTE DE SATISFAÇÃO?	5
CAPÍTULO 3 – REFERENCIAIS TEÓRICOS	6
3.1 – TEORIA DA APRENDIZAGEM SIGNIFICATIVA DE AUSUBEL	6
3.1.1 – Diferença entre aprendizado mecânico e por recepção significativa	6
3.1.2 – O processo de subsunção no aprendizado e no esquecimento	7
3.1.3 – Princípio da diferenciação progressiva	9
3.1.4 - Princípio da reconciliação integrativa	10
3.1.5 - Organizadores prévios	10
3.2 – CONCEPÇÕES ALTERNATIVAS	11
3.2.1 - Cargas elétricas e partículas subatômicas	12
3.2.2 - Circuitos elétricos simples	13
3.2.3 - Outras considerações sobre concepções alternativas	14
3.3 – JOGOS DE CARTAS	15
3.3.1 – Jogos de cartas no ensino	16
3.3.2 – Projetos de jogos de cartas	17
CAPÍTULO 4 – MATERIAIS E MÉTODOS	19
4.1 – JOGO “EM BUSCA DO PRÊMIO NOBEL” (EBPN), VERSÃO CARTAS	19
4.2 – CONCEITOS DE ELETROSTÁTICA E ELETRODINÂMICA NO CENÁRIO DE CONCEPÇÕES ALTERNATIVAS	22
4.2.1 - Carga, Campo, Força, Potencial e Energia	23
4.2.1.1 Carga elétrica	27

4.2.1.2 Processos de eletrização por atrito ou por contato	30
4.2.1.3 Processos de eletrização por indução em condutores	32
4.2.1.4 Campo elétrico e força elétrica	33
4.2.1.5 Potencial elétrico	38
4.2.1.6 Trabalho e energia	42
4.2.2 – Eletrodinâmica no Cenário de Concepções Alternativas	46
CAPÍTULO 5 – RESULTADOS E DISCUSSÕES	64
CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES E COMENTÁRIOS FINAIS	70
REFERÊNCIAS	73
APÊNDICE – Produto educacional: Versão para cartas do jogo “em busca do prêmio nobel” (EBPN)	76

1 INTRODUÇÃO

A presente dissertação faz parte de um projeto mais amplo, coordenado pelo prof. Carlos Alberto dos Santos no âmbito do MNPEF-UFERSA, cujo objetivo é investigar o uso do jogo *Em Busca do Prêmio Nobel* (EBPN) em diferentes cenários pedagógicos e socioeconômicos. Como será visto mais adiante, EBPN é um jogo multiplataforma e multitemático. Ou seja, com a mesma estrutura básica ele pode ser usado em ambiente digital, com cartas e com tabuleiro. Também com a mesma estrutura básica ele pode ser usado em diferentes áreas de ensino, assim como com diferentes referenciais pedagógicos. Sua primeira aplicação foi no formato digital, para o ensino de atomística em uma escola pública de Fortaleza, com Indicador de Nível Socioeconômico (INSE) médio-baixo (DE AQUINO, E. M. et al., 2023; DINIZ, 2018, 2018; DINIZ; DOS SANTOS, 2019).

No momento, uma versão digital para o ensino de ondulatória está sendo usada na Escola Instituto São José, uma instituição privada, localizada em Aracati (CE). É objeto de dissertação de José Vânio Paula Silva, sob orientação da professora Erlânia Lima de Oliveira.

Para o ensino de eletricidade, o jogo está sendo aplicado em seis ambientes diferentes, nos formatos digital, tabuleiro e cartas. No formato digital e cartas em duas turmas (Técnico em Segurança do Trabalho e Novo Ensino Médio Potiguar) da Escola Estadual Teônia Amaral (Florânia, RN), objeto da dissertação de Eliabe Maxsuel de Aquino. No formato tabuleiro em uma turma no Centro Educacional Paideia e duas turmas no Centro Educacional de Aprendizagem Moderna, ambas em Mossoró (RN), objeto da dissertação de Ellen Mileide Amorim Costa. Essas quatro turmas são compostas de alunos adolescentes que frequentam turnos diurnos. Na presente dissertação relata-se a aplicação do jogo no formato cartas em uma turma do noturno da Escola de Ensino Médio Tempo Integral Professor Antônio Martins Filho (EEMTI-PAMF). Do ponto de vista socioeconômico essa turma é bastante diferente das outras cinco. Como geralmente ocorre em turmas do noturno, ela é constituída de alunos na faixa etária que vai dos 17 aos 56 anos, com diferentes dificuldades para as atividades escolares usuais.

Excetuando a primeira aplicação, relatada na dissertação de Farnésio Vieira da Silva Diniz (DINIZ, 2018), todas as outras usaram como referencial pedagógico a teoria de aprendizagem significativa de David Ausubel (AUSUBEL, 1962), no contexto discutido na

disciplina Fundamentos Teóricos de Ensino e Aprendizagem, ministrada pelo prof. C.A. dos Santos, no MNPEF-UFERSA, em 2023 (DOS SANTOS, C. A., 2024). A revisão bibliográfica apresentada nesta dissertação foi discutida ao longo da disciplina, e constou de um trabalho de avaliação. Portanto, a menos do estilo de redação, o conteúdo aqui apresentado sobre a teoria de Ausubel deve ser similar àquele apresentado por E. M. de Aquino e E. M. A. Costa.

A aplicação da teoria de Ausubel é conduzida pelo uso de um texto especificamente elaborado para o ensino de eletricidade, com ênfase em organizadores prévios e nas ideias de diferenciação progressiva e reconciliação integrativa (AUSUBEL, 1960; DOS SANTOS, 1978; MOREIRA, M. A., 1977). Para que todas as aplicações do projeto supracitado tenham como elemento comparativo o mesmo texto ausubeliano, este foi elaborado pelo prof. C.A. dos Santos, que tem experiência de longa data nesse tipo de atividade (MOREIRA; DOS SANTOS, 1981). O texto ausubeliano é apresentado em anexo.

Os instrumentos de validação do jogo foram discutidos em reuniões de orientação dos mestrandos (E. M. de Aquino, E. M. A. Costa, e o autor da presente dissertação) com os professores C.A. dos Santos e G. F. Barbosa. Foram definidos três instrumentos de validação: Teste de Concepções Alternativas (TCA), Teste de Associação Numérica de Conceitos (TANC) e questionário de reação ao jogo. Os aspectos teóricos desses instrumentos são apresentados, juntamente com a teoria de Ausubel, no Capítulo 2 (Referenciais teóricos). No Capítulo 3 (Materiais e métodos) os instrumentos são apresentados como devem ser usados.

Tivemos dificuldade em aplicar o TCA e o TANC na EEMTI-PAMF, nos moldes recomendáveis para uso como testes de validação. Ou seja, a coleta de uma boa quantidade de alunos nos pré e pós-testes. Foram poucos os alunos que estiveram nas duas ocasiões, e aqueles que estiveram apresentaram respostas inconsistentes. Sendo assim, usamos apenas o questionário de reação como instrumento de validação do jogo, e fizemos entrevistas informais com alguns alunos. Os resultados obtidos são apresentados e discutidos no Capítulo 4 (Resultados e discussão), enquanto a conclusão da dissertação é apresentada no Capítulo 5.

O questionário de reação ao jogo, e as entrevistas informais indicaram uma recepção satisfatória por grande parte da turma. Alguns alunos mostraram interesse em jogar o EBPV novamente.

Para concluir esta introdução, não custa repetir: se cada uma dessas aplicações podem ser consideradas autônomas e assim devem ser analisadas, no âmbito do projeto supra referido as aplicações servirão como subsídios para uma análise sistemática do uso e validação do jogo, em diferentes ambientes socioeconômicos e com diferentes temáticas e referenciais pedagógico. Para cobrir toda a temática do ensino médio, é objetivo do grupo de pesquisa investir em aplicações em mecânica, termodinâmica e ótica.

2 OBJETIVOS E JUSTIFICATIVAS

Objetiva-se com esta dissertação relatar a adaptação para cartas e a aplicação em uma intervenção didática do jogo *Em Busca do Prêmio Nobel* (EBPN). O produto educacional (PE), intitulado *Versão para Cartas do Jogo “Em Busca do Prêmio Nobel”*, foi aplicado em uma turma do 3º. Ano do ensino médio, turno noturno, da Escola de Ensino Médio em Tempo Integral Professor Antônio Martins Filho (EMTI-PAMF), em Maracanaú, Ceará.

2.1 POR QUE USAR O JOGO DE CARTAS?

Além das recomendações reportadas na literatura (ver Capítulo 3), e do fato de que a elaboração de diferentes modalidades do EBPN atende ao objetivo de pesquisa mencionado na introdução, a disponibilização do jogo na versão cartas serve para atender situações nas quais a escola não possui estrutura computacional, e os alunos só dispõem de um celular para acessar a versão digital. Já se sabe, de testes anteriores, que o uso do jogo em celulares é desconfortável, uma vez que ele contém muitos textos.

SMITH e MUNRO (2009) e MOURSUND (2006) apresentam boas razões para o uso de jogos de cartas em processos educacionais. Esses autores destacam que os jogos contribuem para o desenvolvimento do raciocínio lógico, a resolução de problemas e a colaboração entre os estudantes, e podem servir como um elo entre teoria e prática, permitindo que os alunos explorem conteúdos complexos em um ambiente envolvente. Esse aspecto é especialmente eficaz no ensino de disciplinas como ciências e matemática, onde conceitos abstratos podem ser visualizados e aplicados por meio da dinâmica dos jogos. A interatividade e o caráter lúdico favorecem o interesse dos estudantes, criando um ambiente dinâmico e estimulante. SMITH e MUNRO (2009) relatam que a aplicação de jogos em escolas na Inglaterra apresentou resultados positivos no desempenho escolar.

Em um estudo conduzido por TzuFen Su e colaboradores na Universidade Nacional de Educação de Changua, Taiwan, foi mostrada a eficiência de um jogo de cartas para o ensino de imunologia humana. Noventa e nove estudantes do ensino médio participaram do estudo. Em geral eles se mostraram confiantes na aprendizagem com o jogo, e acharam o ensino com o jogo mais interessante do que o ensino com aulas tradicionais.

Esses resultados são ilustrativos daquilo que a literatura nos apresenta.

2.2 POR QUE USAR A TEORIA DA APRENDIZAGEM SIGNIFICATIVA DE AUSUBEL?

Na disciplina Fundamentos Teóricos em Ensino e Aprendizagem, ministrada em 2003 no MNPEF-UFERSA pelo prof. C. A. dos Santos (2024), comparamos propostas pedagógicas de cinco pensadores da educação: Ausubel, Bruner, Paulo Freire, Piaget e Vygotsky. Chegamos ao consenso quanto à relevância da teoria da aprendizagem significativa de Ausubel. Essa conclusão é compartilhada por inúmeros mestrados nos diversos polos do MNPEF.

No entanto, um breve exame da literatura a respeito do uso da teoria de Ausubel em diversas áreas da física nos mostrou que vários elementos da teoria deixaram de ser usados em muitas dissertações. Por exemplo, o uso dos organizadores prévios ainda não foi explorado no mesmo nível em que é explorado na literatura internacional (AUSUBEL, 1960; BARNES, B. R.; CLAWSON, E. U., 1975; SHIHUSA; KERARO, 2009). Também falta na literatura brasileira trabalhos que explorem o uso de textos ausubelianos, sobretudo nos quais são explorados não apenas a inserção de organizadores prévios, como também uma estrutura didática que contemple a diferenciação progressiva e a reconciliação integrativa, elementos fundamentais da teoria de Ausubel. O texto usado na presente intervenção didática objetiva atender esses requisitos.

2.3 POR QUE USAR O TESTE DE SATISFAÇÃO?

Quando se usa um procedimento educacional pela primeira vez, é necessário a utilização de um instrumento de validação. Existem muitas possibilidades de validação, sendo uma delas o método de Kirkpatrick (2006), muito referido na literatura. Entre os recursos descritos por Kirkpatrick encontram-se questionários de satisfação. Seguimos esse método para elaborar um questionário com uma escala Lickert de cinco pontos.

3 REFERENCIAIS TEÓRICOS

3.1 TEORIA DA APRENDIZAGEM SIGNIFICATIVA DE AUSUBEL

Nas pesquisas educacionais vem sendo demonstrado que um fator preponderante e que influencia a aprendizagem é a estrutura cognitiva do indivíduo, isto é, a organização hierárquica e clara do conhecimento previamente adquirido. Segundo AUSUBEL (1962), a aprendizagem significativa ocorre no momento em que novos conceitos ou conteúdos são relacionáveis de maneira lógica e não arbitrária com os conceitos que já existem na estrutura cognitiva do indivíduo. Essa relação que existe entre os novos conteúdos e os conceitos previamente estabelecidos é essencial para que haja retenção e compreensão duradoura.

AUSUBEL (1962) destaca que para que o processo de aprendizagem e a retenção sejam facilitadas, a estrutura cognitiva existente deve ser clara, estável e bem-organizada. Ou seja, quanto mais bem definidos e diferenciados forem os conceitos na estrutura cognitiva do aprendiz, maior será a sua capacidade de incorporar e reter novos conhecimentos. Para enriquecer e fortalecer essa relação, é necessário introduzir elementos que sirvam de ancoragem ideacional, conhecidos como organizadores prévios. Esses organizadores, descritos por AUSUBEL e FITZGERALD (1962) como conceitos gerais apresentados antes do conteúdo específico, têm a função de proporcionar uma base cognitiva adequada para o novo material. Além disso, a clareza e a estabilidade dos conceitos de subsunção, bem como a discriminação dos novos materiais em relação aos já existentes, são variáveis fundamentais que influenciam diretamente a eficiência do processo de aprendizagem.

Assim, para que o processo de aprendizagem seja efetivamente facilitado, é importante o fortalecimento dos aspectos mais relevantes da estrutura cognitiva, de modo que novos conteúdos sejam integrados de forma significativa. Tal abordagem não apenas promove a retenção a longo prazo, mas também melhora a aplicabilidade dos conhecimentos em contextos variados.

3.1.1 Diferença entre aprendizado mecânico e por recepção significativa

Para AUSUBEL e FITZGERALD (1962) e AUSUBEL (1963), na aprendizagem significativa, os materiais são relacionados a conceitos previamente estabelecidos na estrutura

cognitiva, permitindo a criação de várias conexões e relações significativas. Essa forma de aprendizagem promove maior compreensão e retenção a longo prazo, pois está ancorada em sistemas ideacionais organizados e hierárquicos. Um exemplo claro dessa abordagem pode ser observado na organização de currículos escolares, que são projetados para introduzir novos conceitos de maneira gradual e não traumática, respeitando a estrutura cognitiva existente dos alunos AUSUBEL, (1963).

Os materiais aprendidos mecanicamente são tratados como unidades discretas e isoladas, que se relacionam com a estrutura cognitiva de forma arbitrária. Essa organização limita a criação de relações mais amplas e torna esses materiais mais favoráveis ao esquecimento. Na aprendizagem mecânica, os conceitos memorizados não interagem com a estrutura cognitiva de maneira significativa, e isto dificulta na hora verificar sua aplicação em novos contextos pois verifica-se a redução de sua retenção a longo prazo.

Essa diferença entre as duas formas de aprendizagem mostra ligações importantes. A aprendizagem significativa é influenciada por características da estrutura cognitiva, como clareza, estabilidade e organização hierárquica, que fornecem uma base para a incorporação e retenção de novos conhecimentos AUSUBEL, (1963). Porém na aprendizagem mecânica verifica-se a dependência, principalmente de fatores externos, como repetição e associações arbitrárias, e está sujeita a interferências que podem comprometer sua eficácia AUSUBEL (1963).

Nesse sentido, a teoria da subsunção AUSUBEL, (1962) mostra a importância de conceitos relevantes e bem definidos na estrutura cognitiva, na medida em que eles se apresentam como pontos de ancoragem para novos materiais, criando a facilitação de sua incorporação na estrutura cognitiva. Da mesma forma, organizadores prévios, ao introduzirem ideias gerais antes do aprendizado do conteúdo específico tendem a melhorar a retenção e compreensão de novos conceitos (AUSUBEL, 1962; AUSUBEL; FITZGERALD, 1962).

O fortalecimento da estrutura cognitiva, por meio de uma organização clara e estável, é uma estratégia chave para promover a aprendizagem significativa e garantir a retenção de conhecimentos ao longo do tempo.

3.1.2 O processo de subsunção no aprendizado e no esquecimento

O processo de subsunção é um elemento fundamental para a aprendizagem significativa e a retenção do conhecimento. De acordo com AUSUBEL (1962), a organização

cognitiva hierárquica, composta por conceitos gerais e inclusivos, fornece uma base sólida para a incorporação progressiva de novos conteúdos. Nesse modelo, novos conceitos são ancorados em ideias amplas e relevantes, o que favorece a compreensão e a retenção eficiente das informações AUSUBEL (1963).

A teoria da subsunção, proposta por AUSUBEL, STAGER e GAITE (1968), enfatiza a importância dos subsunçores, ou seja, dos conceitos previamente existentes na estrutura cognitiva, para o processo de aprendizagem significativa. Sempre que novos conteúdos são apresentados, eles interagem com conhecimentos já estabelecidos, sendo organizados e assimilados de maneira hierárquica. Essa interação facilita a identificação de relações mais profundas e promove a formação de conceitos mais abrangentes.

Por outro lado, é fundamental destacar as diferenças entre a aprendizagem significativa e a aprendizagem mecânica. Enquanto a aprendizagem significativa envolve a integração de novos conhecimentos a sistemas cognitivos preexistentes, criando conexões que melhoram a retenção e facilitam a transferência do aprendizado, a aprendizagem mecânica se caracteriza pela memorização de conteúdos isolados, sem conexões significativas, tornando-os mais suscetíveis ao esquecimento (AUSUBEL, 1963; AUSUBEL; STAGER; GAITE, 1968).

No contexto das variáveis da estrutura cognitiva, há distinções entre influências de longo e curto prazo. Em um nível mais amplo, essas variáveis estão relacionadas à organização geral do conhecimento acumulado, permitindo a retenção significativa e a transferência de informações. Entretanto, em situações específicas e imediatas, a estrutura cognitiva pode afetar diretamente a capacidade de assimilação de novos conteúdos, dependendo da qualidade das conexões já estabelecidas (AUSUBEL, 1961; 1969). Essas conexões podem atuar tanto como facilitadoras quanto como inibidoras do aprendizado, dependendo da clareza e estabilidade dos conceitos preexistentes.

A disponibilidade de conceitos bem-organizados na estrutura cognitiva é uma condição essencial para a aprendizagem significativa. Segundo AUSUBEL; FITZGERALD (1961), a proximidade conceitual de novos conteúdos a conceitos ancoradores adequados é crucial, pois permite a diferenciação progressiva das informações. Dessa forma, a retenção de conhecimentos significativos está diretamente relacionada à estabilidade dos subsunçores, que devem ser claros e bem definidos para garantir a assimilação eficiente dos novos materiais.

A clareza dos subsunçores também favorece o acesso e a utilização dos conceitos de forma ágil e eficaz, promovendo uma base cognitiva que não apenas melhora a retenção, mas também facilita a transferência de conhecimento para novos contextos AUSUBEL (1968). A interligação entre experiências anteriores e novos conteúdos fortalece a organização da estrutura cognitiva, permitindo ao aprendiz construir uma base sólida para futuras aquisições de conhecimento (AUSUBEL, 1962; AUSUBEL, 1968; AUSUBEL, 1969).

No processo educacional, a aprendizagem exige a incorporação de novos conceitos e informações em uma estrutura cognitiva já existente, com propriedades organizacionais bem definidas. Segundo AUSUBEL e FITZGERALD (1962), os avanços mais significativos no ensino de disciplinas como química, física, biologia e matemática baseiam-se na premissa de que a aprendizagem eficaz e a retenção funcional dependem, em grande parte, da organização da estrutura cognitiva. A aquisição de uma estrutura cognitiva adequada, por sua vez, está condicionada a dois fatores: a utilização de conceitos organizadores bem estruturados e a adoção de metodologias que apresentem os conteúdos de forma sequencial e clara, promovendo estabilidade e coerência no processo de aprendizagem.

3.1.3 Princípio da diferenciação progressiva

Esse princípio estabelece que a estrutura cognitiva se organiza de maneira hierárquica, partindo de conceitos amplos e gerais, que são progressivamente diferenciados em conceitos mais específicos e detalhados (AUSUBEL, 1961, 1965; AUSUBEL; STAGER; GAITE, 1968).

Para seguir o princípio da diferenciação progressiva, é fundamental organizar e apresentar inicialmente as ideias mais gerais e inclusivas da disciplina, para depois introduzir, de forma gradual, termos e detalhes mais específicos. O desenvolvimento da consciência cognitiva nos seres humanos segue essa mesma sequência, conforme proposto pelo princípio.

Dessa forma, pode-se presumir que a organização do conhecimento na mente de um indivíduo, em relação a determinado tema, baseia-se em uma estrutura hierárquica. Nessa estrutura, os conceitos mais abrangentes ocupam posições no topo, enquanto os conceitos e dados factuais menos inclusivos e mais diferenciados aparecem em níveis progressivamente inferiores.

3.1.4 Princípio da reconciliação integrativa

Esse princípio trata da integração dos novos conteúdos à estrutura cognitiva existente, promovendo conexões entre conceitos previamente estabelecidos e os novos aprendidos. Ausubel (1963) destaca que a aprendizagem ocorre de forma significativa quando essas relações são estabelecidas, permitindo uma reorganização da estrutura cognitiva, aumentando a coerência e a funcionalidade do conhecimento.

Uma experiência conduzida por AUSUBEL, STAGER e GAITE (1968) mostrou que a reconciliação integrativa faz parte do processo dinâmico de organização da estrutura cognitiva. Esse processo ocorre simultaneamente à diferenciação progressiva e tem como objetivo eliminar discrepâncias aparentes, resolver inconsistências e integrar significados. Dessa forma, a reconciliação integrativa contribui para a reorganização e a consolidação dos conceitos dentro da estrutura cognitiva do indivíduo.

3.1.5 Organizadores prévios

De acordo com Ausubel (1970),

A principal suposição subjacente à minha defesa do uso de organizadores prévios no ensino de ciências é que o significado potencial de uma tarefa de aprendizagem depende da sua relação com a estrutura de conhecimento de um determinado aluno numa determinada área ou subárea temática.

Para implementar os princípios da diferenciação progressiva e da reconciliação integrativa, é fundamental utilizar organizadores prévios relevantes e inclusivos, que sejam estáveis dentro dos sistemas conceituais relacionados ao aprendizado cognitivo do aluno (AUSUBEL; STAGER; GAITE, 1968).

Esses organizadores devem ser construídos de maneira a serem familiares ao aluno, apresentados antes do material de aprendizagem e conter um nível mais elevado de abstração, generalidade e inclusão. Sua principal função é preencher a lacuna entre o que o aluno já sabe e o que precisa saber para aprender com sucesso a nova tarefa.

A elaboração intencional de um organizador específico para cada nova unidade é essencial, pois permite que o aluno aproveite as vantagens de um subsunçor, que lhe oferece uma perspectiva mais ampla e detalhada do material antes mesmo de interagir com ele. Além disso, os organizadores promovem elementos de estruturação inclusivos, garantindo que o conteúdo seja abordado de forma relevante e eficiente.

A diferenciação progressiva pode ser incentivada na estruturação dos assuntos ao se criar uma hierarquia de organizadores, na qual cada um antecede sua respectiva unidade de material. Dessa forma, um subsunçor relevante e inclusivo não apenas fornece ancoradouros ideacionais para cada unidade diferenciada, mas também possibilita a progressiva diferenciação entre as várias unidades do conteúdo.

Os organizadores também são projetados para favorecer a reconciliação integrativa. Isso ocorre quando explicitam as relações entre conceitos já aprendidos e novas informações, destacando suas semelhanças ou diferenças fundamentais. Dessa maneira, estabelecem conexões com todos os conceitos relevantes na estrutura cognitiva do aluno, reduzindo o esforço necessário para a aprendizagem e evitando o isolamento de ideias semelhantes em compartimentos desconectados. Além disso, os organizadores facilitam a distinção entre novos conteúdos e conceitos análogos, mas potencialmente conflitantes, reforçando o princípio da reconciliação integrativa.

AUSUBEL (1970) enfatiza que um organizador bem estruturado possui grande potencial pedagógico, tornando-se, por si só, um material de aprendizagem. No contexto escolar, é crucial relacionar o novo material a conceitos previamente estabelecidos. A organização sequencial adequada do assunto, aliada ao uso de organizadores eficazes, potencializa o aprendizado, uma vez que cada novo conhecimento serve como base para a aquisição subsequente.

De acordo com AUSUBEL (1963, 1960, 1969), quando a estrutura cognitiva é bem-organizada emergem significados precisos e duradouros. No entanto, se a estrutura cognitiva for instável, ambígua ou desorganizada, a aprendizagem significativa e a retenção são prejudicadas.

Por fim, AUSUBEL, STAGER e GAITE (1968) ressaltam a importância da motivação na aprendizagem escolar. Os alunos têm maior propensão a se engajar e aprender significativamente quando percebem a relevância e a aplicabilidade das informações, bem como quando demonstram interesse pessoal pelo assunto abordado.

3.2 CONCEPÇÕES ALTERNATIVAS

A presente seção traz uma breve revisão bibliográfica sobre concepções alternativas em eletricidade manifestadas por estudantes de diferentes níveis escolares e regiões. Serão discutidos os impactos dessas concepções no processo de aprendizagem, bem como

estratégias para corrigi-las. A revisão será restrita ao tema da eletricidade, conforme abordado no presente produto educacional. Dentro desse escopo, serão tratados os seguintes aspectos específicos: a constituição atômica da matéria (prótons, elétrons e nêutrons); a distribuição de cargas e seus efeitos no mundo macroscópico, especialmente no cotidiano; e os fenômenos relacionados à corrente elétrica

3.2.1 Cargas elétricas e partículas subatômicas

Para compreender os fenômenos da eletrostática, é fundamental conhecer a estrutura atômica da matéria. A sequência didática deve enfatizar a existência dos elétrons, prótons e nêutrons, destacando que, em seu estado natural, a matéria é eletricamente neutra, possuindo o mesmo número de prótons e elétrons. Dessa forma, quando um corpo adquire carga elétrica positiva, outro corpo deve adquirir a mesma quantidade de carga, porém negativa. Nesta seção, exploraremos essas questões relacionadas à natureza atômica da matéria e suas implicações nos fenômenos eletrostáticos, com base nas seguintes referências: (AIDOO, S.; AWUAH, A. B.; MPARE, A. O., 2014; BAŞER, M.; GEBAN, Ö., 2007; HASHISH, A. H.; SEYD-DARWISH, I.; TIT, N., 2020; MÉTIOUI, A.; TRUDEL, L.; MACWILLIE, M. B., 2015).

O entendimento da estrutura da matéria no ensino básico pode contribuir para a superação de concepções alternativas equivocadas, como as identificadas por BASER e GEBAN (2007):

- O elétron é apenas uma carga negativa, sem massa.
- Objetos neutros não possuem carga elétrica.
- Um corpo carregado contém apenas um tipo de carga.
- Os conceitos de eletrostática só são aplicáveis quando as cargas estão em repouso.
- A eletrostática é causada exclusivamente pelo atrito.
- Quando os elétrons entram em movimento para gerar corrente elétrica, todos os fenômenos eletrostáticos desaparecem.
- Elétrons e prótons, quando separados, permanecem estáticos e não se movem.
- O atrito entre a pele e um balão de borracha gera cargas elétricas.
- Não há transferência de carga entre dois objetos metálicos carregados com cargas de mesmo sinal.
- A transferência de carga entre dois objetos metálicos de sinais opostos ocorre até que um deles se torne eletricamente neutro.

- Não ocorre transferência de carga entre um metal carregado e outro neutro.
- Prótons podem ser transferidos entre corpos.

Algumas dessas concepções foram observadas em um estudo com professores de ciências em formação no Canadá (MÉTIOUI, A.; TRUDEL, L.; MACWILLIE, M. B., 2015) e até mesmo entre estudantes de engenharia nos Emirados Árabes (HASHISH, A. H.; SEYDARWISH, I.; TIT, N., 2020). Um estudo realizado em Cape Coast, Gana, também identificou concepções alternativas interessantes (AIDOO, S.; AWUAH, A. B.; MPARE, A. O., 2014). Ao contextualizar a importância do ensino da eletrostática, Aidoo e colaboradores ressaltam que é essencial que os alunos percebam "o poder das teorias científicas não apenas nas salas de aula, mas também na vida cotidiana". Dentre as concepções equivocadas observadas nesse estudo, destacam-se:

- Duas partículas exercendo forças de mesma intensidade uma sobre a outra se moveriam com a mesma velocidade, independentemente de suas massas.
- Qualquer partícula carregada, independentemente do sinal da carga, move-se na direção do campo elétrico.

Com base nessas observações, uma das recomendações propostas por esses autores foi incorporada ao presente material educacional: abordar, durante as atividades em sala de aula ou em textos suplementares, as concepções alternativas mais comuns relatadas na literatura, com o objetivo de esclarecê-las.

3.2.2 Circuitos elétricos simples

Concepções alternativas sobre circuitos elétricos simples talvez sejam as mais investigadas no campo da eletricidade. A vasta literatura sobre o tema nos levou a selecionar apenas, em nossa opinião, os estudos mais representativos para orientar esta revisão (COHEN; EYLON; GANIEL, 1983; DUIT; RHONECK, 1998; FREDETTE; LOCHHEAD, 1980; MCDERMOTT; SHAFFER, 1992; OSBORNE, 1983; SHAFFER; MCDERMOTT, 1992; SHIPSTONE, 1988). Esses trabalhos identificaram diversos modelos mentais associados a circuitos elétricos simples compostos por fontes de tensão, chaves e resistores em série e em paralelo. Como há certa ambiguidade na nomenclatura de alguns modelos, optamos por enumerar apenas os mais recorrentes, que podem coexistir simultaneamente:

- **Modelo I** – A corrente elétrica é emitida pela fonte (bateria, pilha etc.) a partir de um dos polos e consumida ao longo do circuito, diminuindo sua intensidade após atravessar cada elemento.
- **Modelo II** – A corrente elétrica sai da fonte pelos dois polos e é utilizada quando encontra os elementos do circuito.
- **Modelo III** – A intensidade da corrente é determinada pelo elemento por onde ela passa e não pode ser influenciada por componentes que ainda não foram percorridos. Nesse modelo, a corrente é vista como algo que se propaga ponto a ponto, afetando cada elemento apenas no instante em que o atinge. Assim, uma alteração em um ponto do circuito não influencia os pontos anteriores.
- **Modelo IV** – A corrente é uma propriedade exclusiva do gerador e independe dos demais elementos do circuito.

Um aspecto interessante desses estudos é a recorrência desses modelos em diferentes níveis de ensino e em diversas regiões do mundo. Crianças na Nova Zelândia (OSBORNE, 1983) e na Inglaterra (SHIPSTONE, 1984), estudantes do ensino médio em Israel (COHEN; EYLON; GANIEL, 1983) e calouros de engenharia nos EUA (FREDETTE; LOCHHEAD, 1980; MCDERMOTT; SHAFFER, 1992; SHAFFER; MCDERMOTT, 1992) apresentam concepções alternativas semelhantes. Essa persistência também foi observada em estudos realizados no MNPEF-UFERSA (ANDRADE, 2018; ANDRADE et al., 2018; LIMA, 2018; LIMA et al., 2019).

As questões do Teste de Concepções Alternativas (TCA), utilizadas na aplicação do produto educacional, foram extraídas dessa literatura. No capítulo de resultados, discutiremos em maior detalhe as concepções alternativas identificadas entre os alunos.

3.2.3 Outras considerações sobre concepções alternativas

Além dos aspectos discutidos anteriormente, diversos outros foram abordados em diferentes estudos. Um dos primeiros que selecionamos é o de CAILLOT e NGUYEN-XUAN (1995), que investigaram a percepção de trabalhadores não qualificados e funcionários de escritório sobre fenômenos eletrostáticos em situações cotidianas. Entre os contextos analisados estavam a eletricidade estática em carros ou em oficinas eletrônicas, bem como o funcionamento de dispositivos como lâmpadas e máquinas de lavar. O estudo também explorou fenômenos como choques elétricos e curtos-circuitos. Os autores identificaram diversos modelos mentais construídos a partir da experiência pessoal dos entrevistados. Embora

muitos tivessem aprendido sobre eletricidade na escola ou durante treinamentos no trabalho, raramente faziam referência ao conhecimento formal, baseando suas explicações exclusivamente em concepções alternativas.

Outro estudo relevante foi conduzido por Duit, da Universidade de Kiel, e Rhöneck, da Faculdade de Pedagogia de Ludwigsburg, ambos na Alemanha (DUIT; RHONECK, 1998). Eles realizaram um amplo levantamento das concepções alternativas apresentadas por estudantes do ensino médio antes de qualquer instrução formal sobre eletricidade. Os pesquisadores observaram fortes correlações entre essas concepções e a linguagem cotidiana utilizada para descrever eletricidade e aparelhos elétricos. Termos como corrente, voltagem e resistência, por exemplo, possuem significados específicos na ciência, mas são frequentemente empregados no dia a dia com interpretações completamente distintas. Os autores destacam que, devido às variações linguísticas entre diferentes idiomas, não é possível generalizar todas as concepções alternativas para todas as línguas. No presente estudo, também identificamos essas correlações com a linguagem cotidiana, em concordância com os achados de BASER e GEBAN (2007) e DOGRU (2021).

Um estudo que sintetiza bem esse cenário foi apresentado por HAMID e COLABORADORES (2017). Todos esses trabalhos reforçam a importância de um ensino que leve em consideração as concepções alternativas, contribuindo para a formação de adultos cientificamente alfabetizados.

3.3 JOGOS DE CARTAS

Este texto tem como base o artigo de MICHAEL DUMMETT (1993).

Os jogos de cartas surgiram na Europa por volta do século XIV, apresentando uma complexidade maior em relação aos jogos de tabuleiro. Enquanto os jogos de tabuleiro seguiam regras fixas e imutáveis, os jogos de cartas permitiam variações, tornando-se mais diversificados e difundidos. Dessa forma, tornaram-se mais populares e acessíveis.

Uma das dificuldades em se obter um conhecimento preciso sobre a origem e a evolução dos jogos de cartas deve-se à escassez de registros e à facilidade com que se disseminavam. Entre os jogos mais conhecidos está o veneziano *Trappola*, que se espalhou a partir do século XVII e era caracterizado por sinais, naipes e figuras inspiradas na corte italiana. Além disso, há relatos de pelo menos três tipos distintos de jogos de cartas, o que, somado à

diversidade de adaptações, resultou na criação de inúmeras variações com princípios diferentes.

O baralho com 52 cartas chegou à Europa no século XIV, trazido pelo povo islâmico através do reino de Aragão. Com o tempo, sofreu diversas modificações em sua forma e estética, adaptando-se às diferentes épocas e regiões. Por volta de 1470, o baralho se aproximou do formato atual, tornando sua produção mais acessível. No entanto, para alguns, essa evolução resultou em um empobrecimento visual e artístico. Há indícios de que os jogos de azar tenham surgido em período próximo ao dos jogos de cartas, visto que existem registros de apostas elevadas em jogos por volta de 1400.

Os jogos evoluem constantemente, incorporando pequenas mudanças em suas regras, seja por inovações, seja pela influência de práticas de outras culturas ou períodos históricos. No século XV, surgiu o *Tarot*, jogo associado ao ocultismo e à prática de adivinhação. Todos os jogos mencionados até aqui pertencem à categoria dos chamados jogos de truques. Como instrumentos lúdicos, as cartas de baralho cumprem dois propósitos principais: possibilitar jogos de informação imperfeita e introduzir elementos de acaso.

A evolução e a popularização dos jogos de cartas demonstram sua capacidade de adaptação ao longo do tempo, tanto em formato quanto em gênero. Além disso, a introdução de novas regras reforça o dinamismo desse processo, indo além do mero fator da sorte. Diante disso, os jogos de cartas podem ser vistos também sob uma perspectiva pedagógica, considerando sua flexibilidade e capacidade de engajamento.

3.3.1 Jogos de cartas no ensino

Temos no artigo de SMITH e MUNRO (2009) um exemplo exitoso utilizado no sistema educacional Inglês, com o uso de cartas há pelo menos uma década, como ferramenta para o ensino. Nessa mesma linha, MOURSUND (2006) argumenta que os jogos permitem que os alunos assumam um papel ativo no processo de aprendizagem. Ele exemplifica essa ideia comparando a apreciação de uma obra de arte, na qual o observador é passivo, com a experiência de jogar, onde os participantes tomam decisões ativamente, tornando o processo dinâmico. Nesse sentido, os jogos de cartas têm sido amplamente utilizados como ferramentas pedagógicas, pois envolvem os alunos e facilitam a compreensão de conceitos abstratos.

(SMITH; MUNRO, 2009) destacam que os jogos contribuem para o desenvolvimento do raciocínio lógico, a resolução de problemas e a colaboração entre os estudantes.

Isso torna as cartas um recurso valioso para o ensino de conteúdos teóricos de forma prática e lúdica. MOURSUND (2006) reforça essa ideia ao afirmar que os jogos educacionais podem servir como um elo entre teoria e prática, permitindo que os alunos explorem conteúdos complexos em um ambiente envolvente. Esse aspecto é especialmente eficaz no ensino de disciplinas como Ciências e Matemática, onde conceitos abstratos podem ser visualizados e aplicados por meio da dinâmica dos jogos.

Além de potencializar a aprendizagem, os jogos de cartas se destacam pelo aumento do engajamento dos alunos no processo educacional (SMITH; MUNRO, 2009). A interatividade e o caráter lúdico favorecem o interesse dos estudantes, criando um ambiente dinâmico e estimulante. Ao participar dos jogos, os alunos têm a oportunidade de aplicar seus conhecimentos na prática, o que contribui para uma assimilação mais efetiva e significativa do conteúdo. (SMITH; MUNRO, 2009) relatam que a aplicação de jogos em escolas na Inglaterra resultou em feedbacks positivos, evidenciando o impacto desse recurso na motivação e no desempenho acadêmico.

Outro benefício dos jogos é a promoção da interação, do trabalho em equipe e da troca de estratégias entre os alunos. Esse ambiente colaborativo favorece o aprendizado mútuo e incentiva a comunicação entre os participantes, fortalecendo o processo educativo.

3.3.2 Projetos de jogos de cartas

O “Gameplay Loop” metodologia mostrada por (CZAUDERNA; GUARDIOLA, 2019) tem mostrado resultados muito bons e com isso tem sido destacado por desenvolvedores de jogos que a utilizam como uma ferramenta muito boa para desenvolver seus projetos de jogos que são capazes de integrar o aprendizado e o entretenimento. Essa metodologia também citada por MOURSUND (2006) que aponta a metodologia como bastante eficaz. Principalmente quando faz a relação bastante promissora entre a mecânica do jogo e abordagem pedagógica. Para ele é o cerne da utilização dos jogos de cartas em ambiente educacional. A sequência utilizada pelos jogadores em suas ações, e a possibilidade de permitir a adequação das regras e até mesmo do desenho do jogo é avaliado como fator positivo. Pois permite uma maior integração e um maior engajamento. Já foi falado por DUMMETT, (1993) que a simples alteração das regras do jogo cria outro jogo. Quando (CZAUDERNA; GUARDIOLA, 2019) permite e propõe essa ação ele está contribuindo para a criação de um novo jogo onde os alunos em um processo colaborativo foram coadjuvantes nesta construção.

GUTIERREZ (2014) desenvolveu um jogo de cartas para o ensino de biologia, demonstrando que estas ferramentas lúdicas podem melhorar significativamente a compreensão de conteúdos complexos. O estudo mostrou que o jogo aumentou o desempenho acadêmico e a motivação dos alunos. PIYAWATTANAVIROJ et al. (2019) criaram um jogo voltado para o aprendizado da tabela periódica, destacando a importância da interatividade e do feedback imediato para manter o engajamento dos estudantes.

Os jogos de cartas educacionais apresentam um grande potencial para complementar métodos tradicionais de ensino. Eles promovem o aprendizado ativo e podem ser adaptados a diferentes áreas do conhecimento, desde que sejam projetados com base em princípios pedagógicos bem definidos.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 JOGO “EM BUSCA DO PRÊMIO NOBEL” (EBPN), VERSÃO CARTAS

O jogo utilizado na presente intervenção didática é uma adaptação para cartas do jogo inicialmente elaborado para uso em dispositivos eletrônicos (DE AQUINO, E. M. et al., 2023; DOS SANTOS; DE AQUINO, 2018). O hipertexto sobre eletricidade utilizado na versão digital, foi aproveitado para a montagem de um texto ausubeliano em versão impressa, distribuído aos participantes do jogo.

Na versão cartas, o jogo é disputado entre dois jogadores ou dois grupos, cada um formado por quatro ou cinco participantes. Para facilitar a explicação, as regras serão descritas considerando a competição entre grupos de quatro integrantes. Os estágios do jogo são os mesmos da versão digital: Graduação, Mestrado, Doutorado e Pesquisador em busca do Nobel.

As questões variam de acordo com cada categoria. No nível Graduação, abordam exclusivamente carga elétrica e campo elétrico. No nível Mestrado, o tema central é o potencial elétrico. Já no nível Doutorado, os desafios envolvem corrente elétrica, circuitos elétricos e a Lei de Ohm. As questões dessas três categorias são retiradas do ENEM e apresentam níveis de dificuldade baixo ou intermediário. Na categoria Pesquisador, as questões abrangem todos os tópicos anteriores e são selecionadas entre as mais difíceis do ENEM.

As cartas do jogo contêm as mesmas questões utilizadas na versão digital, conforme ilustrado na Figura 4.1. Cada jogador recebe um material com o conteúdo relacionado ao tema. O estudo pode ser feito individualmente, em atividades organizadas pelo professor ou durante o próprio jogo, seguindo as regras estabelecidas. A disposição das cartas na mesa é representada na Figura 4.2.

Duas formas de aplicação do jogo foram testadas. Uma na presente dissertação, e outra na dissertação de Eliabe Maxsuel de Aquino (a ser submetida). A ideia inicial era aplicar a mesma forma nas duas. No entanto, na minha turma os alunos sugeriram mudanças e resolvi adotá-las, até para no futuro, em replicações do jogo, termos elementos de comparação.

Figura 4.1 – Ilustração de cartas nas categorias (a) graduação (resposta: d); (b) mestrado (resposta: a); (c) doutorado (resposta: b); (d) pesquisador (resposta: a).

G3

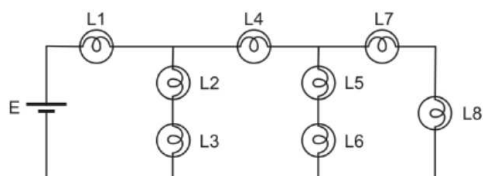
Uma menina começa a pentear seus longos cabelos usando um pente de plástico, quando percebe que o pente atrai pequenos pedaços de papel que se encontram sobre a mesa. Esse fenômeno acontece por que (Adaptado de Gualter et al, 2007):

- a) O pente é um bom condutor elétrico.
- b) O papel é um bom condutor elétrico.
- c) Os pedaços de papel já estavam eletrizados.
- d) O pente ficou eletrizado por atrito no cabelo.
- e) Entre o pente e os pedaços de papel ocorre atração gravitacional.

(a)

D6

No circuito dessa figura, quais são as três lâmpadas que acendem com o mesmo brilho por apresentarem igual valor de corrente fluindo nelas? (Adaptado do Enem 2009).



- a) L1, L2 e L3.
- b) L2, L3 e L4.
- c) L2, L5 e L7.
- d) L4, L5 e L6.
- e) L4, L7 e L8.

(c)

M6

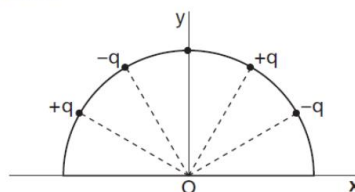
Quatro cargas puntiformes iguais, positivas, estão nos vértices de um quadrado. É correto dizer que no centro do quadrado (PUC-MG):

- a) O potencial é diferente de zero e o campo elétrico é nulo.
- b) O potencial é nulo e o campo elétrico é diferente de zero.
- c) O potencial e o campo elétrico são ambos diferentes de zero.
- d) O potencial e o campo elétrico são ambos nulos.

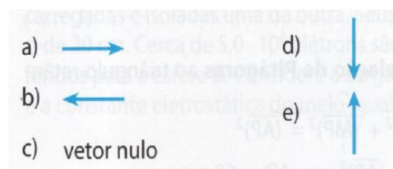
(b)

P11

Quatro cargas, todas de mesmo valor, q , sendo duas positivas e duas negativas, estão fixadas em um semicírculo no plano XY, conforme figura abaixo.



Indique a opção que pode representar o campo elétrico resultante, produzido por essas cargas, no ponto O (UFC-CE):

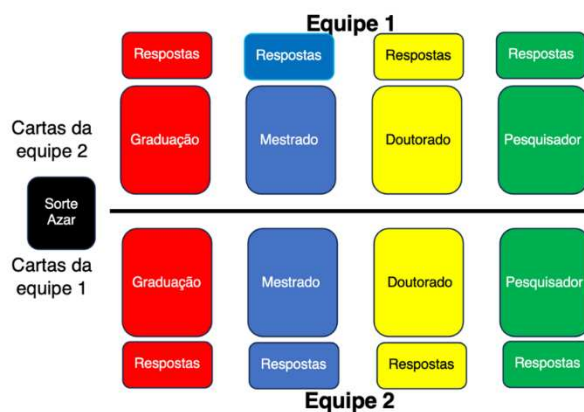


(d)

De acordo com as regras originais, utilizadas na dissertação de E.M. de Aquino:

1. O jogo começa com o sorteio dos componentes de cada equipe para ocupar cada um dos estágios. Ou seja, um componente será sorteado para a graduação, outro para o mestrado, e assim por diante.
2. A equipe sorteada para iniciar o jogo (suponhamos, equipe 1) retira a carta de cima do conjunto graduação da equipe 2 e entrega a carta para o adversário ler a questão. Se este acertar, a carta volta para baixo do conjunto, e o jogador da equipe 1 retira outra carta do conjunto graduação e repete o procedimento. Quando o jogador adversário erra a questão, a carta volta para o final do conjunto, e o jogador da equipe 2 retira a carta do conjunto da equipe 1 e prossegue como descrito acima.
3. A equipe passa de estágio quando seus componentes acertam 5 questões. Portanto, a equipe ganha o Nobel quando acerta pelo menos 20 questões.
4. Cada vez que um jogador acerta uma questão, em qualquer estágio, ele retira uma carta do conjunto SORTE/AZAR. Se a carta tiver a palavra SORTE, ele segue o jogo; se a carta tiver a palavra AZAR, o jogador perde a questão que acertou, é como se tivesse errado a questão.
5. Cada jogador pode pedir ajuda da equipe. Se o colega que vai ajudá-lo (jogador-auxiliar) errar a questão, é como se o jogador tivesse errado, e tudo segue como descrito no item 1. Se o jogador-auxiliar acertar a questão, o jogador em ação não poderá mais solicitar ajuda.
6. Os componentes da equipe que está questionando podem consultar o livro de conteúdo, o que é impedido para os componentes da equipe que está respondendo.

Figura 4.2 – Disposição das cartas na mesa. Abaixo das cartas de perguntas são colocadas as cartas com as respostas.



Na presente dissertação, por sugestão dos alunos, as regras foram essas:

1. O jogo começa com o sorteio do grupo que irá começar a responder. O grupo que começa a responder escolhe qual de seus componentes deverá iniciar.
2. Este componente deverá retirar a carta de cima da categoria em jogo; fazer a leitura em voz alta e em seguida responder. Caso acerte, ele deverá escolher uma carta do conjunto SORTE/AZAR. Caso a carta seja de sorte ele passa a vez para o grupo oponente; caso a carta tenha a palavra azar, o jogador continua retirando carta até que chegue na combinação resposta correta e carta de sorte.
3. Para passar de etapa cada equipe deverá responder no mínimo cinco questões da etapa. O mínimo corresponde a tirar cinco cartas de sorte.
4. Cada equipe é composta de quatro componentes e um coringa, que substituirá algum componente ausente no dia do jogo.
5. Em cada uma das fases um jogador poderá solicitar ajuda aos colegas do grupo, uma única vez por etapa.
6. Os componentes que não estiverem respondendo poderão fazer uso do material de leitura. Desde que não seja solicitada a ajuda.
7. Para obter o prêmio Nobel cada equipe deverá responder corretamente no mínimo cinco questões de cada fase.

4.2 CONCEITOS DE ELETROSTÁTICA E ELETRODINÂMICA NO CENÁRIO DE CONCEPÇÕES ALTERNATIVAS

As dissertações do grupo de pesquisa coordenado pelo prof. Carlos Alberto dos Santos têm como foco a abordagem de tópicos de física a partir das concepções alternativas amplamente referidas na literatura e observadas nas diferentes intervenções didáticas no MNPEF-UFERSA, quer seja em dissertações já defendidas (ANDRADE, F. A. L., 2018; FELIX, H. R. T. et al., 2024; LIMA, 2018), ou nas dissertações em andamento (E. M. de Aquino, E. M. A. Costa). A literatura a esse respeito é imensa. Com a sentença de busca *electricity misconception "science teaching"*, o Google Acadêmico (GA) recupera mais de 16 mil documentos, publicados a partir dos anos 1950. Apesar disso, não conhecemos livros didáticos de física que incorporem as descobertas sobre concepções alternativas na área da eletricidade.

Em função da importância dessa temática, serão apresentados aqui conceitos de eletrostática e eletrodinâmica no cenário das concepções alternativas, em um nível mais elevado do que aquele exigido no ensino médio, mas compatível com o nível de formação de professores de física. Selecionamos textos que nos parecem relevantes para a formação do professor de física, incluindo assuntos que não foram abordados no produto educacional descrito nesta dissertação.

O levantamento bibliográfico que resultou na seleção dos textos que orientaram a elaboração desta seção, foi realizado sob a orientação do prof. C.A. dos Santos e em parceria com meus colegas mestrandos Ellen Mileide Amorim Costa e Eliabe Maxsuel de Aquino, que também desenvolveram suas dissertações em torno do mesmo tema. No primeiro levantamento bibliográfico que fizemos, entre os 100 artigos e teses mais relevantes, conforme os critérios do GA, selecionamos 50 documentos para um exame mais detalhado e criterioso. Decidimos selecionar os dez artigos e teses mais importantes, ou seja, os documentos mais relacionados com os nossos produtos educacionais. Foi uma tarefa difícil, realizada em etapas. Na primeira, com critérios flexíveis, conseguimos reduzir a lista para 90 textos. Na segunda etapa resolvemos selecionar apenas os artigos que continham abordagens didáticas em nível mais avançado do que o usual no ensino médio, ou que abordavam concepções alternativas induzidos por livro-textos. Ou seja, resolvemos, para esta seção, desconsiderar os artigos que tratavam as concepções alternativas como foco central. Alguns desses artigos foram importantes em outros trechos dessa dissertação. Com esse critério mais restritivo, conseguimos selecionar 30 textos. Na terceira etapa decidimos considerar apenas textos que pudessem ser usados em um curso de formação de professores. Ou seja, textos com conteúdos ao nível do Halliday-Resnick (HALLIDAY; RESNICK, 1981), mas com abordagem qualitativa. Com esses critérios, reduzimos a lista de 50 para 24 textos e um endereço na internet¹. Achamos difícil estabelecer algum critério para escolher dez entre os 24 textos relacionados na Tabela 4.1.

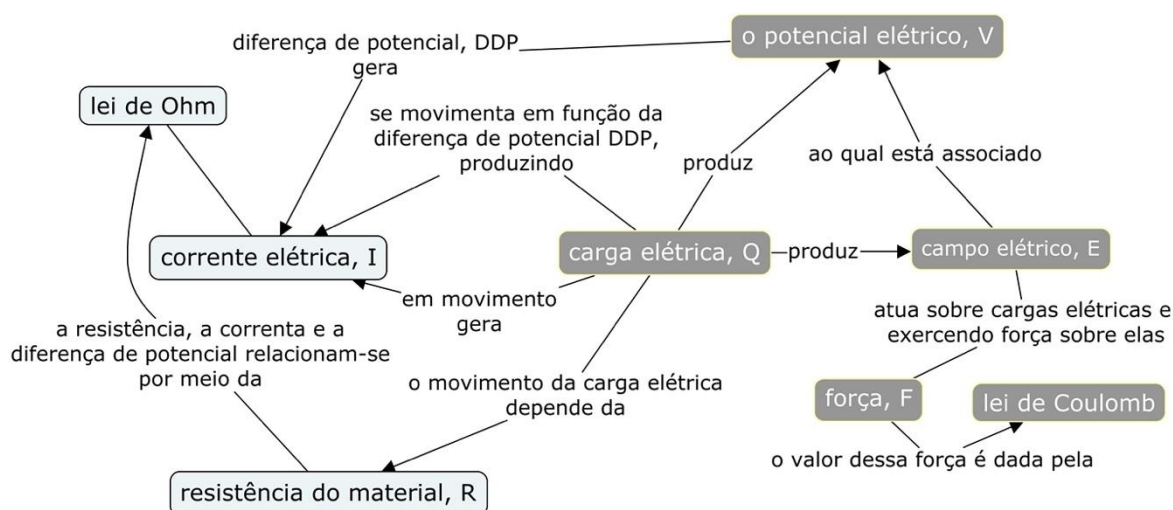
Vamos abordar os conceitos de eletrostática e eletrodinâmica seguindo o roteiro do texto ausubeliano usado durante a intervenção didática. Portanto, a partir do texto ausubeliano (AQUINO, E. M.; BARBOSA, G. F.; DOS SANTOS, C. A., 2023) apresentaremos esses conceitos em nível superior ao que foi apresentado aos alunos.

¹ <http://amasci.com/ele-edu.html>.

4.2.1 Carga, Campo, Força, Potencial e Energia

Esses conceitos são objeto do Organizador Prévio 1 (OP1), carga e campo, e do OP2, potencial. Em nossa opinião esses são os três mais importantes subsunçores da eletricidade em nível de ensino médio. O mapa conceitual da Figura 4.3 representa toda a disciplina abordada na intervenção didática.

Figura 4.3 – Mapa conceitual para eletricidade no ensino médio. Conceitos em retângulos escuros pertencem à eletrostática, enquanto aqueles em retângulos claros pertencem à eletrodinâmica.



O mapa sugere nossa visão ausubeliana da matéria, sendo a carga elétrica o conceito central. É ela que gera o campo elétrico. Existindo um campo elétrico, naturalmente surgirá o potencial elétrico. A diferença de potencial leva ao movimento de cargas, de onde surge a corrente elétrica.

Tabela 4.1 – Textos selecionados para a elaboração desta seção.

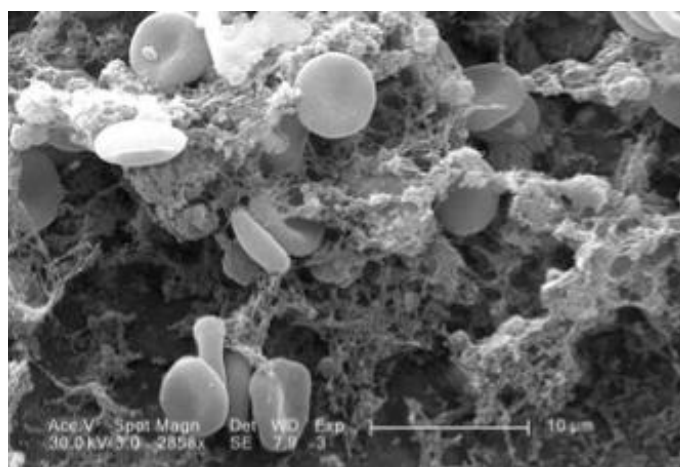
Assunto	Referências
Modelo microscópico da eletricidade	(BURDE, J.-P.; WILHELM, T., 2016; GUIASOLA, 2014; NAKHLEH, 1992; UNAL; ZOLLMAN, 1999)
Gás de elétrons	(BURDE, J.-P.; WILHELM, T., 2016; COTTLE; MARSHALL, 2016; DE POSADA, 1997)
História da eletricidade	(ATHERTON, T., 1986; CASTLE, G. P., 2010; FURIÓ, C.; GUIASOLA, J., 1998)
Voltagem elétrica	(HAERTEL, H., 1985)
Eletrodinâmica com símbolos e imagens	(HAERTEL, H., 1987)
Distribuição de carga em circuitos elétricos	(FERREIRA; FIGUEIREDO, 2003; MOREAU, W. R., 1989; RUSSELL, 1968; WELTI, 2005)
Eletrostática e corrente elétrica	(PARKER, 1970; SHERWOOD, B. A.; CHABAY, R. W., 1999)
Transiente em circuitos RC	(PREYER, N. W., 2002)
Mecanismos da corrente elétrica	(KIPNIS, 2009; ROSSER, 1963)
Estratégia para superar concepções alternativas	(CHABAY; SHERWOOD, 2006; SHAFFER; MCDERMOTT, 1992)

A disciplina de eletricidade é apresentada depois da mecânica, quando é abordada a interação gravitacional. É interessante, do ponto de vista ausubeliano chamar a atenção para o fato de que formalmente as interações gravitacionais são iguais às interações eletromagnéticas. E mais importante do que isso, toda energia resulta das interações gravitacionais, eletromagnéticas e nucleares, e que no seu estado latente, quando recebe a denominação de energia potencial, ela depende unicamente da configuração da matéria envolvida, massa no caso gravitacional, carga elétrica, no caso eletromagnético, e prótons e nêutrons no caso nuclear.

Sendo a carga o conceitual fundamental da eletricidade, é essencial que o assunto comece por uma discussão da estrutura atômica da matéria. A literatura é ampla a esse respeito. Supõe-se que inúmeras concepções alternativas têm origem na falta desse conhecimento por parte dos alunos. NAKHLEH (1992) e UNAL e ZOLLMAN (1999) apresentam bons textos sobre a estrutura atômica da matéria compatível com a abordagem que fizemos no produto educacional. Partes desses textos são de conhecimento de quem fez licenciatura ou bacharelado em física, e de fato foram usados no texto ausubeliano, antes de seus autores conhecerem os artigos de Nakhleh e Unal e Zollman.

Praticamente tudo que vemos ao nosso redor dá a ideia de que a matéria é contínua. A olho nu, uma gota de sangue parece uma porção líquida contínua, mas com a ajuda de um potente microscópio eletrônico, pode-se ver células vermelhas com vários buracos entre elas (Figura 4.4), um aspecto de crateras com vários caminhos contínuos

Figura 4.4 – Amostra de sangue vista em microscópio eletrônico de varredura, com aumento de 2.858 vezes. Disponível em (https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Blood_clot_in_scanning_electron_microscopy.jpg.) Acesso em 1/1/2025.

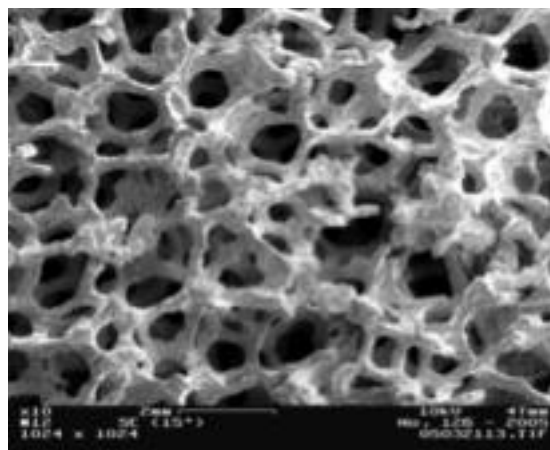


Outro exemplo interessante de como a olho nu os objetos parecem contínuos, mas que a microscopia eletrônica nos mostra que são descontínuos, é de um bloco de espuma de alumínio, um material poroso e muito resistente.

Figura 4.5 - a) – Bloco de espuma de alumínio. Disponível em https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Aluminium_foam.jpg. Acesso em 1/1/2025. (b) – Parte de um bloco de espuma de alumínio visto com um microscópio eletrônico, com ampliação de 10 vezes. Disponível em https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Image-Metal_Foam_in_Scanning_Electron_Microscope,_magnification_10x_b.GIF. Acesso em 1/1/2025.



(a)



(b)

Portanto, tudo que é visível a olho nu ou mesmo através de microscópios potentes sugere que a matéria é contínua, mas não é. Se tivéssemos um microscópio superpotente, que fosse capaz de detectar qualquer material, por menor que fosse esse material, mostraríamos que no limite chegaríamos ao átomo, que é o componente básico de toda a matéria. Ou seja, qualquer material é feito de uma quantidade extraordinariamente grande de diferentes tipos de átomos. Nessa escala atômica tem mais espaço vazio do que espaço ocupado por massa.

A informação básica é: qualquer matéria do universo é composta de átomos. Cada átomo é composto de um núcleo e de uma certa quantidade de elétrons que ficam orbitando em volta do núcleo. O núcleo tem uma massa aproximadamente 1840 vezes maior do que a massa do elétron. É por isso que se diz que praticamente toda a massa do átomo está no núcleo. Os elétrons podem girar em torno do núcleo a uma distância muito grande. Por exemplo, se o núcleo fosse do tamanho de uma bola de futebol, e se o colocássemos no centro de um grande campo de futebol, como o Maracanã, alguns elétrons poderiam girar a uma distância equivalente à das arquibancadas mais afastadas. Entre o núcleo e esse elétron existiria apenas um espaço vazio. É por isso que se diz no nível atômico, a matéria tem mais espaço vazio do que espaço ocupado com massa.

Do ponto de vista da eletricidade, a ideia essencial é que a matéria é basicamente composta de prótons, nêutrons e elétrons. Os dois primeiros praticamente não se movem. Ficam presos no núcleo atômico. Os elétrons têm liberdade para facilmente se moverem em materiais metálicos, os condutores. Em materiais não condutores, ou isolantes, ou dielétricos, os elétrons se movem com muita dificuldade.

Todos os fenômenos elétricos podem ser explicados a partir dessa ideia. Começemos pelo conceito de carga elétrica, de onde ela surge, e como os corpos podem ser eletricamente carregados.

4.2.1.1 Carga elétrica

De acordo com os conhecimentos da física contemporânea, a carga elétrica na natureza é transportada por diferentes tipos de partículas elementares, sendo, nesse contexto, o elétron a principal delas. Embora muito importantes para a física das partículas elementares, os léptons e os quarks não precisam ser considerados em uma abordagem elementar da eletricidade. Ou seja, vamos nos concentrar aqui tão somente no elétron e no próton, que não é uma partícula elementar, pois é constituída de quarks que lhe conferem uma carga elétrica igual em valor e oposta em sinal à carga do elétron.

Existem muitos modelos atômicos, desde a antiguidade grega, Tales de Mileto (625–547 a.C.) e Aristóteles (384–322 a.C.), passando por John Dalton (1766–1844), até chegar ao modelo do início do século 20, proposto por Joseph John Thomson (1856-1940). Depois do modelo de Thomson, surgiu o modelo de Bohr, sugerido por Rutherford. É este modelo de Bohr que utilizaremos aqui.

Nesse modelo, os prótons e os nêutrons se concentram em um volume muito pequeno, em torno do qual, em grandes distâncias orbitam os elétrons. É por isso que podemos dizer que a matéria é um grande vazio. Mas, o que interessa para a nossa disciplina, é que a carga positiva se concentra no núcleo, e a carga negativa fica ziguezagueando em torno dele. Em condições normais, o átomo é eletricamente neutro, porque o número de prótons é igual ao de elétrons.

Podemos considerar que, nesse modelo, a força de atração entre prótons e elétrons é a força coulombiana, que será abordada a seguir. Os elétrons mais distantes do núcleo, ou menos ligados a ele, são fracamente atraídos e podem facilmente se desprender do átomo. Esses elétrons livres são responsáveis pela condução da corrente elétrica nos materiais

condutores, pois, ao se desprenderem dos átomos, ficam livres para se movimentar pelo material. Nos materiais isolantes, quando um elétron abandona um átomo, este passa a ter um próton a mais, tornando-se eletricamente positivo. Os átomos que perdem elétrons são chamados de íons. Mas será que esses elétrons menos ligados ao núcleo podem se transferir de um corpo para outro? Sim. Essa transferência está na base dos processos de eletrização e condutividade. Os relâmpagos que observamos no céu são um exemplo de transferência de cargas elétricas entre nuvens. Já o funcionamento de motores e dispositivos eletrônicos ocorre devido à condutividade elétrica, isto é, ao movimento dos elétrons dentro de materiais condutores e semicondutores.

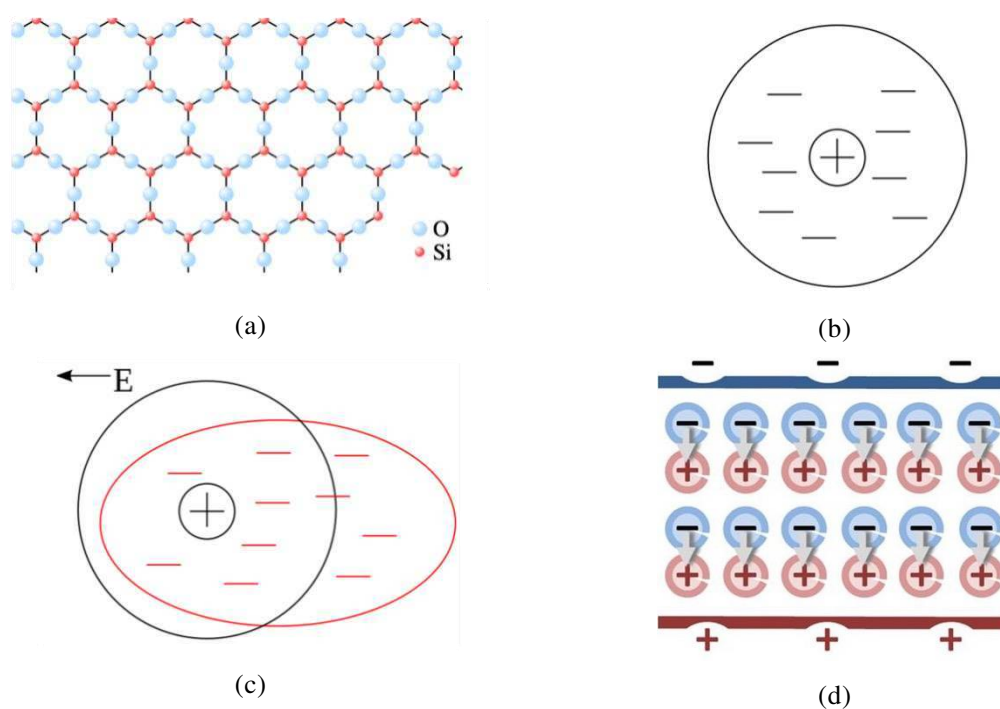
Aqui surge uma questão importante para a nossa disciplina: como os elétrons se movimentam nos materiais?

Essa é a questão fundamental que impulsiona toda a ciência e tecnologia da eletricidade. Para analisá-la, é essencial reconhecer os diferentes tipos de materiais. No entanto, a diversidade dos materiais na natureza é vasta, e, para tornar nossa abordagem mais didática, algumas restrições serão necessárias. Primeiramente, limitaremos nossa análise ao estado sólido, deixando de lado os materiais líquidos e gasosos. Em seguida, focaremos apenas nos materiais inorgânicos, excluindo os materiais biológicos. Por fim, dentre os sólidos conhecidos—condutores, isolantes, semicondutores e supercondutores—nos concentraremos nos condutores e nos isolantes, também chamados de dielétricos. Vale destacar que as expressões "isolante" e "dielétrico" são sinônimos e serão utilizadas de forma intercambiável ao longo do texto para que você se familiarize com ambos os termos. A forma mais elementar de definirmos um material condutor, é dizer que ele tem facilidade de conduzir corrente elétrica. De modo análogo, dielétrico é um material que não conduz corrente elétrica. Essas duas definições são simples demais, e não nos ajudam a entender os fenômenos mais elementares da eletrostática e da eletrodinâmica. Então, vamos melhorar as definições.

Na estrutura do material isolante quartzo (SiO_2), exibida na Figura 4.6a, os núcleos atômicos permanecem praticamente imóveis nas posições indicadas para os átomos de silício (Si) e oxigênio (O). Em condições normais, os elétrons distribuem-se de maneira homogênea ao redor de cada núcleo. No entanto, quando um campo elétrico é aplicado, essa distribuição é alterada. Sendo o quartzo um material dielétrico, essa distorção na distribuição de cargas ocorre em pontos específicos da superfície e do interior do material. Como essas cargas permanecem localizadas ou praticamente estáticas, dizemos que a situação é eletrostática. Caso

o quartzo fosse um condutor, os elétrons se deslocariam livremente, espalhando-se por toda a superfície do material. Portanto, nos materiais dielétricos, quando um campo elétrico é aplicado, as moléculas tornam-se polarizadas. Isso significa que as cargas positivas se deslocam para um lado, enquanto as negativas se acumulam no lado oposto, em relação ao centro da molécula. Essa concepção de moléculas polarizadas é fundamental para a compreensão de diversos fenômenos da eletrostática.

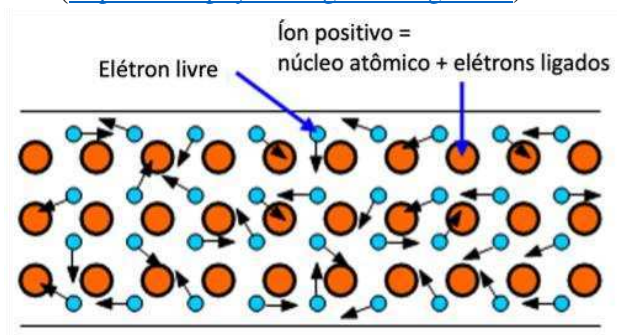
Figura 4.6 – (a) estrutura do quartzo (SiO_2), (https://commons.wikimedia.org/wiki/File:SiO2_Quartz_extra-O.svg) Acessado em 1/1/2025; (b) distribuição dos elétrons em torno do núcleo, em condições normais, (https://pt.m.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Dielectric_model.svg) Acessado em 1/1/2025; (c) distribuição dos elétrons após aplicação de um campo elétrico no sentido indicado (https://pt.m.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Dielectric_model.svg) Acessado em 1/1/2025; (d) desenho esquemático de um material dielétrico polarizado (https://pt.wikipedia.org/wiki/Lei_de_Gauss) Acessado em: 1/1/2025.



A situação nos materiais condutores é completamente diferente. O conhecimento atual sobre a condutividade elétrica em metais, como ferro e níquel, é resultado de pesquisas iniciadas no século 19. Assim como qualquer outro material, os condutores também são formados por átomos, que, por sua vez, são compostos de prótons, nêutrons e elétrons. Diferentemente dos dielétricos, nos materiais condutores, alguns elétrons possuem liberdade para se deslocar para longe dos núcleos aos quais estavam originalmente ligados. Embora nem todos os elétrons apresentem essa mobilidade, os que possuem já são suficientes para dar origem aos fenômenos da eletrodinâmica, sendo a corrente elétrica o principal

deles. Esses elétrons com liberdade de movimento são chamados de *elétrons livres*. Drude usou a expressão *gás de elétrons*. Outra expressão frequentemente utilizada para descrevê-los é *mar de elétrons de Fermi*, em referência ao modelo desenvolvido pelo físico italiano Enrico Fermi. Praticamente todos os fenômenos da eletrodinâmica estão relacionados a esse mar de elétrons. Mais adiante usaremos os artigos de POSADA (1997) e (COTTLE e MARSHALL, 2016) para mostrar como a ideia do gás de elétrons, ilustrada na Figura 4.7, pode ser usada no ensino médio, no contexto da eletrodinâmica.

Figura 4.7 – Modelo da estrutura eletrônica de um metal, com um mar, ou um gás de elétrons em volta dos íons positivos. (<http://alevelphysics.org.uk/charge.html>) Acessado em 1/1/2025.



4.2.1.2 Processos de eletrização por atrito ou por contato

Tudo indica que a eletrização por atrito foi o primeiro processo descoberto pelo homem, e é por isso considerado como o início da história da eletricidade. Os relatos históricos indicam que foi em Mileto, antiga Grécia, onde hoje situa-se a Turquia, que o fenômeno da eletricidade estática, ou eletrostática, foi observado em um experimento de eletrização por atrito. Isso ocorreu 600 anos antes da era cristã, e o experimento foi realizado por Tales, que ficou conhecido como Tales de Mileto. O experimento foi feito com âmbar, uma resina de árvore fossilizada. Depois que esfregou um pedaço de âmbar com peles de animais, Tales percebeu que o âmbar atraía pequenos objetos, como penas. Como a palavra âmbar significa elétron em grego, aquele fenômeno deu origem ao que passou a se chamar eletricidade. Mais de dois mil anos depois a palavra foi usada para denominar a partícula elementar que transporta a menor carga elétrica na natureza, o elétron.

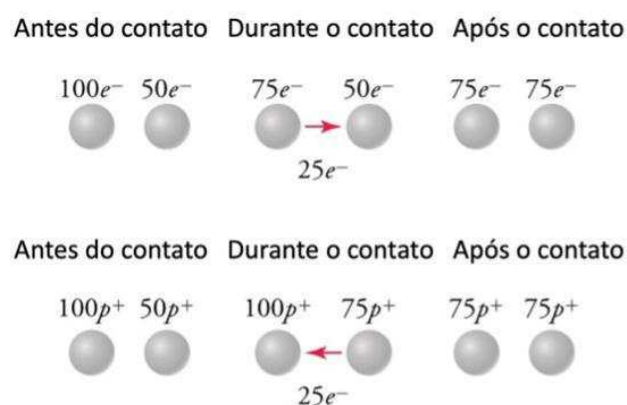
Nas aulas de física, o experimento é geralmente realizado com um bastão de vidro ou plástico, atritado com um pano de seda. Nesse caso, elétrons são transferidos do bastão, que fica positivo, para o pano, que fica negativo. Você pode fazer outro experimento, de modo mais simples. Coloque pequenos pedaços de papel sobre uma mesa. Depois use um rolo de filmes de PVC, desses usados para embalar comida. Puxe uma ponta do filme e

aproxime dos pedaços de papel. Alguns desses papéis serão atraídos e grudarão no filme. O experimento é muito simples, mas a explicação do fenômeno é muito complexa. Mesmo depois de mais de 2600 anos de sua descoberta, ainda não há consenso na comunidade científica sobre sua explicação.

No caso dos materiais condutores, a situação é mais simples e mais interessante para a nossa disciplina. Já vimos acima que, diferentemente dos isolantes, nos condutores existem muitos elétrons que podem se mover livremente. E, também como sabemos, em condições normais os materiais são eletricamente neutros. Ou seja, a quantidade total de prótons e elétrons é a mesma. Então, o que acontece quando duas peças condutoras são colocadas em contato? Eles passam a formar uma única peça condutora. Se uma das peças estiver carregada, ou as duas, o que vai ocorrer é a redistribuição de cargas entre as peças, de modo que a quantidade total de carga permaneça a mesma. Isso é o que se chama de conservação da carga. Mais adiante usaremos essa ideia em algumas questões com circuitos elétricos.

A ilustração mostrada na Figura 4.8, adaptada da Texas Gateway², é ótima para explicar o fenômeno. A transferência de carga depende das dimensões dos materiais, mas, para simplificar, vamos considerar que as esferas têm as mesmas dimensões.

Figura 4.8 – Ilustração do processo de transferências de elétrons entre dois condutores em contato.



No primeiro caso, uma esfera tem 100 elétrons, enquanto a outra tem 50 elétrons. Portanto, no final do processo as duas esferas deverão conter no total 150 elétrons. Durante o contato, a primeira esfera fornece 25 elétrons para segunda. Quando todos os elétrons se distribuírem nas duas esferas, teremos o equilíbrio eletrostático, com os elétrons ocupando

²<https://www.texasgateway.org/resource/181-electrical-charges-conservation-charge-and-transfer-charge>.

as duas superfícies. Quando as esferas forem separadas, cada uma ficará com 75 elétrons. No segundo caso, as esferas estão com cargas positivas. A segunda esfera transfere 25 elétrons para a primeira. No final do processo, quando elas forem separadas, ambas ficarão com 75 prótons. Se as esferas tiverem cargas de sinais contrários, o procedimento é similar. Soma-se algebricamente as duas e divide-se o total em duas partes.

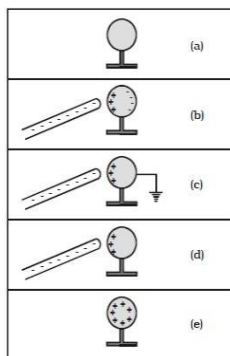
Para calcular as cargas elétricas dos exemplos acima, basta multiplicar o número de elétrons ou de prótons, pelo valor da carga elementar, que é a carga do elétron ou do próton: $1,6 \times 10^{-19}$ C. Essa unidade de carga elétrica é Coulomb.

Mais adiante, quando estudarmos o campo elétrico, veremos que essas cargas se distribuem ao longo das superfícies dos condutores com uma única finalidade: deixar o condutor em equilíbrio eletrostático, ou seja, sem grandes movimentos de cargas. Isso só será possível se o campo elétrico no seu interior for nulo.

4.2.1.3 Processos de eletrização por indução em condutores

A Figura 4.9 ilustra esse processo. Como os condutores possuem muitos elétrons livres, que se movimenta facilmente, qualquer campo elétrico, por pequeno que seja, leva-os a se deslocarem ao longo do condutor. Está aí a fonte da eletrização por indução em condutores. Na Figura 4.9, um bastão negativamente carregado aproxima-se de uma esfera eletricamente neutra. O bastão pode ser condutor ou isolante, mas a esfera tem que ser condutora. O campo elétrico criado pelo excesso de cargas negativas no bastão fará com que elétrons livres na esfera desloquem-se para o lado mais afastado do bastão (Figura 4.9b). A parte da esfera mais próxima do bastão ficará com um excesso de cargas positivas. Se a esfera for ligada à terra, o excesso de elétrons livres escoará para a terra, deixando um excesso de carga positiva na esfera. Se o bastão for afastado para muito longe, elétrons livres ainda existentes na esfera se redistribuirão na superfície da esfera, fazendo com que o excesso de carga positiva fique homogeneamente distribuída na superfície. Preste atenção: não são as cargas positivas que se distribuirão ao longo da superfície da esfera.

Figura 4.9 – Ilustração do processo de eletrização por indução em condutores. (https://www.brain-kart.com/article/Electrostatic-induction_529/) Acessado em: 1/1/2025



4.2.1.4 Campo elétrico e força elétrica

Acabamos de analisar uma questão na qual fizemos uso do conceito de campo elétrico, antes de o conhecê-lo. É natural, portanto, que a explicação fique dúbia. Vejamos agora como torná-la mais clara.

Para facilitar o tratamento matemático dos conceitos de campo e potencial, é conveniente fazer cálculos com cargas pontuais, em vez de trabalhar com materiais reais, macroscópicos, como um pedaço de fio. E, também para exercitar, convém trabalhar com cargas pontuais de diferentes valores, não exatamente um múltiplo da carga do elétron, que é $1,6 \times 10^{-19}$ C, embora na natureza todas as cargas elétricas sejam iguais a um múltiplo da carga do elétron. Mais importante do que isso, podemos fazer cálculos algébricos, com letras em lugar de números.

Em praticamente todos os livros didáticos, incluindo o Halliday-Resnick, o livro mais usado em cursos universitários, a interação entre cargas elétricas é inicialmente representada pela força entre elas, matematicamente expressa pela lei de Coulomb. Trata-se do que se chama de ação à distância. A lei de Coulomb permite calcular as forças que as cargas exercem uma sobre as outras, mas nada diz sobre como isso se processa. Foi nos anos 1830 que Michael Faraday introduziu o conceito de campo elétrico, campo magnético e campo eletromagnético, que intermedia a interação entre cargas elétricas. Ou seja, uma carga cria um campo à sua volta, e esse campo exerce força sobre uma carga que se encontra na região. No início do século 20, com a sua teoria da relatividade geral, Einstein consagrou a ideia de campo em detrimento da interação à distância. Do ponto de vista ausubeliano, consideramos mais importante iniciar o estudo das interações elétricas pela introdução do conceito de campo, para depois introduzir a lei de Coulomb. Formalmente não há qualquer impedimento para isso. Aliás, olhando o eletromagnetismo sob uma perspectiva mais avançada, nota-se

que as quatro equações de Maxwell não envolvem forças explicitamente. Como consta na seção 37.2 do Halliday-Resnick (HALLIDAY; RESNICK, 1981):

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{q}{\epsilon_0}. \quad (4.1)$$

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0. \quad (4.2)$$

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d\Phi_B}{dt}. \quad (4.3)$$

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 i. \quad (4.4)$$

A Equação 4.1 é a lei de Gauss para a eletricidade. Matematicamente ela expressa a integral de superfície, ao longo de uma superfície fechada, que engloba a carga q . Ou seja, ela permite calcular o campo de uma carga, ao longo da superfície que a engloba. A Equação 4.2 é a lei de Gauss para o magnetismo. Ela expressa o resultado importante de que não há monopolo magnético. A Equação 4.3 expressa a integral de linha do campo elétrico através de um circuito fechado, e é conhecida como lei de Faraday-Lenz, enquanto a Equação 4.4 que expressa o mesmo tipo de integral de linha com o campo magnético, é conhecida como lei de Ampère.

Vamos explorar a simetria dessas equações, seguindo a seção 37.2 do Halliday-Resnick. Por exemplo, se a variação do fluxo magnético (Equação 4.3) origina um campo elétrico, será que a variação do fluxo elétrico não poderia originar um campo magnético? Neste caso, a Equação 4.4 seria

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = -\frac{d\Phi_E}{dt}. \quad (4.5)$$

Há dois erros nessa equação. O primeiro é que a experiência mostra que o sinal deve ser positivo. O segundo erro é dimensional. O membro da esquerda tem unidade $\mu_0 i$, enquanto o da direita tem unidade V/ϵ_0 . Portanto, a Equação 4.4 deveria ser

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt}. \quad (4.6)$$

É a primeira vez que a constante de permissividade, ϵ_0 , aparece na mesma equação com a permeabilidade magnética, μ_0 . Antes, a constante de permissividade relacionava-se com fenômenos elétricos, enquanto a permeabilidade relacionava-se com fenômenos magnéticos. Portanto, essa equação simboliza o surgimento do eletromagnetismo. Substituindo os valores da permeabilidade magnética e da permissividade no sistema SI, obtém-se:

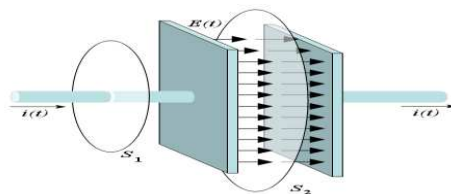
$$\sqrt{\frac{1}{\mu_0 \varepsilon_0}} = \sqrt{\frac{1}{1,26 \times 10^{-6} \times 8,85 \times 10^{-12}}} = 3 \times 10^8 = \text{velocidade da luz no vácuo}.$$

Portanto, a Equação 4.6 representa a inclusão da ótica na fenomenologia do eletromagnetismo. As equações (4.4) e (4.6) representam duas formas de produção de um campo magnético. Por meio de uma corrente elétrica (lei de Ampère), e por meio da variação de um campo elétrico. Resulta daí a lei de Ampère-Maxwell expressa pela junção dessas duas equações.

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 i + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt}. \quad (4.7)$$

Um esquema de realização experimental para analisar a Equação 4.6 é apresentada na Figura 4.10. O campo E surge quando há uma corrente, i , carregando o capacitor. Essa corrente que produzirá um campo magnético de acordo com a lei de Ampère (Equação 4.4), de repente *desaparece* entre as placas do capacitor, aparecendo depois da outra placa.

Figura 4.10 – Campo variável em um capacitor sendo carregado por uma corrente i . (https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Corrente_di_spostamento.png) Acessado em 15/06/2025



Para onde foi a corrente que desapareceu? Ela aparece entre as placas como *corrente de deslocamento*, dada pela expressão:

$$i_d = \varepsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt}. \quad (4.8)$$

Portanto, a lei de Ampère-Maxwell pode ser escrita assim:

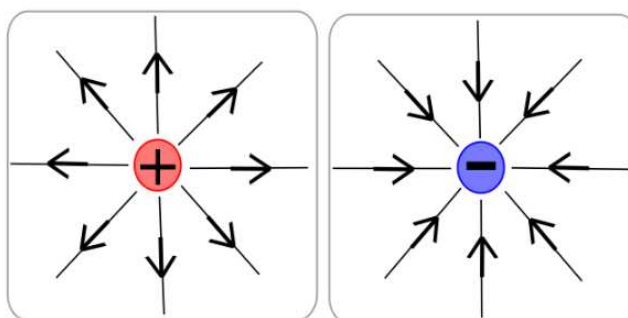
$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 (i + i_d). \quad (4.9)$$

Voltemos agora a uma abordagem mais próxima do nível do produto educacional. Isto é, uma abordagem qualitativa que expresse o formalismo matemático apresentado acima.

Como foi já foi dito, o processo de interação entre cargas é assim. Primeiro a carga cria em volta de si seu campo elétrico. Se ela estiver em movimento também cria seu campo magnético, mas isso é outra história. Vamos ficar apenas com o campo elétrico. O campo

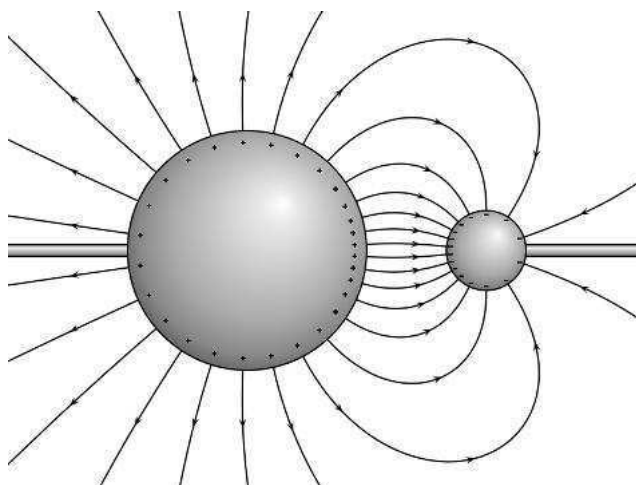
elétrico é visualmente representado pelas suas linhas de campo, ou linhas de força. Se a carga for positiva (negativa), as linhas de força apontam para fora (dentro) da carga. Se houver outra carga nas proximidades da primeira, o campo desta atua sobre a segunda, exercendo uma força dada pela lei de Coulomb. É claro que por simetria, a segunda carga também cria seu campo, que exercerá uma força igual e de sentido contrário sobre a primeira carga. Cargas pontuais isoladas, ou esfericamente simétricas, têm linhas de campo homogeneamente distribuídas, como ilustra a Figura 4.11.

Figura 4.11 – Linhas de campo de uma carga positiva (apontam para fora) e de uma carga negativa (apontam para dentro). (https://en.wikipedia.org/wiki/Field_line#/media/File:Electric_Field_Lines.svg) Acessado em 1/1/2025



Se essas cargas estiverem próximas uma da outra, cada uma distorcerá as linhas da outra, como ilustra a Figura 4.12.

Figura 4.12 – Linhas de campo elétrico de duas esferas metálicas carregadas. (https://commons.wikimedia.org/wiki/File:VFpt_metal_balls_large_small.svg). Acessado em 1/1/2025



Não esqueça que as figuras 4.11 e 4.12 são apenas representações esquemáticas do campo elétrico. Essas figuras permitem fazer uma avaliação qualitativa do campo nos

diferentes pontos do espaço, uma vez que o valor do campo é proporcional à densidade de linhas de campo. Por exemplo, na Figura 4.12 o campo entre as cargas é mais intenso do que à esquerda da carga positiva ou à direita da carga negativa. Mas, exatamente quanto vale o campo em determinado ponto? Ou seja, quanto vale o campo a uma distância r de uma carga Q ?

É possível mostrar experimentalmente que o valor do campo é dado por:

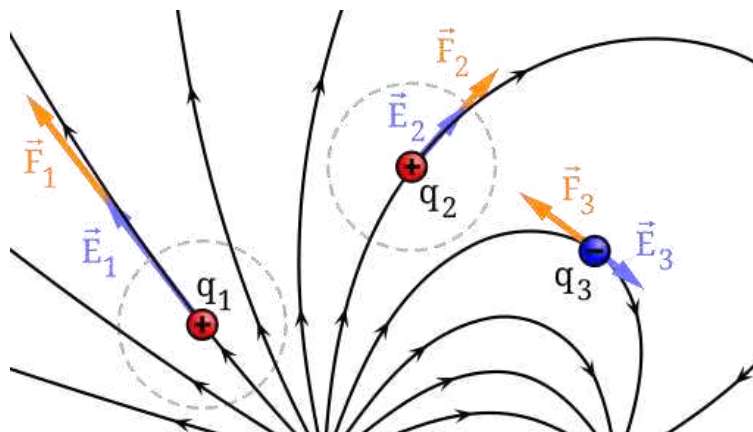
$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2} = k \frac{Q}{r^2}. \quad (4.10)$$

Nesta fórmula usamos a definição da constante dielétrica, $k = 1/4\pi\epsilon_0$, que será usada em todas as fórmulas daqui em diante. Seu valor é, aproximadamente, $k=9 \times 10^9 \text{ Nm}^2\text{C}^{-2}$.

Assim como a força (qualquer que seja sua natureza) e o campo gravitacional, o campo elétrico tem uma direção e um sentido bem determinados. Ou seja, além do valor calculado pela Equação 4.10, que representa o módulo do campo, este tem uma direção e um sentido. As grandezas físicas que além de um valor escalar, ou módulo, precisam de uma direção e um sentido para serem totalmente caracterizadas são denominadas de grandezas vetoriais. Portanto, assim como a força, o campo elétrico é uma grandeza vetorial, ou simplesmente um vetor.

A Figura 4.13 ilustra várias situações da relação entre os vetores força e campo.

Figura 4.13 – Linhas de campo elétrico de duas esferas metálicas carregadas. (<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Electric-field-lines.svg>). Acessado em 1/1/2025



Assim como o vetor força elétrica, o vetor campo elétrico é sempre tangente à linha de campo, e como já foi dito, é o campo elétrico que imprime força a uma carga com a qual

ele interage. Voltemos agora à rota didática tradicional, ou seja, vamos mostrar a força a partir da lei de Coulomb e depois mostrar a relação entre F e E .

Cinquenta anos antes de Faraday criar o conceito de campo elétrico, Charles Augustin de Coulomb descobriu a lei que ficou conhecida como lei de Coulomb, que fornece a força entre duas cargas elétricas, q e Q , a uma distância r entre elas:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qQ}{r^2} = k \frac{qQ}{r^2} \quad (4.11)$$

Substituindo (4.10) em (4.11), obtém-se

$$F = qE \quad (4.12)$$

A Equação 4.12 expressa o conceito de força por intermédio do campo. Ou seja, a carga Q cria um campo elétrico E , que exerce a força qE sobre a carga q .

Vejam os casos das cargas q_1 (positiva) e q_3 na Figura 4.13. Quaisquer que sejam os sinais das cargas, o campo e força têm a mesma direção, tangente à linha de campo. No entanto, utilizando as equações 4.10 e 4.12, mostra-se que no caso da carga positiva, campo e força têm sentidos iguais, enquanto no caso da carga negativa os sentidos são contrários.

4.2.1.5 Potencial elétrico

O conceito de potencial é muito complexo, razão pela qual os livros didáticos do ensino médio tentam abordar a eletricidade explorando a corrente elétrica como se ela fosse um efeito primário. Não é. A corrente é consequência da existência do potencial, ou, mais precisamente, da diferença de potencial. A propriedade elétrica primária é a carga elétrica, que produz o campo elétrico e o potencial elétrico, mas o conceito de potencial é tão importante quanto conceitualmente difícil de entender.

Na linguagem coloquial, o termo potencial é frequentemente usado para se referir à capacidade que uma pessoa tem para realizar algo, para atingir determinada meta. Sobre um bom aluno no colégio diz-se que tem potencial para ter sucesso na vida profissional. Essa capacidade de realizar algo na linguagem cotidiana, de fato tem a ver com a ideia da energia potencial como a capacidade de realizar trabalho. E praticamente todos os livros didáticos abordam o potencial elétrico a partir da sua relação com a energia potencial, o que está correto. Foi assim que a ideia do potencial elétrico surgiu (FURIÓ, C.; GUIASOLA, J., 1998), mas do ponto de vista conceitual mais fundamental, o potencial tem a ver com o campo elétrico. A partir da relação do potencial com o campo, chega-se à energia potencial.

Por causa da dificuldade matemática para estudar este conceito detalhadamente, podemos definir, sem provar, o potencial a uma distância, r , de uma carga Q :

$$V = k \frac{Q}{r} \quad (4.13)$$

Substituindo a equação (4.13) em (4.10), obtém-se a relação entre campo e potencial:

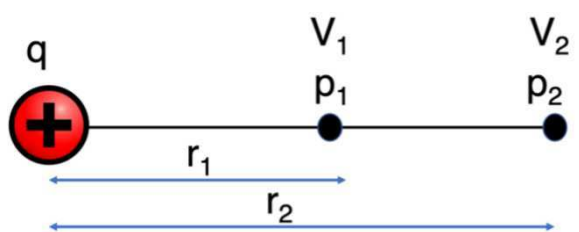
$$V = Er \quad (4.14)$$

Antes de abordarmos as relações matemáticas do conceito de potencial envolvendo força e energia, convém aprofundarmos qualitativamente este importante conceito da eletricidade. Essa discussão qualitativa vai ajudar os alunos a compreenderem melhor muitos dos exercícios que terão que fazer nessa disciplina, no exame do ENEM, e também em vestibulares.

Mais adiante veremos noções básicas de circuitos elétricos simples. Veremos que a corrente elétrica em um circuito resulta da ação de uma *força eletromotriz* produzida por uma fonte de voltagem, por exemplo, uma pilha dessas que usamos nos rádios portáteis. Em praticamente todos os livros didáticos, os termos ou expressões: *força eletromotriz*, ou *fem*, *voltagem*, *queda de potencial* ou *diferença de potencial*, são usados indistintamente, como se fossem a mesma coisa. Mas, isso não é bem assim.

Para entender isso direitinho, precisamos ter em mente que todos os fenômenos elétricos decorrem das cargas elétricas. Se elas estão imóveis, temos fenômenos eletrostáticos. Se elas se movem, teremos a eletrodinâmica. Vamos fazer uns cálculos simples com uma carga positiva, $+q$, em repouso, como ilustra a Figura 4.14.

Figura 4.14 – Ilustração esquemática para o cálculo do potencial de uma carga puntiforme.
Fonte própria



Usando a Equação 4.13, obtém-se:

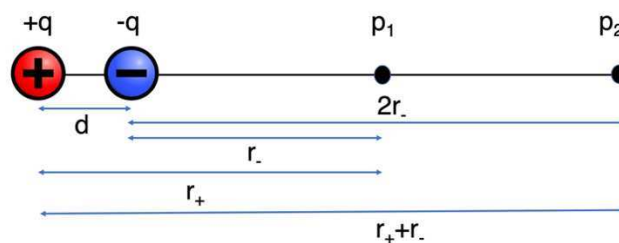
$$V_1 = k \frac{q}{r_1}, \quad (4.15)$$

$$V_2 = k \frac{q}{r_2}. \quad (4.16)$$

Como r_2 é maior do que r_1 , o potencial V_2 é menor do que V_1 . Portanto, se uma carga positiva for colocada em P_1 , ela se deslocará em direção a P_2 . O inverso ocorre com uma carga negativa. Se ela for colocada em P_2 , se deslocará em direção a P_1 . Esse resultado é muito importante para o caso de circuitos elétricos. Os elétrons sempre se deslocam do potencial menor para o maior.

Vejamos agora o caso de um dipolo elétrico, formado por uma carga positiva e outra negativa, separadas por uma distância d (Figura 4.15). Essa estrutura é muito importante no estudo do eletromagnetismo.

Figura 4.15 – Diferença de potencial devido a um dipolo elétrico em dois pontos. Fonte própria



Para calcular o potencial de um dipolo, devemos ter em mente que o potencial de um conjunto de cargas é igual à soma dos potenciais das cargas individuais. Portanto, o potencial no ponto p_1 será

$$V(p_1) = V_+(p_1) + V_-(p_1) = kq \left(\frac{1}{r_+} - \frac{1}{r_-} \right) = kq \frac{r_- - r_+}{r_+ r_-} < 0 \quad (4.17)$$

$$V(p_2) = V_+(p_2) + V_-(p_2) = kq \left(\frac{1}{r_++} - \frac{1}{r_{--}} \right) = kq \frac{r_{--} - r_++}{2r_- r_++ + 2r_-^2} < 0 \quad (4.18)$$

Para facilitar a interpretação, vamos supor que $r_-=5$ m e $r_+=6$ m. Substituindo esses valores em (4.17) e (4.18), obtém-se:

$$V(p_1) = -\frac{kq}{30}, \quad (4.19)$$

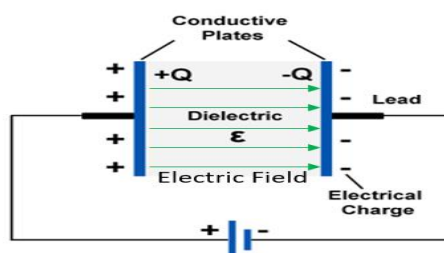
$$V(p_2) = -\frac{kq}{110}. \quad (4.20)$$

Portanto, $V(p_2) > V(p_1)$. Um elétron colocado naquela linha vai de p_1 para p_2 . Essa conclusão também é facilmente obtida apenas analisando a lei de Coulomb. No ponto p_1 , a força da

carga negativa é maior do que a da carga positiva. Portanto, a força resultante aponta na direção de p_2 .

Outro resultado importante, e que tem a ver com circuitos elétricos, é que a separação de cargas provoca diferença de potencial ao longo de uma linha que une as cargas. Para ilustrar essa afirmação, suponha duas placas metálicas paralelas separadas por uma determinada distância (Figura 4.16).

Figura 4.16 – Desenho esquemático de um capacitor. (<https://www.nde-ed.org/Physics/Electricity/capacitance.xhtml>) Acessado em 15/06/2025



Por meio de algum processo, que não interessa definir agora, elétrons são extraídos de uma placa, que ficará positiva, e colocados na outra, que ficará negativa. Agora vamos conectar as duas placas usando um interruptor. Enquanto o interruptor estiver aberto, a situação é essa da Figura 4.16. As cargas continuarão imóveis nas placas e haverá uma diferença de potencial entre quaisquer dois pontos do circuito.

Quando o interruptor for fechado, cargas negativas saem da placa em direção à placa positiva. Haverá uma corrente elétrica até que todo o excesso de cargas negativas se junte ao de cargas positivas. Nesse momento não haverá mais excesso de carga livre. Não haverá mais diferença de potencial, e a corrente cessa. Esse conjunto de placas paralelas é denominado capacitor. Trata-se de um dispositivo muitíssimo importante para qualquer equipamento eletrônico.

Atenção, a existência da corrente não significa que a carga negativa saia da placa e vá até a placa oposta. Na verdade, a carga negativa tende a fazer isso, mas assim que ela se movimenta outra carga negativa à sua frente segue a rota, que por sua vez é substituída por outra carga mais adiante, até que uma carga negativa próxima da placa positiva seja absorvida pela placa e neutralize uma carga positiva.

Essa situação simples que acabamos de analisar, tem a ver com uma situação prática, importante e muito complexa. Trata-se da força eletromotriz de uma pilha voltaica, elemento essencial para o funcionamento de circuitos simples que analisaremos na seção 4.2.2.

Tudo o que foi visto acima é fruto da eletrostática: cargas de sinais contrários se atraem, e cargas de sinais iguais se repelem. No capacitor, isolado, as cargas não se atraem porque há um meio dielétrico entre elas. Basta colocar um fio entre as placas do capacitor, para as cargas negativas se moverem na direção da placa positiva. Agora, uma situação bastante diferente ocorre no caso das pilhas, cujo funcionamento foi descoberto por Alessandro Volta no final do século 18. Em todas essas pilhas, reações químicas no seu interior provocam a separação de cargas. Num dos polos se concentram cargas negativas, e no outro polo se concentram cargas positivas. Uma situação muito parecida com essas do capacitor carregado que acabamos de analisar. Todavia, no caso das pilhas há uma substância no seu interior que continua produzindo a separação de cargas. Quando essa substância for totalmente consumida, a pilha deixará de funcionar. Enquanto a pilha estiver em funcionamento, as cargas continuam separadas, mesmo que sua união seja possível. Volta denominou *força eletromotriz* a ação que faz as cargas ficarem separadas. Portanto, o potencial que resulta dessa situação não é um potencial eletrostático como o que vimos até agora, é uma espécie de potencial químico, algo que converte energia química em energia elétrica.

Em um circuito elétrico temos potenciais vindos da eletrostática e potenciais vindo de reações eletroquímicas. Mas, daqui em diante vamos nos fixar apenas nos potenciais eletrostáticos. Quando trabalhamos com a eletrodinâmica, para a qual precisamos de uma bateria, podemos simplesmente considerá-la como uma *caixa preta*, que fornece uma voltagem fixa. No caso das pilhas comerciais, usualmente essa voltagem é de 1,5 volt. Na prática, para estudar fenômenos eletrodinâmicos não há necessidade de saber como a bateria fornece energia para produzir o movimento de elétrons nos circuitos.

4.2.1.6 Trabalho e energia

No início da seção 4.2.1.5 afirmamos que o potencial tem a ver com energia potencial, que tem a ver com a capacidade de realizar trabalho. Nesta seção vamos formalizar essa ideia. É interessante destacar que o princípio que está por trás disso é o mesmo no caso gravitacional e no caso nuclear, embora o tratamento matemático deste último seja bem mais complicado. Portanto, vamos abordar a relação entre força elétrica, campo elétrico e energia elétrica partindo do que aprendemos na mecânica newtoniana.

Pela lei da gravitação universal de Newton, dois corpos, m e M , separados por uma distância r , atraem-se com uma força dada por:

$$F = G \frac{mM}{r^2}, \quad (4.21)$$

onde G é a constante gravitacional. Veja que esta fórmula fica igual à (4.11) se substituirmos G por k , m por q e M por Q . Podemos dizer que elas são formalmente iguais. Mais importante do que essa semelhança, é o fato de que as principais propriedades físicas resultantes de (4.21) podem ser estendidas para a lei de Coulomb. Essas forças são conhecidas como forças conservativas porque levam ao teorema da conservação da energia (energia cinética + energia potencial) e ao teorema do trabalho-energia.

Para um sistema conservativo, regido pelas equações (4.11) e (4.21), a energia total é sempre conservada. Ou seja, a soma da variação da energia cinética, ΔE_c , com a variação da energia potencial, ΔE_p , é zero:

$$\Delta E_c + \Delta E_p = 0 \rightarrow \Delta E_c = -\Delta E_p. \quad (4.22)$$

Por outro lado, o trabalho, T , realizado sobre uma partícula num sistema conservativo é sempre igual à variação da energia cinética da partícula:

$$T = \Delta E_c = -\Delta E_p. \quad (4.23)$$

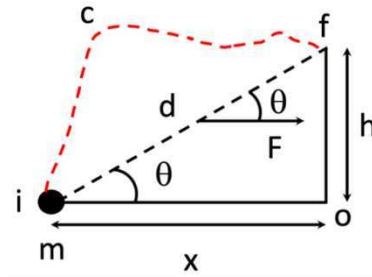
Precisamos agora resolver um problema que você deve ter resolvido quando estudou mecânica. O problema é calcular o trabalho para levar um objeto de massa m , de um ponto i até um ponto f , como ilustrado na figura 4.17. Isso pode ser feito levando o objeto pelo caminho iof , ou pelo caminho d , ou pelo caminho c , ou por qualquer caminho que comece em i e termine em f .

Para resolver o problema precisamos saber como calcular o trabalho de uma força, ao longo de uma trajetória qualquer, entre i e f . No capítulo 7 do primeiro volume do Halliday-Resnick (RESNICK; HALLIDAY, 1984) ficamos sabendo que se a força é variável, esse trabalho é dado pela fórmula

$$T_{if} = \int_i^f F(x)dx. \quad (4.24)$$

Na verdade, não necessitamos recorrer à fórmula (4.24) para resolver o problema ilustrado na Figura 4.17, se considerarmos que a força é constante e paralela ao eixo x . Neste caso,

Figura 4.17 – O trabalho realizado pela força F para levar um objeto do ponto i até o ponto f independe do caminho utilizado. Autoria Própria



O trabalho para levar a partícula de i até o ponto o é:

$$T_x = Fx. \quad (4.25)$$

O trabalho para levar a partícula de o até o ponto f é nulo, porque o caminho é perpendicular à direção da força. Portanto, o trabalho para levar a partícula pelo caminho iof é dado por (4.24).

Pelo caminho d , o trabalho será:

$$T_d = (F \cos \theta) d = \left(F \frac{x}{d} \right) d = Fx. \quad (4.26)$$

Como (4.25) é igual a (4.26), conclui-se que o trabalho pelo caminho iof é igual ao trabalho pelo caminho d .

Mesmo com F constante, para calcular o trabalho pelo caminho c é necessário o uso da fórmula (4.24), cujo tratamento está acima do nosso escopo. Mas, podemos enunciar o resultado geral: em sistemas conservativos, o trabalho para levar uma partícula de um ponto a outro independe do caminho entre esses dois pontos.

Agora temos tudo para relacionar campo elétrico, potencial elétrico e energia potencial. Para evitar confusão, vamos denominar energia potencial pela letra U , em vez de E_p . Vamos reescrever a equação (4.23):

$$U_p(f) - U_p(i) = -T_{if}, \quad (4.27)$$

onde, $U_p(i)$ é a energia potencial no ponto i , $U_p(f)$ é a energia potencial no ponto f , e T_{if} é o trabalho necessário para levar uma carga elétrica do ponto i até o ponto f . É importante chamar a atenção, mais uma vez, para o seguinte fato: o trabalho é sempre a diferença das energias nos dois pontos do trajeto, o inicial e o final. Isso significa que é possível definir arbitrariamente o valor da energia potencial em algum ponto como referência. No caso

gravitacional costuma-se definir a energia potencial na superfície da Terra como sendo nula. No caso eletrostático é costume usar um ponto no infinito como tendo energia potencial eletrostática nula. Ou seja,

$$U_p(f) - U_p(\infty) = -T_{if} \rightarrow U_p(f) = -T_{\infty}. \quad (4.28)$$

Portanto, dada uma configuração de cargas e uma carga de prova, q_0 , a energia potencial dessa configuração é o negativo do trabalho realizado pelo campo da configuração para trazer a carga de prova do infinito até o ponto em que ela se encontra.

A situação que discutimos até agora é assim: uma carga elétrica cria um campo elétrico. A intensidade desse campo decresce com o aumento da distância à carga, conforme a Equação 4.10. Se uma carga, q , for colocada na zona de ação do campo, ela será submetida a uma força dada pela fórmula (4.12). Essa força realizará trabalho sobre a carga levando-a de um ponto a outro, conforme a fórmula (4.28).

Mas, em vez de trabalhar com energia potencial, é melhor trabalhar com potencial, assim definido:

$$V = \frac{U}{q_0} = -\frac{T}{q_0} \rightarrow V_f - V_i = -\frac{T_{if}}{q_0}. \quad (4.29)$$

O trabalho realizado por uma força F , do ponto i ao ponto f , ao longo de um percurso x é dado por (4.25):

$$T_{if} = Fx = q_0Ex \quad (4.30)$$

Substituindo (4.30) em (4.29), obtém-se a expressão para a diferença de potencial (ddp) entre dois pontos, i e f , em função do campo elétrico:

$$V_f - V_i = -Ex \quad (4.31)$$

Embora o conceito de potencial seja muito importante, é a diferença de potencial que interessa na prática, porque é a ddp que gera energia que resulta em movimento de cargas. As correntes elétricas surgem por causa da ddp. Na linguagem usual, a ddp também é denominada simplesmente de voltagem. Ou seja, nos circuitos elétricos a voltagem é uma diferença de potencial. Podemos considerar a ddp, ou a voltagem, como o conceito primário, ou conceito fundamental no estudo dos circuitos elétricos.

Embora tudo se origine nas cargas e nos campos elétricos, na prática é a ddp o conceito fundamental no estudo dos circuitos elétricos.

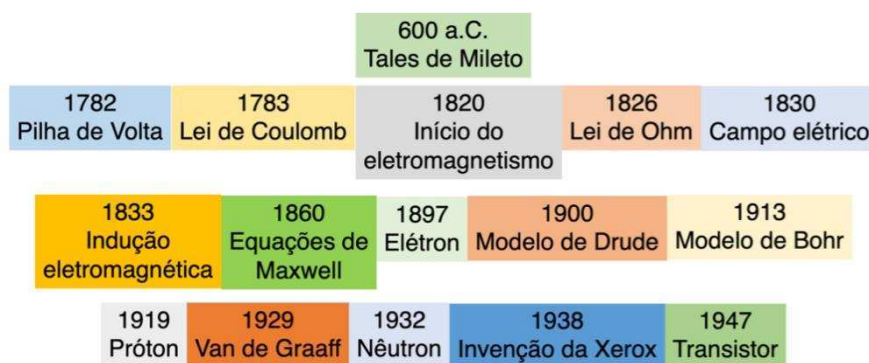
4.2.2 Eletrodinâmica no Cenário de Concepções Alternativas

4.2.2.1 Conceitos fundamentais

No ensino médio, a eletricidade pode ser dividida em três áreas principais: eletrostática, eletrodinâmica e eletromagnetismo. Embora o eletromagnetismo não seja o foco desta disciplina, é importante compreender sua relação com a eletrostática e a eletrodinâmica. Todos os fenômenos elétricos estão conectados aos conceitos abordados na eletrostática, sendo a carga elétrica o conceito fundamental. Vale reforçar: a carga elétrica gera um campo elétrico, que exerce força sobre outras cargas próximas. Essa força pode realizar trabalho, aumentando a energia cinética da carga. O movimento das cargas também pode ser entendido pela perspectiva do potencial elétrico, que está diretamente associado ao campo elétrico.

Quando essas cargas em movimento estão dentro de materiais condutores, podemos observar a corrente elétrica, o principal fenômeno da eletrodinâmica. Vamos explorar os detalhes e os métodos de medição nos processos envolvendo corrente elétrica. Antes disso, porém, é importante revisar a linha do tempo das principais descobertas da eletricidade, até chegarmos ao nosso conhecimento atual. Parte dessa história já foi abordada nas seções anteriores, outras serão aprofundadas nesta e na próxima seção.

Figura 4.18 – Linha do tempo dos principais eventos da eletricidade



Observe a linha do tempo. Entre as primeiras observações sistemáticas da eletrostática, realizadas por Tales de Mileto, e a formulação da primeira lei da eletricidade, proposta por Coulomb, passaram-se mais de dois mil anos. A primeira observação relacionada ao eletromagnetismo ocorreu na mesma época em que foi descoberta a principal lei da eletrodinâmica, a lei de Ohm. No entanto, foram necessários apenas 40 anos para que as leis do eletromagnetismo fossem plenamente desenvolvidas, o que aconteceu com a formulação

até que, em 1947, o transistor foi inventado, dando início à tecnologia eletrônica que alimenta todos os dispositivos digitais atuais (VILLANI et al., 2019).

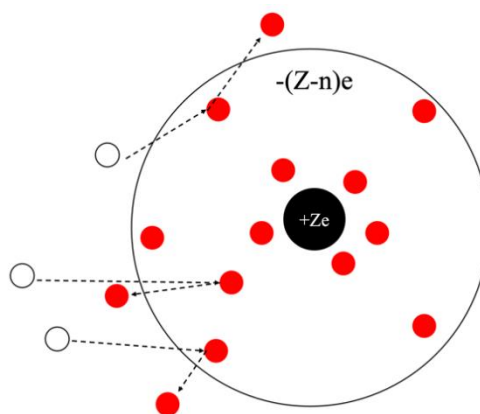
O modelo de Drude baseia-se no princípio de que os metais contêm uma grande quantidade de elétrons livres. Na visão de Drude, esses elétrons livres formam o que ele chamou de gás de elétrons. A partir dessa ideia, Drude utilizou conceitos da termodinâmica, especialmente da teoria cinética dos gases, para derivar os resultados da condutividade elétrica. Embora a matemática envolvida seja complexa e vá além do nível do ensino médio, é possível apresentar uma descrição qualitativa dos resultados obtidos por ele, facilitando o entendimento dos principais conceitos.

Microscopicamente, o comportamento das cargas elétricas envolve seu movimento sob a ação de campos elétricos e magnéticos, em diferentes ambientes. No entanto, vamos focar nos materiais metálicos condutores, como cobre, níquel e ferro, com destaque para o cobre, amplamente utilizado em circuitos elétricos. Ao analisar o movimento dos elétrons em resistores, consideramos a influência de um campo elétrico gerado por uma bateria. Esse cenário permite explorar os principais fenômenos da eletrodinâmica, como o comportamento da corrente elétrica e a resistência do material.

Geralmente o modelo microscópico de Drude é ilustrado em livros didáticos com a Figura 4.7. Na ausência de campo elétrico, os elétrons movimentam-se aleatoriamente, exatamente como uma molécula de gás. Quando se aproximam do íon positivo, formado pela carga nuclear (positiva) e os elétrons fortemente ligados ao núcleo, os elétrons livres são espalhados em todas as direções. É por isso que o movimento é aleatório. Mas, tem um problema com essa imagem. Como é que os elétrons livres são espalhados por um íon positivo? De acordo com a lei de Coulomb eles deveriam ser atraídos, e não repelidos pelo íon positivo. Para resolver esse enigma é preciso olhar o modelo de Drude mais detalhadamente.

A Figura 4.20 oferece uma visão mais realista do modelo de Drude, para o caso de um átomo que tem n elétrons livres. Ou seja, o íon positivo tem carga ne . Como se sabe do modelo de Bohr, os elétrons mais externos estão muito afastados do núcleo, de modo que um elétron livre ao se aproximar de um átomo, será repelido por um elétron externo com mais intensidade do que pelo núcleo. Dependendo do ângulo de impacto entre o elétron livre e o elétron mais afastado do núcleo, o primeiro será espalhado em várias direções. É por isso que se diz que no modelo de Drude os elétrons são espalhados aleatoriamente. Portanto, é a grande distância entre os elétrons e o núcleo atômico que explica o espalhamento dos elétrons nos materiais condutores.

Figura 4.20 – Representação esquemática do espalhamento eletrônico no modelo de Drude
 Fonte: (Próprio autor)



Observe na tabela periódica (Figura 4.19) que o cobre possui número atômico 29, ou seja, possui 29 elétrons em sua configuração eletrônica. No entanto, apenas um desses elétrons é considerado livre. Embora pareça pouco, esse único elétron livre por átomo é suficiente para tornar o cobre um dos melhores condutores de eletricidade. Em um simples pedaço de cobre, existem oitilhões de elétrons livres. Para ter uma ideia, um oitilhão equivale ao número 1 seguido de 27 zeros! É com essa imensa quantidade de elétrons livres que lidamos em um circuito elétrico simples.

Quando um campo elétrico é aplicado a um condutor, o movimento aleatório dos elétrons livres é modificado pela força do campo elétrico, fazendo com que esses elétrons adotem um movimento ordenado. Os espalhamentos (ou colisões) continuam ocorrendo, mas o campo elétrico gera uma direção preferencial para o movimento dos elétrons. Nos bons condutores, os elétrons livres se movem com mais facilidade em comparação aos maus condutores. Vale destacar que o movimento dos elétrons ocorre no sentido oposto ao do campo elétrico, conforme já explicado. Isso acontece porque os elétrons possuem carga negativa,

fazendo com que sua direção natural de movimento seja contrária à direção do campo elétrico, que aponta do positivo para o negativo.

Apesar de microscopicamente o movimento aparentar caótico, macroscopicamente há um movimento eletrônico efetivo no sentido contrário do campo elétrico. É esse movimento efetivo dos elétrons que dá origem à corrente elétrica.

A primeira evidência da existência de corrente elétrica surgiu no século 18, com a invenção da pilha de Volta. No entanto, a primeira investigação sistemática desse fenômeno ocorreu apenas por volta de 1820, quando André-Marie Ampère estudava a relação entre o sentido da corrente elétrica e o efeito magnético produzido em uma bússola. Em reconhecimento ao seu trabalho pioneiro, a unidade de corrente elétrica no Sistema Internacional de Unidades (SI) recebeu o nome de ampere (A), em sua homenagem.

A intensidade de corrente elétrica é definida como a quantidade de carga que atravessa a seção reta de um condutor, por unidade de tempo, isto é,

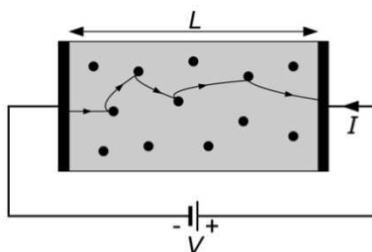
$$i = \frac{dq}{dt}, \quad (4.32)$$

sendo a quantidade de carga medida em coulombs (C), e o intervalo de tempo em segundos (s). Então $1 \text{ C/s} = 1 \text{ A}$.

Embora definida por uma equação muito simples, o conceito de corrente elétrica é muito complexo, causando confusão na mente de alunos de todos os níveis, do ensino médio ao universitário, e mesmo profissionais da eletricidade manifestam confusão conceitual em relação à corrente elétrica. Praticamente todos os livros didáticos contribuem para essa confusão.

A Figura 4.21 apresenta uma ilustração da corrente elétrica em um condutor de comprimento L , inspirada no modelo de Drude. Na imagem, os pontos pretos representam os íons positivos da rede cristalina, e o conceito de espalhamento eletrônico é sugerido pela interação dos elétrons livres com esses íons.

Figura 4.21 – Desenho típico encontrado em livros didáticos para ilustrar a corrente elétrica através de um resistor de comprimento L , alimentado por uma bateria com voltagem V . (https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Electron_flow_in_a_resistive_medium.svg) Acessado em 1/1/2025



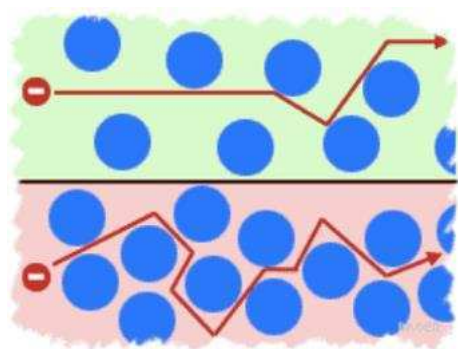
A figura 4.2.1 mostra dois tipos de corrente elétrica: Corrente convencional (I): Representa o fluxo de carga positiva, indo do polo positivo para o polo negativo da bateria. Corrente real: Corresponde ao movimento dos elétrons, que ocorre no sentido oposto, ou seja, do polo negativo para o polo positivo. Antes de 1897, ano da descoberta do elétron, não se sabia exatamente quem era o responsável pela corrente elétrica. Por quase um século, adotou-se a convenção de que a corrente fluía do polo positivo para o polo negativo, criando o conceito de corrente convencional. Mesmo após a descoberta do elétron e o reconhecimento de que são as cargas negativas que realmente se movem, a convenção do sentido da corrente foi mantida. Essa escolha prática evita confusões, principalmente porque muitos conceitos e leis elétricas já haviam sido estabelecidos com base na corrente convencional.

Essa imagem é fonte de muita confusão. Ela sugere que o elétron sai do polo negativo e vai até o polo positivo. Não é isso o que acontece. A explicação detalhada do que acontece requer conhecimentos de física e matemática que estão acima do que podemos tratar aqui.

4.2.2.2 Resistência, resistividade, condutividade e lei de Ohm

Para entendermos o funcionamento de circuitos elétricos, mesmo os mais simples, é necessária a apropriação desses conceitos. Na Figura 4.22, são ilustrados os movimentos de um elétron em um bom condutor (desenho superior) e em um mau condutor (desenho inferior). A figura sugere que no bom condutor o elétron se movimenta mais livremente, enquanto no mau condutor há mais obstáculos para o movimento eletrônico. Esse tipo de imagem, ou modelo, tem alguma coisa a ver com a realidade? Ou, o que faz um material ser bom ou mau condutor de eletricidade?

Figura 4.22 – Ilustração do movimento de elétrons no interior de um bom condutor (desenho superior) e no interior de um mau condutor (desenho inferior). (<https://loganandjoseph.weebly.com/ch-6---fields-and-forces4.html>) Acessado em 1/1/2025

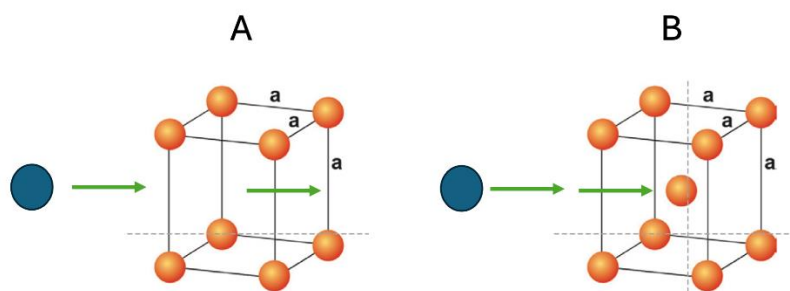


Só depois que todos os fundamentos clássicos da eletricidade foram descobertos é que essa pergunta pôde ser respondida. Por exemplo, quando Georg Simon Ohm descobriu a lei que leva seu nome, no início dos anos 1820, ele não tinha a menor ideia do que acontecia no interior dos condutores. Ele só conseguiu relacionar as propriedades macroscópicas nos seus experimentos, e conseguiu estabelecer a relação entre diferença de potencial, corrente elétrica e resistência. A resistência é uma propriedade que depende do material condutor e de sua geometria, ou seja, seu comprimento, l , e sua seção reta, ou área transversal, A . Daqui a pouco você vai ver a fórmula descoberta por Ohm, mas antes disso é interessante saber que propriedades microscópicas explicam a resistência de um material.

Vamos voltar ao modelo de Drude, cuja ilustração foi apresentada na Figura 4.7. Os íons positivos formam a estrutura cristalina do material. Nessa imagem, a estrutura é formada de fileiras de três íons, que se repetem ao longo do fio. Denominamos *célula unitária* essa parte da estrutura que se repete. Cada material tem uma determinada célula unitária. Os materiais que têm células unitárias similares formam determinados grupos de materiais. Não precisamos discutir esses detalhes aqui. Basta ficarmos com o modelo qualitativo de Drude.

Veja essas duas células unitárias na Figura 4.23. Na célula A, os íons formam quadrados, com um íon em cada vértice, enquanto na célula B eles formam hexágonos, com um íon no centro e seis íons nos vértices. As imagens sugerem que se um elétron penetra nessas estruturas cristalinas na mesma direção das setas, ele passa sem espalhamento na estrutura A, mas será espalhado na estrutura B. A situação real é muito mais complexa, mas esse modelo simples indica que materiais com estruturas cristalinas diferentes espalham elétrons diferentemente. Essas diferenças nos espalhamentos eletrônicos resultam em diferentes valores das resistências elétricas. Quando Ohm descobriu que diferentes metais apresentavam diferentes resistências, ele não sabia que isso tinha a ver com a estrutura atômica dos materiais (ATHERTON, T., 1986).

Figura 4.23 – Ilustração de uma célula unitária cúbica (A) e de uma hexagonal de corpo centrado (B). Montada a partir de (<https://canal.cecierj.edu.br/112019/b895f40932f58cc137c89b0a974144d9.pdf>)



Nos seus primeiros experimentos, Ohm mediu a corrente elétrica que passava em determinado fio condutor, quando ele aplicava uma diferença de potencial (ddp) entre seus extremos. Ele experimentou fios de vários metais: cobre, ferro, zinco, ouro, prata, platina, entre outros. Para todos eles o resultado foi muito similar. Em notação moderna, ele obteve a seguinte relação:

$$i = \frac{V}{R}, \quad (4.33)$$

onde, i é a corrente elétrica, V é a ddp, e R é uma constante que depende do material. A partir desse resultado, Ohm enunciou sua lei:

A corrente em um condutor é diretamente proporcional à ddp aplicada nas suas extremidades.

Em vários livros didáticos, a lei de Ohm é apresentada diferente do enunciado acima, mas todas elas resultam da Equação 4.33. Nessa equação, a constante de proporcionalidade é o inverso da resistência, que Ohm demonstrou como calcular:

A resistência de um condutor pode ser calculada dividindo o comprimento do condutor pelo produto da sua condutividade pela sua área transversal.

Em notação moderna, esse enunciado pode ser expresso por essa equação:

$$R = \frac{L}{\sigma A}, \quad (4.34)$$

onde, L é o comprimento do fio, A é sua seção transversal, e σ é a condutividade do material. É essa propriedade que tem a ver com a estrutura cristalina do material. O inverso da condutividade é a resistividade, outra propriedade do material, ou seja, $\frac{1}{\sigma} = \rho$. Nos livros didáticos, a Equação 4.34 é geralmente apresentada em termos da resistividade:

$$R = \rho \frac{L}{A}. \quad (4.35)$$

No sistema SI, a unidade de resistência é o ohm (Ω), da resistividade é ohm.m, e da condutividade é S/m, onde S é o símbolo de Siemens, uma unidade do Sistema Internacional de Unidades (SI) que mede a condutância elétrica. Equivale ao inverso do ohm, razão pela qual é conhecida como mho.

4.2.2.3 Circuitos elétricos simples

Praticamente tudo em nosso dia a dia depende de pelo menos um circuito elétrico, muitas vezes bastante complexo. Engenheiros eletricitas dedicam-se diariamente aos cálculos de correntes e diferenças de potencial nesses circuitos, visando desenvolver projetos e fabricar equipamentos. Mesmo para tarefas simples, são criados sistemas eletrônicos, como as placas utilizadas na extração de água de uma bombona caseira.

Para compreender o funcionamento de todos esses circuitos elétricos, é fundamental dominar a lei de Ohm, abordada na seção anterior, e ter uma noção básica das leis de Kirchhoff, que serão apresentadas aqui de maneira introdutória e qualitativa. Todo circuito elétrico precisa de, no mínimo, uma bateria ou fonte de tensão para funcionar, além de um ou mais interruptores. Esses interruptores, como o próprio nome indica, permitem interromper o funcionamento do circuito ou de partes dele. Sem eles, as lâmpadas de nossas casas estariam sempre acesas ou sempre apagadas. Um dos circuitos mais simples que podemos imaginar é composto apenas por uma bateria, um interruptor e uma lâmpada incandescente³.

Quando um interruptor é fechado, antes de uma lâmpada, ela acende, ou seja, emite luz. Mas, por que isso acontece? A maioria dos livros didáticos explica que isso se deve ao fato de que os elétrons na resistência da lâmpada atingem altas temperaturas⁴, o que os leva a emitir luz visível. Embora essa explicação esteja parcialmente correta, ela não conta toda a história. Afinal, por que o aumento da temperatura faz com que a lâmpada emita luz visível? Pouco depois da descoberta do elétron, em 1897, Joseph Larmor constatou que uma partícula carregada em movimento emite luz, cuja frequência é proporcional à sua velocidade. Além disso, a temperatura de um corpo está diretamente relacionada à velocidade das partículas atômicas que o compõem. Essas descobertas ajudam a fundamentar o que é dito

³ Texto similar a este encontra-se no texto ausubeliano discutido com os alunos durante a intervenção didática para aplicação do produto. Lá, o texto é amplamente acompanhado por desenhos ilustrativos, que não usaremos aqui.

⁴ Isso vale para o caso de lâmpadas incandescentes e fluorescentes. No caso das modernas lâmpadas LED o mecanismo é outro, bem mais complicado.

nos livros didáticos: os materiais condutores emitem luz devido às altas temperaturas geradas pela passagem da corrente elétrica.

A repetição de ideias, conceitos e leis já abordados ao descrevermos o fenômeno da condutividade elétrica em circuitos simples é praticamente inevitável. Na verdade, do ponto de vista didático, essa repetição é benéfica, pois contribui para a melhor fixação e compreensão dos conceitos trabalhados. Quando o interruptor (ou chave) é acionado, o campo elétrico gerado pela bateria começa a atuar nas cargas elétricas presentes nos condutores do circuito. Assim que um elétron sai do polo negativo da bateria, com a velocidade da luz outro elétron entra pelo polo positivo. Ou seja, isso não significa que o mesmo elétron que saiu do polo negativo é o que chega ao polo positivo. O importante é que a quantidade de elétrons que sai do polo negativo é igual à quantidade que entra no polo positivo, evidenciando a conservação da carga elétrica no circuito. Além disso, o mesmo princípio se aplica à corrente elétrica: ela também é conservada. Em outras palavras, não há desaparecimento de carga nem consumo de corrente elétrica no circuito. A corrente elétrica se mantém constante ao longo de todo o circuito, reforçando o conceito de conservação.

O campo elétrico atua em TODAS as cargas, mas apenas os elétrons livres se deslocam em uma distância razoavelmente longa.

Então, a corrente que sai da bateria é igual à que entra. A corrente sai da bateria por causa do campo elétrico produzido por ela. A bateria não é fonte de corrente, ela é fonte de tensão, ou de potencial, ou de força eletromotriz. Tudo isso é produzido pelo campo elétrico.

Cada bateria possui uma força eletromotriz (fem) específica, determinada pelo seu processo de fabricação. As pilhas comuns utilizadas em aparelhos domésticos, por exemplo, apresentam forças eletromotrizes que variam entre 1,5 V e 9 V. Com o uso, o material responsável pela geração da força eletromotriz é gradualmente consumido. Quando esse material se esgota, a pilha não consegue mais fornecer a tensão necessária para o funcionamento dos dispositivos, levando à sua substituição.

Repetindo, a força eletromotriz (fem) de uma bateria é fixa, determinada pela sua construção, mas a corrente elétrica que circula pelo circuito depende diretamente da resistência presente nele. A corrente que sai da bateria é igual à que entra, evidenciando a conservação da corrente elétrica ao longo do circuito. Nesse percurso, ela pode se dividir em alguns trechos, voltar a se unir em outros e finalmente entrar na bateria com o mesmo valor que saiu.

Os valores apresentados pela corrente ao longo dos caminhos percorridos no circuito, têm a ver com a lei de Ohm (Equação 4.33). A notação usada nessa equação, adotada em praticamente todos os livros didáticos, pode trazer alguma confusão, pois a letra V simboliza o potencial elétrico, enquanto a lei de Ohm trata da diferença de potencial entre as extremidades de um resistor, R , quando é atravessado por uma corrente, i . O símbolo mais apropriado seria ΔV , mas por comodidade todos usam V .

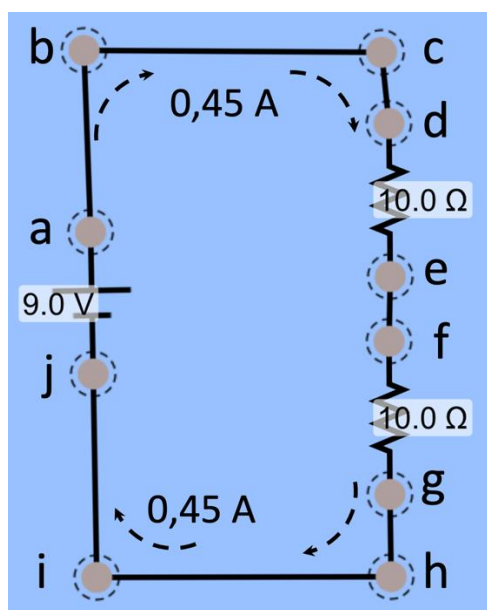
Vamos aplicar a Equação 4.33 para analisar alguns circuitos simples, e introduzir os fundamentos das leis de Kirchhoff⁵. No texto ausubeliano que acompanha o jogo, essas leis foram abordadas implícita e qualitativamente, sem mencioná-las explicitamente. Faremos, mais adiante, uma abordagem mais formal, na linha do que apresentam esses autores (BARRETO-FILHO, B.; SILVA, C. X., 2013), contudo, achamos instrutivo repetir a abordagem intuitiva no texto ausubeliano, antes da abordagem formal.

Na Figura 4.24 vemos dois circuitos. O circuito (a) foi montado com uma bateria ou fonte de tensão de 9 V e de resistências de 10 Ω , em série. Chamamos essa montagem de circuito em série. Na figura (b) temos um circuito em paralelo. Mais adiante trataremos de circuitos mistos, com uma parte em série, e outra parte em paralelo.

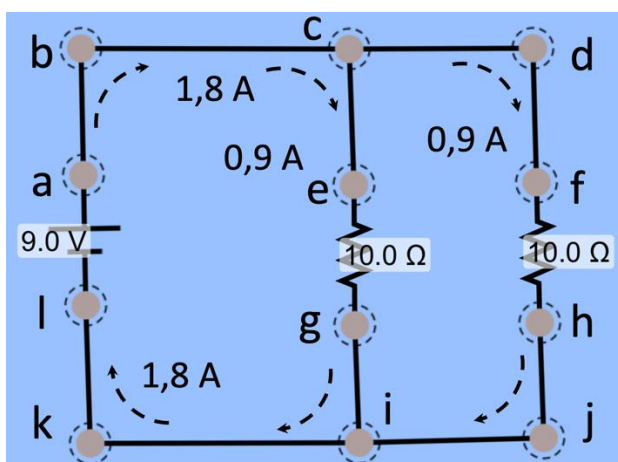
Para montar esses circuitos, temos que usar fios condutores para conectar os componentes. Esses fios são fabricados de tal modo que suas resistências elétricas são praticamente nulas, comparadas com as resistências dos componentes eletro-eletrônicos. Para o circuito (a) usamos os fios $abcd$, ef e $ghij$. Como indicado no circuito, o amperímetro mediu uma corrente de 0,45 A.

Figura 4.24 – (a) circuito com resistências em série; (b) circuito em com resistências em paralelo.

⁵ Todas as imagens usadas a partir daqui foram extraídas do portal <https://phet.colorado.edu>.



(a)



(b)

Quando analisamos a Figura 4.14, mostramos que os elétrons sempre se deslocam do potencial menor para o maior. Nas figuras a partir da 4.24, a corrente indicada é a convencional, de modo que a corrente real, conduzida pelos elétrons tem o sentido inverso. Então, $V_j < V_a$, $V_g < V_f$, $V_e < V_d$. Por causa disso, é que se diz, considerando a corrente convencional, que há uma *queda de potencial* quando a corrente atravessa alguma resistência. Por exemplo, há uma queda de potencial quando a corrente atravessa o primeiro resistor, R_{de} , na Figura 4.24a.

Como os fios de ligação têm resistência praticamente nula, podemos considerar que é nula a diferença de potencial entre suas extremidades, isto é, $\Delta V_{ab} = V_a - V_b = 0$, $\Delta V_{cd} = V_c - V_d = 0$, e assim por diante. Portanto, na Figura 4.24a, só haverá diferença de potencial (ddp), ou queda de potencial, entre os pontos d e e , f e g , e j e a . Entre j e a é a ddp da bateria ($\Delta V_{aj} = V_a - V_j = 9\text{V}$). Como os resistores são idênticos, e a corrente que os atravessa também é a mesma, a ddp entre suas extremidades, pela lei de Ohm, será a mesma, $\Delta V_{fg} = V_f - V_g = \Delta V_{de} = V_d - V_e = 4,5\text{V}$.

Esses resultados foram obtidos com a lei de Ohm, mas, como dissemos acima, podem ser obtidos, intuitivamente, sem fazer uso dessa lei. Como na Figura 4.24a o fio $abcd$ não tem resistência, o potencial em a é igual ao potencial em d . Então, caminhando de a até j , no sentido da corrente convencional, só há queda de potencial entre d e g . Na verdade, entre esses dois pontos há duas quedas de potencial: entre d e e , e entre f e g . Como as duas

resistências são iguais ($10\ \Omega$), as quedas também serão iguais. Como justificar isso sem o uso da lei de Ohm?

Vamos usar um argumento um pouco perigoso, porque pode levar à concepção alternativa de que o elétron sai do polo negativo e chega no polo positivo. Já dissemos que o elétron que sai do polo negativo não chega ao polo positivo. Quando um elétron sai do polo negativo, quase imediatamente outro elétron entra no polo positivo. Mas, para chegar à nossa conclusão intuitiva, mas vamos supor que o elétron sai do polo negativo, atravessa o circuito e chega no polo positivo. Ao longo dessa trajetória ele atravessa zonas de ganho de potencial⁶, de g para f , e de e para d . O que faz o elétron ganhar potencial? É simples, não? É a resistência. Então, se as duas resistências são iguais, os ganhos de potencial são iguais. Esse resultado é o mesmo no caso da queda de potencial. Ou seja, quando trabalhamos com a corrente convencional, que é o mais frequente, temos quedas de potencial. Quando trabalhamos com a corrente real, temos ganhos de potencial. Um é positivo e o outro é negativo, mas os valores são iguais.

Voltemos à Figura 4.24a. A bateria fornece 9 V, que serão divididos pelas duas resistências iguais, cada uma ficando com 4,5 V, que é o resultado encontrado usando a lei de Ohm. Agora veja uma coisa muito interessante. Entre d e g há uma queda de potencial de 9 V, mas entre j e a há um ganho de potencial, ou uma queda de potencial negativa. Portanto, no circuito fechado, a soma das quedas de potencial deve ser nula. Esse resultado é justamente a segunda lei de Kirchhoff. Os circuitos simples podem ser facilmente resolvidos com o uso da lei de Ohm e das leis de Kirchhoff, mas antes disso devemos abordar uma questão de grande utilidade prática: a associação de resistências.

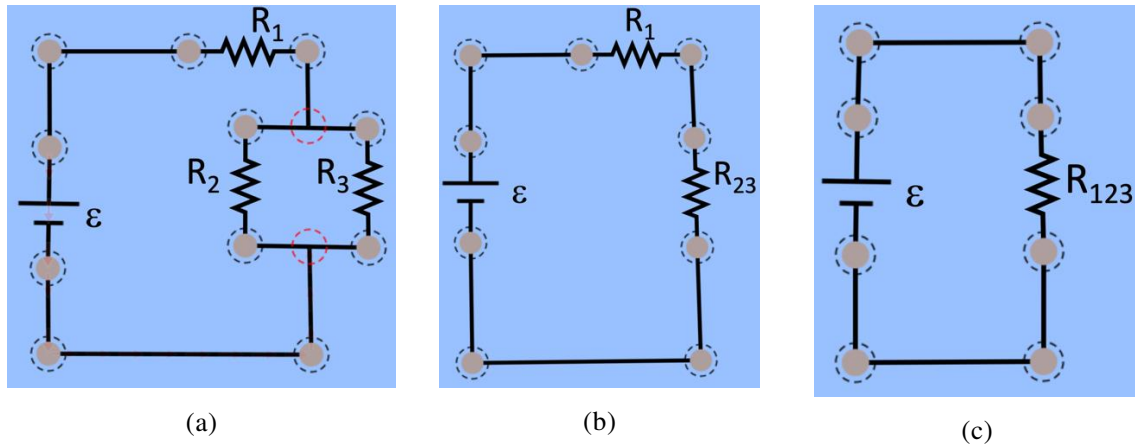
4.2.2.4 Associação de resistências

Estamos aqui denominando circuito simples aquele constituído de uma bateria e diversas resistências, algumas em série, outras em paralelo. Há um conceito básico na teoria dos circuitos, cuja discussão está fora do escopo desta dissertação, mas que serve para introduzir o assunto desta seção. Este conceito é conhecido como conceito do circuito equivalente (JOHNSON, D. H., 2003): “Não importa quão complexo seja o circuito, do ponto de vista de qualquer par de terminais, o circuito se comporta como se consistisse apenas de uma fonte

⁶ Veja que aqui não é queda de potencial, como no caso da corrente convencional. Aqui é ganho de potencial, porque o elétron sempre se desloca do potencial menor para o maior.

e uma impedância”. Como informa Johnson, esse conceito faz parte de um tratamento mais geral, conhecido como teorema de Thevenin, elaborado em 1883, mas que foi antecipado por Helmholtz em 1853. No caso de um circuito simples, o conceito significa que qualquer combinação de resistências pode ser substituída por uma única resistência, conhecida como resistência equivalente. Figura 4.25 ilustra o processo.

Figura 4.25 – (a) circuito simples, uma bateria e três resistências. ε é o símbolo geralmente usado para representar a força eletromotriz, *fem*.



As resistências em paralelo R_2 e R_3 (Figura 4.25a) são substituídas pela resistência R_{23} (figura b), e, finalmente, as duas resistências em série são substituídas pela resistência equivalente do circuito, $R_{123} = R_{eq}$.

Para transformar resistências em série em uma resistência equivalente, basta somar as resistências:

$$R_{eq} = \sum R_i. \quad (4.36)$$

Para o caso de resistências em paralelo, a fórmula é essa:

$$\frac{1}{R_{eq}} = \sum \frac{1}{R_i}. \quad (4.37)$$

Essas fórmulas são muito úteis quando queremos conhecer qual é a corrente que é fornecida por uma bateria a um circuito simples. Basta substituir o circuito da Figura 4.25a no circuito da Figura 4.25c. A corrente será

$$i = \frac{\varepsilon}{R_{eq}}. \quad (4.38)$$

Depois, para calcular as correntes e as ddp ao longo do circuito devemos substituir o processo lento descrito acima, pelo uso das leis de Kirchhoff.

4.2.2.5 Leis de Kirchhoff

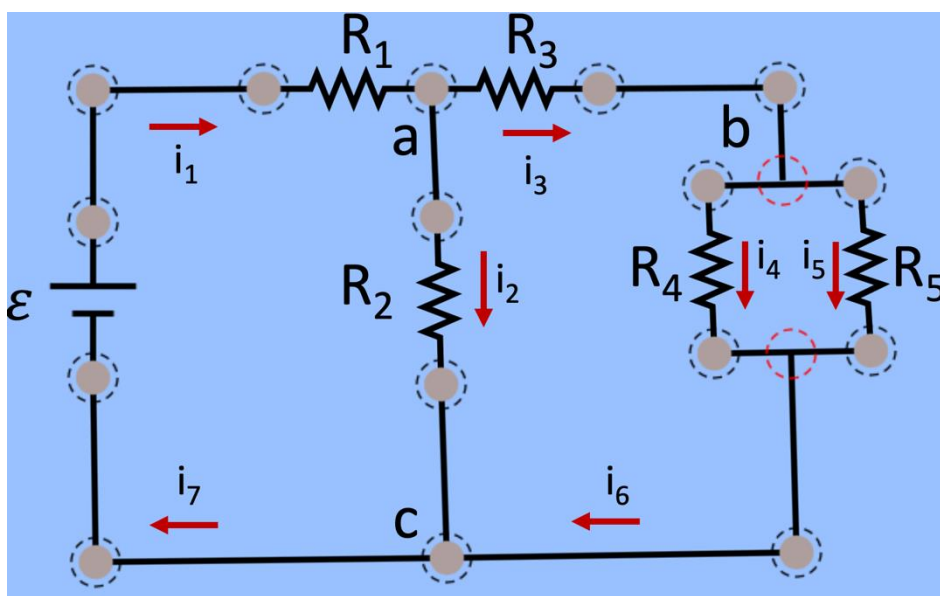
A primeira lei de Kirchhoff, também conhecida como *lei, ou regra dos nós*, tem a ver com a conserva da corrente elétrica, que por sua vez tem a ver com a conserva de carga. Como já foi dito, a corrente que sai de um polo de uma bateria, depende do circuito, mas é sempre a mesma que vai entrar no polo oposto. A lei dos nós diz exatamente isso: em qualquer ponto do circuito, a corrente que entra em um nó é a mesma que sai do nó. No nó *a* da Figura 4.26, entra i_1 e saem i_2 e i_3 , portanto, $i_1 = i_2 + i_3$. Generalizando,

$$\sum i_{entra} = \sum i_{sai}. \quad (4.39)$$

A segunda lei de Kirchhoff já foi apresentada na discussão da Figura 4.24: no circuito fechado, a soma das quedas de potencial deve ser nula. Ela é conhecida como *lei ou regra das malhas*, e pode ser matematicamente expressa assim:

$$\sum \Delta V = 0. \quad (4.40)$$

Figura 4.26 – Circuito para ilustrar o uso das leis de Kirchhoff



No texto ausubeliano, assim como no livro-texto adotado na escola existem exercícios com aplicações das leis de Kirchhoff. Portanto, não há necessidade de repeti-los aqui. Por outro lado, há uma questão fundamental no estudo dos circuitos que causa muitas concepções alternativas, e merece ser discutida com algum detalhe.

4.2.2.6 Como se dá a condução da corrente elétrica em um circuito simples

Baseados na literatura, ANDRADE e COLABORADORES (2018) apresentam vários modelos mentais induzidos por concepções alternativas referentes

Modelo I – A corrente elétrica é emitida pela fonte (bateria, pilha ou gerador) a partir de um dos polos e é consumida durante sua passagem no circuito, de modo que sua intensidade diminui ao ultrapassar algum elemento do circuito.

Modelo II – Correntes elétricas deixam a fonte a partir de ambos os polos, sendo usadas quando se encontram nos elementos do circuito.

Modelo III – A intensidade da corrente é determinada pelo elemento através do qual ela está passando. Ela não pode ser influenciada por um elemento onde ainda não passou. Ou seja, a corrente é vista como algo que atravessa o circuito ponto a ponto, afetando cada elemento no momento que o atinge. Assim, uma mudança em um ponto do circuito não afeta o comportamento do circuito nos pontos anteriores.

Modelo IV – A corrente é uma propriedade exclusiva do gerador. Ela é independente dos demais elementos do circuito.

Portanto, é fundamental discutir o processo da condução elétrica em resistores, a partir da questão: o que é corrente elétrica? A primeira resposta é simples: é o movimento de cargas elétricas. Mas, que tipo de cargas elétricas? Nos resistores que estamos explorando aqui, são os elétrons que carregam essas cargas. Já em soluções líquidas, além dos elétrons, também podem existir correntes de íons positivos, mas não vamos nos aprofundar nesse tema agora. E como acontece o processo que gera a corrente elétrica? Essa já é uma pergunta mais complexa. Se você já consultou algum livro didático sobre o assunto, talvez esteja familiarizado com algumas hipóteses:

1. O estabelecimento de um campo elétrico em um fio metálico provoca um fluxo de elétrons neste condutor, fluxo este denominado corrente elétrica.
2. Quando um fio é ligado entre aos terminais de uma bateria, um campo elétrico é estabelecido no interior do fio, orientado do potencial maior para o menor. Como a carga elétrica dos elétrons é negativa, surgem neles forças elétricas de sentido oposto ao do campo. Dessa forma, os elétrons livres passam a se deslocar de um terminal a outro, criando-se, então, a corrente elétrica no fio.
3. A corrente elétrica é como o fluxo da água em um circuito hidráulico, onde a bateria funciona como a bomba.

As duas primeiras hipóteses têm algum grau de verdade, mas não explicam completamente o fenômeno da passagem de corrente elétrica por um fio condutor. Já a terceira

hipótese, bastante comum em livros didáticos, é totalmente equivocada. Comparar o fluxo de elétrons com o fluxo de água é um erro, pois os processos são fundamentalmente distintos. Essa analogia entre os dois circuitos pode levar os alunos a uma compreensão incorreta da corrente elétrica.

Quais são os problemas dessa analogia? A comparação entre o circuito elétrico e o circuito hidráulico reforça a ideia da corrente convencional, que tem sentido oposto ao da corrente real. Isso gera dificuldades na compreensão do fluxo de elétrons. Nessa analogia a corrente sai do polo positivo e entra no polo negativo, o que leva à suposição errada de que, na corrente real, o elétron sairia do polo negativo e chegaria ao polo positivo. No entanto, isso não acontece.

Na realidade, durante o processo de corrente elétrica, os elétrons se movimentam apenas em um pequeno espaço dentro do condutor. O que acontece é que um elétron, digamos próximo ao polo negativo, sofre a ação do campo elétrico criado pela bateria. Sua tendência é se afastar do polo, mas ele não vai muito longe. Todavia, o campo criado por esse elétron age em elétrons mais adiante, que tende a se deslocar para longe, mas também não vai muito adiante. O campo desse segundo elétron age em outro elétron mais adiante, etc. Esse mexe-mexe é que dá origem à corrente elétrica. Mas a questão é ainda mais complicada do que esse simples mexe-mexe, para responder à questão fundamental: o que exatamente faz a corrente elétrica fluir? A resposta para essa questão envolve o papel das cargas superficiais nos condutores, que funcionam como um guia para a corrente elétrica ROSSER (1963). Essa abordagem, embora importante, não aparece em nenhum dos livros didáticos que conhecemos. No entanto, ela é discutida em alguns artigos científicos que utilizaremos ao longo desta seção (ver Tabela 4.1).

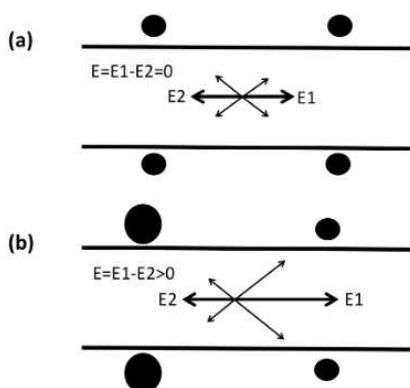
Após um curto período inicial, depois que a bateria é ligada, chamado de transiente, os elétrons livres se deslocam para as superfícies dos condutores metálicos, formando uma estrutura de cargas superficiais. Essas cargas geram campos eletrostáticos, que são os responsáveis pela circulação da corrente no interior dos condutores. Em outras palavras, o fluxo de corrente é determinado tanto pela ação da fonte de força eletromotriz (como baterias, pilhas ou geradores) quanto pelos campos eletrostáticos criados pelas cargas superficiais negativas ou positivas. Os sinais de campo elétrico que conduzem a corrente se propagam a velocidades próximas à da luz (e, no vácuo, exatamente à velocidade da luz). Na prática, isso nos permite imaginar uma transmissão praticamente instantânea do sinal elétrico. Portanto, a corrente elétrica não ocorre porque um elétron sai do polo negativo e eventualmente chega

ao polo positivo. Na verdade, ela é resultado dos campos elétricos gerados pelas cargas superficiais e pela quase instantânea propagação das variações desses campos no interior do condutor.

A abordagem formal desse problema está fora do escopo desta dissertação, de modo que usaremos aqui a descrição qualitativa apresentada na dissertação de Francisco Cristiano Barbosa Lima (LIMA, 2018).

Para a criação do campo elétrico ao longo do resistor, e a consequente existência de corrente, é necessário que haja um gradiente de cargas superficiais ao longo do circuito. Ou seja, que a distribuição de cargas não seja uniforme ao longo do circuito. Um modelo simples para ilustrar este resultado é apresentado na Figura 4.27. A figura é meramente ilustrativa, sem escala e aplicável tanto a cargas positivas quanto negativas, bastando ajustar os sentidos dos vetores para cada caso. No exemplo apresentado, as cargas são positivas. O condutor é considerado infinito, o que permite, devido à simetria, analisar apenas as quatro cargas mostradas no circuito. Quando a distribuição de cargas é uniforme, como na Figura 4.27a, o campo elétrico no interior do condutor é nulo. Somente quando há um gradiente de cargas é que surge um campo resultante, conforme ilustrado na Figura 4.27b. Ferreira e Figueiredo (2003) destacam que Ohm formulou sua lei para justificar o surgimento de um campo elétrico a partir de um gradiente de carga volumétrica. No entanto, foi Kirchhoff quem demonstrou que uma corrente uniforme requer apenas um gradiente de carga superficial.

Figura 4.27 – Modelo ilustrativo para discutir a necessidade de gradiente na distribuição de cargas superficiais em circuitos elétricos. Fonte: (LIMA, 2018).



5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Estava prevista a utilização de três instrumentos de validação do jogo: um teste de concepções alternativas (TCA), um teste de associação numérica de conceitos (TANC) e um questionário de reação. Infelizmente só tivemos condições de aplicar o questionário, que foi elaborado de acordo com o método Kirkpatrick (KIRKPATRICK, D., 2006).

Tabela 5.1 – Resultados do teste de satisfação. Modelo Kirkpatrick com escala Lickert de 5 pontos.

	Discordo totalmente	Discordo parcialmente	Não con- cordo nem dis- cordo	Concordo parcialmente	Concordo totalmente	Média Ponderada
1) Estou confiante com o aprendizado que obtive no jogo	3	2	2	12	9	3,78
2) Depois do jogo, eu consigo compreender conceitos básicos de eletricidade	3	3	7	10	6	2,93
3) Houve momentos em que eu queria desistir do jogo	9	8	5	7	1	3,57
4) Eu alcancei rapidamente os objetivos do jogo	4	0	9	10	4	3,37
5) Eu jogaria novamente o EBP	0	0	2	6	13	4,52
6) Fiquei torcendo para o jogo acabar logo	12	6	5	4	3	3,67
7) jogo foi mais difícil de entender do que eu gostaria	7	3	8	4	3	3,04
8) O desenho das cartas do jogo é atraente	1	1	12	8	8	3,70
					Média geral	3.15

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 1, podemos dizer que o jogo foi avaliado um pouco acima da indiferença, uma vez que a média ponderada foi 3,15. É interessante examinar os extremos dessa avaliação. O item com média ponderada mais negativa refere-se ao nível da aprendizagem com o jogo, questão 2.

Ainda em relação à análise dos dados da Tabela 5.1, a diferença entre os itens que versam sobre o entusiasmo dos participantes em relação ao jogo — como observado pela

elevada média no item “Eu jogaria novamente o EBPB” (4,52) — em contraste com a menor autopercepção de aprendizagem, observada pela média mais baixa no item “Consigo compreender conceitos básicos de eletricidade” (2,93). Tal observação pode ser interpretada como uma indicação de que o jogo foi reconhecido enquanto atividade lúdica envolvente, mas seu impacto cognitivo ainda não se mostrou plenamente consolidado aos olhos dos estudantes.

Tal ambiguidade verificada na leitura dos resultados pode ter origem em diferentes fatores:

- Em primeiro lugar, o caráter subjetivo da autoavaliação pode não ter refletido, com precisão, os ganhos conceituais reais, sobretudo diante da ausência de um instrumento objetivo de mensuração.
- Em segundo lugar, os conteúdos abordados envolvem conceitos abstratos de eletricidade que, tradicionalmente, apresentam alta taxa de evasão conceitual por parte dos estudantes, além da dificuldade encontrada pelos alunos na última fase do jogo e a pressão externa da semana do ENEM. Estes fatores podem ter contribuído ou refletido na resposta do questionário.
- Em terceiro lugar, é possível que o tempo de exposição ao jogo e as condições do ambiente de aplicação não tenham sido suficientes para gerar uma mudança perceptível na compreensão conceitual, ao menos no curto prazo.

Sendo assim, reconhece-se que o jogo *Em Busca do Prêmio Nobel* cumpriu, de modo satisfatório, o papel de instrumento de motivação, engajamento e familiarização dos alunos com o conteúdo. No entanto, também se reconhece que, para atingir maior efetividade pedagógica, o jogo deverá ser utilizado como parte de uma sequência didática mais ampla, integrada a momentos de formalização do conhecimento, discussões orientadas e avaliações diagnósticas, conforme os princípios de aprendizagem significativa defendidos por Ausubel.

Aluno 1 - Aluna surda com idade por volta dos 54 anos, com muita dificuldade de aprendizagem pois não é totalmente alfabetizada em Libras o que dificulta sobremaneira em seu aprendizado de forma geral. Mas é muito assídua e participativa, envolveu-se muito bem com o jogo, apesar de ter tido dificuldade em responder. No geral gostou do jogo tendo por vez perguntado, via intérprete, se na semana haveria jogo. Não respondeu ao pré-teste por ausência de intérprete.

Aluno 2 - Aluno com idade de 48 anos, voltou a estudar depois de mais de 20 anos, segundo relatos do próprio aluno. Aluno assíduo e participativo, trazia uma bagagem muito grande de concepções alternativas, oriunda do meio em que trabalhava. Muito participativo, tirava muitas dúvidas, porém com rendimento em provas e avaliações pouco satisfatória. Gostava do jogo, sentia-se entusiasmado com a leitura dos organizadores prévios e do material e por vezes veio tirar dúvidas. Na hora do jogo, apesar de motivado, ficava nervoso e tinha dificuldade em responder as questões. Após a realização do jogo veio tirar dúvidas acerca das perguntas.

Aluno 3 - Aluna com 42 anos de idade, cabeleira de profissão. Assídua, porém pouco participativa, limitava-se a escrever o conteúdo. Gostava da leitura, mas relatava não conseguir entender física. Participou do jogo, mas com muita dificuldade em responder as perguntas. Tímida pouco se manifestou nas fases em que participou dos jogos.

Aluno 4 - Aluna com 46 anos de idade, assiduidade boa dentro de suas limitações, de saúde. Participava das aulas fazia perguntas tirava dúvida, muito organizada. Contudo devido ao longo período afastada da sala de aula. Tinha muita dificuldade em entender determinados conteúdo. Notadamente aquele que necessitasse um pouco mais de abstração. Participou dos jogos, porém sem muita empolgação.

Aluno 5 - Aluno com 42 anos de idade, pouco assídua devido a problemas severos de saúde. Quando vinha as aulas limitava-se a escrever. Muito tímida pouco falava. Devido aos seus problemas de saúde sua avaliação era feita de forma especial e por atividade passada para que realizasse em casa. Pouco contribui para o jogo.

Aluno 6 - Aluna com 18 anos, pouco assídua, porém muito participativa. Sua assiduidade baixa era devida a crises de ansiedade e por problemas familiares. Durante as aulas tirava dúvidas tinha algumas concepções alternativas e procurava ajustar seus conceitos prévios ao científico. Criando estrutura própria de aprendizado. Gostava muito das aulas e adorava participar do jogo. Isso devido ao espírito competitivo que o jogo traz. Foi uma das alunas que sugeriu alteração nas regras. E relatou que o jogo criava inspiração em estudar.

Aluno 7 - Aluna com 46 anos de idade, pouco assídua, egressa do SEJAM, sentia muita dificuldade em aprender, sua timidez dificultava qualquer aproximação. Limitava-se a escrever o conteúdo e responder as atividades de sala. Teve uma participação pouco expressiva nos jogos.

Aluno 8 - Aluna com 56 anos muito assídua, porém limitava-se a escrever, suas principais dúvidas eram em relação as letras e símbolos que não entendia. Raras vezes tirava dúvidas relacionadas ao conteúdo, porém essas dúvidas estavam relacionadas a concepções alternativas. Notadamente a dificuldade em separar o conceito de corrente com o de DDP. Participou dos jogos, porém com muita dificuldade não tendo acertado a nenhuma das perguntas feita a ela.

Aluno 9 - Aluna com 17 anos, pouco frequente e pouco motivada aos estudos, fazia estágio e devido a isso faltava muito. Restringia sua participação a fotografar a lousa. Participou do jogo, momento em que percebi uma leve melhora em seu humor, ao sair de uma das fases do jogo. Me falou “toda aula deveria ser assim...gostei muito”. Realmente participou e conversas com os colegas da equipe sobre as cartas lidas. Porém com baixa frequência sua motivação não rendeu muito.

Aluno 10 - Aluna com 17 anos muito assídua, porém apenas de corpo presente, não gostava de lê limitava-se a fotografar a lousa e ficar com conversas paralelas acerca de redes sociais. Participou do jogo. Gostou de jogar. Sentia-se envolvida com o jogo, porém seu baixo rendimento devido a falta total de interesse nos estudos de forma geral, fez com sua participação fosse tímida.

Aluno 11 - Aluna com 19 anos, com assiduidade boa participativa. Gostava da leitura tirava dúvidas, gostou e participou do jogo. Como ponto negativo é muito amiga da Aluna 10, o que lhe rendeu alguma chamada de atenção. Foi boa no jogo, após o jogo tirou dúvida. Sobre carga e qual a diferença entre força e campo elétrico. Assim como qual eletrodoméstico mais gasta energia.

Aluno 13 - Aluna de 18 anos, muito assídua, porém pouco participativa, gostou de fazer a leitura e fez perguntas sobre os temas. Participou com prazer do jogo. Muito calada e muito tímida pouco falava. Foi uma das alunas que solicitou a alteração nas regras iniciais do jogo.

Aluno 14 - Aluno com 21 anos, pouco assíduo, não demonstrava nenhum interesse nas aulas. Participou do jogo, mas com pouca empolgação.

Aluno 15 - Aluno com 22 anos, baixa assiduidade o que lhe rendeu a transferência. Não demonstrava interesse em nada, inclusive nem respondeu ao pré-teste.

Aluno 16 - Aluno com 17 anos, assiduidade regular. Pouco participativo. Limitava-se a escrever. Passava a aula com conversas paralelas. Participou do jogo. Mostrou interesse, porém nada de extraordinário.

Aluno 17 - Aluna de 19 anos (mãe adolescente), pouco frequentou a escola. Porém era participativa e inteligente. Fazia perguntas, tirava dúvidas e respondia a questionamento. Acabou desistindo e abandonando a escola. Chegou a ser sorteada a participar de um dos grupos, porém não participou do jogo.

Aluno 18 - Aluna de 18 anos. Assiduidade regular, porém, inteligente e participativas. Devido a timidez sempre fazia perguntas nos corredores, antes ou após a aula. Participou do jogo, gostava muito e vivia a perguntar: "hoje tem jogo?". gostou muito do jogo. Tirava dúvidas das leituras que fazia e lia muito bem.

Aluno 19 - Aluna de 19 anos, pouco frequentou a escola. Devido a problemas familiares, tendo inclusive abandonado a escola. Mas era uma boa aluna muito dedicada e muito esforçada. Fazia perguntas e fez elogios ao texto. Pois dizia que com a leitura facilitava a compreensão.

Aluno 20 - Aluna de 17 anos, muito assídua, muito educada e muito participativa. Dizia que não gostava de física, mas gostava de fazer a leitura e gostava de o modo do professor ensinar. Gostou bastante do jogo, foi uma das alunas que sugeriram as mudanças nas regras. Após o jogo sempre vinha pergunta qual seria a resposta correta. E outra aluna com a concepção alternativa associada ao sinal da carga e a igualdade entre corrente e DDP.

Aluno 21 - Aluna de 18 anos. Muito inteligente muito competitiva, muito assídua. Gosta das aulas de física, até arrumar um namorado. Participava dos jogos com uma empolgação de fazer gosto. Discutia com os colegas de equipe sobre as respostas. Tinha o espírito do jogador muito bom. Tirava bastante dúvida, lia muito o texto. Queria conhecer a universidade e fazia perguntas sobre o mundo acadêmico.

Aluno 22 - Aluna de 18 anos, pouco assídua, não mostrava interesse em aprender e limitava-se a fotografar a lousa. E suas perguntas eram sobre a sequência que deveria escrever. Participou e relatou ter gostado do jogo. Porém seu baixo estímulo e sua alta infrequência levaram a uma participação média.

Aluno 23 - Aluno de 20 anos, muito faltoso, não demonstrava interesse nenhum pelo aprendizado, ficava na sala vez por outra olhando ao celular. Não participou do jogo, e por fim desistiu da escola.

Aluno 24 - Aluno de 19 anos que, se assistiu 6 aulas ao longo do ano assistiu muito. Pouco participativo. Quando estava em sala, apenas fotografava a lousa. Aluno desistente.

Aluno 25 - Aluna de 18 anos com assiduidade regular, participativa bem comunicativa. No entanto com histórico de ansiedade e depressão. Nas aulas perguntava, participou do jogo. Tentou fazer a leitura em sala, mas não conseguiu e pediu para se retirar. Tinha uma boa bagagem conceitual e compreendia com facilidade a conceitos abstratos. Gostou do jogo, mas reclamou sobremaneira sobre as cartas “sorte” e “azar”. Tirou dúvidas sobre a leitura notadamente sobre a relação feita entre corrente elétrica e fluxo de água.

Aluno 26 - Aluna de 18 anos, inicialmente muito assídua, porém com o passar do ano arrumou emprego e sua frequência caiu bastante. Aluna inteligente com boas respostas, adorava ler e tirar dúvidas. Adorava participar dos jogos e trazia questões do enem para que eu resolvesse. Dizia não gostar muito de exatas, mas estudava, pois, queria muito aprender. Foi aluna que sugeriu alteração das regras. Teve boa participação nos jogos e discutia, com os colegas, sobre as perguntas no jogo. Sugeriu que as cartas poderiam ser coloridas e trazer uma espécie de link de onde poderia encontrar suporte para resposta.

Aluno 27 - Aluna de 18 anos, trabalhadora autônoma, assiduidade regular, bem nas aulas, quanto a participação. Gostou muito do jogo, porém não gostava muito da leitura. Tirava frequentemente dúvidas. Queria saber a carreira acadêmica. Acha bonita, mas, falava “não é pra mim”. Participou do jogo e gostou.

Aluno 28 - Aluno de 19 anos muito inteligente, porém extremamente tímido. Muito participativo. Mas eu precisava ir até a cadeira dele para ouvir suas dúvidas. Sua timidez e ansiedade foram responsáveis pela sua pouca eficiência nas participações dos jogos. Pois quando errava, parecia que tinha levado uma surra. Conversei várias vezes com ele, momento em que descobria que ele sabia a resposta. Porém devido ao nervosismo, provavelmente, causado pela timidez. Levava para o erro.

Aluno 29 - Aluno de 20 muito assíduo, mas assim como aluno 28 bastante tímido. Mas muito participativo. Um dia ao final da aula me mostrou a transcrição feita a mão do livro do Resnick. E me pediu para esclarecer algumas dúvidas sobre símbolos e palavras. Teve boa participação nos jogos. Tendo uma peculiaridade, salvo engano foi o aluno que mais acertou as perguntas em todas as fases do jogo e ao mesmo tempo o aluno que mais foi sorteado com a carta “azar”.

Aluno 30 - Aluno de 18 anos, pouco frequente, demonstrava nenhum ou quase nenhum interesse pelas aulas. Quando vinha ficava cochilando em sua cadeira ou brincando em seu celular. Desistiu da escola devido a rivalidade ligadas as facções criminosas

Aluno 31 - Aluno de 20 anos, pouco frequente com baixo interesse em aprender. Quando ia as aulas limitava-se a escrever o conteúdo.

Aluno 32 - Aluna de 17 anos com assiduidade baixa ligada a problemas psicológicos. Aluna pouco participativa que fazia leitura com dificuldade e quando participou do jogo pediu para ficar na reserva.

6 CONCLUSÕES E COMENTÁRIOS FINAIS

A presente dissertação demandou considerável esforço para sua elaboração. Foram inúmeras horas dedicadas à leitura, além de momentos de tensão e incerteza quanto à aceitação e ao consequente desenvolvimento do estudo. No entanto, todas essas apreensões foram aos poucos substituídas pela satisfação e motivação pessoal ao observar o entusiasmo e o interesse dos alunos ao participarem das atividades lúdicas, realizarem leituras, formularem questionamentos e esclarecerem dúvidas.

"Os jogos educacionais têm demonstrado potencial significativo para aumentar o engajamento dos alunos e promover uma aprendizagem mais profunda, facilitando a compreensão de conceitos complexos por meio de interações lúdicas. Estudos indicam que a gamificação pode contribuir para a motivação dos estudantes, reduzindo concepções alternativas e reforçando a construção significativa do conhecimento." (ONDER-CELIKKANLI; TAN, 2022)

No ambiente em sala de aula, ocorreram intensos debates, pois um dos principais objetivos do estudo era analisar como os conceitos científicos se modificavam em relação às concepções prévias dos estudantes. Esse processo exigiu um grande esforço, com dedicação exaustiva, além de leituras e interpretações detalhadas dos textos dos organizadores prévios. Aos poucos, os alunos começaram a aceitar e incorporar novos conceitos ao seu repertório de conhecimentos, seguindo as diretrizes das teorias de aprendizagem significativa propostas por Ausubel (1960, 1963, 1968) e colaboradores (AUSUBEL; STAGER; GAITE, 1968).

Além disso, observou-se um engajamento notável dos estudantes na tentativa de avançar nas etapas do jogo, demonstrando motivação para progredir e alcançar fases mais complexas. Esse fator impactou diretamente o envolvimento com a leitura, algo incomum em turmas do ensino médio. Durante a execução do jogo, o ambiente de sala de aula foi marcado por concentração, com poucas distrações. As interações entre os alunos eram focadas na dinâmica do jogo e na resolução de dúvidas, corroborando estudos que defendem o uso de jogos como ferramenta de ensino, promovendo uma aprendizagem ativa e participativa (PIYAWATTANAVIROJ; MALEESUT; YASRI, 2019).

A satisfação dos alunos foi particularmente evidente nas fases de graduação e mestrado, nas quais se percebeu maior confiança durante as atividades propostas. Embora não

seja possível determinar se essa confiança se deve ao início do ano letivo — tradicionalmente um período de maior disposição — ou à estrutura e complexidade dos conteúdos abordados, notou-se que, nas etapas de doutorado e pesquisador, os alunos enfrentaram mais dificuldades. Foram relatados problemas com o tempo disponível e confusões na resolução das questões. Apesar do uso frequente da leitura como estratégia para sanar dúvidas, algumas incertezas persistiram, prolongando o tempo necessário para completar essas etapas do jogo. Esse cenário é consistente com estudos sobre dificuldades conceituais em eletrostática, que indicam a necessidade de abordagens diferenciadas para facilitar a aprendizagem (AIDOO; AWUAH; MPARE, 2014; CASTLE, 2011).

O material didático fornecido ao longo do ano foi fundamental para a internalização dos conceitos trabalhados. Os organizadores prévios, desenvolvidos pelo professor Carlos Alberto, foram essenciais para o alcance dos objetivos da pesquisa, estabelecendo uma base conceitual sólida para a construção do conhecimento. Assim, até mesmo os alunos sem conhecimento prévio sobre força elétrica, carga elétrica ou campo elétrico puderam ter um primeiro contato com o tema, o que despertou maior interesse pelo conteúdo. Essa eficácia ficou clara quando os alunos 2, 28 e 29 solicitaram outras fontes de pesquisa e livros para ampliar seus conhecimentos. Isso reforça a importância de materiais didáticos bem estruturados na superação de concepções alternativas em eletricidade.

No que se refere ao jogo, acredita-se que sua aplicação em outras turmas e instituições de ensino será igualmente eficaz, já que combina uma abordagem lúdica com o rigor necessário para avaliar o desempenho dos estudantes. Um ponto positivo foi a diminuição da dependência exclusiva da matemática como ferramenta de resolução de problemas, incentivando o uso do raciocínio lógico e da interpretação textual no processo de aprendizagem. Embora a matemática seja essencial na física, o jogo permitiu explorar estratégias didáticas que reduziram a carga de cálculos e valorizaram exemplos do cotidiano, especialmente aqueles comuns em exames como o ENEM. Pesquisas mostram que abordagens inovadoras, como a escrita para a aprendizagem, também auxiliam na compreensão de conceitos de eletricidade.

De forma geral, os objetivos baseados na teoria da aprendizagem significativa de Ausubel foram plenamente atingidos. A hierarquização dos conceitos foi favorecida, possibilitando a substituição de concepções alternativas por conhecimentos científicos consolidados. Conclui-se, portanto, que a combinação entre material didático bem elaborado, uma sequência pedagógica coerente e uma metodologia lúdica e fundamentada pode potencializar

o aprendizado e estimular o ensino da física, especialmente no ensino noturno. Os resultados obtidos evidenciam a importância da adaptação e aprimoramento contínuos das práticas educacionais, levando em conta a dinamicidade do processo de ensino-aprendizagem. O referencial teórico de Ausubel mostrou-se pertinente, considerando que os estudantes frequentemente trazem concepções prévias que devem ser valorizadas como ponto de partida para a construção significativa do conhecimento.

Referências

- AUSUBEL, D. P. The use of advance organizers in the learning and retention of meaningful verbal material. **Journal of Educational Psychology**, v. 51, n. 5, p. 267–272, 1960.
- AUSUBEL, D. P. A Subsumption Theory of Meaningful Verbal Learning and Retention. **The Journal of General Psychology**, v. 66, n. 2, p. 213–224, 1962.
- DE AQUINO, E. M. et al. EM BUSCA DO PRÊMIO NOBEL: UM JOGO DIGITAL MULTIPLATAFORMA E MULTITEMÁTICO. **REPPE-Revista de Produtos Educacionais e Pesquisas em Ensino**, v. 7, n. 2, p. 413–432, 2023.
- DINIZ, F. S. V. **Uso do jogo digital “Em busca do prêmio Nobel” para abordar tópicos de atomística**. [s.l.] Universidade Federal Rural do Semiárido, 2018.
- DINIZ, F. V. S.; DOS SANTOS, C. A. Ensinando atomística com o jogo digital “Em busca do Prêmio Nobel”. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 41, n. 3, p. e20180268, 2019.
- DOS SANTOS, C. A. **Aplicação da análise multidimensional e da análise de agrupamentos hierárquicos ao mapeamento cognitivo de conceitos físicos**. [s.l.] UFRGS, 1978.
- DOS SANTOS, C. A. Fundamentos teóricos em ensino e aprendizagem: um experimento pedagógico no MNPEF-UFERSA. **Revista do Professor de Física**, v. 8, n. 1, p. 209–234, 2024.
- MOREIRA, M. A. **An Ausubelian approach to physics instruction: an experiment in an introductory college course in eletromagnetism**. Thesis—Ithaca: Cornell University, 1977.
- MOREIRA, M. A.; DOS SANTOS, C. A. The Influence Of Content Organization On Student’S Cognitive Structurein Thermodynamics. **Journal of Research in Science Teaching**, v. 18, p. 525–531, 1981.
- AIDOO, S.; AWUAH, A. B.; MPARE, A. O. EXPLORING SHS STUDENTS’ ALTERNATIVE CONCEPTIONS ON ELECTROSTATICS. 2014.
- ANDRADE, F. A. L. Ensino de eletricidade e magnetismo orientado por projetos de pesquisa com sucata eletrônica. Dissertação de Mestrado—Mossoró: Universidade Federal Rural do Semiárido, 2018.
- ATHERTON, T. A history of Ohm’s law. **Electronics and Power**, v. 32, n. 6, p. 467–472,

1986.

AUSUBEL, D. P. The use of advance organizers in the learning and retention of meaningful verbal material. *Journal of Educational Psychology*, v. 51, n. 5, p. 267–272, 1960.

AUSUBEL, D. P. A Subsumption Theory of Meaningful Verbal Learning and Retention. *The Journal of General Psychology*, v. 66, n. 2, p. 213–224, 1962.

AUSUBEL, D. G. Cognitive Structure and the Facilitation of Meaningful Verbal Learning 1. *Journal of Teacher Education*, v. 14, n. 2, p. 217–222, jun. 1963.

AUSUBEL, D. P.; FITZGERALD, D. Organizer, general background, and antecedent learning variables in sequential verbal learning. *Journal of Educational Psychology*, v. 53, n. 6, p. 243–249, 1962.

AUSUBEL, D. P. Symbolization and symbolic thought: response to Furth. *Child development*, v. 39, n. 3, p. 997–1001, 1968.

AUSUBEL, D. P.; STAGER, M.; GAITE, A. J. H. Retroactive facilitation in meaningful verbal learning. *Journal of Educational Psychology*, v. 59, n. 4, p. 250–255, 1968.

BARNES, B. R.; CLAWSON, E. U. Do advance organizers facilitate learning? Recommendations for further research based on an analysis of 32 studies. *Review of Educational Research*, v. 45, n. 4, p. 637–659, 1975.

BARRETO-FILHO, B.; SILVA, C. X. Física aula por aula: eletromagnetismo, ondulatória, física moderna. São Paulo: FTD, 2013.

BURDE, J.-P.; WILHELM, T. The electron gas model as an introduction to electricity in middle school science. Em: *Science Education Research: Engaging Learners for a Sustainable Future*. Helsinki: University of Helsinki, 2016. p. 26–36.

CASTLE, G. P. A Century of Development in Applied Electrostatics. *IEEE Industry Applications Magazine*, v. 16, n. 4, p. 8–13, 2010.

CHABAY, R.; SHERWOOD, B. Restructuring the introductory electricity and magnetism course. *American Journal of Physics*, 2006.

COTTLE, D.; MARSHALL, R. Exploring electrical resistance: A novel kinesthetic model

helps to resolve some misconceptions. *Physics Education*, v. 51, n. 5, 2016.

COHEN, R.; EYLON, B.; GANIEL, U. Potential difference and current in simple electric circuits: A study of students' concepts. *American Journal of Physics*, 1983.

CZAUDERNA, A.; GUARDIOLA, E. The Gameplay Loop Methodology as a Tool for Educational Game Design. *Electronic Journal of e-Learning*, v. 17, n. 3, 1 set. 2019.

DE AQUINO, E. M. et al. EM BUSCA DO PRÊMIO NOBEL: UM JOGO DIGITAL MULTIPLATAFORMA E MULTITEMÁTICO. *REPPE-Revista de Produtos Educacionais e Pesquisas em Ensino*, v. 7, n. 2, p. 413–432, 2023.

DE AQUINO, E. M.; BARBOSA, G. F.; DOS SANTOS, C. A. Eletrostática e eletrodinâmica: Texto ausubeliano para o ensino médio: Material didático. Mossoró: Universidade Federal Rural do Semiárido, 2023.

DE POSADA, J. M. Conceptions of high school students concerning the internal structure of metals and their electric conduction: Structure and evolution. *Science Education*, 1997.

DINIZ, F. S. V. Uso do jogo digital “Em busca do prêmio Nobel” para abordar tópicos de atomística. [s.l.] Universidade Federal Rural do Semiárido, 2018.

DINIZ, F. V. S.; DOS SANTOS, C. A. Ensinando atomística com o jogo digital “Em busca do Prêmio Nobel”. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 41, n. 3, p. e20180268, 2019.

DOS SANTOS, C. A. Aplicação da análise multidimensional e da análise de agrupamentos hierárquicos ao mapeamento cognitivo de conceitos físicos. [s.l.] UFRGS, 1978.

DOS SANTOS, C. A. Fundamentos teóricos em ensino e aprendizagem: um experimento pedagógico no MNPEF-UFERSA. *Revista do Professor de Física*, v. 8, n. 1, p. 209–

234, 2024. DOS SANTOS, C. A.; DE AQUINO, E. M. Em busca do Prêmio Nobel – Versão beta.

Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 40, n. 3, p. e3501-5, 2018.

DUIT, R.; RHONECK, C. Learning and understanding key concepts of electricity. Em: TIBERGHEN,

A.; JOSSEM, E. L.; BAROJAS, J. (Eds.). Connecting Research in Physics

Education with Teacher Education. [s.l.] International Commission on Physics Education, 1998. p. 1–6.

DUMMETT, M. The history of card games. *European Review*, v. 1, n. 2, p. 125–135, abr. 1993.

FELIX, H. R. T. et al. EFEITOS DE APRENDIZAGEM NA ASSOCIAÇÃO DE CONCEITOS:

UM ESTUDO COM ESCALONAMENTO MULTIDIMENSIONAL. *Revista do Professor de Física*, v. 8, n. 1, p. 269–290, 2024.

FREDETTE, N.; LOCHHEAD, J. Student conceptions of simple circuits. *The Physics Teacher*, v. 18, n. 3, p. 134–98, 1980.

FURIÓ, C.; GUIASOLA, J. Difficulties in learning the concept of electric field. *Science Education*, v. 82, n. 4, p. 511–526, 1998.

GUIASOLA, J. Teaching and learning electricity: The relations between macroscopic level observations and microscopic level theories. Em: *International Handbook of Research in History, Philosophy and Science Teaching*. [s.l.: s.n.].

HAERTEL, H. The electric voltage: What do students understand? What can be done to help for a better understanding. *Aspects of Understanding Electricity. Anais...IPN-Arbeitsberichte*, 1985.

HAERTEL, H. A Qualitative Approach to Electricity A Guide to Visualising Elektrodynamics using symbols and images. Palo-Alto: Palo-Alto Research Center, 1987.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R. Física Básica, vol. 3. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1981.

KIPNIS, N. A Law of Physics in the Classroom: The Case of Ohm's Law. **Science & Education**, v. 18, n. 3, p. 349–382, 2009.

KIRKPATRICK, D. Evaluating training programs: The four levels. San Francisco: Berrett-Koehler Publishers, 2006.

LIMA, F. C. B. Experimentos de baixo custo para abordar concepções alternativas sobre corrente elétrica em circuitos simples. Dissertação de Mestrado—Mossoró: Universidade Federal Rural do Semiárido, 2018.

MCDERMOTT, L. C.; SHAFFER, P. S. Research as a guide for curriculum development: An example from introductory electricity. Part I: Investigation of student understanding. *American Journal of Physics*, v. 60, n. 11, p. 994–1003, 1992.

MOREAU, W. R. Charge distributions on DC circuits and Kirchhoff's laws. *European journal of physics*, v. 10, n. 4, p. 286–390, 1989.

MOREIRA, M. A. An Ausubelian approach to physics instruction: an experiment in an introductory college course in eletromagnetism. Thesis—Ithaca: Cornell University, 1977.

MOREIRA, M. A.; DOS SANTOS, C. A. The Influence Of Content Organization On Student'S Cognitive Structurein Thermodynamics. *Journal of Research in Science Teaching*, v. 18, p. 525–531, 1981.

MOURSUND, D. Some Personal Thoughts About Research on Using Games in Education : A Paper Prepared for NECC 2006. p. 1–11, 2006.

NAKHLEH, M. B. Why some students don't learn chemistry: Chemical misconceptions. *Journal of Chemical Education*, 1992.

ONDER-CELIKKANLI, N.; TAN, M. Determining Turkish high school students' misconceptions about electric charge imbalance by using a four-tier misconception test. *Physics Education*, v. 57, n. 5, p. 055010, 1 set. 2022.

OSBORNE, R. Towards Modifying Children's Ideas about Electric Current. *Research in Science & Technological Education*, 1983.

PARKER, S. Electrostatics and Current Flow. Citation: *Am. J. Phys*, v. 38, p. 720, 1970.

PIYAWATTANAVIROJ, P.; MALEESUT, T.; YASRI, P. An educational card game for

enhancing students' learning of the periodic table. *ACM International Conference Proceeding Series*, n. 1, p. 380–383, 2019.

PREYER, N. W. Transient behavior of simple RC circuits. *American Journal of Physics*, v. 70, n. 12, p. 1187–1193, 2002.

RESNICK, R.; HALLIDAY, D. Física. Volume 1. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1984.

ROSSER, W. G. V. What Makes an Electric Current “Flow”. *American Journal of Physics*, 1963.

RUSSELL, B. R. Surface Charges on Conductors Carrying Steady Currents. Citation: *Am. J. Phys*, v. 36, p. 527, 1968.

SHAFFER, P. S.; MCDERMOTT, L. C. Research as a guide for curriculum development: An example from introductory electricity. Part II: Design of instructional strategies. *American Journal of Physics*, 1992.

SHERWOOD, B. A.; CHABAY, R. W. A unified treatment of electrostatics and circuits. Pittsburgh: Carnegie Mellon University, 1999. Disponível em: <<http://cil.andrew.cmu.edu/emi>>. Acesso em: 1/10/2024.

SHIHUSA, H.; KERARO, F. N. Using Advance Organizers to Enhance Students' Motivation in Learning Biology. *Eurasia Journal of Mathematics, Science & Technology Education*, v. 5, n. 4, p. 413–420, 2009.

SHIPSTONE, D. Pupils' understanding of simple electrical circuits. Some implications for instruction. *Physics education*, v. 23, n. 92–96, 1988.

SMITH, D. R.; MUNRO, E. Educational card games. *Physics Education*, v. 44, n. 5, p. 479–483, 2009.

STOCKLMAYER, S. Teaching direct current theory using a field model. *International Journal of Science Education*, v. 32, n. 13, p. 1801–1828, 2010.

UNAL, R.; ZOLLMAN, D. Students' Description of an Atom: A Phenomenographic Analysis. Manhattan: Kansas State University, 1999.

VARNEY, R. N.; FISHER, L. H. Electric fields associated with stationary currents. *American Journal of Physics*, v. 52, p. 1097–1099, 1984.

VILLANI, A. et al. Da revolução científica à revolução tecnológica: tópicos de história da física moderna e contemporânea. São Paulo: Livraria da Física, 2019