



MNPEF
Mestrado Nacional
Profissional em
Ensino de Física



UNIVERSIDADE REGIONAL DO CARIRI - URCA
MESTRADO NACIONAL PROFISSIONAL EM ENSINO DE FÍSICA – MNPEF
SOCIEDADE BRASILEIRA DE FÍSICA – SBF
COORDENAÇÃO DE APERFEIÇOAMENTO DE PESSOAL DE NÍVEL SUPERIOR – CAPES

**EFEITO FOTOELÉTRICO E GERAÇÃO DA ENERGIA SOLAR NA PERSPECTIVA DOS
CAMPOS CONCEITUAIS COM ESTUDANTES DO ENSINO MÉDIO DO MUNICÍPIO DE
SÃO JOÃO DO RIO DO PEIXE–PB**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

CLAUDIO REINKE

Juazeiro do Norte–CE

2025



MNPEF
Mestrado Nacional
Profissional em
Ensino de Física



CLAUDIO REINKE

**EFEITO FOTOELÉTRICO E GERAÇÃO DA ENERGIA SOLAR NA PERSPECTIVA DOS
CAMPOS CONCEITUAIS COM ESTUDANTES DO ENSINO MÉDIO DO MUNICÍPIO DE
SÃO JOÃO DO RIO DO PEIXE–PB**

Dissertação apresentada à Universidade Regional do Cariri–URCA, como parte das exigências do Programa de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física, para obtenção do título de mestre.

Orientador: Prof. Dr. Cláudio Rejane da Silva Dantas

Juazeiro do Norte–CE

2025



MNPEF
Mestrado Nacional
Profissional em
Ensino de Física



Ficha Catalográfica elaborada pelo autor através do sistema
de geração automático da Biblioteca Central da Universidade Regional do Cariri - URCA

Reinke, Claudio

R372ee EFEITO FOTOELÉTRICO E GERAÇÃO DA ENERGIA SOLAR NA
PERSPECTIVA DOS CAMPOS CONCEITUAIS COM ESTUDANTES DO
ENSINO MÉDIO DO MUNICÍPIO DE SÃO JOÃO DO RIO DO PEIXE-PB /
Claudio Reinke. Juazeiro do Norte-CE, 2025.

154p. il.

Dissertação. Programa Nacional de Mestrado Profissional em Ensino de Física
da Universidade Regional do Cariri - URCA.

Orientador(a): Prof. Dr. Cláudio Rejane da Silva Dantas

1.Física Moderna, 2.Efeito Fotoelétrico, 3.Energia Solar, 4.Campos Conceituais,
5.Ensino e Aprendizagem; I.Título.

CDD: 621.47



MNPEF
Mestrado Nacional
Profissional em
Ensino de Física



CLAUDIO REINKE

EFEITO FOTOELÉTRICO E GERAÇÃO DA ENERGIA SOLAR NA PERSPECTIVA DOS CAMPOS CONCEITUAIS COM ESTUDANTES DO ENSINO MÉDIO DO MUNICÍPIO DE SÃO JOÃO DO RIO DO PEIXE-PB

Dissertação apresentada à Universidade Regional do Cariri-URCA, como parte das exigências do Programa de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física, para obtenção do título de mestre.

Orientador: Prof. Dr. Cláudio Rejane da Silva Dantas

Aprovada em 29 de agosto de 2025.

BANCA EXAMINADORA

Dr. Claudio Rejane da Silva Dantas
(Orientador - URCA)

Dra. Mariele Regina Pinheiro Gonçalves
(Membro Externo – UNIVASF)

Dra. Naiara Cipriano Oliveira
(Membro Interno- URCA)



MNPEF
Mestrado Nacional
Profissional em
Ensino de Física



Dedico este trabalho a todas as pessoas que contribuíram para a minha caminhada e sucesso até aqui, em especial à minha querida mãe Alice Reinke, que me ensinou as primeiras e mais valiosas lições de vida; à minha esposa Maria Cleide Miranda Reinke, por estar sempre a meu lado e me apoiar e amparar nos momentos que sempre precisei; às minhas filhas Ruth e Rivka, que são a razão maior da minha existência; ao meu orientador Professor Dr. Cláudio Rejane Dantas pelos preciosos conhecimentos e pela segurança que me fez sentir durante todo o processo; indistintamente a todos professores e colegas de mestrado da Universidade Regional do Cariri; e, aos meus colegas de trabalho e alunos da Escola Estadual de Ensino Fundamental e Médio Ministro José Américo de Almeida e da Escola Cidadã Integral Técnica Estadual Coronel Jacob Guilherme Frantz.



MNPEF
Mestrado Nacional
Profissional em
Ensino de Física

SBF
SOCIEDADE BRASILEIRA DE FÍSICA

CAPES

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço à Suprema Força do Universo pela existência vital e a saúde, sem as quais nada do que vivi nesses anos teria sido possível.

Agradeço o apoio, incentivo e carinho recebido por parte de toda minha família.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Cláudio Rejane da Silva Dantas pela amizade, companheirismo e preciosas orientações neste trabalho.

Agradeço aos meus professores do mestrado profissional que gentilmente compartilharam comigo seus preciosos conhecimentos e experiências.

Agradeço a todos os amigos e amigas que sempre me incentivaram e me apoiaram para a inscrição e conclusão desse mestrado profissional.

Agradeço aos colegas gestores, professores e funcionários da E.E.E.F.M. Ministro José Américo de Almeida e da ECIT Coronel Jacob Guilherme Frantz pelo apoio e incentivo ao longo da minha trajetória e em especial, neste mestrado.

Agradeço à Universidade Regional do Cariri – URCA, Campus Crajubar pela receptividade e instalações para a realização do mestrado.

Agradeço aos meus alunos que participam e contribuem para a realização deste trabalho, participando das aulas ministradas e contribuindo para a execução das ações relativas ao programa de mestrado.

Agradeço aos meus colegas do mestrado profissional pelas contribuições nas aulas, pela empatia e pelo compartilhamento de materiais didáticos, experiências e conhecimentos durante todo o curso deste Mestrado Profissional.

Agradeço à Secretaria de Estado da Educação da Paraíba por meio de seus órgãos representativos (9ª GRE) pelo aporte temporal de carga horária, orientação e incentivo profissional que recebi durante o Mestrado Profissional.

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES pelo aporte financeiro para a realização do mestrado profissional, Código de financiamento 001.



MNPEF
Mestrado Nacional
Profissional em
Ensino de Física



“Existe uma coisa que uma longa existência me ensinou: toda a nossa ciência, comparada a realidade, é primitiva e inocente; e, portanto, é o que temos de mais valioso”.

(Albert Einstein)



MNPEF
Mestrado Nacional
Profissional em
Ensino de Física



RESUMO

Esta dissertação apresenta uma análise crítica e uma proposta metodológica para o ensino do efeito fotoelétrico, tópico fundamental da física moderna, enfatizando a importância de uma educação que transcenda a mera transmissão de conhecimentos e promova a construção ativa do saber, reconhecendo a aprendizagem como um processo dinâmico e contextualizado. O estudo tem como objetivo investigar o desenvolvimento de aprendizagens sobre efeito fotoelétrico e suas aplicações práticas na geração de energia solar, fundamentado na Teoria dos Campos Conceituais de Gerard Vergnaud, com estudantes do ensino médio de uma escola pública no município de São João do Rio do Peixe, Paraíba. A pesquisa fundamenta-se em uma revisão bibliográfica sistemática sobre o ensino do efeito fotoelétrico, geração de energia solar e física moderna no ensino médio, identificando tendências pedagógicas que privilegiam a experimentação e a contextualização histórica. Adota-se como referencial teórico-metodológico a Teoria dos Campos Conceituais, que enfatiza a interconexão entre conceitos, situações e invariantes operatórios, possibilitando aos estudantes integrarem novas informações aos seus esquemas cognitivos preexistentes. A revisão da literatura revela que a inclusão de contextos históricos e a valorização das contribuições de cientistas como Max Planck, Heinrich Hertz, Philip Lenard e Albert Einstein são essenciais para situar o fenômeno no panorama mais amplo da física moderna. A proposta metodológica sugere a utilização de unidade didática estruturada em torno de um campo conceitual que mobiliza os conhecimentos prévios dos estudantes e sistematiza o processo de apropriação de conceitos físicos de forma organizada e lógica. Os resultados evidenciam a necessidade de diversificação nas representações e abordagens dos conteúdos, utilizando recursos didáticos variados que estimulem a participação ativa dos estudantes. A implementação de situações-problema que desafiem os estudantes a aplicarem conceitos em ação demonstra-se essencial para o desenvolvimento de habilidades de raciocínio e resolução de problemas. A avaliação formativa destaca-se como prática pedagógica fundamental durante o processo de ensino-aprendizagem, permitindo aos estudantes refletirem sobre sua aprendizagem e ajustarem suas compreensões sobre o campo conceitual da física moderna. Conclui-se que a abordagem baseada nos campos conceituais, aliada à contextualização com a geração de energia solar, não apenas facilita a compreensão do efeito fotoelétrico, mas também estimula o pensamento crítico e a investigação científica, promovendo uma aprendizagem mais significativa e conectada à realidade dos estudantes.

Palavras-chaves: Física Moderna. Efeito Fotoelétrico. Energia Solar. Campos Conceituais. Ensino e Aprendizagem.



MNPEF
Mestrado Nacional
Profissional em
Ensino de Física

SBF
SOCIEDADE BRASILEIRA DE FÍSICA

CAPES

ABSTRACT

This dissertation presents a critical analysis and a methodological proposal for teaching the photoelectric effect, a fundamental topic in modern physics, emphasizing the importance of an education that transcends the mere transmission of knowledge and promotes the active construction of learning, recognizing learning as a dynamic and contextualized process. The study aims to investigate the development of learning about the photoelectric effect and its practical applications in solar energy generation, based on Gerard Vergnaud's Theory of Conceptual Fields, with high school students from a public school in the municipality of São João do Rio do Peixe, Paraíba. The research is based on a systematic bibliographic review on the teaching of the photoelectric effect, solar energy generation, and modern physics in high school, identifying pedagogical trends that favor experimentation and historical contextualization. The Theory of Conceptual Fields is adopted as a theoretical-methodological framework, which emphasizes the interconnection between concepts, situations, and operational invariants, enabling students to integrate new information into their preexisting cognitive schemes. The literature review reveals that the inclusion of historical contexts and the appreciation of the contributions of scientists such as Max Planck, Heinrich Hertz, Philip Lenard, and Albert Einstein are essential to situate the phenomenon within the broader landscape of modern physics. The methodological proposal suggests the use of teaching units structured around a conceptual field that mobilizes students' prior knowledge and systematizes the process of appropriating physical concepts in an organized and logical manner. The results highlight the need for diversification in the representations and approaches to content, using varied teaching resources that stimulate active student participation. The implementation of problem situations that challenge students to apply concepts in action proves essential for the development of reasoning and problem-solving skills. Formative assessment stands out as a fundamental pedagogical practice during the teaching-learning process, allowing students to reflect on their learning and adjust their understandings about the conceptual field of modern physics. It is concluded that the approach based on conceptual fields, combined with contextualization with solar energy generation, not only facilitates the understanding of the photoelectric effect but also stimulates critical thinking and scientific investigation, promoting more meaningful learning connected to the students' reality.

Keywords: Modern Physics. Photoelectric Effect. Conceptual Fields. Teaching. Learning.



LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Quadro comparativo das dissertações analisadas do Portal Capes.....	26
Tabela 2: Levantamentos dos Livros de Física disponíveis pelo PNLD 2018.....	32
Tabela 3: Quadro Síntese da Sequência Didática.....	73
Tabela 4: Rubrica para Avaliação Formativa da Sequência Didática.....	79
Tabela 5: Avaliação quantitativa das questões de múltipla escolha.....	111
Tabela 6: Resultados da Rubrica de Avaliação Formativa.....	114

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Coleções de Livros de Física adotados no Nordeste no PNLD 2018.....	33
Figura 2: Representação conceitual de um Corpo Negro.....	50
Figura 3: Espectro de Radiação de Corpo Negro (CC BY-SA-NC; anônimo).....	53
Figura 4: Representação do Experimento de Hertz.....	59
Figura 5: Representação do Experimento de Lenard.....	61
Figura 6: Representação do Experimento de Thomas Young.....	64
Figura 7: Mapa de localização de São João do Rio do Peixe/PB	69
Figura 8: Foto da fachada de entrada da escola	70
Figura 9: Estudantes respondendo aos questionamentos.....	81
Figura 10: Nuvem de palavras da questão 1	82
Figura 11: Termos recorrentes nas respostas da questão 3.....	85
Figura 12: Nuvem de palavras da questão 4.....	87
Figura 13: Estudantes montando kits de Robótica Educacional.....	88
Figura 14: Protótipos montados a partir dos Kits de Robótica Educacional.....	89
Figura 15: Estudantes respondendo aos questionamentos.....	89
Figura 16: Estudantes manipulando modelos de Robótica Educacional	90
Figura 17: Estudantes respondendo questionamentos em grupos.....	90
Figura 18: Palavras das respostas para a questão a).....	91
Figura 19: Palavras das respostas para a questão b).....	93
Figura 20: Palavras das respostas para a questão c).....	95
Figura 21: Palavras das respostas para a questão d).....	97
Figura 22: Estudantes atentos à aula expositiva sobre a Teoria Quântica.....	100
Figura 23: Exemplificação do conceito de quantização de energia	100
Figura 24: Uso do Simulador Efeito Fotoelétrico da Plataforma Phet.....	101
Figura 25: Tela do Simulador Efeito Fotoelétrico da Plataforma Phet.....	101
Figura 26: Uso do Simulador Efeito Fotoelétrico da Plataforma Física na Escola.	102
Figura 27: Tela do Simulador Efeito Fotoelétrico da Plataforma Física na Escola	103
Figura 28: Uso didático do Simulador Efeito Fotoelétrico da Plataforma Física na Escola .	103
Figura 29: Explicação do Efeito Fotoelétrico por meio de recursos audiovisuais.....	106
Figura 30: Explicação da função trabalho de alguns materiais citados no livro didático.	107
Figura 31: Explicação da Equação de Einstein para o Efeito Fotoelétrico.....	107
Figura 32: Solução de Exemplos envolvendo cálculos de frequência e energia.....	108
Figura 33: Foto do caderno mostrando conversão de unidades de medidas.	108
Figura 34: Cálculos na lousa da energia dos fótons expressos em elétron-volts (eV).	109
Figura 35: Parques Solares Rio do Peixe I e II.....	109
Figura 36: Aula de revisão conceitual e de cálculos de variáveis do Efeito Fotoelétrico.	110
Figura 37: Estudantes respondendo às questões da folha tarefa.....	111



SUMÁRIO

APRESENTAÇÃO	10
1 INTRODUÇÃO	13
2 BREVE REVISÃO SOBRE FÍSICA MODERNA (EFEITO FOTOELÉTRICO) EM DISSERTAÇÕES, ARTIGOS E LIVROS DIDÁTICOS	19
2.1 O que dizem os livros didáticos.	29
3 TEORIA DOS CAMPOS CONCEITUAIS DE GERARD VERGNAUD	37
3.1 Definição de Campo Conceitual	38
3.2 Definição de Esquemas e Invariantes Operatórios	40
3.3 – Influências e divergências em relação a Jean Piaget	45
4 CAPÍTULO DE FÍSICA: O EFEITO FOTOELÉTRICO.	48
4.1 O Contexto Histórico	48
4.2 – A Radiação de Corpo Negro	49
4.3 A Teoria Quântica de Planck.	54
4.4 A Descoberta do Efeito Fotoelétrico.	58
4.5 As Contribuições de Philip Lenard	60
4.6 O Efeito Fotoelétrico explicado à luz de Albert Einstein	62
4.7 A dualidade onda–partícula: Einstein ou De Broglie?	63
5. CAMINHOS METODOLÓGICOS	68
5.1 – Natureza da Pesquisa.	68
5.2 Descrição do Ambiente Educacional e dos Participantes.	69
5.3 Perfil dos Discentes.	71
5.4 – Sequência Didática para Estudo do Efeito Fotoelétrico.	72
5.5 – Detalhamento das Etapas da Sequência Didática.	73
5.5.1 – Investigação do Campo Conceitual por Questionamentos.	74
5.5.2 – Investigação do Campo Conceitual por Experimentação.	75
5.5.3 – Ampliação do Campo Conceitual por meio de Aulas Contextualizadas.	75
5.5.4 – Ampliação do Campo Conceitual por meio de simuladores.	76
5.5.5 – Resolução de Problemas e Atividades.	77
5.5.6 – Avaliação de Desempenho e Domínio do Campo Conceitual.	78
6. ANÁLISE DE RESULTADOS	80
6.1 Encontro 1: 02 de setembro de 2024 – 2 aulas de 50 min	81
6.2 Análises das Respostas dos Estudantes	82
6.3 Investigação do Campo Conceitual por Experimentação	88
6.4 Encontro 2: 09 de setembro de 2024 – 2 aulas de 50 min	98



MNPEF
Mestrado Nacional
Profissional em
Ensino de Física



6.5 Encontro 3: 16 de setembro de 2024 – 2 aulas de 50 min.....	101
6.6 Encontro 4: 23 de setembro de 2024 – 2 aulas de 50 min.....	106
6.7 Encontro 5: 30 de setembro de 2024 – 2 aulas de 50 min.....	110
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	116
9 REFERÊNCIAS	118
10 APÊNDICES	123



APRESENTAÇÃO

Eu, Claudio Reinke, sou natural do Estado do Paraná e aos 15 anos, por decisão familiar, me mudei para Nova Monte Verde no extremo norte do Estado de Mato Grosso. Por esse motivo, fiquei impossibilitado de estudar por sete (07) anos consecutivos que somados a dois (02) anos de reprovação no ensino fundamental totalizam nove (09) anos de distorção de idade/série.

Porém, mesmo nesses sete anos longe das salas de aula, nunca abandonei o hábito da leitura e da informação através de revistas, jornais, livros e outros meios informativos que muitas vezes chegavam até mim através de doações, visto que à época as condições financeiras familiares não permitiam a aquisição desse tipo de material.

No ano de 1998, já com 23 anos de idade, morando na zona rural e trabalhando arduamente como agricultor o dia todo, retornei à escola no período noturno para concluir meu ensino fundamental e médio, auxiliado por professores inspiradores e colegas que se incentivavam mutuamente, ao mesmo tempo que recebia críticas e comentários desmotivadores de outros amigos que duvidavam do poder transformador da educação na vida das pessoas, mas mesmo diante desses desafios e dificuldades consegui concluir meu ensino médio no ano de 2001.

Sempre fui estudante de escola pública durante toda a Educação Básica e me tornei professor inicialmente mesmo sem a formação necessária em Licenciatura, para suprir a deficiência de profissionais habilitados em Física na Escola Estadual Monte Verde em Nova Monte Verde – MT, onde concluí o meu ensino médio em 2001.

A partir de 2002 fui imediatamente contratado como professor de Física por apresentar certa facilidade e autodidatismo para aprender conceitos e solucionar equações apresentadas nos livros didáticos da época, sendo o principal deles, o livro: Física Fundamental dos autores Bonjorno e Clinton da Editora FTD, que por sinal era um livro pouco teórico e predominantemente matemático, recheado de equações em seus exemplos e exercícios propostos.

No ano de 2003 por meio de uma parceria da Secretaria de Estado da Educação de Mato Grosso SEDUC/MT e a Universidade Federal de Mato Grosso UFMT



tive a inesperada oportunidade de ingressar via vestibular na primeira turma do Curso de Licenciatura Plena em Ciências Naturais e Matemática dessa reconhecida instituição, optando pela habilitação em Física que concluí em junho de 2007.

Ainda nesse mesmo ano fui aprovado no meu primeiro concurso como Professor efetivo de Física do quadro de professores do Estado de Mato Grosso, permanecendo na atualmente extinta E.E Monte Verde como titular da disciplina até o ano de 2010.

No início do ano de 2011 por motivos pessoais me mudei para o Estado da Paraíba e atualmente resido no município de São João do Rio do Peixe/PB, sendo professor da Escola Normal Estadual Ministro José Américo de Almeida e na Escola Cidadã Integral Técnica Estadual Coronel Jacob Guilherme Frantz, onde ingressei como Professor efetivo de Física no ano de 2013.

Ao longo de minha carreira, sempre desenvolvi projetos e participei de programas de formações continuadas oferecidos pela Secretaria de Estado de Educação e outros órgãos educacionais, a exemplo das formações em Uso das TIC's, Tablet Educacional, Robótica Educacional.

Sou também Professor Autor do Time de Autores de Ciências da Revista Nova Escola com quinze (15) planos de aulas de ciências sobre óptica e ondulatória publicado no site da revista¹.

Participei também por duas vezes do Programa de Intercâmbio Gira Mundo Israel oferecido pelo Governo do Estado da Paraíba nas edições de 2018 e 2019 e, no ano de 2023, do Programa de Intercâmbio Conexão Mundo no Curso de Especialização em Meio Ambiente, Sustentabilidade e Energias da Universidade de Mondragon, País Basco, Espanha, que me agregaram experiências valiosas de trocas de conhecimentos educacionais e socioculturais com profissionais e instituições desses países.

Enquanto profissional, acredito ser a educação e a formação contínua o caminho para as transformações e mudanças de paradigmas que tanto queremos para sociedade da qual somos parte integrante e também acredito no potencial da juventude que possui sonhos e metas definidas dentro de seu projeto de vida.

¹ Endereço eletrônico: <https://novaescola.org.br/planos-de-aula/autores/claudio-reinke/1102>



MNPEF
Mestrado Nacional
Profissional em
Ensino de Física



No ano de 2023, já com 48 anos de idade, aceitei o encorajador desafio de cursar o Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física, no Polo 31 – URCA, Juazeiro do Norte/CE, procurando sempre atualizar meu currículo através de estudos, formações e projetos que contribuam para melhorias significativas em minha prática docente e para a minha aprendizagem e de meus educandos e educandas.

Muitos foram nesse período os desafios, como a distância de 150 km aproximadamente entre minha casa e o Polo 31 da URCA; a carga de trabalho semanal; os compromissos familiares e profissionais e, ainda assim me mantenho firme nesse propósito, pois encontrei no polo 31, professores e colegas que tornaram nossa jornada mais leve e significativa para nosso empoderamento e progresso profissional dentro da perspectiva do Físico Professor, como citado por nossa referência brasileira no ensino de Física, o Professor Dr. Marco Antônio Moreira.



1 INTRODUÇÃO

O Ensino de Física ao longo de décadas tem desempenhado um importante papel na formação básica dos estudantes brasileiros, permitindo que estes possam explorar e compreender fenômenos e leis que governam o universo, desde as mais simples à mais complexas, estando intrinsecamente presente no cotidiano das pessoas, sendo essencial para compreender desde as características dos fenômenos naturais até as tecnologias que moldam a sociedade contemporânea.

Contudo, um dos grandes desafios da educação escolar reside em estabelecer conexões significativas entre os conceitos científicos e o dia a dia dos estudantes, de modo a tornar o aprendizado contextualizado e acessível, o que não apenas enriquece o ensino, mas também inspira o desenvolvimento de futuros cientistas e profissionais em diversas áreas do conhecimento.

Nesse cenário, o ensino de Física nas escolas públicas, com ênfase à Física Moderna é uma importante ferramenta de democratização e acesso ao conhecimento científico, não apenas para enriquecer o currículo das escolas, mas principalmente, para situar os estudantes em meio aos constantes avanços científicos e tecnológicos modernos, promovendo o questionamento de ideias preconcebidas sobre o mundo físico e contextualizar conhecimentos até aqui construídos.

A inclusão de tópicos atuais de Física Moderna no ensino pode ajudar a comunicar uma compreensão mais precisa da natureza dessa ciência e do trabalho científico, superando a visão linear do desenvolvimento científico que prevalece nos livros didáticos e nas aulas de física e estimular a curiosidade dos alunos e ajudá-los a entender a física como um esforço humano. (Ostermann e Moreira, 2000, p.18)

Sobre as dificuldades enfrentadas no ensino de Física no Brasil, o Professor Dr. Marco Antônio Moreira na introdução de seu artigo: *Grandes Desafios para o Ensino da Física na Educação Contemporânea*, salienta que:

A Física na Educação Básica está em crise: além falta e/ou despreparo de professores, das más condições de trabalho, do reduzido número de aulas e da progressiva perda da identidade no currículo, o ensino da Física na educação contemporânea estimula a aprendizagem mecânica de conteúdos desatualizados. É preciso, urgentemente, mudar este panorama. (MOREIRA, 2017, p. 1)



O estudo de Moreira (2017) investiga os desafios enfrentados no ensino da disciplina de Física. Entre esses desafios, destaca-se a falta de atualização dos conteúdos abordados em sala de aula.

Enquanto tópicos tradicionais, como o Movimento Retilíneo Uniforme, são amplamente ensinados, temas relacionados à Física Moderna, que concentra muitas pesquisas atuais, frequentemente são negligenciados. Essa lacuna pode contribuir para o desinteresse dos alunos pela disciplina e segundo o autor, é fundamental que os educadores revejam seus currículos e incluam abordagens atualizadas para manter o interesse e a relevância da Física no contexto educativo.

De fato, o ensino de Física Moderna na Educação Básica brasileira enfrenta inúmeros desafios, a começar pela falta de profissionais com formação em nível superior para ministrarem as aulas de Física nas escolas brasileiras.

Segundo estatísticas do Anuário da Educação Básica publicado em 2021 e que traz dados da Educação Básica do ano de 2020. no Ensino Médio:

...apenas 49,6% dos docentes que ministravam aulas de Física na Educação Básica possuíam a formação adequada para a disciplina; enquanto 36% possuíam formação em áreas distintas daquela que lecionam; outros 3,4% dos professores eram pedagogos; bacharéis formação pedagógica em disciplina diferente da que leciona eram 0,9%; bacharelado na disciplina que leciona sem formação pedagógica somavam 1,8%; com outra formação de Ensino Superior eram 5,2% dos professores e docentes de Física sem Ensino Superior completo somavam 3%. (Anuário da Educação Básica, Brasil, 2021)

Associado a esses fatores, a complexidade conceitual dos tópicos de Física Moderna também pode intimidar professores que podem não estarem preparados para a abordagem desses temas em sala, seja por estarem confortavelmente acomodados a conceitos e formulações da Física Clássica, ou pelo fato de eles serem cobrados ainda com maior grau de importância nos vestibulares e Exame Nacional do Ensino Médio (ENEM), como salienta Menezes, 2000:

É claro que precisa ser cautelosa a sinalização para a inclusão desses novos conteúdos, seja pelos desafios didáticos que implica, encontrando professores despreparados e os textos escolares desguarnecidos, seja porque as próprias universidades, ainda por algum tempo, continuarão a solicitar os velhos conteúdos em seus vestibulares. Será preciso algum tempo para que a mensagem seja, primeiro, compreendida e, mais tarde, aceita. (Menezes, 2000, p. 7).



Os estudantes no fim do ensino fundamental são atraídos e estimulados pela curiosidade, com o intuito de descobrirem novos horizontes na área da física e de outras ciências. No entanto ao chegarem ao ensino médio se frustram, devido ao fato de serem disponibilizadas poucas aulas Física, e essas com um foco pouco ligado à realidade ou às suas curiosidades, e a partir daí a disciplina torna-se pouco compreensível e prazerosa (Silva, et al, 2018, p. 2).

O fato de serem disponibilizadas poucas aulas de Física, apresentado no texto por Silva, 2018 se intensificou muito com a aprovação e instituição da Base Nacional Comum Curricular – BNCC a partir do ano de 2018, que em sua estrutura trouxe a inserção da base diversificada do currículo da Educação Básica. (BNCC, Brasil, 2018).

No entanto, o que se percebe foi a inserção de disciplinas aleatórias (Aprofundamento, Eletivas, Trilhas Didáticas, Projeto de Vida etc.) propostas e elaboradas pelas próprias instituições de ensino e seus professores sem critérios metodológicos bem definidos.

Esse fator fez com que as aulas das disciplinas da base comum fossem reduzidas drasticamente, de modo que em algumas escolas, a grade curricular contempla apenas uma aula de Física por semana, prejudicando muito a aprendizagem dos estudantes e limitando muito o trabalho pedagógico dos professores.

Embora inúmeros e diversos, os desafios até aqui apresentados não podem ser tomados como agentes desmotivadores ou limitantes para a promoção do ensino de Física Moderna nas escolas públicas, visto que nos últimos anos nosso país tem emergido como um importante polo de inovação, pesquisa científica e produção tecnológica em diversas áreas como a comunicação digital, a geração de energias renováveis, a infraestrutura de transportes, entre outras.

Nesse sentido, o ensino de Física nas escolas deve integrar esses avanços tecnológicos e científicos aos conteúdos curriculares estipulados nas ementas da disciplina, promovendo uma abordagem contextualizada e relevante para os estudantes.

Dados do Índice Global de Inovação, citados no relatório de gestão do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação – MCTI, revelam por exemplo, que:



...em 2023 o Brasil alcançou a 49ª posição num ranking de 132 países, sendo atualmente o primeiro colocado entre os países da América Latina e o 6º (sexto) colocado entre 33 (trinta e três) economias médias altas mundiais em inovação tecnológica. (MCTI, Brasil, 2023)

No campo de geração de energias renováveis, dados do Ministério de Minas e Energias revelam que entre janeiro e setembro de 2023:

Houve o maior incremento da capacidade de geração de energia solar centralizada da história no Brasil com a instalação de usinas que juntas totalizam um aumento de 3 Gigawatts da capacidade de geração, tornando a energia solar responsável por 7% de toda a matriz elétrica brasileira e com fortes perspectivas de crescimento desse setor nos próximos anos, o que demandará cada vez mais estudos, pesquisas e a formação de profissionais ligados ao setor. (EPE/MME, Brasil, 2024).

No município de São João do Rio do Peixe, alto sertão paraibano, por exemplo, foram inaugurados recentemente os parques solares Rio do Peixe I e II, com capacidade instalada de 70 Megawatts-pico (MWp), unidade de medida da potência máxima de uma fonte de energia. A energia gerada pelo parque é destinada à comercialização no mercado livre de energias renováveis.

O investimento inicial na região foi de R\$ 334,5 milhões, com a geração de cerca de 600 empregos na região durante o período de implantação, o que impactou positivamente a economia do município através dos empregos gerados e dos dividendos que são repassados aos cofres públicos.

Os empreendimentos possuem o certificado global de energia limpa I-REC, que agrega valor ao Megawatt gerado e confirma sua origem de fonte renovável e a construção destas usinas faz parte da estratégia de diversificação do portfólio do Grupo Energisa, concessionária elétrica que atende a região do Rio do Peixe.

Além desses dois parques solares, um complexo solar com seis usinas de 48,1 MWp e uma de 34,7 MWp de potência instalada pertencente ao Grupo Shell, grande companhia global de geração e comercialização de energia e que está em fase de implantação e instalação no município.

São João do Rio do Peixe devido à sua topografia plana e por estar localizado na Região do Vale do Rio do Peixe, possui um clima semiárido com altas taxas de insolação e poucas nuvens durante o ano todo e por isso, se tornou um município atrativo para grandes empresas de geração desse tipo de energia que cada vez mais vêm se estabelecendo na região.



Empresas de pequeno porte também atuam na região e vendem projetos de geração de energia solar para famílias e comerciantes, a exemplo da empresa Êxito Energia Solar que atualmente conta com cerca de 162 projetos de unidades geradoras instalados com uma capacidade média de 1,49 MWp, os quais já geraram uma média de 4,59 GWh de energia elétrica para a região.

Com base nesses dados, é imprescindível promover uma análise crítica do ensino de física nas instituições de ensino, considerando os avanços tecnológicos e econômicos contemporâneos, a fim de incitar a motivação dos jovens para as carreiras científicas, tecnológicas e docentes.

É imprescindível intensificar o ensino de Física Moderna, através de tópicos importantes como o Efeito Fotoelétrico de maneira a despertar e alimentar o interesse dos estudantes pelos conhecimentos, descobertas e tecnologias desenvolvidas nesse setor, visto que o acesso a esses saberes nessa etapa escolar pode criar uma sólida base de conhecimentos para a formação de futuros pesquisadores e profissionais que contribuirão significativamente para a construção de uma sociedade mais instruída e com elevados níveis de desenvolvimento científico.

Nesse contexto, a presente dissertação tem o objetivo geral investigar e propor uma abordagem metodológica contextualizada para o ensino do efeito fotoelétrico à luz da teoria dos campos conceituais para estudantes da 3ª Série do Ensino Médio da Escola Integral Coronel Jacob Guilherme Frantz em São João do Rio do Peixe, Paraíba.

O trabalho reconhece a importância desse assunto como um tema fundamental da Física Moderna em sua conexão intrínseca com aplicações práticas do cotidiano dos estudantes, como a geração de energia solar na região.

Nessa perspectiva, este trabalho de dissertação se propõe:

- Analisar as percepções e compreensões dos estudantes sobre o efeito fotoelétrico, identificando suas potencialidades e fragilidades conceituais, bem como mobilizar os conhecimentos prévios deles em relação a esse fenômeno físico.
- Desenvolver uma Sequência Didática que integre fundamentos da Teoria dos Campos Conceituais de Gerard Vergnaud com o ensino de física, promovendo assim uma aprendizagem contextualizada e ativa,



que estimule a resolução de problemas e a aplicação prática dos conceitos físicos no cotidiano dos estudantes;

- Promover uma reflexão crítica sobre a importância da experimentação e da contextualização histórica no ensino do efeito fotoelétrico, ressaltando como essas estratégias podem enriquecer a experiência educativa e fomentar uma visão mais integrada da física com a realidade cotidiana dos estudantes.
- Avaliar o impacto dessa abordagem na motivação dos estudantes em relação às ciências, contribuindo para uma formação mais sólida e consciente sobre as potencialidades das energias renováveis e seus benefícios para a sociedade moderna.

O trabalho está estruturado da seguinte forma: no capítulo 2 é apresentada uma breve revisão de literatura sobre o ensino do conceito sobre o efeito fotoelétrico; no capítulo 3 destacam-se aspectos relevantes da teoria dos campos conceituais; no capítulo 4 discorre-se sobre a física que perpassa a física moderna centrando no efeito fotoelétrico; no capítulo 5 descreve-se os caminhos metodológicos destacando o tipo de investigação e o detalhamento de uma sequência didática norteadora da intervenção na escola; no capítulo 6 encontra-se as análises dos resultados e no capítulo 7 as considerações finais.



2 BREVE REVISÃO SOBRE FÍSICA MODERNA E EFEITO FOTOELÉTRICO EM DISSERTAÇÕES E LIVROS DIDÁTICOS

Para o embasamento e referenciamento teórico–metodológico desta dissertação, foram realizadas revisões bibliográficas que versam sobre o tema Efeito Fotoelétrico no Ensino Médio em quatro dissertações defendidas entre os anos de 2019 e 2022 no âmbito do Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física MNPEF polo 31 na Universidade Regional do Cariri – URCA campus CRAJUBAR; sete dissertações publicadas entre os anos de 2020 e 2023 no Portal de Periódicos da Capes e de três Livros Didáticos de Física do Programa Nacional do Livro Didático (PNLD) do ano de 2018.

A primeira dissertação analisada, tem como título: “*Análise da Força da Gravidade e Efeito Fotoelétrico nas Aulas de Física no Ensino Médio a Partir da Utilização de Simuladores Phet e Realização de Experimentos*” (Lima, 2020) e investiga como simuladores e experimentos podem contribuir para o ensino da Gravidade e Efeito Fotoelétrico, visando melhorar a compreensão dos estudantes sobre esses temas.

Segundo o autor, o uso de simuladores Phet mostrou evolução significativa na qualidade das respostas dos estudantes e despertou o interesse deles pelos conceitos de gravidade e efeito fotoelétrico.

O Efeito Fotoelétrico é definido nessa dissertação como o fenômeno no qual elétrons são emitidos de um material quando expostos à luz, destacando contribuições de Heinrich Hertz e Albert Einstein¹ para sua descoberta e explicações.

A segunda dissertação, “*Tópicos de Física Quântica em Versos de Cordel e Arte dos Quadrinhos, ensinados à Luz de uma Unidade de Ensino Potencialmente Significativa*” (Feitosa, 2019), aborda a física quântica através de versos de cordel e quadrinhos. A dissertação utiliza elementos da cultura popular brasileira para tornar os conceitos mais acessíveis e interessantes, destacando a dualidade onda-

¹ Heinrich Hertz foi o primeiro a observar o efeito fotoelétrico em 1887, demonstrando que a luz ultravioleta podia ejetar elétrons de um eletrodo, estabelecendo a base empírica para a interação entre luz e matéria. Em 1905, Albert Einstein apresentou uma explicação teórica para esse fenômeno, propondo que a luz é composta por fótons, que, ao serem absorvidos, fornecem a energia necessária para a emissão de elétrons. Essa contribuição foi decisiva para o entendimento do efeito fotoelétrico e o amadurecimento da teoria quântica, rendendo a Einstein o Prêmio Nobel de Física em 1921.



partícula e o princípio da incerteza de Heisenberg². A abordagem histórica e a combinação de texto e imagem facilitam a compreensão dos conceitos complexos por parte dos estudantes.

A terceira dissertação, “*O ensino da Física Moderna: O Efeito Fotoelétrico, a partir da Metodologia Fedathi*” (Morais, 2022), propõe para o ensino do Efeito Fotoelétrico nas aulas de Física, a utilização da Metodologia Fedathi³, que enfatiza a experimentação e a investigação científica como estratégias pedagógicas. A proposta foi envolver os alunos em atividades práticas, seja por meio de experimentos reais, evidências de aplicação ou simulações virtuais, como as disponibilizadas no Portal Interativo de Física Moderna⁴.

A abordagem pedagógica sugerida busca estimular a participação ativa dos estudantes na construção do conhecimento, promovendo a reflexão, a pesquisa e a simulação do Efeito Fotoelétrico de forma sequenciada e lógica, de acordo com as etapas da Sequência Fedathi: Tomada de Posição, Maturação, Solução e Prova. Dessa forma, o ensino do Efeito Fotoelétrico é proposto de maneira dinâmica, interativa e contextualizada, visando proporcionar uma aprendizagem significativa e envolvente para os estudantes.

A quarta dissertação, “*Jogo Ludophysis para explorar o Efeito Fotoelétrico no Ensino Médio por meio de uma UEPS*” (Cruz, 2021), foca na criação e validação do jogo educativo Ludophysis, elaborado pelo próprio autor, para ensinar o Efeito Fotoelétrico. O jogo oferece uma experiência de aprendizagem significativa e inovadora, situando o efeito fotoelétrico no contexto da física moderna e destacando a hipótese quântica de Einstein. O Ludophysis tornou o estudo mais atrativo e participativo

² A dualidade onda-partícula é um conceito fundamental na física quântica que demonstra que partículas como os elétrons podem se comportar tanto como ondas quanto como partículas, dependendo do tipo de experimento. Por outro lado, o Princípio da Incerteza de Heisenberg, proposto em 1927, estabelece que não é possível medir simultaneamente com precisão a posição e o momento de uma partícula; quanto mais precisamente uma dessas propriedades é medida, maior é a incerteza da outra, refletindo a natureza probabilística da mecânica quântica.

³ A Sequência Fedathi é uma metodologia de ensino que promove a construção do conhecimento por meio de etapas estruturadas, envolvendo a tomada de posição, maturação, solução e prova. Essa abordagem visa estimular a investigação científica e a experimentação, permitindo que os alunos se engajem ativamente no processo de aprendizagem. Autores como Hermínio Borges Neto e seus colaboradores defendem essa metodologia como uma forma eficaz de promover uma aprendizagem efetiva e contextualizada.

⁴ <https://quantumdeluz.com.br>



para os estudantes, permitindo que vivenciassem os conceitos de forma prática e dinâmica.

Após a análise e revisão das quatro dissertações apresentadas no Polo 31 do MNPEF, conclui-se que os pontos mais relevantes e comuns observados entre elas são a ênfase na experimentação e investigação científica, visto que todas elas destacam essas premissas como importantes estratégias pedagógicas no ensino de Física, visando envolver os estudantes em atividades práticas para promover uma aprendizagem significativa e articulada com o cotidiano.

A contextualização histórica é bem presente nos textos, sendo que as dissertações analisadas abordam o conjunto histórico do Efeito Fotoelétrico, valorizando as contribuições de cientistas como Heinrich Hertz, Philip Lenard e Albert Einstein, situando o fenômeno dentro de um panorama mais amplo da física moderna e da ciência de modo geral.

A utilização de linguagens artísticas e culturais também é observada, sendo que duas, das dissertações analisadas exploram a combinação de versos de cordel e arte dos quadrinhos para tornar os conceitos da física quântica mais acessíveis e significativos para os estudantes, contribuindo para uma compreensão mais próxima da linguagem cotidiana.

E a abordagem inovadora e criativa também é um diferencial, visto que as dissertações buscam apresentar métodos ativos de ensino de Física através de Unidades de Ensino Potencialmente Significativas e Sequência Fedathi, visando tornar o estudo de conceitos complexos mais atrativos e acessíveis aos estudantes, por meio de instrumentos de planejamento de ensino muito bem elaborados, estruturados e de fácil replicabilidade.

A busca por referências e material de leitura realizada no Portal⁶ de Periódicos da CAPES sobre artigos publicados usando como palavras-chaves a frase “*Ensino do Efeito Fotoelétrico no Ensino Médio*” se concentrou no intervalo temporal entre janeiro de 2020 e dezembro de 2023, pois na data de realização da pesquisa, ainda não havia a possibilidade de selecionar datas do ano de 2024 como período de pesquisa.

⁶ <https://www.periodicos.capes.gov.br/>



Como resultado da pesquisa foram obtidas 07 (sete) dissertações alinhadas às palavras-chaves do tema pesquisado, destacando o ensino de física moderna no ensino médio, com ênfase ao efeito fotoelétrico por meio de sequências de ensino bem fundamentadas, referenciais teóricos amplos, metodologias diversificadas e recursos didáticos apropriados, conforme a descrição individual de cada uma delas que se faz na sequência.

O “*Estudo do Efeito Fotoelétrico por Problemática no Instituto Federal em Xapuri/AC*” (Gomes, et al, 2022) utiliza como referencial metodológico principal os Três Momentos Pedagógicos (3MPs) de Delizoicov e Angotti (1990), que incluem Problemática Inicial, Organização do Conhecimento e Aplicação do Conhecimento.

A pesquisa também se apoia na importância da experimentação no ensino de Física e na educação problematizadora de Paulo Freire (1987). A metodologia empregada é de natureza qualitativa com finalidade descritiva, explorando os 3MPs através de questionamentos sobre o cotidiano (iluminação pública, portas automáticas) para sondar conhecimentos prévios e estimular debates em grupos.

Como recursos didáticos, foram utilizadas reportagens para contextualização, aulas expositivas e dialogadas, demonstrações com um relé fotoelétrico, vídeos e uma simulação computacional do efeito fotoelétrico que permitia a alteração de variáveis como frequência e intensidade luminosa. A aplicação do conhecimento envolveu pesquisa, elaboração de relatórios e uma avaliação final.

Com o ensino por investigação como abordagem central, a dissertação “*O Ensino por Investigação como Abordagem para o Estudo do Efeito Fotoelétrico com Estudantes do Ensino Médio de um Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia*” (Silva Junior e Coelho, 2020) fundamenta-se em uma visão sociocultural da aprendizagem em ciências, inspirada em Vygotsky e outros autores como Sasseron (2015, 2018) e Munford e Lima (2007).

A aprendizagem é entendida como um processo de enculturação científica, onde o conhecimento é construído socialmente através de interações discursivas e a apropriação de conceitos, procedimentos e atitudes.

A metodologia é do tipo pesquisa-intervenção pedagógica, de natureza qualitativa, utilizando uma Sequência de Ensino Investigativa (SEI). A principal explora-



ção metodológica foi uma demonstração investigativa com um relé fotoelétrico, gravada em áudio e vídeo, permitindo a análise das interações discursivas.

Os recursos didáticos incluíram o próprio aparato experimental e a retomada de uma simulação computacional do efeito fotoelétrico utilizada em atividade anterior. A aula foi dividida em etapas para analisar o desenvolvimento de hipóteses, inferências, e trabalho colaborativo.

A dissertação “*O Estudo do Comportamento Dual da Luz com a Mediação da Aprendizagem Cooperativa: Uma Análise Qualitativa do Efeito Fotoelétrico*” (Sousa e Ataíde, 2020) tem como referencial teórico principal a Aprendizagem Cooperativa, destacando os cinco elementos básicos: interdependência positiva, responsabilidade individual, interação face-a-face, habilidades sociais e processamento de grupo, conforme Johnson e Holubec (1999).

A metodologia utilizada é uma análise qualitativa da aplicação de uma sequência didática. Os autores exploraram o Efeito Fotoelétrico e a dualidade onda-partícula da luz através de três métodos cooperativos: Jigsaw, onde os alunos se dividem em grupos base e especialistas para leitura e discussão de textos; Pensar-Formar pares-Partilhar (Think-Pair-Share), que envolve reflexão individual, discussão em pares e compartilhamento com a turma; e Cabeças Numeradas, para a resolução cooperativa de questões conceituais.

Os recursos didáticos incluíram textos impressos, um vídeo (“A saga do prêmio Nobel”), e o software PhET para revisão de conceitos de ondulatória e ótica. A coleta de dados foi realizada por gravações em áudio, inquérito final global e processamento de grupo.

O referencial teórico central da dissertação “*Um Estudo dos Invariantes Operatórios Mobilizados por Estudantes da Terceira Série do Ensino Médio sobre o Efeito Fotoelétrico*” (Carvalho e Gomes, 2022) é a Teoria dos Campos Conceituais de Gérard Vergnaud (1982, 1993), que define um conceito como um triplo de situações (S), invariantes operatórios (I) e representações simbólicas (R). A pesquisa busca identificar os invariantes operatórios (conceitos-em-ação e teoremas-em-ação) mobilizados pelos estudantes.

A metodologia empregada é de cunho qualitativo, baseada em observação participante e aplicação de questionários com questões abertas. Os recursos didáti-



cos foram explorados em uma sequência de atividades, que incluiu o uso de um eletroscópio de folhas e materiais para eletrização (bexigas, canos, flanela e papel).

Foram realizados testes experimentais para descarregar o eletroscópio utilizando lanternas de celular e luzes de LED coloridas. Posteriormente, foi utilizado um vídeo da Univesp USP sobre o efeito fotoelétrico e um simulador para a conceitualização formal do fenômeno.

O artigo *“Uma Sequência Didática Investigativa para a Aprendizagem Conceitual do Efeito Fotoelétrico”* (Silva e Figueiredo, 2022) tem como referencial teórico as Sequências de Ensino Investigativas (SEI), propostas por Carvalho (2013), e se alinha à Base Nacional Comum Curricular (BNCC) que estimula a investigação e análise de fenômenos.

A teoria da aprendizagem significativa de Ausubel (2000) também é utilizada, enfatizando o papel dos conhecimentos prévios. A metodologia é de natureza qualitativa, exploratória e descritiva.

Os autores descrevem duas atividades investigativas: a "Colisão Elástica com Plano Inclinado – Uma Analogia Mecânica do Efeito Fotoelétrico", que utiliza uma rampa com espectro de luz, um carrinho e obstáculos para simular o efeito, explorando a conservação da energia mecânica; e a "Demonstração Experimental do Efeito Fotoelétrico com o Eletroscópio e Farolete com Lâmpada Ultravioleta", que usa um eletroscópio e diferentes fontes de luz (comum e ultravioleta) para observar a eletrização e o Efeito Fotoelétrico. Os recursos didáticos incluem o aparato experimental da rampa, materiais para eletrização (régua de acrílico, bexigas, papel), o simulador online PhET Colorado e uma animação em vídeo intitulada "Dr. Quantum".

O referencial teórico da pesquisa *“Utilização De Experimentos Analógicos e Softwares para Auxiliar o Processo Ensino Aprendizagem do Efeito Fotoelétrico”* (Cabral, 2022) está fundamentado na teoria da aprendizagem significativa cognitiva de David Paul Ausubel (1978) e nas contribuições de Marco Antônio Moreira (2006, 2011), que abordam a interação não arbitrária da nova informação com os conhecimentos prévios do aprendiz.

A Lei de Diretrizes e Bases da Educação (LDB) de 1996 e as Diretrizes Curriculares Nacionais (DCNs) são evocadas para embasar a utilização de métodos experimentais. A metodologia utilizada pelo autor foi dividida em três etapas: um ques-



tionário inicial para diagnóstico dos conhecimentos prévios dos estudantes, a montagem e utilização de experimentos e softwares, e um questionário final para verificar a aprendizagem significativa.

Como recursos didáticos, foram utilizados três experimentos analógicos (in loco): "Ouça o seu controle remoto" (circuito com LDR), "Sensor de luz" (circuito com LDR, LED e transistor) e "Placa solar de LEDs" (demonstração de geração de energia com LEDs e capacitor).

Além disso, foram empregados dois softwares virtuais: PhET Colorado e Simu Photon, que permitem a simulação e manipulação de variáveis do efeito fotoelétrico.

A Dissertação "*Utilização do Arduino no Desenvolvimento de um Experimento Didático para discussão do Efeito Fotoelétrico no Ensino Médio*" (Assunção e Turuda, 2020) fundamenta-se na importância da experimentação no ensino de Física para a aquisição de conhecimentos, citando Assunção e Nascimento (2017), e na necessidade de inserir a Física Moderna no currículo do Ensino Médio, conforme o estabelecido pela BNCC.

A explicação de Albert Einstein para o Efeito Fotoelétrico é o pilar teórico para o fenômeno em estudo. A metodologia envolve o desenvolvimento e a construção de um objeto didático de baixo custo utilizando Arduino e módulos fotovoltaicos.

Os autores criaram um modelo virtual do objeto com o software SketchUp Pro 2016 e construíram a versão física com um anteparo de PVC, módulos fotovoltaicos, sensores LDR e um motor servo, conectados a uma placa Arduino. A programação em Arduino foi utilizada para coletar dados de luminosidade em diferentes ambientes e para controlar o servo motor.

Testes foram realizados com lâmpadas LED, fluorescentes e incandescentes para investigar a relação entre intensidade de luz e corrente fotoelétrica, demonstrando a não linearidade em conformidade com a teoria de Einstein.

A seguir é apresentado um quadro comparativo das dissertações analisadas, destacando os aportes metodológicos, principais teóricos da educação citados e recursos didáticos utilizados pelos autores durante suas intervenções didáticas.



Tabela 1 – Quadro comparativo das dissertações analisadas do Portal da Capes.

Título do Artigo	Autor(es)	Aporte Metodológico	Teóricos Citados	Recursos Didáticos
<i>Estudo do efeito fotoelétrico por problematização no Instituto Federal em Xapuri/AC</i>	Isaías Fernandes Gomes, Bianca Martins Santos, Gahelyka Aghta Pantano Souza, Antonio Romero da Costa Pinheiro.	Três Momentos Pedagógicos.	Paulo Freire, Delizoicov e Angotti	Relê fotoelétrico, exemplos do cotidiano
<i>O ensino por investigação como abordagem para o estudo do efeito fotoelétrico com estudantes do ensino médio de um Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia.</i>	João Mauro da Silva Júnior, Geide Rosa Coelho	Ensino por investigação, análise de interações discursivas.	Mortimer, Scott, Sasse-ron, Carvalho	Relê fotoelétrico, gravações em aula
<i>O estudo do comportamento dual da luz com a mediação da aprendizagem cooperativa: uma análise qualitativa do efeito fotoelétrico.</i>	Francisco Ivanildo de Sousa, Ana Raquel Pereira de Ataíde.	Aprendizagem cooperativa.	Pozo, Vygotsky, Delizoicov	Textos, vídeos e PhET
<i>Um estudo dos invariantes operatórios mobilizados por estudantes da terceira série do Ensino Médio sobre o efeito fotoelétrico.</i>	Bianca Cintra de Carvalho, Luciano Carvalhais Gomes.	Teoria dos Campos Conceituais.	Vergnaud, Moreira	Eletroscópio, luz visível e LED
<i>Uma Sequência Didática Investigativa para a Aprendizagem Conceitual do Efeito Fotoelétrico.</i>	Samuel Gonçalves da Silva, Helenara Regina Sampaio Figueiredo	Sequência de ensino investigativa.	Carvalho, Ausubel	Plano inclinado, eletroscópio
<i>Utilização de experimentos analógicos e softwares para auxiliar o processo ensino aprendizagem do efeito fotoelétrico.</i>	Carlos R. G. Cabral, Fernanda Carla L. Ferreira, Marcelo Souza da Silva, Orahcio F. de Sousa, Andréa de L. F. Novais.	Sala de aula invertida com kits experimentais.	Ausubel, Moreira	Simu Photon, PhET, sensores
<i>Utilização do Arduino no desenvolvimento de um experimento didático para discussão do efeito fotoelétrico no ensino médio.</i>	Thiago Vicente de Assunção, Charles Teruhiko Turuda.	Transposição didática e experimentação tecnológica.	Assunção, Auler, Martins	Arduino, sensores LDR, painéis solares

As dissertações observadas a partir do Portal de Periódicos da Capes revelaram um panorama consistente sobre o ensino de Física Moderna no Ensino Médio, especialmente, sobre o Efeito Fotoelétrico, dialogando entre si em diversos pontos importantes, como o consenso de que o ensino tradicional de Física, caracterizado



pela transmissão unilateral de conteúdos e foco excessivo em equações ou “fórmulas” descontextualizadas, é ineficaz e leva ao desinteresse por parte dos estudantes.

Todas as pesquisas analisadas defendem a urgência e a importância de inserir a Física Moderna no currículo, destacando o Efeito Fotoelétrico por sua relevância no cotidiano, como em tecnologias de portas automáticas, iluminação pública e fotocélulas, ou por seu papel fundamental para o amadurecimento da Física Quântica.

Para superar as limitações do ensino tradicional, as dissertações propõem e validam a utilização de metodologias ativas e investigativas. As Sequências de Ensino Investigativas (SEI), inspiradas em Carvalho (2013), são citadas para reconfigurar a dinâmica da sala de aula, transformando o professor em mediador e o estudante em protagonista.

A sequência, baseada nos Três Momentos Pedagógicos (3MPs), difundidos por Delizoicov e Angotti (1990), articulam momentos de problematização inicial, organização do conhecimento e aplicação do conhecimento. A problematização inicial, em particular, envolve a apresentação de questões e situações reais do cotidiano dos estudantes para sondar conhecimentos prévios e iniciar debates em pequenos grupos.

A Aprendizagem Cooperativa é outra abordagem utilizada para fomentar a interação entre pares, a resolução de conflitos e a corresponsabilidade pela aprendizagem e o papel do professor é fundamental nesse processo, atuando como orientador, mediador e propositor de atividades que favorecem o diálogo, a reflexão e a autonomia dos estudantes, valorizando seus conhecimentos prévios e suas hipóteses.

A diversificação dos recursos didáticos é outro ponto considerável, tornando o ensino do Efeito Fotoelétrico menos abstrato. Experimentos reais e analógicos são desenvolvidos para demonstrar o fenômeno na prática, como o uso de relés fotoelétricos, eletroscópios, ou circuitos com LDR e Arduino.

A construção de aparatos de baixo custo, utilizando materiais reciclados ou facilmente acessíveis, é um destaque, tornando as propostas mais viáveis para escolas com recursos limitados.

Simuladores computacionais (como PhET e Simu Photon) e vídeos são amplamente utilizados para visualizar conceitos abstratos e manipular variáveis que



seriam difíceis de controlar em laboratórios convencionais. Além disso, vídeos educativos e textos de divulgação científica são empregados para contextualizar o conteúdo, despertar o interesse e aprofundar as discussões.

A aprendizagem significativa de David Ausubel (Ausubel, 1963) é uma teoria cognitiva fundamental citada nas dissertações, que busca conectar novos conhecimentos aos saberes prévios dos estudantes por meio de seus subsunçores.

A Teoria dos Campos Conceituais de Vergnaud (Vergnaud, 1996) é também explicitamente utilizada para analisar os "invariantes operatórios" dos estudantes, revelando suas compreensões implícitas sobre o fenômeno e como buscam encaixar novas observações em seus esquemas mentais preexistentes e por fim, a contextualização entre o discurso científico e o cotidiano é um resultado comum e desejável, permitindo que os estudantes integrem o conhecimento formal à sua realidade socioeducacional.

Esses aspectos forneceram uma base sólida e inspiradora para a presente pesquisa e a escrita desta dissertação, oferecendo insights valiosos em diversas situações.

Em primeiro lugar, a necessidade e a importância de abordar a Física Moderna e o Efeito Fotoelétrico no Ensino Médio são amplamente justificadas em todas as dissertações. Isso foi decisivo para fundamentar a relevância desse estudo, mostrando que o tema não é apenas uma exigência curricular, como indicado pela Base Nacional Comum Curricular–BNCC, mas também uma forma de contextualizar a física com o cotidiano dos estudantes despertando a curiosidade e motivação durante as aulas.

Quanto ao referencial teórico, a dissertação de Carvalho e Gomes, 2022 foi uma referência objetiva nessa pesquisa, pois utiliza a Teoria dos Campos Conceituais de Gérard Vergnaud como sua principal fundamentação.

Ela detalha como os conceitos são definidos como um triplo S, I, R (Situações, Invariantes operatórios, Representações simbólicas) e como os esquemas contêm os invariantes operatórios (conceitos-em-ação e teoremas-em-ação), que servem como espinha dorsal teórica, e que, aliada à leitura das outras dissertações, enriqueceram a discussão sobre a transição da Física Clássica para a Quântica com a descoberta e explicação do Efeito Fotoelétrico, um ponto de complexidade que a teoria de Vergnaud pode ajudar a compreender por meio de situações e esquemas



que orientam a análise da compreensão dos estudantes e sua aprendizagem durante o período de intervenção metodológica. (VERGNAUD, 1996. p. 202).

As discussões sobre os resultados e desafios apresentados nessas dissertações são muito importantes podendo antecipar possíveis dificuldades dos estudantes em diferenciar conceitos como frequência e intensidade da luz, ou em superar concepções do senso comum sobre o funcionamento de dispositivos fotovoltaicos, bem como planejar intervenções didáticas prevendo essas dificuldades, fomentando a análise de como os conceitos cotidianos se relacionam com os conhecimentos científicos na construção e sedimentação de um campo conceitual.

2.1 O que dizem os livros didáticos.

O livro didático de Física desempenha um papel fundamental no ensino e aprendizagem dessa disciplina no Ensino Médio das escolas públicas brasileiras. O Programa Nacional do Livro para o Ensino Médio (PNLEM) e o Programa Nacional do Livro Didático (PNLD) têm sido responsáveis pela distribuição de milhões de exemplares dessas obras em todo o país, representando um investimento significativo do Governo Federal. Nesse contexto, é essencial compreender os critérios utilizados para a escolha e análise dos livros didáticos de Física, a fim de promover a qualidade do ensino e subsidiar pesquisas acadêmicas nesta área.

Convém aqui ressaltar que no ano de 2018 aconteceu a última edição do PNLD específico por disciplina, visto que em 2021 o PNLD alicerçado na Base Nacional Comum Curricular trouxe uma nova configuração alinhada às diretrizes do Novo Ensino Médio aprovado em 2017, que apresenta as novas coleções de livros didáticos distribuídos por áreas do conhecimento e não mais por disciplinas específicas (BRASIL, 2018).

O Novo Ensino Médio, instituído pela Lei 13.415/2017, promoveu uma reforma na estrutura curricular dessa etapa da educação básica, trazendo mudanças significativas na organização do ensino. Uma das principais alterações foi o aumento da carga horária mínima, que passou de 2.400 para 3.000 horas ao longo dos três anos, com a previsão de ampliação gradual.

Além disso, a reforma envolveu uma maior flexibilização curricular, permitindo que os estudantes escolhessem parte do conteúdo para ser estudado de acordo com seus interesses e aspirações profissionais.



A formação passou a ser dividida em dois grandes componentes: a Base Nacional Comum Curricular (BNCC), que contempla os conteúdos obrigatórios para todos os alunos com carga horária de 1800 horas, e os itinerários formativos, que oferecem aprofundamento em áreas específicas do conhecimento, como Linguagens, Matemática, Ciências da Natureza, Ciências Humanas e Sociais Aplicadas, além da possibilidade de formação técnica e profissional com carga horária de 1200 horas.

Os estados e as escolas possuem autonomia para definir quais itinerários ofereceriam, levando em consideração a estrutura disponível e a demanda dos estudantes.

Outra mudança significativa foi a introdução de um modelo mais dinâmico e integrado de ensino, que busca conectar os conteúdos à realidade dos alunos, estimular o protagonismo juvenil e desenvolver competências e habilidades essenciais para o século XXI. A reforma também permitiu o uso do ensino híbrido, com parte das atividades realizadas presencialmente e outra parte a distância, especialmente para a formação técnica.

Entretanto, fundamentado em nossa experiência como docente de física no ensino médio, o Novo Ensino Médio gerou debates sobre desafios na melhoria, como a falta de estrutura adequada em muitas escolas, a formação de professores e a desigualdade no acesso aos itinerários formativos em diferentes regiões do país, sem falar na redução drástica no número de aulas da Base Nacional Comum Curricular.

Devido a essas críticas foi instituída em 31 de julho de 2024 por meio da promulgação da Lei nº 14.945/2024, a Política Nacional do Ensino Médio que promoveu alterações na Lei de Diretrizes e Bases da Educação Nacional (Lei nº 9.394/1996) e revogou parcialmente a Lei nº 13.415/2017, que anteriormente regulamentava a reforma do Novo Ensino Médio.

Essa nova diretriz, ou Novíssimo Ensino Médio, visa proporcionar uma adequação mais eficaz das alternativas formativas à realidade das instituições escolares, ao mesmo tempo em que reintegram componentes curriculares obrigatórios, como História e Biologia, os quais tinham sido flexibilizados no modelo anterior.

Além disso, uma nova estrutura curricular redefine a carga horária específica à formação geral básica, ampliando-a para um total de 2.400 horas para os estudan-



tes que optam pelo ensino médio regular, em contraposição à carga horária anterior de 1.800 horas.

A organização curricular mantém a carga horária total de 3.000 horas distribuídas ao longo dos três anos do ensino médio, tanto na modalidade regular, quanto na modalidade técnica.

No caso do ensino médio regular, as 600 horas adicionais, que complementam a formação geral básica, terão de ser direcionadas para itinerários formativos, os quais se estruturam em quatro grandes áreas do conhecimento: linguagens e suas tecnologias; matemática e suas tecnologias; ciências da natureza e suas tecnologias; e ciências humanas e sociais aplicadas.

As instituições de ensino, dentro da sua autonomia e considerando as suas condições estruturais, devem oferecer itinerários formativos em pelo menos duas dessas áreas.

Com respeito ao ensino médio técnico, a organização curricular compreende 2.100 horas destinadas aos componentes curriculares da formação geral básica, sendo complementadas por 300 horas de um itinerário formativo que dialoga com a formação técnica e por uma carga horária adicional, que pode atingir até 1.200 horas, dedicada exclusivamente à qualificação profissional. Essa nova estrutura de busca garante maior equidade na distribuição dos conteúdos, ao mesmo tempo em que possibilita aos estudantes uma formação mais alinhada às demandas acadêmicas.

Em relação ao Programa Nacional dos Livros Didáticos (PNLD), Schivani et al. (2020) abordam a importância dos livros didáticos de Física no contexto do Ensino Médio das escolas públicas no Brasil, com foco nas escolhas e análises realizadas pelos professores e pesquisadores. Segundo os autores, os critérios utilizados para a escolha das obras para o Ensino Médio incluem a reflexão coletiva entre os professores, a consulta ao guia do livro didático, a análise da presença de elementos históricos, a investigação das atividades experimentais propostas e a consideração do perfil epistemológico das obras adotadas.

Sendo assim, de acordo com o levantamento feitos pelos autores, as coleções de livros de Física enquanto disciplina específica disponíveis nacionalmente para a escolha em 2018 estão apresentadas na tabela 2, com informações sobre os



autores, editoras e valores de cada exemplar à época aos cofres do Ministério da Educação – MEC.

Tabela 2 – Levantamento dos Livros de Física disponíveis pelo PNLD 2018.

Valores de cada volume (livro do aluno) para aquisições efetuadas pelo MEC com distribuição em 2018					
Código	Título/ Autores	Editora	Valor (R\$)		
			Vol. 1	Vol. 2	Vol. 3
0021P18133	Física/ Carron; Guimarães; Piqueira	Ática	8,45	8,23	8,45
0025P18133	Compreendendo a Física/ Alberto Gaspar	Ática	8,45	8,45	8,45
0045P1813	Física: Contexto & Aplicações/ Antônio Máximo; Beatriz Alvarenga; Carla Guimarães	Scipione	8,62	7,71	8,39
0071P18133	Ser Protagonista – Física/ Adriana Benetti Marques Válio; Ana Fukui; Ana Paula Souza Nani; Bassam Ferdinian; Madson de Melo Molina; Gladstone Alvarenga de Oliveira; Venê	SM	8,79	8,79	8,79
0100P18133	Física para o Ensino Médio/ Kazuhito Yamamoto; Luiz Felipe Fuke	Saraiva	8,50	8,50	8,50
0101P18133	Física/ Ricardo Helou Doca; Gualter José Biscuola; Newton Villas Bôas	Saraiva	8,50	10,24	10,24
0118P18133	Física: Interação e Tecnologia/ Aurelio Gonçalves Filho; Carlos Toscano	Leya	12,16	10,24	10,24
0129P18133	Física aula por aula/ Benigno Barreto; Claudio Xavier	FTD	8,90	8,90	7,96
0131P18133	Física/ Bonjorno; Casemiro; Clinton; Eduardo Prado	FTD	8,90	8,90	8,43
0167P18133	Física em Contextos/ Alexander Pogibin; Maurício Pietrocola; Renata de Andrade; Talita Raquel Romero	Editora do Brasil	14,31	14,31	14,31
0188P18133	Física - Ciência e Tecnologia/ Carlos Magno A. Torres; Nicolau Gilberto Ferraro; Paulo Antônio de Toledo Soares; Paulo Cesar Martins Penteado	Moderna	8,62	8,39	8,62
0200P18133	Conexões com a Física/ Blaidi Sant'anna; Glorinha Martini; Hugo Carneiro Reis; Walter Spinelli	Moderna	8,62	8,62	8,39

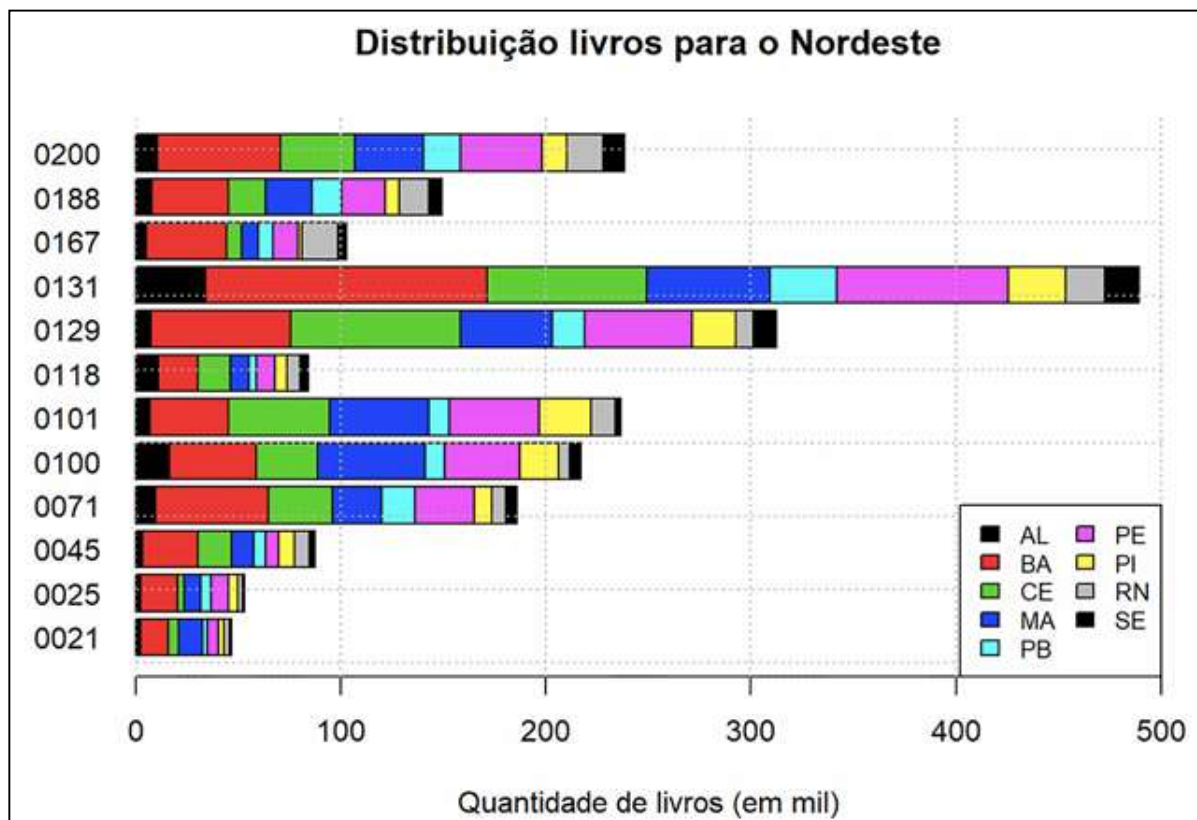
Fonte: Programa Nacional do Livro Didático de Física: Subsídios para Pesquisas, Revista Brasileira de Ensino de Física, Volume 42. Página 05.

Na figura 1, produzida por Schivani, et al (2018) é possível também observar quais as coleções de livros de Física foram as mais adotadas por escolas públicas da Região Nordeste em 2018 no âmbito do PNLD.

A partir dos dados apresentados pelos autores na figura 1, é possível afirmar que a coleção de livros de Física mais adotada pelas escolas públicas da Região Nordeste em 2018 foi a de código 0131P18133 dos autores Bonjorno, Casemiro, Clinton e Eduardo Prado, publicada pela Editora FTD, com quase meio milhão de exemplares distribuídos pelos nove estados da região.

Já a coleção menos escolhida pelos professores foi a de código 0021P18133 dos autores Carron, Guimarães e Piqueira, publicada pela Editora Ática com aproximadamente cinquenta mil exemplares distribuídos pelos estados do nordeste.

Figura 1 – Coleções de livros de Física mais adotadas na Região Nordeste em 2018.



Fonte: Programa Nacional do Livro Didático de Física: Subsídios para Pesquisas, Revista Brasileira de Ensino de Física, Volume 42. Página 05.

Realizando uma análise dessas duas obras no que se refere ao ensino de Física Moderna, especificamente do Efeito Fotoelétrico é possível encontrar na obra Bonjorno & Clinton, 2018 (Código 0131P18133) conhecimentos e referenciais teóricos onde o tema é tratado como um fenômeno fundamental na física quântica, no qual a luz incidente sobre um material pode causar a emissão de elétrons.

O efeito fotoelétrico é explicado por meio da teoria dos quanta, introduzida por Max Planck em 1900 e utilizada por Albert Einstein em seu artigo⁷ publicado na Revista Alemã Annalen der Physik em 1905.

O livro detalha que a emissão de elétrons ocorre somente a partir de uma determinada frequência, conhecida como frequência de corte, que depende do material sobre o qual a radiação incide. Para frequências inferiores à de corte, o efeito não ocorre, mesmo que a intensidade da radiação seja aumentada. Quando a emis-

⁷ Uma visão heurística da produção e transformação da luz. Albert Einstein, 1905.



são ocorre, o número de elétrons emitidos é diretamente proporcional à intensidade da luz incidente.

Aplicações práticas do efeito fotoelétrico são também mencionadas, como células fotoelétricas que controlam a abertura e o fechamento de portas de elevadores, o funcionamento de máquinas, visores noturnos, e células solares que convertem energia luminosa em eletricidade. Além disso, o texto discute o uso de sensores em câmeras digitais, que se baseiam no efeito fotoelétrico para capturar imagens.

O volume III da coleção Bonjorno & Clinton também aborda o experimento de Compton, que confirmou a natureza quântica dos raios-X, mostrando que os fótons se comportam como partículas em colisões com elétrons.

A dualidade onda-partícula é abordada no livro acima citado como um conceito central na física quântica, que descreve o comportamento tanto ondulatório quanto corpuscular da luz e da matéria.

O texto sobre a dualidade onda-partícula inicia com uma discussão sobre o princípio da complementaridade, estabelecido por Niels Bohr, que reconhece a necessidade de ambos os modelos para descrever o comportamento duplo das radiações, embora não seja necessário usar ambos ao mesmo tempo para descrever determinados fenômenos.

O texto do livro Física de Bonjorno & Clinton também menciona o trabalho de Louis de Broglie, que estendeu a dualidade onda-partícula para as partículas materiais, atribuindo-lhes uma frequência e um comprimento de onda. O comprimento de onda de Louis De Broglie é definido e sua importância é ilustrada pelo comportamento ondulatório de elétrons em processos atômicos.

No livro didático Física Piqueira e Carron da Editora Ática (Código 0021P18133), a Física Quântica é mencionada como um campo fundamental da física moderna, que descreve o comportamento da matéria e da energia em escalas muito pequenas, como átomos e partículas subatômicas.

A dualidade onda-partícula, princípio da incerteza e outras características quânticas são discutidas para ilustrar a natureza peculiar e desafiadora desse ramo da física.

O Efeito Fotoelétrico é abordado como um fenômeno em que elétrons são ejetados de um material quando expostos à luz. A explicação desse efeito dentro do



contexto da Física Quântica é explorada, destacando a natureza dual onda-partícula da luz e a interação entre fótons e elétrons nos materiais.

O volume III da coleção também destaca as aplicações práticas do Efeito Fotoelétrico, como o uso de células fotoelétricas em dispositivos que controlam o funcionamento de equipamentos, como torneiras automáticas para economia de água.

O texto de Piqueira e Carron menciona Albert Einstein como o físico que recebeu o Prêmio Nobel de Física em 1921 por sua explicação do fenômeno do efeito fotoelétrico, salientando que Einstein publicou um artigo em 1905, intitulado *"Sobre um ponto de vista heurístico a respeito da produção e transformação da luz"*, onde ele aplicou a quantização de energia para explicar como a radiação eletromagnética interage com a matéria, resultando no efeito fotoelétrico. Entretanto, não há sequer uma menção sobre os trabalhos de Louis De Broglie sobre a dualidade onda-partícula.

Em relação à Escola Cidadã Integral Técnica Estadual (ECIT. E.) Coronel Jacob Guilherme Frantz e à Escola Estadual de Ensino Fundamental e Médio (EEEFM) Ministro José Américo de Almeida no município de São João do Rio do Peixe, onde o autor da presente dissertação atua como profissional, a coleção didática adotada no PNLD 2018 foi a intitulada: Física – Ciência e Tecnologia dos Autores Torres; Ferraro, Toledo e Penteado da Editora Moderna (Código 0188P18133) e que serviu como texto base para os estudantes durante a execução da sequência didática sobre o Efeito Fotoelétrico como parte do produto educacional resultante desta dissertação.

No volume III da coleção Torres, et al, o efeito fotoelétrico é discutido em detalhes, apresentando uma montagem típica para estudá-lo por meio de imagem, onde a emissão de elétrons por uma superfície metálica é induzida pela radiação eletromagnética incidente. A corrente de elétrons entre o emissor e o coletor é influenciada pela ddp aplicada e pela intensidade da luz monocromática utilizada.

Albert Einstein é mencionado como o responsável por uma explicação completa do efeito fotoelétrico em 1905, ao estender o conceito de quantização da energia de Planck para as ondas eletromagnéticas, considerando a luz e outras radiações eletromagnéticas como feixes de pacotes de energia chamados fótons.



A dualidade onda-partícula da luz é discutida, destacando como o comportamento da luz pode ser interpretado tanto como onda quanto como partícula, com a luz se manifestando de forma diversa no mundo natural dependendo de sua interação com objetos.

São citados os trabalhos de Louis de Broglie, que em sua tese de doutorado em 1924, estendeu o conceito de dualidade onda-partícula dos fótons de Einstein para as partículas de matéria, como elétrons e prótons, propondo que todas as formas de matéria apresentam propriedades duais de onda e partícula, introduzindo o conceito do comprimento de onda de Louis De Broglie associado às partículas, determinado por sua quantidade de movimento.

Essa contribuição de Louis De Broglie, segundo o texto didático, amplia a compreensão da dualidade onda-partícula para além da luz, abrangendo a matéria.

Após as análises dos três livros didáticos, podemos considerar o livro didático adotado em ambas as escolas como uma boa referência para o ensino de Física Moderna no Ensino Médio, pois aborda conceitos fundamentais como o efeito fotoelétrico, a dualidade onda-partícula e a quantização da energia, essenciais para a compreensão da mecânica quântica.

O texto do livro adotado em ambas as escolas também contextualiza as descobertas científicas dentro de um quadro histórico, mencionando figuras importantes como Albert Einstein, Max Planck, Louis De Broglie, entre outros, o que ajuda os estudantes a entenderem a evolução histórica da Física Moderna.

As explicações são claras e didáticas, com o uso de diagramas, tabelas e imagens que facilitam a compreensão dos fenômenos mais complexos.

A seguir será apresentado o referencial teórico-metodológico que embasou esta pesquisa, alicerçando o trabalho do autor na construção e utilização pedagógico de seu produto educacional.



3 TEORIA DOS CAMPOS CONCEITUAIS DE GERARD VERGNAUD

A fundamentação teórica e metodológica desta dissertação foi pautada em uma teoria cognitivista proposta por Gerard Vergnaud sobre o desenvolvimento da aprendizagem, conhecida como Teoria dos Campos Conceituais (TCC).

Vergnaud foi um importante psicólogo e educador matemático do século XX. Nascido em 1933, na França, desde cedo demonstrou interesse pela matemática e pela filosofia. Estudou na École Normale Supérieure de Paris, onde se formou em matemática e filosofia e obteve o doutorado em psicologia na Universidade de Paris, sob a orientação de Jean Piaget, um dos maiores nomes da psicologia do desenvolvimento cognitivo da época.

A TCC é uma abordagem que busca explicar como os sujeitos constroem e mobilizam conhecimentos em situações diversas. Segundo Vergnaud:

Trata-se de uma teoria psicológica do conceito, ou melhor, da **conceitualização do real**, que permite situar e estudar as filiações e ruptura do ponto de vista de seu conteúdo conceitual. Ela também possibilita analisar a relação entre os conceitos enquanto conhecimentos explícitos e os invariantes operatórios implícitos nos comportamentos dos sujeitos em determinadas situações, bem como aprofundar a análise das relações entre significados e significantes. (Vergnaud, 1990. P. 133, Grifos nossos).

Ao afirmar que sua teoria permite situar e estudar as filiações e rupturas do ponto de vista do conteúdo conceitual, Vergnaud destaca o conhecimento como algo dinâmico em um processo de constante evolução e ressignificação.

Essa abordagem permite uma análise mais profunda das relações entre conceitos, considerando tanto os conhecimentos explícitos que os indivíduos possuem quanto os invariantes operatórios que se manifestam em seus comportamentos em situações específicas, revelando que a compreensão de um conceito vai além de sua definição formal, precisa de um tempo longo para ser apropriado que ultrapassa o tempo escolar.

Esta compreensão está intrinsecamente ligada à maneira como os indivíduos aplicam esse conhecimento em contextos práticos, além de ressaltar a complexidade da aprendizagem e da construção do conhecimento, sugerindo que a educação deve considerar *“não apenas o que é ensinado, mas também como os estu-*



dantes interpretam e expressam esse conhecimento no seu cotidiano em diversas situações.” (VERGNAUD, 1990).

A seguir destacamos alguns conceitos da Teoria dos Campos Conceituais, por exemplo, a definição do que entende o autor por um campo conceitual, o conceito de esquema, o conceito de conceito, o conceito de invariantes operatórios (teoremas em ação e conceitos em ação).

3.1 Definição de Campo Conceitual

Vergnaud define um campo conceitual como um conjunto de situações que compartilham um mesmo tipo de relação, permitindo que o aprendiz desenvolva um entendimento mais profundo sobre um determinado conceito.

Para Vergnaud, 1993:

Um conceito não pode ser reduzido à sua definição, principalmente se nos interessamos por sua aprendizagem e seu ensino. É através das situações e dos problemas a resolver que um conceito adquire sentido para a criança. Esse processo de elaboração pragmática é essencial para a psicologia e para a didática, como também, aliás, para a história das ciências. (Vergnaud, 1993. P. 1).

Como exemplo, Vergnaud (1993) cita o campo conceitual da multiplicação, pois envolve situações de proporcionalidade, repetição, combinação, área, entre outras; conceitos como produto, fator, razão; símbolos como $\times$, $*$, $\div$, ∞ ; estratégias como usar tabelas, propriedades, algoritmos e invariantes operatórios como a comutatividade, a associatividade, a distributividade e assim por diante. Sendo que cada uma dessas situações oferece uma perspectiva diferente sobre o mesmo conceito, permitindo que o estudante internalize conhecimentos cada vez mais elaborados sobre o campo conceitual explorado nas aulas.

Vergnaud (1998, p. 141, citado por Moreira, 2002) define essa relação da seguinte forma:

[...] poderia considerar um conceito como um conjunto de invariantes utilizáveis na ação, [...] um conjunto de situações que constituem o referente e um conjunto de esquemas postos em ação pelos sujeitos nessas situações. Daí, o triplete (S, I, R) onde, em termos psicológicos, S é a realidade, e (I, R) a representação que pode ser considerada como dois aspectos interagentes do pensamento, o significado (I) e o significante (R). (VERGNAUD, 1998)



Gerard Vergnaud apresenta uma visão profunda sobre a natureza dos conceitos e sua relação com a ação e o pensamento. Ao considerar um conceito como um conjunto de invariantes utilizáveis na ação, Vergnaud enfatiza que a compreensão de um conceito não se limita a uma definição abstrata, mas se manifesta na capacidade de aplicar esse conhecimento em situações práticas.

Os invariantes, conforme definidos por Vergnaud, são conhecimentos ou princípios que permanecem constantes em diferentes situações, funcionando como bases fundamentais para organizar e entender informações. Eles atuam como "regras" ou "padrões" que os indivíduos utilizam para tomar decisões e resolver problemas, como por exemplo, o Princípio de Conservação da Energia que é utilizado em diversas situações e fenômenos físicos ou as Leis de Newton, utilizadas para descrever e interpretar diversos tipos de movimentos na Física Clássica.

Entendemos que o triplo (S, I, R) que ele propõe é uma estrutura que ilustra a interconexão entre a realidade, as representações mentais e os esquemas de ação.

Nesse contexto, S representa a realidade (também chamada de referente), ou seja, o conjunto de situações que os indivíduos enfrentam no cotidiano escolar ou extraescolar, enquanto I e R representam, respectivamente, o significado e o significante, que são aspectos interagentes do pensamento.

O significado refere-se à compreensão e à interpretação que os indivíduos atribuem às situações, enquanto o significante diz respeito às formas de expressão e representação desse conhecimento (muito comum na área da física ao utilizarmos o formalismo matemático para expressarmos comportamentos de um objeto).

Essa interação entre significado e significante é importante para a construção do conhecimento, pois revela como os indivíduos não apenas processam informações, mas também como essas informações são expressas e comunicadas.

Ainda segundo Gerard Vergnaud:

[...] a construção e apropriação de todas as propriedades de um conceito ou todos os aspectos de uma situação é um processo de muito fôlego que se estende ao longo dos anos, às vezes uma dezena de anos, com analogias e mal-entendidos entre situações, entre concepções, entre procedimentos, entre significantes (VERGNAUD, 1983 apud MOREIRA, 2004, P. 10).

O autor destaca a complexidade e a profundidade do processo de construção e apropriação de conceitos e situações ao longo do tempo, destacando que ele



não é imediato. Pelo contrário, se estende por muitos anos e talvez nem seja totalmente dominado pelos indivíduos ao longo de sua existência, sendo que durante esse período, estes enfrentam uma série de desafios, como comparações que podem ser úteis, mas também causar confusões conceituais que surgem em diferentes situações educacionais, de modo que a relação entre significantes e significados pode ser confusa, levando a interpretações errôneas.

Essa análise revela que a aprendizagem é um caminho repleto de nuances, onde a compreensão se desenvolve gradualmente, à medida que os estudantes interagem com diversas circunstâncias e refinam suas concepções ao serem expostos a novas e diversificadas situações de aprendizagem.

Baseado em experiências educacionais é perceptível que o tempo escolar, na maioria das vezes não se preocupa com esta maturação do processo da aprendizagem que exige um tempo maior para aquisição de um campo conceitual, atropelando etapas importantes em nome de calendários e metas impostas pelos órgãos superiores.

De forma geral, os jovens são forçados a memorizarem uma grande quantidade de conteúdos de física em um tempo curto voltado para preparação para exames e o resultado disso é o agravamento do desinteresse pela ciência pela maioria dos jovens, sendo que muitos desistem pelo caminho não encontrando sentido em aprender física.

A construção do conhecimento, portanto, é um processo contínuo e evolutivo, que exige tempo, reflexão e a capacidade de conectar diferentes experiências e aprendizados.

Essa visão enfatiza a importância de um ambiente educacional que reconheça e apoie essa jornada complexa, permitindo que os estudantes desenvolvam uma compreensão significativa e integrada dos conceitos que estão estudando.

3.2 Definição de Esquemas e Invariantes Operatórios

Vergnaud (1993) compreende o conceito de 'esquema' como a organização invariante do comportamento para uma classe de situações dada. Para ele é nos esquemas que se devem pesquisar os conhecimentos-em-ação do sujeito, isto é, os elementos cognitivos que fazem com que a ação do sujeito seja operatória. (MOREIRA, 2002, p.12)



Em outras palavras, os esquemas podem ser compreendidos como estruturas cognitivas prévias que os estudantes utilizam quando expostos a uma nova situação de aprendizagem para darem resposta a um novo problema ou indagação.

Por exemplo, na 3ª série do Ensino Médio, quando se aborda o conceito de cargas elétricas, observa-se que muitos estudantes já estão familiarizados com o conceito de atração ou repulsão entre cargas elétricas, devido a diversas situações cotidianas em que esse conceito é utilizado, muitas vezes até fora do contexto científico.

Outro exemplo é o fato de muitos estudantes conseguirem de forma rápida e precisa dar respostas para questões que envolvem cálculo de velocidade média, pois já possuem em sua estrutura cognitiva os esquemas de razão e proporção matemática entre o deslocamento de um móvel e o intervalo de tempo gasto no percurso, sendo que esses esquemas, muitas vezes são adquiridos por meio de situações vivenciadas pelos estudantes em seu cotidiano, fora do ambiente escolar.

Para o Vergnaud, o conceito de esquemas é central para a compreensão de como os indivíduos organizam e utilizam o conhecimento em situações de aprendizagem e resolução de problemas. (MOREIRA, 2002, p.12)

Os esquemas são estruturas cognitivas que representam um conjunto de classes de situações de aprendizagem e são utilizados pelos indivíduos para interpretar e agir em diferentes contextos. Eles podem ser vistos como "mapas cerebrais" que guiam o raciocínio e a ação, permitindo que os sujeitos façam conexões entre conceitos e as situações vivenciadas. (MOREIRA, 2002, p.12)

Desta forma interpreta-se que os esquemas são conjuntos de operações e relações que um indivíduo pode aplicar em situações específicas. Eles não são apenas simples regras ou fórmulas, mas sim estruturas complexas que incorporam tanto o conhecimento explícito (como definições e teoremas) quanto o conhecimento implícito (os invariantes operatórios que guiam a ação). (MOREIRA, 2002, p.12)

Vergnaud enfatiza que os esquemas são dinâmicos e podem ser adaptados ou modificados à medida que o indivíduo ganha novas experiências e informações.

Já os invariantes operatórios referem-se ao termo mais geral utilizado por Vergnaud para englobar as classes de situações contidas nos esquemas de representação que o sujeito pode apresentar durante o processo de construção do conhecimento, que Vergnaud denomina de "conceito-em-ação" e "teorema-em-ação".



O próprio autor esclarece que: “*Designam-se pelas expressões “conceito-em-ação” e “teorema-em-ação” os conhecimentos contidos nos esquemas. Pode-se também designá-los pela expressão mais global ‘invariantes operatórios.’*” (VERGNAUD, 1993. P. 1).

Os invariantes operatórios são estruturas cognitivas que permanecem constantes, mesmo quando os indivíduos enfrentam diferentes situações ou problemas. Esses invariantes são as regras, princípios ou propriedades que os sujeitos utilizam para organizar suas ações e raciocínios em contextos variados.

Elas são essenciais para a operacionalização de conceitos, pois permitem que os indivíduos reconheçam padrões e façam transferências de conhecimento entre diferentes situações. (VERGNAUD, 1993; MOREIRA, 2002, p.14).

Os invariantes operatórios são fundamentais para a transferência de aprendizagem, pois quando os estudantes conseguem identificar invariantes em diferentes contextos, eles podem aplicar o que aprenderam em novas situações, o que é um indicador de uma aprendizagem efetiva.

Por exemplo, ao aprender sobre a adição, um estudante pode identificar o invariante de que a soma de dois números é comutativa, onde $(a + b)$ é equivalente a $(b + a)$. Esse invariante pode ser transferido para outras situações, como a soma de grandezas ou a resolução de problemas em diversas áreas do conhecimento.

Essa capacidade de transferir conhecimentos é um dos principais objetivos da educação, pois prepara o estudante para enfrentar desafios em contextos variados ao longo de sua vida.

Para Vergnaud os invariantes operatórios contidos nos esquemas podem se apresentar de duas maneiras distintas ao se explorar um campo conceitual, a saber:

- I. classes de situações em que o sujeito dispõe, no seu repertório, em dado momento de seu desenvolvimento e sob certas circunstâncias, das competências necessárias ao tratamento relativamente imediato da situação;
- II. classes de situações em que o sujeito não dispõe de todas as competências necessárias, o que o obriga a um tempo de reflexão e exploração, a hesitações, a tentativas frustradas, levando-o eventualmente ao sucesso ou ao fracasso. (Vergnaud, 1993. P. 2).

Essas duas classes de situações, Gerard Vergnaud define em suas obras como “conceitos-em-ação” e “teoremas-em-ação”, respectivamente, sendo que os conceitos-em-ação se referem à aplicação prática de um conceito em situações con-



cretas, que Vergnaud caracteriza como “[...] *uma categoria de pensamento considerada como pertinente*”. (VERGNAUD, 1996. p. 202).

Em vez de serem entendidos apenas como definições formais ou teóricas, os conceitos-em-ação são vistos como ferramentas que os indivíduos utilizam para resolver problemas e tomar decisões em contextos específicos.

Por exemplo, o conceito de ação e reação pode ser utilizado por um estudante ao resolver um problema de física para justificar o lançamento de um foguete. Nesse caso, ele pode não estar ciente de todas as definições formais relacionadas ao fenômeno, mas ele aplica intuitivamente o que entende sobre esse conceito para chegar a uma solução satisfatória para o problema apresentado. (CEDRAN, et al, 2019. p. 74).

Vergnaud, enfatiza que *"um conceito-em-ação não é, absolutamente, um conceito"*, destacando que a operacionalidade de um conceito se revela na prática, através de ações e decisões em situações múltiplas e diversificadas.

Por outro lado, Teoremas-em-ação referem-se à aplicação de princípios em situações práticas, ao que Vergnaud classifica como... *“uma proposição considerada como verdadeira sobre o real”*. (VERGNAUD, 1996. p. 202).

Um teorema, que é uma afirmação formalmente provada dentro de um sistema lógico, pode ser utilizado por um indivíduo em um contexto específico, mesmo que ele não tenha uma compreensão completa da prova ou da formalização do teorema.

Um exemplo de “Teorema-em-ação” é a aplicação da segunda lei de Newton, que relaciona a força resultante à massa de um objeto e sua aceleração. Em uma situação, um professor pode apresentar um problema em que os estudantes precisem calcular a força necessária para mover um automóvel.

Ao se depararem com essa situação, eles podem levar um tempo considerável em análises da situação-problema, tentativas aleatórias de cálculos envolvendo as grandezas físicas apresentadas na atividade, ou aplicar a segunda lei de Newton para resolver o problema, utilizando a relação entre força, massa e aceleração de forma intuitiva.

Nesse contexto, alguns estudantes sentem-se motivados pela necessidade de dar resposta ao problema e buscam meios para isso, embora a resposta dada nem sempre estará adequada ao que se pede no enunciado. Já outros estudantes



buscarão encontrar uma força específica para alcançar a aceleração desejada do automóvel, aplicando a segunda lei de Newton sem precisar recitar a equação ($F=m.a$) ou entender todos os detalhes teóricos sobre sua formulação.

Esses exemplos demonstram como os aprendizes utilizam ou não um teorema de maneira prática em uma situação real, evidenciando a operacionalidade dos esquemas cognitivos dentro de um campo conceitual. (HILGER, et al, 2012. p. 59).

Essas noções são importantes porque ressaltam a diferença entre o conhecimento explícito e o conhecimento implícito. O conhecimento explícito é aquele que pode ser verbalizado e formalizado, enquanto o conhecimento implícito é aquele que se manifesta nas ações e decisões dos indivíduos em situações práticas. (VERGNAUD, 1993)

A teoria dos campos conceituais propõe que a aprendizagem e a compreensão dos conceitos e teoremas não se limitam à memorização de definições e provas, mas envolvem a capacidade de aplicar esses conhecimentos em contextos variados, o que é essencial para o desenvolvimento de competências cognitivas complexas. (CEDRAN, et al, 2019 p.66).

As competências cognitivas complexas referem-se às habilidades que envolvem um alto nível de processamento mental, como análise, síntese, avaliação e resolução de problemas. Elas vão além do simples conhecimento formal e incluem a capacidade de aplicar o conhecimento em situações novas e complexas.

Essas competências são desenvolvidas por meio da realização de tarefas e situações que exigem pensamento crítico, como raciocínio lógico, argumentação, e a capacidade de trabalhar com conceitos em várias disciplinas ou áreas do conhecimento.

Na Teoria dos Campos Conceituais, o desenvolvimento dessas competências é entendido como um processo que ocorre através da interação entre o conhecimento teórico e prático, com base em situações de aprendizagem relevantes. (CEDRAN, et al, 2019 p.66).

A Teoria de Vergnaud, é uma contribuição significativa para a educação, pois oferece uma visão dinâmica e integrada do conhecimento, reconhece a diversidade e a complexidade das situações que envolvem a aprendizagem, e valoriza o papel do sujeito na construção e na mobilização do conhecimento, tendo implicações diretas no ensino e aprendizagem, pois propõe que os estudantes sejam expostos a si-



tuações diversificadas e significativas, que estimulem o seu raciocínio e a sua criatividade.

Por fim, a teoria defende que os conceitos não sejam ensinados de forma isolada, mas integrados em campos mais amplos e complexos, que reflitam as relações entre eles.

3.3 – Influências e divergências em relação a Jean Piaget

A Teoria dos Campos Conceituais de Gerard Vergnaud e a Teoria Cognitivista de Jean Piaget compartilham algumas semelhanças, visto que ambas abordam o desenvolvimento cognitivo e reconhecem que a aprendizagem ocorre de maneira progressiva e em estágios.

Para os dois autores, esta progressividade é um elemento central para a evolução das habilidades e domínio conceitual em etapas que refletem uma construção contínua do conhecimento. (FRANCHI, 1999 p.158).

Entretanto, é possível também identificar diferenças de concepções entre os dois autores no que se refere aos processos do desenvolvimento cognitivo dos indivíduos. Piaget, por exemplo, focou no desenvolvimento cognitivo através de estágios sequenciais, enfatizando como as crianças constroem conhecimento através de processos de assimilação, acomodação e equilíbrio, adaptando seus esquemas mentais para entender novas informações.

Vergnaud, por outro lado, concentrou-se em como os conceitos são desenvolvidos e aplicados em diferentes contextos de aprendizagem, não se limitando a estágios de desenvolvimento, mas explorando como os estudantes utilizam esquemas conceituais para resolver problemas em situações práticas. (MOREIRA, 2002 p. 7; FRANCHI, 1999 p.159).

Piaget introduz também a ideia de esquemas como estruturas cognitivas que ajudam na organização e interpretação da informação, acreditando que o desenvolvimento cognitivo é um processo universal e sequencial baseado na relação sujeito-objeto.

Vergnaud expandiu o conceito de esquemas para incluir o que se poderia denominar de esquemas operatórios, que são estruturas mentais usadas para resolver problemas específicos, enfatizando a importância da relação esquema-situação.



Em outras palavras, para Piaget, esquemas são as unidades básicas de conhecimento que as pessoas utilizam para organizar suas experiências. Já para Vergnaud, os esquemas são mais amplos e se relacionam diretamente com situações específicas, refletindo a interação entre o indivíduo e seu contexto. (MOREIRA, 2002. p. 12; FRANCHI, 1999. p.164).

As proposições de Jean Piaget são mais teóricas e focadas na descrição dos processos de desenvolvimento cognitivo, sendo amplamente aplicadas na educação, mas sem fornecer muitas diretrizes práticas para o ensino, visto que Piaget não atuava em sala de aula.

A Teoria dos Campos Conceituais de Vergnaud, por sua vez, é mais prática e contextualizada e fornece ferramentas práticas para professores ajudarem os estudantes a desenvolverem competências em diversas áreas do conhecimento, enfatizando a importância das situações-problema e das inúmeras interações vivenciadas pelo estudante durante a aprendizagem. (MOREIRA, 2002. p. 12).

Piaget via o conhecimento como algo que é construído internamente pela criança através da interação com o ambiente, acreditando que o desenvolvimento cognitivo precede a aprendizagem.

Já Vergnaud considera o conhecimento como algo que é construído através da interação entre o sujeito e o contexto, incluindo a resolução de problemas e a aplicação prática, vendo a aprendizagem e o desenvolvimento cognitivo como processos interdependentes. (FRANCHI, 1999. p. 157).

Enquanto Piaget se concentrou nas operações lógicas gerais e nas estruturas universais do pensamento (isto é, em como todas as crianças, independentemente do contexto, desenvolvem sua capacidade cognitiva), Vergnaud propõe que o estudo do desenvolvimento cognitivo deve considerar como essas operações se manifestam em situações concretas. Isso significa que ele enfatiza o contexto e as particularidades das experiências que influenciam a cognição. (MOREIRA, 2002, p. 12).

Desse modo, a teoria dos campos conceituais de Gérard Vergnaud é uma abordagem cognitivista e neopiagetiana que busca oferecer uma estrutura teórica mais eficaz para compreender o desenvolvimento cognitivo e a aprendizagem de competências complexas, especialmente nas ciências e na técnica. (MOREIRA, 2002, p. 8)



Essa teoria vai além das ideias de Jean Piaget ao se concentrar em aplicações práticas do conhecimento, enfatizando a aquisição de habilidades que exigem raciocínio e contextualização, em vez de mera memorização.

Vergnaud destaca a importância de considerar o conteúdo específico do conhecimento e a análise conceitual, examinando como os conceitos se relacionam dentro de um domínio e como podem ser ensinados e aprendidos de forma eficaz.

Essa abordagem permite aos educadores não apenas entender como os estudantes pensam, mas também implementar estratégias de ensino que atendam às suas necessidades específicas, promovendo um aprendizado contextualizado e operacional. (FRANCHI, 1999, p.160).

Vergnaud dedicou a sua vida à pesquisa e à formação de professores, especialmente de matemática, tendo publicado inúmeros livros e artigos sobre a sua teoria e as suas aplicações. O autor faleceu em 2021, aos 83 anos, deixando um legado inestimável para a educação em diversos países e inspirando pesquisas nas mais diversas áreas de conhecimento.

Na sequência do texto, será apresentada uma abordagem historiográfica e conceitual a respeito da Física do final do século XIX, o surgimento da Teoria Quântica, a descoberta do Efeito Fotoelétrico e a sua explicação por Albert Einstein em 1905.



4 CAPÍTULO DE FÍSICA: O EFEITO FOTOELÉTRICO.

4.1 O Contexto Histórico

No final do século XIX, os estudos relacionados ao campo da Física estavam em um momento de pleno desenvolvimento e importantes descobertas. Nesse período, a comunidade científica concentrava-se em explorar e compreender os princípios e leis da Mecânica, Óptica e Termodinâmica e Eletromagnetismo.

Nesse contexto, a Teoria Eletromagnética de Maxwell, unificando a eletricidade e o magnetismo, trouxe grandes impactos para essa Ciência, de modo que alguns físicos da época acreditavam que a Física enquanto Ciência havia atingido o seu ápice e poderia explicar com facilidade todos os fenômenos observáveis no universo.

Segundo Martins, 2001:

As áreas da Física que chamamos "Física Clássica" e que compreendem a mecânica, a óptica, a termodinâmica e o eletromagnetismo já haviam alcançado um grande aperfeiçoamento no século XIX. Quase tudo aquilo que se ensina sobre Física no segundo grau já havia sido descoberto naquela época - e, é claro, em um nível mais elevado do que aquilo que se ensina nos colégios. (MARTINS, 2001, p.1)

Segundo relatos, como o do Professor Luiz Davidovich, em seu artigo: *"Está a Física esgotada?"* William Thomsom, mais conhecido como Lord Kelvin, um dos cientistas que muito havia contribuído para os estudos da termodinâmica, descreve a Física, no final do século XIX, *"como um céu azul, com algumas nuvens no horizonte."*

Essas "nuvens" correspondiam a fatos experimentais ainda não explicados, entre eles a propriedade exibida pelos átomos de absorverem ou emitirem luz apenas com certas frequências, o efeito fotoelétrico (emissão de elétrons por metais quando sobre eles incide um feixe de luz) e a variação da cor de objetos aquecidos. (DAVIDOVICH, 2017)

De acordo com o Professor Dr. Roberto de Andrade Martins, Lord Kelvin chegou a recomendar aos jovens da época que não se dedicassem mais à Física, pois restavam à essa ciência apenas alguns detalhes pouco interessantes a serem de-



envolvidos, como o aperfeiçoamento de medidas e a solução de problemas pouco relevantes.

Em uma palestra para a British Association for the Advancement of Science, Thomsom teria dito que: *"Agora, não há mais nada novo para ser descoberto pela Física. Tudo o que nos resta são medições cada vez mais precisas."*

Em seu artigo, A Torre de Babel Científica, publicado na Revista Scientific American Brasil, o Professor Dr. Roberto de Andrade Martins cita que:

Em 1900, o físico escocês William Thomson, mais conhecido como Lord Kelvin (1824-1907), que dera grandes contribuições ao desenvolvimento do eletromagnetismo e da termodinâmica no decorrer do século XIX, pronunciou uma famosa conferência na qual dizia sentir pena dos jovens físicos daquela época, que não teriam nada de emocionante para pesquisar, pois todas as teorias fundamentais já estavam prontas. (MARTINS, 2006)

No entanto, apesar dos significativos avanços alcançados pela Física no final do século XIX, alguns experimentos passaram a desafiar a visão clássica desta ciência.

Os primeiros questionamentos desafiadores à época surgiram do estudo da radiação de corpos aquecidos e principalmente, a radiação de corpo negro, observada inicialmente por Thomas Wedgwood em 1972.

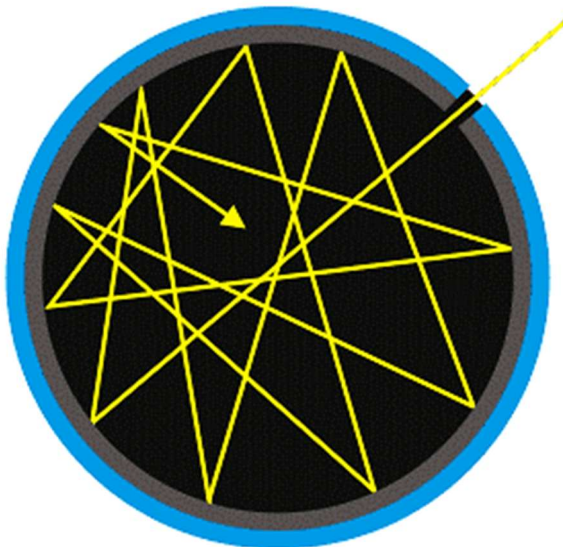
Wedgwood observou que existia relação entre a temperatura e a cor da luz irradiada por objetos aquecidos, como um pedaço de ferro "em brasa". Para ele, a cor da luz emitida era dependente apenas da temperatura e não de outros parâmetros, como material, formato ou tamanho. (LUZ, et al, 2016, p.257)

4.2 – A Radiação de Corpo Negro

A radiação de corpo negro refere-se ao espectro de ondas eletromagnéticas emitidas por um objeto aquecido, que é um emissor perfeito de radiação térmica. (GOMES, 2020, p.20).

Sendo assim, um corpo negro (ver Fig. 2) é idealizado como um objeto que absorve toda a radiação incidente sobre ele, independentemente da frequência ou do comprimento de onda da radiação. Isso significa que ele não reflete nenhuma parte da radiação, apenas a absorve e a emite novamente. (EISBERG; RESNICK 1979, P. 20).

Figura 2 – Representação conceitual de um Corpo Negro



Fonte: <https://webfisica.com/fisica/curso-de-fisica-basica/aula/13-98>

O estudo da radiação de corpo negro foi fundamental para o desenvolvimento da teoria quântica, pois revelou as limitações da Física Clássica para explicar os fenômenos atômicos e subatômicos.

No final do século XIX e início do século XX, vários físicos tentaram encontrar uma equação matemática que descrevesse o espectro da radiação do corpo negro, mas sem sucesso.

As tentativas baseadas na Física Clássica levavam a resultados contraditórios ou absurdos, como a chamada catástrofe do ultravioleta, que previa uma emissão infinita de energia para frequências muito altas, como previsto na equação de Rayleigh-Jeans. (EISBERG; RESNICK 1979, P. 30)

Entre os físicos que contribuíram para as explicações sobre a radiação do corpo negro, destacam-se os trabalhos de Wilhelm Wien, um físico austríaco.

Em 1894, Wilhelm Wien publicou a derivação de sua lei, conhecida a partir de então como lei do deslocamento de Wien, que afirma que o comprimento de onda para o qual a intensidade da radiação de corpo negro é máxima, é inversamente proporcional à temperatura absoluta do corpo. (GOMES, 2020, P. 52)

Em outras palavras, a Lei de Wien esclarece que quanto maior a temperatura, menor o comprimento de onda de pico e maior a frequência da radiação emitida. Essa lei é expressa pela seguinte equação:



$$\lambda_{M\acute{a}x} = \frac{b}{T}. \quad (1)$$

Na equação (1), $\lambda_{M\acute{a}x}$ é o comprimento de onda de pico em metros (m), T é a temperatura absoluta em kelvin (K) e b é denominada de constante de deslocamento de Wien, com valor aproximado de $2,898 \cdot 10^{-3} \text{ m.K}$, desse modo:

$$\lambda_{M\acute{a}x} = \frac{0,002898}{T}. \quad (2)$$

Essa lei explica, por exemplo, por que um pedaço de metal aquecido brilha em diferentes cores conforme sua temperatura aumenta.

Quando o metal está frio, ele emite radiação infravermelha, que não é visível aos nossos olhos. Conforme ele se aquece, o comprimento de onda de pico diminui e entra na faixa do vermelho, que é a cor mais próxima do infravermelho no espectro visível.

Se o metal continuar sendo aquecido, o comprimento de onda de pico passa pelas outras cores do espectro, até chegar no azul, que é a cor mais próxima do ultravioleta. (GOMES, 2020, p.53)

Uma teoria desenvolvida pelos físicos britânicos Lord Rayleigh (John William Strutt) e Sir James Jeans no final do século XIX e início do século XX previu que a intensidade energética deveria ir ao infinito em comprimentos de onda muito curtos, como a radiação ultravioleta.

Essa teoria buscava descrever como a energia da radiação é distribuída em diferentes frequências em um corpo negro, utilizando conceitos da mecânica estatística e da eletrodinâmica clássica. (ELENO, 2010, p. 35).

Na tentativa de explicar a distribuição espectral da radiação emitida por um corpo negro, Rayleigh e Jeans partiram de dois conceitos clássicos principais.

Primeiro, o de ondas estacionárias⁸ em uma cavidade, cuja ideia básica é que a radiação eletromagnética dentro de uma cavidade fechada (um corpo negro) pode ser descrita como uma coleção de ondas estacionárias, de modo que as ondas

⁸ São ondas que possuem um padrão de vibração estacionário. Formam-se a partir de uma superposição de duas ondas idênticas, mas em sentidos opostos, normalmente quando as ondas estão confinadas no espaço como ondas sonoras em um tubo fechado e ondas de uma corda com as extremidades fixas.



refletem continuamente nas paredes da cavidade, podendo serem descritas por modos normais de vibração que possuem frequências discretas.

O segundo conceito adotado foi a da teoria da equipartição de energia, que era um princípio fundamental da termodinâmica clássica. (ELENO, 2010, p. 35).

Essa teoria afirma que a energia térmica se reparte igualmente entre todos os modos possíveis de oscilação e cada modo dissipa energia proporcional à temperatura. É como dividir a energia térmica em proporções idênticas para cada modo de oscilação possível.

Rayleigh e Jeans assumiram que cada modo de vibração de uma onda estacionária dentro da cavidade possui, em média, uma energia proporcional à temperatura do corpo negro. Mais precisamente, a energia média associada a cada modo é dada por $k_B T$, onde k_B é a constante de Boltzmann e T é a temperatura absoluta.

Para formular a expressão matemática para a densidade espectral de energia $u(\nu, T)$, que representa a energia por unidade de volume e por unidade de frequência, Rayleigh e Jeans consideraram o número de modos de vibração de uma onda estacionária em uma cavidade para uma dada frequência (ν).

Em três dimensões, o número de modos $g(\nu)$ por unidade de volume e por unidade de intervalo de frequência é proporcional ao quadrado da frequência:

$$g(\nu) \propto \nu^2 \quad (3)$$

Aplicando a teoria da equipartição de energia, onde cada modo possui uma energia média $k_B T$, a densidade espectral de energia $u(\nu, T)$, é obtida multiplicando o número de modos $g(\nu)$ pela energia média por modo:

$$u(\nu, T) = g(\nu) \cdot k_B T \quad (4)$$

Combinando esses fatores, Rayleigh e Jeans derivaram a seguinte expressão para a densidade espectral de energia de um corpo negro:

$$u(\nu, T) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} k_B T \quad (5)$$

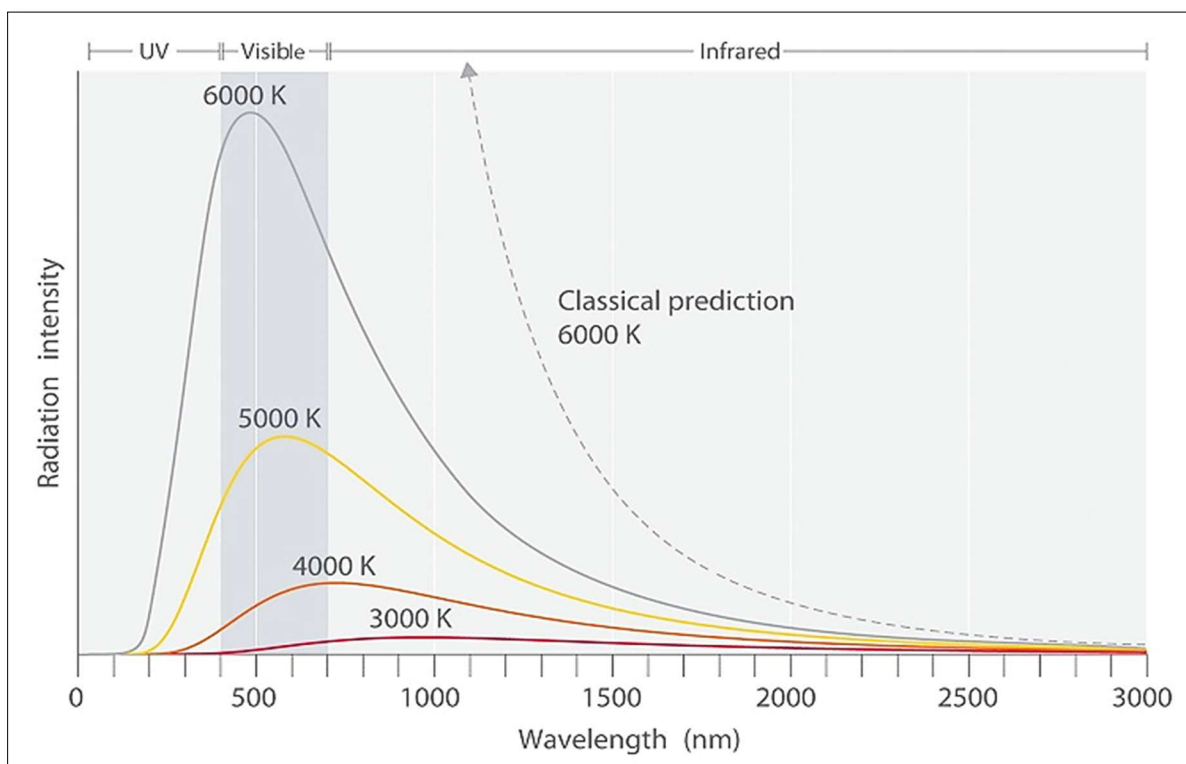
Onde:

- k_B é a constante de Boltzmann, aproximadamente $1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K
- T é a temperatura absoluta, sendo: $T = ^\circ C + 273,15$
- c é a velocidade das ondas radiantes, aproximadamente $3 \cdot 10^8$ m/s

- ν é a frequência das radiações, em Hertz (1/s).

Entretanto, por essa lei, o aumento da frequência implica em aumento da energia radiante tendendo ao infinito; ou seja, à medida que as frequências aumentavam, a distribuição de energia predita pela equação aumentava indefinidamente, levando a um resultado divergente para frequências do ultravioleta, como mostrado na figura 3. Esse desacordo com as observações experimentais realizadas à época ficou conhecido como a "catástrofe do ultravioleta". (EISBERG; RESNICK 1979, P. 30).

Figura 3 – Espectro de Radiação de Corpo Negro.



Fonte: https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical_and_Theoretical_Chemistry_Textbook_Maps

Quando um objeto está com temperatura relativamente baixa, a maior parte da energia radiante emitida está concentrada em comprimentos de onda maiores, principalmente na região do infravermelho do espectro eletromagnético. Isso ocorre porque a agitação térmica das partículas no objeto é relativamente baixa, o que resulta em emissão de radiação com energia menor.

À medida que a temperatura aumenta, a agitação térmica das partículas no objeto também aumenta, resultando em radiação com maior energia e, portanto, frequências mais altas e comprimentos de ondas mais curtos.



O deslocamento da intensidade máxima para comprimentos de onda mais curtos resulta em uma mudança de cor aparente da radiação emitida. Começando com luz laranja, passando por amarela e eventualmente atingindo a luz branca à medida que a temperatura continua a aumentar. Essa mudança nas cores está relacionada às diferentes frequências da luz visível associadas a diferentes comprimentos de onda.

Em temperaturas muito altas, a distribuição de energia radiante se torna aproximadamente uniforme em todas as frequências da luz visível, resultando em uma aparência branca. O Sol, por exemplo, tem uma temperatura de superfície em torno de 6000 K e emite uma intensa radiação que se aproxima do espectro de luz branca, com uma combinação de todas as cores visíveis.

A predição clássica, como representada pela lei de Rayleigh-Jeans, não foi capaz de reproduzir adequadamente a curva experimental da distribuição da radiação de corpo negro.

Especificamente, ela prevê uma intensidade de radiação crescente indefinidamente à medida que as frequências ultravioletas aumentam, resultando na chamada "catástrofe do ultravioleta" que destacou a inadequação da teoria clássica para descrever a radiação do corpo negro em altas frequências.

A solução para inconsistência teórico experimental começou a ser estruturada com o desenvolvimento da Teoria Quântica, especialmente por meio dos trabalhos relacionados à quantização da energia das radiações eletromagnéticas pelo físico Max Planck.

4.3 A Teoria Quântica de Planck.

Max Planck (1858–1947), foi um renomado físico alemão e o pioneiro da Teoria Quântica, sendo uma figura proeminente no cenário científico.

Em 1874, Planck dá início à sua vida acadêmica como estudante de Física na Universidade de Munique. Entretanto, em 1877, transfere-se para Berlim, onde teve a oportunidade de estudar com grandes nomes da física, como Hermann Von Helmholtz e Gustav Kirchhof.

Essa experiência em Berlim moldou profundamente sua compreensão da física e o preparou para descobertas que mudariam o curso da história científica nas décadas seguintes. (FRAZÃO, 2020, p.1)



No ano de 1900, Max Planck apresentou uma explicação para a catástrofe ultravioleta ao postular que a energia das ondas eletromagnéticas é quantizada, em contraposição à sua natureza contínua proposta até então. Isso implica que, para cada temperatura, existe um limite máximo de intensidade de radiação emitida por um objeto que se comporta como um corpo negro.

De acordo com sua hipótese, os osciladores eletromagnéticos (responsáveis pela emissão e absorção de radiação) só poderiam trocar energia em pacotes discretos ou "*quanta*", plural de "*quantum*". Em 1926, o físico-químico estadunidense Gilbert Lewis (1875 -1946) atribuiu aos quanta o sugestivo nome de fótons, que significa "pacotes" ou "partículas" de luz, nome adotado desde então. (TORRES, et al, 2018, p.207)

A quantização, apesar de ser um termo pouco utilizado no cotidiano social e desconhecido para muitas pessoas, refere-se ao fato de que certas grandezas físicas, só podem ter valores discretos, em vez de uma gama contínua de valores, como por exemplo, as notas musicais em uma oitava, que são quantizadas em frequências sonoras específicas e o sistema monetário dos países, cujos valores são quantizados em função de seu menor valor de moeda.

No Brasil, por exemplo, o valor mínimo monetário seria de 1 centavo de Real (R\$0,01), logo todo sistema monetário envolvendo a moeda nacional só pode ser quantizado em múltiplos desse valor. (HALLIDAY, et al, 2016, p. 179).

Esse fato explica por exemplo, uma característica bastante peculiar no país, que é a precificação dos produtos na casa dos noventa e nove centavos (R\$9,99; R\$19,99; R\$29,99...) no comércio de modo geral.

Um outro bom exemplo de quantização é o ato de subir ou descer uma escada, onde a altura constante de cada degrau determina um valor quantizado da energia potencial gravitacional adquira ou perdida pelo corpo durante seu percurso, ou seja, a cada degrau o corpo só pode assumir quantidades múltiplas de um valor específico, que no caso seria dado pela expressão: $\Delta E = m.g.\Delta h$.

Na equação citada, ΔE é a variação da Energia Potencial Gravitacional do corpo cujo valor varia em função da altura (Δh) de cada degrau, o que não aconteceria no caso de uma rampa linear inclinada, onde a depender do tamanho dos passos de uma pessoa podemos ter diversos valores de energia potencial associada ao movimento.



Isso é exemplificado pelo princípio da quantização de Planck, onde a energia de um sistema quântico é quantizada em múltiplos inteiros de uma quantidade mínima chamada "quantum de energia". Isso leva a estados de energia discretos e níveis de energia quantizados (HALLIDAY, et al, 2016, p. 179).

Segundo Planck, a energia de cada quantum é proporcional à frequência da fonte de ondas eletromagnéticas, como expresso pela equação:

$$E = h \cdot \nu \quad (6)$$

Onde:

E = Energia do quantum

h = Constante de Planck, aproximadamente $6,626 \cdot 10^{-34}$ J·s

ν = Frequência do oscilador eletromagnético, em Hertz (1/s).

Com o aumento da frequência da radiação eletromagnética, a intensidade do quantum associado de energia radiante aumenta. Assumindo que a energia pode ser emitida por um objeto apenas em múltiplos integrais de $h \cdot \nu$, isto significa substituir a soma contínua na equação de Rayleigh-Jeans por uma soma discreta.

Planck utilizou também a distribuição de Boltzmann para descrever a distribuição das energias entre os osciladores em equilíbrio térmico a uma determinada temperatura. Combinando esses elementos, Planck derivou a equação de distribuição espectral de energia e obteve a equação (7) para a radiação emitida pelo corpo negro. (COHEN-TANNOUDJI, 2020, p.652).

$$u(\nu, T) = \frac{8h\nu^3}{c^3} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{k_B T}} - 1} \quad (7)$$

Onde:

- $\pi = 3,14159$, aproximadamente.
- h é a Constante de Planck, aproximadamente, $6,626 \cdot 10^{-34}$ J·s
- c é a velocidade das ondas radiantes, aproximadamente $3 \cdot 10^8$ m/s
- ν é a frequência das ondas radiantes, em Hertz (1/s).
- k_B é a Constante de Boltzmann, aproximadamente, $1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K
- T é a temperatura absoluta, em kelvin (K), sendo $T = ^\circ\text{C} + 273,15$

Em função do comprimento de onda λ , a equação de Planck pode ser reescrita como:



$$u(\lambda, T) = \frac{8h\pi}{\lambda^3} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda k_B T}} - 1}, \quad (8)$$

onde, λ é o comprimento de onda da radiação, em metros (m).

Já observamos na equação (5) a lei de Rayleigh-Jeans amparada nos postulados da física clássica e agora na equação (7) a lei de Planck baseada na Teoria Quântica. As diferenças entre essas duas leis nos remetem àquelas que existem entre as curvas gráficas mostradas na Figura 3. Em altas frequências, surgem dificuldades na lei de Rayleigh-Jeans, pois a quantidade $u(\nu)$ dada na equação (5) se aproxima do infinito quando $\nu \rightarrow \infty$, o que é fisicamente absurdo.

Para resolver esse equívoco, Planck foi levado a postular que a energia de cada oscilador variava descontinuamente, por saltos proporcionais a ν (quantização de energia); Assim, ele obteve a equação (7), que explica perfeitamente os resultados experimentais. (COHEN-TANNOUDJI, 2020, p.652)

Uma das particularidades da equação de Planck é que o comprimento de onda associado ao seu ponto de máximo é inversamente proporcional à temperatura associada. Ou seja, o comprimento de onda, para qual a intensidade da radiação emitida por um corpo negro é máxima, é inversamente proporcional à sua temperatura absoluta.

É possível compreender qualitativamente a explicação de Planck para a catástrofe ultravioleta, considerando que, em baixas temperaturas, são emitidas radiações de baixas frequências relativas, que corresponde a um “pacote” (*quanta*) de baixa energia.

À medida que a temperatura de um objeto aumenta, a probabilidade de ele emitir radiação com mais altas frequências também aumenta, o que corresponde à emissão de um “pacote” (*quanta*) de maior energia.

Para uma temperatura qualquer, no entanto, é logicamente mais provável que um objeto perca energia emitindo muitos quantas de baixa intensidade energética do que um único quantum de intensidade energética muito alta correspondente à radiação ultravioleta. (HALLIDAY, et al, 2016)

Quando Planck formulou sua teoria, nem ele e nem muitos cientistas contemporâneos consideravam os *quanta* como entidades reais. Conservador e fortemente vinculado aos princípios da Física Clássica, Planck via sua hipótese mais como um “instrumento matemático” para solucionar o problema que investigava desde 1890.



A maioria dos físicos da época compartilhava desse ponto de vista. Em carta a um amigo em 1931, Planck confessou que tomou esse caminho:

numa atitude desesperada [...] pois sou contra aventuras duvidosas. Mas o problema tinha de ser resolvido a qualquer preço. Eu estava pronto para sacrificar minhas mais profundas convicções físicas! Eu tinha de chegar a algum resultado positivo. (PLANCK, 1931.)

As implicações históricas dessa "atitude desesperada" foram profundas, pois ao quantizar a energia das radiações, Planck lançou as bases da mecânica quântica, permitindo que cientistas como Albert Einstein e Niels Bohr expandissem o modelo para explicar outros fenômenos, como o efeito fotoelétrico e a estrutura dos átomos.

Assim, a aceitação progressiva da quantização transformou a visão física da realidade, levando ao desenvolvimento de uma nova física que viria em poucos anos desafiar e ampliar a concepção clássica dos fenômenos naturais. (TORRES, et al, 2018, p. 208).

4.4 A Descoberta do Efeito Fotoelétrico

Em meados da década de 1880, o físico alemão Heinrich Hertz, desenvolveu uma série de estudos e experimentos para testar a existência das ondas eletromagnéticas previstas anteriormente por James Clerk Maxwell. (NUSSENZVEIG, 1998, p. 249)

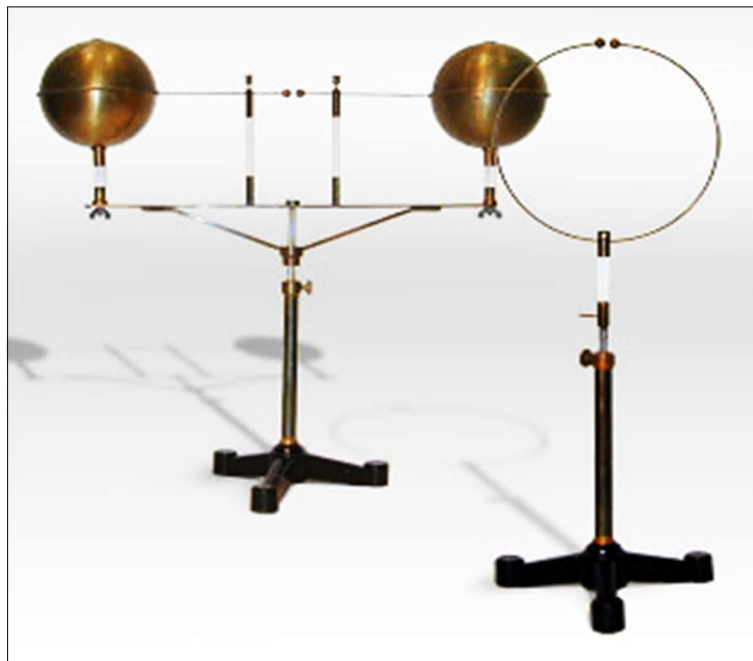
No ano de 1887, Hertz se utilizou de um oscilador composto por esferas de bronze bem polidas, cada qual interligada a uma bobina e posicionadas a uma pequena distância entre si, de modo que permitiam a ocorrência de faíscas entre elas sob a influência de elevadas tensões elétricas aplicadas ao conjunto. (Ver Fig. 4)

Em sua concepção, Hertz postulou que, se as previsões concebidas por Maxwell estivessem corretas, então a geração de ondas eletromagnéticas ocorreria paralelamente às faíscas emitidas. Hertz construiu também um receptor simples que consistia em uma espira aberta, na qual duas pequenas esferas também estavam separadas por uma distância pequena em suas extremidades. (Ver fig. 4)

De acordo com a teoria de Maxwell, se ondas eletromagnéticas fossem geradas durante o faiscamento do aparato, elas induziriam uma corrente na espira recep-

tora e ela produziria um centelhamento entre suas esferas. E foi o que ocorreu quando Hertz ligou seu oscilador. (NUSSENZVEIG, 1998, p. 249).

Figura 4 – Representação do Experimento de Hertz



Fonte: <http://www.sarmiento.eng.br/Historia/Hertz-Resonator+detector.jpg>

Uma observação intrigante, surgiu quando Hertz, diante da dificuldade em visualizar a faísca secundária produzida por indução no receptor, adotou uma prática alternativa, erigindo um invólucro de proteção em torno do sistema experimental, buscando conter a dissipação da luminosidade resultante da faísca no receptor. Entretanto, essa intervenção provocou uma redução notável na amplitude da faísca secundária. (SANTOS, 2002, p.1)

No curso de suas investigações, Hertz verificou que o fenômeno em questão não possuía natureza eletrostática, dado que fenômeno permanecia inalterado na presença de materiais isolantes ou condutores utilizados na construção do invólucro de proteção. Isso indicava para Hertz que de alguma forma que a incidência de luz sobre o conjunto intensificava o faiscamento observado em seu receptor. (SANTOS, 2002, p. 1)

Por meio de uma sequência detalhada e meticulosa de experimentos com diferentes frequências de luz, Hertz não somente comprovou a sua intuição primária, como também consolidou a convicção de que a luz possuía uma capacidade intrín-



seca de induzir a geração de faíscas no receptor e que essa capacidade estava fortemente associada à região do espectro eletromagnético caracterizada como luz ultravioleta. (SANTOS, 2002, p. 1)

Ainda que o pleno entendimento acerca desta descoberta, denominada mais tarde de efeito fotoelétrico, estivesse aquém de sua compreensão, Hertz foi pioneiro em sua observação experimental e não dedicou estudos em entendê-la ou explicá-la.

Coube ao físico alemão Philipp Lenard, que trabalhava com Hertz em 1903, a realização de experimentos que foram fundamentais para a compreensão das características e grandezas associadas ao efeito fotoelétrico, embora não o tenha explicado de modo plausível. (SANTOS, 2002, p. 3)

4.5 As Contribuições de Philip Lenard

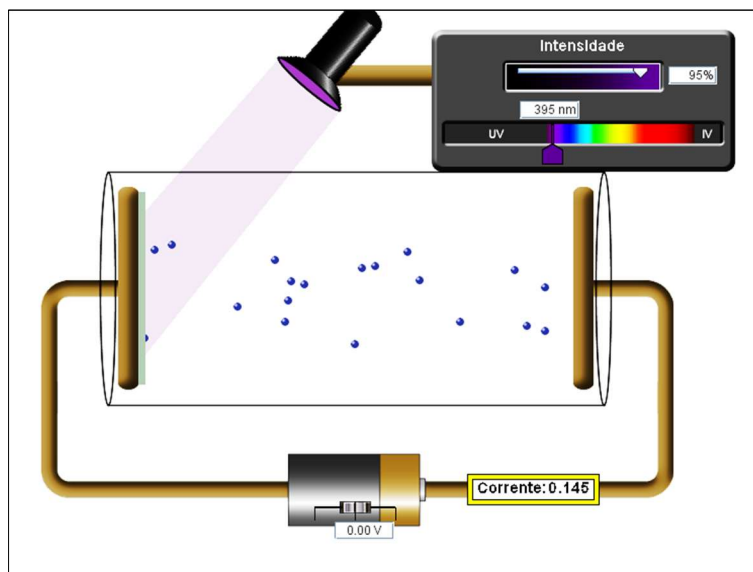
Philip Lenard, em seus estudos e observações criou um aparato experimental, consistindo basicamente em uma câmara de vácuo na qual introduziu uma chapa de material metálico.

A câmara de vácuo permitia controlar o ambiente e eliminar quaisquer efeitos indesejados, como a interferência do ar. Ele colocou um eletrodo na câmara, próximo à superfície do material metálico, que seria atingido pelos elétrons emitidos.

Lenard então, utilizou-se de uma fonte de luz, geralmente uma lâmpada de descarga, que emite radiação eletromagnética em uma faixa de frequência conhecida e variava a frequência da luz incidente, que é a frequência da luz que atinge a superfície metálica.

Alterando o tipo de lâmpada ou utilizando filtros de cores para selecionar diferentes comprimentos de onda. (TORRES, et al. 2016, p. 211).

Podemos observar uma representação do aparato experimental produzido Hertz na Figura 5.

Figura 5 – Representação do Experimento de Lenard.

Fonte: https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulations/photoelectric

Quando a luz atingia a superfície do material metálico, elétrons eram emitidos da superfície. Esses elétrons eram acelerados em direção ao eletrodo dentro da câmara de vácuo. Lenard mediu a corrente elétrica gerada nos eletrodos de acordo com a intensidade da luz incidente e sua frequência.

Lenard a partir desse experimento observou que ao aumentar a intensidade da luz incidente, isso levava a um aumento na corrente elétrica gerada, indicando que mais elétrons estavam sendo emitidos da superfície metálica. Também percebeu que, ao aumentar a frequência da luz incidente, a corrente elétrica não aumentava linearmente.

Em vez disso, havia um ponto de frequência abaixo do qual não importava quanto a intensidade da luz fosse aumentada, os elétrons não seriam emitidos. Acima dessa frequência, a corrente aumentava significativamente. Lenard também mediu a energia cinética dos elétrons emitidos. Ele observou que a energia cinética máxima dos elétrons aumentava com a frequência da luz incidente e era independente da intensidade da luz. (TORRES, et al. 2016, p. 211)

O experimento de Philipp Lenard sobre o efeito fotoelétrico foi um dos primeiros indícios de que a luz possuía característica de partícula, ao contrário da visão tradicional da luz como uma onda contínua e foi um marco importante para a compreensão da natureza dual da luz e na confirmação das teorias quânticas emergentes do final do século XIX. (SUTTINI, et al. 2024, p.3).



Coube ao físico alemão Albert Einstein o papel fundamental para a explicação teórica do Efeito Fotoelétrico a partir de uma interpretação baseada na teoria quântica de Max Planck.

4.6 O Efeito Fotoelétrico explicado à luz de Albert Einstein

O artigo intitulado *"Sobre um ponto de vista heurístico a respeito da produção e transformação da luz"* publicado por Albert Einstein em 1905, foi uma das contribuições mais influentes para o desenvolvimento da mecânica quântica e teve um impacto significativo na compreensão da natureza dual da luz como onda-partícula. (SANTOS, 2002, p. 3)

Em seu trabalho, Einstein partiu da hipótese de que a luz não era apenas uma onda eletromagnética, como previsto pela teoria clássica de Maxwell, mas possuía também, propriedades discretas de partículas e a partir dessa hipótese, Einstein propõem que a luz poderia ser quantizada, ou seja, emitida e absorvida em unidades discretas de energia. (SANTOS, 2002, p. 3)

Einstein utilizou em sua teoria quântica da luz os resultados observados no experimento de Efeito Fotoelétrico de Philipp Lenard. Ele propôs que, quando a luz atinge uma superfície metálica, ela transfere sua energia para elétrons na superfície.

Se a energia de um fóton incidente for suficiente para superar a energia de ligação dos elétrons no metal, esses elétrons serão ejetados da superfície, criando assim, uma corrente elétrica. Einstein relacionou a energia de um fóton (E) com sua frequência (ν) usando a já conhecida equação de Planck (Eq. 6). (TORRES, et al. 2016, p. 211)

Albert Einstein introduziu também em seus estudos, o conceito de "função trabalho" (ϕ), que representa a energia mínima necessária para ejetar um elétron da superfície de um material. Essa energia mínima está associada a uma frequência mínima da radiação incidente, denominada de frequência de corte (ν_0). Se a energia de um fóton incidente ($h \cdot \nu$) for maior ou igual à função trabalho ($h \cdot \nu \geq \phi$), o elétron pode ser ejetado da superfície. Caso contrário, o efeito fotoelétrico não seria observado. De acordo com a equação de Einstein para o efeito fotoelétrico, não existem dois materiais com frequências de corte e funções trabalho iguais. As grandezas ν_0 e ϕ são características intrínsecas de cada material estudado. (SANTOS, 2002, p. 3)



Einstein também explicou a relação entre a energia cinética (K) dos elétrons e a energia do fóton incidente. A energia cinética dos elétrons é dada por:

$$K = h \cdot \nu - \phi. \quad (\text{Eq. 9})$$

Dessa forma, a energia cinética dos elétrons emitidos é a diferença entre a energia do fóton incidente e a função trabalho do material. (SANTOS, 2002, p. 3)

O trabalho de Einstein não apenas explicou o Efeito Fotoelétrico de forma consistente com as observações experimentais de Lenard, mas também confirmou as bases da teoria quântica. Ele demonstrou que a luz possui características de partículas e que sua energia é quantizada por meio de quantidades discretas. Essas ideias desafiaram as noções tradicionais da física clássica e abriram caminho para a revolução quântica que se seguiria nos próximos anos.

4.7 A dualidade onda-partícula: Einstein ou De Broglie?

A dualidade onda-partícula é uma das características fundamentais da natureza, e é um dos conceitos centrais da mecânica quântica. Essa dualidade afirma que todas as partículas, incluindo a luz, podem se comportar como ondas ou como partículas, dependendo das condições experimentais. A natureza ondulatória da luz já havia sido demonstrada inicialmente através do experimento de dupla fenda de Thomas Young, em 1801. (COHEN-TANNOUDJI, 2020, p.3)

Neste experimento, Young, se utilizou de três anteparos. No primeiro, havia um pequeno orifício em que ocorria a primeira difração da luz proveniente de uma fonte monocromática.

O orifício único no primeiro anteparo fazia a luz atingir os orifícios do segundo anteparo em fase, transformando-os em novas “fontes” de luz, já que pertenciam a uma mesma fonte original.

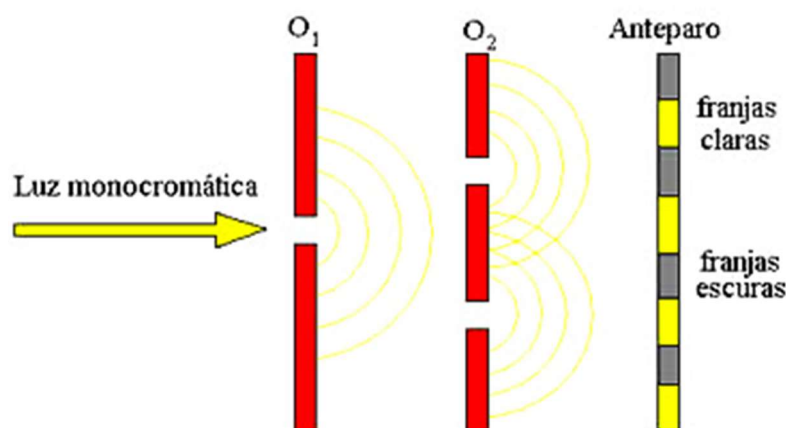
No segundo anteparo havia dois orifícios colocados lado a lado, nos quais aconteciam novas difrações com a luz já difratada no primeiro orifício.

No último anteparo eram projetadas as manchas de interferência e podiam ser observados máximos (regiões bem iluminadas) e mínimos (regiões mal iluminadas) de intensidade luminosa.

Quando os dois orifícios eram substituídos por duas estreitas fendas, essas manchas tornavam-se franjas de interferência, que podiam ser mais bem visualizadas no último anteparo. (COHEN-TANNOUDJI, 2020, p.4).

Uma representação esquemática do experimento de Thomas Young é mostrada na Fig. 6.

Figura 6 – Representação do Experimento de Thomas Young.



Fonte: https://static.preparaenem.com/conteudo_legenda.jpg

A formação do padrão de interferência no último anteparo confirmava as previsões iniciais de Thomas Young de que se a luz tivesse uma natureza ondulatória, ela deveria se comportar de maneira semelhante a ondas em um lago.

Quando duas ondas opostas se encontrassem, elas deveriam reagir de uma maneira específica para reforçar ou destruir uma à outra, formando padrões de interferências como os obtidos em seu experimento.

Ao se comparar os resultados obtidos por Thomas Young em seu experimento de dupla fenda com a explicação dada por Albert Einstein para o Efeito Fotoelétrico, muitos questionamentos surgiram dentro da comunidade científica.

Com a explicação dada por Einstein retornamos a uma concepção de partículas para a luz. Isso, entretanto, não significa que devemos abandonar a teoria ondulatória, pois fenômenos típicos de ondas, como interferência e difração, não poderiam ser explicados se considerarmos apenas os comportamentos de partículas apresentados pela luz. (COHEN-TANNOUDJI, 2020, p.3).

Analizando o famoso experimento da dupla fenda de Young, chegaremos à seguinte conclusão: uma interpretação completa dos fenômenos só pode ser obtida conservando tanto o aspecto de onda quanto o aspecto de partícula da luz (embora eles pareçam a priori irreconciliáveis). (COHEN-TANNOUDJI, 2020, p.4).



A origem da dualidade onda partícula é um tema complexo e controverso. Em geral, atribui-se a Albert Einstein a proposta inicial do conceito, em seu artigo de 1905 publicado na revista *Annalen der Physik*, intitulado: “*Sobre um ponto de vista heurístico a respeito da produção e transformação da luz*”.

Nesse artigo, Einstein propôs a partir da Teoria Quântica de Planck, que a luz pode ser quantizada, ou seja, que ela é composta de pequenas unidades discretas de energia, denominados de quanta de luz.

Segundo alguns autores, esse artigo traz a introdução da dualidade onda-partícula para a luz. Um desses autores é o físico italiano Emílio Segré.

Voltemos agora ao primeiro dos dois trabalhos escritos por Einstein no surpreendente ano de 1905. A meu ver, é uma das maiores obras já realizadas em física. Naquela época, os cientistas sabiam que a luz era constituída de ondas eletromagnéticas; se havia alguma coisa de certo, era isso. No entanto, Einstein tinha dúvidas e revelou a natureza dual da luz – corpuscular e ondulatória. Essa descoberta, junto com o aspecto dual correspondente da matéria, tornou-se a maior conquista do século. (SEGRÉ *Apud* MARTINS, 2014, p. 16)

O físico francês Louis de Broglie é geralmente também creditado com a primeira proposta explícita da dualidade onda-partícula para todas as partículas, incluindo a matéria. Em sua tese de doutorado, defendida em 1924, De Broglie postulou que todas as partículas possuem uma onda associada a seu movimento. (MARTINS, 2014, p. 16).

Essa hipótese foi confirmada experimentalmente em 1927, por experimentos realizados Davisson e Germer com emissão de elétrons contra anteparos de duplas fendas produziram os mesmos padrões de interferência obtidos por Thomas Young e confirmaram notavelmente a existência de um aspecto ondulatório da matéria, mostrando que padrões de interferência podem ser obtidos com partículas materiais. (COHEN-TANNOUDJI, 2020, p.10).

Assim, a questão de saber se a proposta do conceito de dualidade onda partícula para a luz (radiação) poderia ou não ser atribuída a Einstein, ou se o conceito surgiu pela primeira vez com De Broglie, é uma questão complexa e de interpretação.

De acordo com Roberto Andrade Martins, em seu livro: *História da Teoria Quântica: A Dualidade Onda-Partícula, de Einstein a De Broglie*, alguns autores re-



forçam a ideia de que Einstein foi o proponente do conceito de dualidade onda partícula.

Por exemplo, em 1974, Heinrich Medicus afirmou que a ideia de Louis de Broglie era uma extensão, para incluir todas as partículas, da teoria de Einstein de 1905 sobre a dualidade onda partícula.

Basicamente, sua ideia [de Louis de Broglie] era uma extensão, para incluir todas as partículas, da teoria de Einstein de 1905 sobre a dualidade onda-partícula dos fótons: Corpúsculos são acompanhados por ondas. (MEDICUS, 1974, p. 38)

Além disso, o trabalho de Einstein sobre o efeito fotoelétrico, publicado em 1905, é frequentemente referido por muitos físicos como o artigo de Einstein sobre a dualidade onda-partícula.

No entanto, em seu livro, Andrade Martins, também menciona que não há uma visão dualística clara nos trabalhos de Einstein, semelhante à de Louis de Broglie, e que há diferenças entre as visões de diferentes autores a respeito do que Einstein estaria propondo em 1905.

Portanto, a questão da autoria da concepção de dualidade onda-partícula para a luz ainda é objeto de debate e análise historiográfica. (MARTINS, 2014, p.6)

Com base na análise do artigo de 1905, Martins (2014) afirma que a posição de Einstein era favorável à descontinuidade da radiação. Ele defendia que a luz se manifestava na forma de quanta pontuais, sem sugerir qualquer dualidade onda-partícula. No entanto, o trabalho de Einstein estava intimamente ligado ao estudo da radiação do corpo negro, e ele introduziu a ideia de “grânulos” de luz.

Embora reconhecesse que a teoria ondulatória explicava bem diversos fenômenos ópticos e provavelmente não seria substituída, Einstein não abordou explicitamente a relação entre essas partículas de luz e as ondas no artigo de 1905.

Portanto, não existem evidências de que ele tenha proposto a teoria da dualidade onda-partícula para a luz, pois o próprio Einstein reconheceu a complexidade e a dificuldade de reconciliar a natureza dual da luz, expressando preocupações sobre a falta de uma solução clara para o problema do dualismo.

Mas, mesmo assim, essa reflexão sobre a dualidade da luz e sua relação com a matéria foi uma parte importante de seu legado. (MARTINS, 2014, p.18).

Já os argumentos sobre a dualidade onda-partícula da luz e da matéria atribuídos a Louis de Broglie destacam sua proposta de que todos os constituintes



da matéria, como os elétrons, possuem tanto propriedades ondulatórias quanto corpusculares.

De Broglie é frequentemente interpretado como alguém que generalizou a concepção de dualidade onda-partícula, que já era aceita para a luz, aplicando-a à matéria.

Ele acreditava que a dualidade estava presente na proposta de Einstein de 1905, onde Einstein introduziu a ideia de que a luz poderia ser vista como composta de "quanta de luz". De Broglie reconheceu que Einstein, ao abordar a dualidade, estava tentando preservar a noção de ondas luminosas, mesmo diante da existência dos "grânulos" de luz. (MARTINS, 2014, p.18)

Além disso, De Broglie expressou que a busca de Einstein por uma solução clara para o problema do dualismo da luz foi uma inspiração para sua própria pesquisa. Ele enfatizou que Einstein foi o primeiro a reconhecer a dualidade entre ondas e corpúsculos na radiação, e essa questão o preocupou ao longo de sua vida.

De Broglie também argumentou que a ideia de que corpúsculos são acompanhados por ondas é uma extensão da teoria de Einstein sobre a dualidade dos fótons.

Assim, a contribuição de Louis De Broglie é vista como uma ampliação do conceito de dualidade, que ele aplicou a todas as partículas, não apenas à luz, estabelecendo uma conexão fundamental entre a mecânica quântica e a natureza dual da matéria. (MARTINS, 2014, p.206)

A teoria da dualidade onda-partícula teve um impacto profundo na física moderna, pois desafiou a visão clássica de que a luz e a matéria eram entidades separadas. Essa dualidade levou ao desenvolvimento da mecânica quântica, que é a base para entender fenômenos em escalas atômicas e subatômicas.

A ideia de que partículas podem se comportar como ondas e vice-versa permitiu avanços em várias áreas da física, incluindo a física de partículas, a física médica, a tecnologia de semicondutores, entre outros avanços tecnológicos. (TORRES, et al, 2018, p. 222).

No próximo capítulo serão descritos os caminhos metodológicos perpassados durante o desenvolvimento do Produto Educacional desta dissertação.



5. CAMINHOS METODOLÓGICOS

5.1 – Natureza da Pesquisa.

A modalidade de pesquisa utilizada nesta dissertação é de natureza qualitativa pelo método da pesquisa participante, que se trata de uma abordagem metodológica que prioriza a interpretação dos significados que os participantes atribuem às suas ações dentro do contexto socioeducacional de sala de aula.

Nesse sentido, o foco central da investigação não está apenas em quantificar respostas ou medir fenômenos, mas sim em compreender como os indivíduos (estudantes do ensino médio) percebem suas experiências e interações com o conhecimento e o mundo que os cerca. (MOREIRA, 2011, p.81)

Neste processo em particular, o professor, como principal instrumento de coleta de dados, atuando como um pesquisador inserido no ambiente educativo, exerce um papel fundamental na coleta de dados através da observação participativa.

Sua imersão nas dinâmicas da sala de aula permite uma coleta rica e contextualizada de informações, uma vez que ele testemunha e participa ativamente das interações entre os estudantes durante o processo de aprendizagem. (MOREIRA, 2011, p.82).

Ao envolver-se diretamente com os estudantes, o pesquisador não apenas coleta dados, mas também colhe hipóteses que serão analisadas ao longo do processo. Essa prática de observação e interação proporciona uma compreensão mais profunda da realidade em estudo, uma vez que admite a complexidade das interações humanas e os diversos significados que emergem delas.

Assim, a pesquisa participante de natureza qualitativa busca investigar a dinâmica do aprendizado em um contexto real, comprometendo-se com a análise não apenas dos resultados, mas principalmente dos processos que levam os estudantes a construir e consolidarem seus conhecimentos. (MOREIRA, 2011, p.85)

Segundo as autoras Lüdke e André (1986), a pesquisa de natureza qualitativa tem as seguintes características:

- a) A pesquisa qualitativa tem o ambiente natural como sua fonte direta de dados e o pesquisador como seu principal instrumento; b) os dados coletados são predominantemente descritivos; c) a preocupação com o processo é muito maior do que com o produto; d) o significado que as pessoas dão às coisas e à sua vida são focos de atenção especial pelo pesquisador; e) a análise dos dados tende a seguir um processo indutivo. (LÜDKE e ANDRÉ, 1986, p. 44)

De acordo com as autoras, a análise dos dados em uma abordagem qualitativa tende a ser indutiva, o que significa que o pesquisador parte das experiências dos participantes para construir uma compreensão mais ampla do fenômeno em estudo.

Essa metodologia propõe que o conhecimento emerge das próprias interações e narrativas das pessoas, permitindo que o pesquisador extraia significados contextuais e conceituais a partir das respostas compartilhadas pelos estudantes.

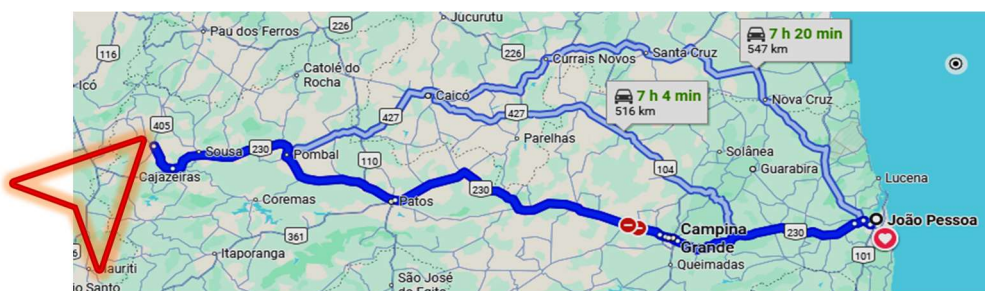
Nesse contexto, a finalidade desta dissertação foi investigar essas interações e compreender os significados e conceitos que os estudantes do ensino médio atribuem à natureza da luz e sua interação com a matéria através de uma Sequência Didática baseada na Teoria dos Campos Conceituais de Gerard Vergnaud apresentada no capítulo 3, elaborada com o intuito de realização de uma intervenção didática em uma sala de aula real.

A sequência objetivou não apenas avaliar o rendimento dos estudantes por meio de médias e notas quantitativas, mas também investigar como eles internalizam e reestruturam conceitos em debates e atividades práticas ao estudarem o Efeito Fotoelétrico, promovendo uma discussão sobre o papel do professor na mediação do domínio e fortalecimento dos campos conceituais abordados dessa área da Física durante o período de intervenção.

5.2 Descrição do Ambiente Educacional e dos Participantes.

A intervenção didática que alicerça a presente dissertação foi planejada e desenvolvida no âmbito da Escola Cidadã Integral Técnica Estadual Coronel Jacob Guilherme Frantz, escola pública, localizada à Rua Padre Joaquim Cirilo de Sá, 95, centro de São João do Rio do Peixe, município localizado na região do alto sertão do Estado da Paraíba, conforme localizado e representado nas figuras 7 e 8.

Figura 7 – Mapa com a localização de São João do Rio do Peixe/PB



Fonte: <https://www.google.com/maps/>

Figura 8 – Foto da fachada da entrada da Escola.



Fonte: Arquivos do Autor

A escola oferece a modalidade de ensino de tempo integral das 7:30 h às 17:00 h, com a oferta do nível médio técnico através dos cursos Técnico em Agroecologia e Técnico em Informática Básica, sendo mantida e administrada pela Secretaria de Estado da Educação da Paraíba por meio de seus representantes legais e subordinada à 9ª Gerência Regional de Educação com sede em Cajazeiras – PB.

A unidade escolar possui uma infraestrutura ampla, com 16 salas de aulas adequadas, espaçosas e bem arejadas, espaços físicos para funcionamento da secretaria escolar, laboratório de ciências (Química e Biologia), laboratório de Física e Matemática, laboratório de robótica educacional.

O espaço físico contempla também sala de vídeo, biblioteca, sala da gestão escolar, sala da coordenação pedagógica, sala dos professores, almoxarifados, banheiros para estudantes, banheiros para professores e funcionários, auditório, salas de funcionários, refeitório, cozinha com salas anexas e quadra poliesportiva com banheiros e vestiários.

A escola conta ainda com uma grande área livre não construída, utilizada como espaços de convivência e para o desenvolvimento de projetos e aulas práticas do curso técnico em agroecologia.

Os ambientes e infraestruturas encontram-se em bom estado de conservação e limpeza, necessitando, entretanto, de investimentos em climatização das salas de aula que foram construídas originalmente no sentido norte-sul, de modo que estão expostas a alta taxa de insolação ao longo do dia em suas portas e janelas e são



equipadas apenas com ventiladores, que há muito se mostram ineficientes para o conforto térmico dos estudantes e professores.

5.3 Perfil dos Discentes

Os discentes da escola se caracterizam por estudantes residentes na zona rural e urbana do município de São João do Rio do Peixe–PB e cidades circunvizinhas, cujas famílias possuem perfil socioeconômico diversificado, tendo como fonte de renda predominante a agricultura familiar e para os moradores da zona urbana o trabalho em serviços diversos no âmbito da administração pública e do setor comercial.

Neste ano de 2025, a escola conta com 187 estudantes matriculados, divididos em 06 turmas, sendo 04 turmas no Curso Técnico de Agroecologia e 02 turmas no Curso Técnico em Informática.

Os estudantes atendidos pela instituição demonstram confiar na educação de tempo integral como meio para atingir a sua realização pessoal, profissional e financeira, buscando sua independência e crescimento intelectual.

Entretanto, nos últimos anos o número de estudantes matriculados vem diminuindo em função de o município contar com outra escola estadual que oferta o ensino médio de tempo parcial (Matutino e/ou vespertino), o que leva muitos estudantes a se matricularem nessa modalidade de ensino que não exige a sua permanência na escola durante todo o dia, dado que muitos estudantes necessitam trabalhar precocemente para complementar a renda de sua família, o que é uma realidade bem presente nesta região.

Diante disso e apesar de todos os desafios encontrados, principalmente no período pós-pandemia, a equipe escolar busca constantemente desenvolver projetos que venham minimizar as defasagens de aprendizagem, buscando a sensibilização e a conscientização dos educandos para uma educação efetiva e de qualidade, que contribua para a sua formação acadêmica, não só para o mundo do trabalho como também ao longo de toda a vida.

Com base nesse contexto escolar, a sequência para ensino do Efeito Fotoelétrico a ser descrita nesta dissertação foi planejada para ser executada junto à turma da 3ª Série B do Ensino Médio Técnico em Agroecologia durante o mês de setembro do ano letivo de 2024.



A turma escolhida foi composta por um total de 32 estudantes, sendo 15 do sexo feminino e 17 do sexo masculino, regularmente matriculados e frequentes às aulas.

5.4 – Sequência Didática para Estudo do Efeito Fotoelétrico.

A sequência didática utilizada durante o período de intervenção foi estruturada tendo como base a Teoria dos Campos Conceituais de Gerard Vergnaud, considerando a articulação entre os conceitos e as situações que foram previstas para a seu desenvolvimento e execução, permitindo que os estudantes pudessem estabelecer conexões significativas entre ambos.

Na construção da sequência foi importante identificar os conceitos centrais que seriam explorados e como eles se relacionavam com as situações práticas que os estudantes enfrentariam, permitindo que esses conceitos fossem vivenciados em contextos educativos reais.

Além disso, foi levado em conta a progressão dos conteúdos ensinados, começando por conceitos mais simples e avançando para aqueles que envolvem maior complexidade, de modo a facilitar a construção gradual do conhecimento e o fortalecimento do domínio do campo conceitual em estudo.

Outro aspecto considerado foi a diversidade de representações e formas de abordagem dos conteúdos, utilizando diferentes recursos didáticos e metodologias que estimulam a participação ativa dos estudantes.

A promoção de situações-problemas que desafiam os estudantes a aplicarem os conceitos em ação foi essencial, pois promoveu o desenvolvimento de habilidades de raciocínio e resolução de problemas.

Também se considerou a utilização da avaliação formativa ao longo do processo (valorizando as construções dos estudantes e participações em todas as etapas), permitindo que os estudantes refletissem sobre seu aprendizado e ajustassem suas compreensões sobre os conceitos abordados.

Nesse sentido, é importante que o professor atue como mediador, promovendo um ambiente de aprendizagem colaborativa onde os estudantes possam discutir, questionar e construir conhecimentos de forma conjunta. Essa abordagem não apenas enriquece a experiência de aprendizagem, mas também contribui para a



formação de um entendimento mais profundo e contextualizado do campo conceitual explorado nas aulas.

Com base nessas premissas e reflexões, é apresentada a seguir uma Sequência Didática para o estudo do Efeito Fotoelétrico, destinada a estudantes da terceira série do Ensino Médio como forma de vivenciar em sala de aula os elementos norteadores da Teoria dos Campos Conceituais de Gerard Vergnaud, de modo a validá-la como um importante referencial teórico e metodológico para o ensino de Física.

5.5 – Detalhamento das Etapas da Sequência Didática.

A sequência didática aqui proposta para o estudo do Efeito Fotoelétrico foi estruturada de forma a ser coerente, progressiva e alinhada aos princípios da Teoria dos Campos Conceituais de Vergnaud. A seguir, na tabela 3, é apresentado um quadro síntese das etapas, objetivos, elementos dos fundamentos teóricos utilizados em cada etapa e os recursos e dinâmicas empregadas em cada momento da sequência.

Tabela 3 – Quadro Síntese da Sequência Didática.

ETAPA	OBJETIVO PRINCIPAL	FUNDAMENTO TEÓRICO EM (VERGNAUD)	RECURSOS DINÂMICAS
1. Questionamentos prévios.	Diagnosticar conhecimentos prévios e ativar esquemas mentais.	Invariantes operatórios e situações-problema.	Discussão oral com questões de natureza etimológica e conceituais.
2. Experimentação	Vincular conceitos a fenômenos observáveis.	Conceitos-em-ação em situações concretas.	Kits robóticos, células fotovoltaicas e análise em grupo.
3. Aulas Contextualizadas	Sistematizar conhecimentos científicos.	Validação e modelagem de conceitos.	Slides, vídeos, animações e leitura dirigida.
4. Uso de Simuladores	Explorar relações quantitativas e limites do fenômeno.	Esquemas, Teoremas e Conceitos-em-Ação mediados	Simuladores (PhET/Vascak), manipulação



ETAPA	OBJETIVO PRINCIPAL	FUNDAMENTO TEÓRICO EM (VERGNAUD)	RECURSOS DINÂMICAS
		por ferramentas.	de variáveis.
5. Resolução de Problemas	Aplicar conceitos em cálculos e contextos reais.	Teoremas-em-ação e formalização matemática.	Exercícios analíticos e conceituais.
6. Avaliação Formativa	Verificar domínio conceitual multidimensional.	Rubricas baseadas em competências integradas ao Campo Conceitual.	Critérios de desempenho

A seguir é descrito os métodos, recursos e dinâmicas que são adotados em cada etapa da sequência didática.

5.5.1 – Investigação do Campo Conceitual por Questionamentos.

Nesse primeiro momento, o professor inicia a aula trazendo algumas questões para que os estudantes respondam e assim, possa identificar o grau de conhecimento deles sobre o efeito fotoelétrico.

Nesse primeiro momento, busca-se investigar os conhecimentos prévios dos estudantes a partir de questões do tipo:

- 1) “O que as palavras *fotografia*, *fotossíntese*, *fotocópia*, *fotossensível* têm em comum e qual o significado do radical compartilhado por esses termos?”
- 2) “Você conhece ou já ouviu falar sobre o Efeito Fotoelétrico? Explique.”
- 3) “Mesmo se não ouviu ou conhece, que você entende ou imagina que seja, o Efeito Fotoelétrico?”
- 4) “Que tecnologias você acredita que podem estar associadas ao Efeito Fotoelétrico?”

As respostas fornecidas pelos estudantes devem ser analisadas, refletidas e comentadas pelo professor pesquisador de modo a perceber como os estudantes conseguem estabelecer a relação dos termos com radical etimológico foto com o espectro visível da luz, suas interações com a matéria e as tecnologias associadas ao efeito.



5.5.2 – Investigação do Campo Conceitual por Experimentação.

Na sequência da aula, utilizando-se de kits de robótica educacional, brinquedos ou outros equipamentos alimentados por células fotovoltaicas, realiza-se um experimento, onde as células fotovoltaicas são expostas diretamente à luz solar e em seguida à luz de uma lâmpada incandescente; logo após, à luz de uma lâmpada fluorescente e/ou de led e em cada situação, solicitamos que os estudantes façam anotações e observações sobre o comportamento das estruturas alimentadas pelas células fotovoltaicas em cada etapa da atividade.

A partir do experimento realizado, os estudantes podem ser divididos em grupos de trabalho com até 4 integrantes e são orientados a responderem às seguintes questões:

- a) *“Qual o princípio de funcionamento das células fotovoltaicas?”*
- b) *“Que tipo de transformações de energia ocorreram durante o experimento?”*
- c) *“Quais diferenças foram observadas ao se substituir o tipo de fonte luminosa que alimenta as células?”*
- d) *“Como vocês explicam ou justificam essas diferenças observadas?”*

Após responderem às questões propostas, os estudantes fazem a socialização e discussão de suas respostas com os demais grupos sob mediação do professor.

Nesse momento, observa-se e anota-se as respostas de forma a perceber os invariantes operatórios utilizados pelos estudantes e argumentos pertinentes ao campo conceitual que posteriormente será abordado em profundidade nas próximas aulas.

5.5.3 – Ampliação do Campo Conceitual por meio de Aulas Contextualizadas.

Ao iniciar essa etapa, faz-se a exposição do conteúdo referente ao Efeito Fotoelétrico por meio de materiais diversificados, como slides ilustrados, vídeos explicativos, animações e recursos visuais, como diagramas e gráficos, para facilitar a compreensão dos conceitos e princípios relativos ao tema, destacando também os experimentos pioneiros realizados por Heinrich Hertz, Philipp Lenard e detalhando os argumentos propostos por Albert Einstein para explicar o Efeito Fotoelétrico.



Durante a aula expositiva, devem ser visitados os argumentos e conceitos trazidos pelos estudantes na aula anterior, evidenciando, validando e modelando esses argumentos de acordo com o saber científico apresentado no texto entregue aos estudantes ou nas fontes bibliográficas utilizadas pelo professor para compor o seu material de apresentação.

Na sequência é recomendado aos estudantes a leitura do capítulo que trata do Efeito Fotoelétrico no livro didático utilizado pela escola. Como sugestão, essa leitura, pode ser feita em sala, caso haja tempo hábil ou como uma atividade complementar extraclasse em que poderiam realizar em casa.

Para esta sequência didática, foi utilizado o texto do Livro **Física: Ciência e Tecnologia** da Editora Moderna, 2018, Páginas 209 a 212. (TORRES, et al, 2016), sendo que durante a leitura, os estudantes devem fazer apontamentos de conceitos, conhecimentos e dúvidas por meio de anotações em seu material de estudo (cadernos ou bloco de notas).

5.5.4 – Ampliação do Campo Conceitual por meio de simuladores.

Nessa etapa é apresentado aos estudantes um Objeto Digital de Aprendizagem (ODA) que se trata de um Simulador do Efeito Fotoelétrico baseado no experimento de Phillipp Lenard. Para isso, dispomos de duas possibilidades de simuladores: O simulador **photoelectric** disponível na plataforma **Phet**³. Ou então o simulador **Efeito Fotoelétrico**⁴.

Os estudantes devem ser orientados quanto ao funcionamento e operacionalização do simulador, que pode ser explorado em computadores ou smartphones, e após isso, os estudantes podem manipular o ODA variando os comprimentos de ondas da fonte luminosa, sua intensidade e testando essas variações em diferentes materiais disponíveis no simulador, de modo, que os estudantes possam perceber como ocorrem as interações entre fótons e elétrons, observando que a energia dos fotoelétrons depende da frequência da radiação incidente e não da intensidade desta (como apresentado no capítulo 4).

³ Da Universidade do Colorado através do link:
https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulations/photoelectric/about

⁴ Disponível na plataforma **Vasak-Física na Escola** através do link: [Efeito fotoelétrico](#)



Evidenciar que para cada metal, existe uma frequência mínima da radiação eletromagnética abaixo da qual não são produzidos fotoelétrons, por mais intensa que seja esta radiação. Para isso, pode-se lançar mão de alguns questionamentos dirigidos aos estudantes durante a manipulação do simulador, tipo:

- a) *“Qual é a relação entre a intensidade da luz incidente na superfície refletora e o número de elétrons emitidos?”*
- b) *“O que acontece quando alteramos o comprimento de onda?”*
- c) *“É possível perceber a existência de uma quantidade mínima de energia para o efeito acontecer?”*
- d) *“O efeito apresenta as mesmas características para todos os elementos disponíveis na simulação? Explique o que se observa ao aplicarmos a simulação em diferentes materiais.”*

Após esse período de simulações, é ideal promover um momento de sistematização das observações e informações obtidas durante a aula, retomando as observações realizadas durante o experimento da etapa 2, onde é possível verificar que a radiação emitida por uma lâmpada de led ou fluorescente não foi capaz de fazer funcionar as células fotovoltaicas, enquanto a radiação emitida pela lâmpada incandescente a fez funcionar como quando exposta à radiação solar.

5.5.5 – Resolução de Problemas e Atividades.

Nessa etapa, ministra-se uma aula expositiva por meio da utilização de uma folha impressa com exemplos de questões e exercícios de aprofundamento das características mais relevantes do Efeito Fotoelétrico, explorando tópicos como cálculos da função trabalho; cálculo da energia de um fóton, relação matemática entre frequência e energia, entre outros. À medida em que explica-se o assunto, deve-se auxiliar os estudantes na resolução das questões impressas e incentivar momentos de discussões dos resultados obtidos, aprofundando os conceitos apresentados nas aulas anteriores e trazendo novos elementos ao conteúdo, como as deduções matemáticas do Efeito Fotoelétrico e exemplos de sua aplicação em sistemas de pequena e grande escala, como os kits ou equipamentos utilizados no experimento da etapa 2 e os sistemas de geração de energia fotovoltaica.



Após esse primeiro momento, é recomendado entregar aos estudantes, uma folha tarefa com questões inéditas, ou adaptadas que sejam resolvidas e devolvidas ao professor para correção, apontamentos e feedbacks que precisam ser dados à turma na aula posterior. A sugestão é que a folha tarefa contenha questões alternativas no modelo Exame Nacional do Ensino Médio – ENEM, e questões de cálculos das variáveis do efeito fotoelétrico, onde os estudantes tenham a oportunidade de expressarem os significados atribuídos aos conhecimentos obtidos durante as aulas.

5.5.6 – Avaliação de Desempenho e Domínio do Campo Conceitual

Durante o desenvolvimento e execução desta sequência didática em sala de aula, é proposto um método de avaliação para verificação da evolução e domínio do campo conceitual sobre o Efeito Fotoelétrico por parte dos estudantes, através de uma avaliação formativa de processo, contínua e validada por meio de rubricas e que possam ser convertidas em uma nota de forma a cumprir as exigências de médias somativas adotadas pela maioria dos sistemas de ensino brasileiros.

Carvalho e Martinez (2005), *apud* Dantas (2017), defendem o uso da avaliação formativa que pode ser entendida como uma ação que exige redefinição constante de metas, visando orientar e reorientar a prática do professor de acordo com a aprendizagem alcançada pelos estudantes. (DANTAS, 2017 p.10)

Desse modo, nesse modelo de avaliação são considerados os aspectos relacionados à proatividade e protagonismo dos estudantes em relação ao processo de ensino e aprendizagem, como a manipulação dos instrumentos e materiais de ensino; as discussões promovidas e alimentadas em grupos; as apresentações de argumentos e hipóteses; as produções realizadas em cada etapa e outros elementos que possam validar a efetiva participação dos estudantes nesse processo.

Neste quesito, os estudantes são avaliados, conforme a disposição ocorrida durante as aulas e podem receber uma nota de até 10 (dez) pontos com base nos critérios definidos pela rubrica descrita na tabela 4 abaixo e que deve ser apresentada previamente aos estudantes no início da aplicação desta sequência em sala de aula.



Tabela 4 – Rubrica para Avaliação Formativa da Sequência Didática.

COMPREENSÃO DOS CONCEITOS BÁSICOS.	ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DE RESULTADOS EXPERIMENTAIS.	CONEXÕES COM APLICAÇÕES PRÁTICAS E TECNOLÓGICAS.	CAPACIDADE DE REALIZAR ANÁLISES QUANTITATIVAS.	RELAÇÃO DO EFEITO FOTOELÉTRICO COM OUTROS CONCEITOS DA FÍSICA.
DE 0 A 2 PONTOS	DE 0 A 2 PONTOS	DE 0 A 2 PONTOS	DE 0 A 2 PONTOS	DE 0 A 2 PONTOS
Os Estudantes apresentam uma boa compreensão dos conceitos relacionados ao efeito fotoelétrico, sendo capazes de expressá-los com clareza em suas produções.	Os Estudantes realizam e interpretam com boa precisão os resultados do experimento e simulações propostas durante as aulas.	Os Estudantes estabelecem conexões significativas entre o efeito fotoelétrico e suas aplicações práticas e tecnológicas.	Os Estudantes realizam e demonstram bom entendimento das relações quantitativas no estudo de efeito fotoelétrico.	Os Estudantes, em suas produções, estabelecem conexões entre o efeito fotoelétrico e outros conceitos da Física.

Ao se utilizar essa sequência didática em sala de aula, três eixos merecem atenção prioritária. Primeiro, a evolução dos invariantes operatórios: como as noções iniciais foram reformuladas após a simulação e formalização matemática do Efeito Fotoelétrico?

Dados das discussões em grupo (etapa 2) e respostas aos simuladores (etapa 4) podem revelar rupturas conceituais, particularmente na compreensão do caráter discreto da energia dos fótons.

Em segundo, a efetividade da multirrepresentação entre experimentação física, modelos digitais e linguagem matemática garante uma compreensão integrada do campo conceitual?

Análises comparativas entre as respostas obtidas para questões apresentadas na etapa 1 e os exercícios propostos na etapa 5 poderão indicar se as representações complementares superaram os obstáculos cognitivos.

Por fim, a rubrica de avaliação oferece uma matriz para decifrar nuances do aprendizado. Seus critérios – desde a compreensão básica até conexões com outros tópicos da física – permitirão correlacionar engajamento nas atividades investigativas com domínio conceitual mensurado nas avaliações.

A persistência de dificuldades em dimensões específicas sinalizará onde a mediação docente precisará ser repensada, testando assim o potencial da teoria de Vergnaud para níveis mais complexos de aprendizagem, evidenciando como os estudantes transformam informação em conhecimento, quando conceitos e situações se entrelaçam intencionalmente dentro do domínio de um campo conceitual.



6. ANÁLISE DE RESULTADOS

De acordo com o planejamento das ações relativas ao desenvolvimento da sequência didática junto à turma da 3ª Série B da ECIT. E Coronel Jacob Guilherme Frantz, foram realizados 5 (cinco) encontros de 02 (duas) aulas geminadas (aulas sequenciais), perfazendo um total de 10 (dez) aulas de 50 minutos cada, sempre às segundas-feiras, nas datas de 02/09/2024, 09/09/2024, 16/09/2024, 23/09/2024 e 30/09/2024 no 8º e 9º horários que aconteciam entre as 15:20 h às 17:00 h.

Convém aqui esclarecer que no início do ano letivo de 2024 esta turma de estudantes estava atribuída ao Professor Claudio Reinke, autor desta dissertação, para a docência das aulas de Física.

Entretanto, no mês de julho de 2024, pelo fato da escola funcionar em tempo integral e desta forma ter adquirido o direito legal junto à Secretaria de Educação do Estado da Paraíba da redução carga horária para se dedicar às aulas e atividades acadêmicas do Mestrado Profissional em Ensino de Física (MNPEF), o Núcleo de Movimentação de Pessoal (NUMOP) órgão ligado à Secretaria de Educação do Estado da Paraíba enviou uma determinação à escola, solicitando uma remoção do professor/autor para uma escola de tempo parcial e que deixasse de exercer as suas atividades docentes na referida escola de tempo integral.

Importante deixar claro que as diretrizes educacionais das escolas integrais do Estado da Paraíba não permitiam à época que a escola mantivesse em seu quadro docente, professores com redução de carga horária, mas apenas professores em regime de dedicação exclusiva (RDDI).

Diante dessa determinação do NUMOP, o autor deste trabalho foi removido para a Escola Estadual de Ensino Fundamental e Médio Ministro José Américo de Almeida, passando a ocupar o cargo de Técnico de Laboratório de Ciências e Robótica e Assistente Educacional, visto que com o ano letivo em andamento, o quadro de aulas e de professores da instituição já se encontravam completo e consolidado.

Com a mudança de instituição as aulas de Física ofertadas pela instituição de tempo integral foram atribuídas a outro docente, licenciado em Matemática, que assumiu prontamente as turmas para que os estudantes não tivessem prejuízo da carga horária prevista para o ano letivo. O novo professor, entretanto, permitiu a realização da intervenção didática com a turma da 3ª Série B e dessa forma, foi possí-

vel dar sequência ao processo de intervenção e desenvolvimento desta pesquisa por meio do desenvolvimento e execução da sequência didática como prevista e descrita inicialmente, nas datas e horários informados no início do texto desta seção de relatos de experiências.

Na sequência descreve-se as situações didáticas em cada etapa da sequência proposta, seguidas de interpretações subjetivas à luz da Teoria dos Campos Conceituais.

6.1 Encontro 1: 02 de setembro de 2024 – 2 aulas de 50 min

O primeiro encontro teve a participação de 26 (vinte e seis) estudantes presentes e foi dividido em dois momentos principais. Inicialmente foi realizada uma breve apresentação do assunto a ser detalhado durante os encontros de intervenção pedagógica, mas sem muitos detalhes, pois os estudantes já receberiam na sequência um pequeno questionário de levantamento de conhecimentos prévios sobre o Efeito Fotoelétrico e suas relações com situações cotidianas, conforme mostrado na Figura 9.

Os estudantes tiveram um tempo aproximado de 20 minutos para refletirem e responderem às questões propostas. As respostas dos estudantes para as quatro questões foram bastante diversificadas e algumas delas estão transcritas a seguir e analisadas sob a ótica da Teoria dos Campos Conceituais de Gerard Vergnaud.

Figura 9 – Estudantes respondendo aos questionamentos.



Fonte: Arquivos do Autor.

6.2 Análises das Respostas dos Estudantes

Para a primeira questão: “O que as palavras *fotografia*, *fotossíntese*, *fotocópia*, *fotossensível* têm em comum e qual o significado do radical compartilhado por esses termos?” foram obtidas respostas que relacionam o radical “foto” com a luz e citam processos de transformação:

- “Captação de luz, energia vindo pela luz” (Estudante 1).
- “Possuem em comum o ‘foto’, e por exemplo, a fotossíntese se relaciona ao processo de transformação de energia solar em energia química” (Estudante 2).
- “É um processo de transformação de uma coisa para outra” (Estudante 3).
- “Acredito que são processos que envolve a luz, assim como o significado” (Estudante 4).
- Todos são registros, processos. Fotografia são registros feitos por câmeras, fotocópia é o registro de coisas que já existem (a famosa xerox), fotossíntese é o processo em que durante o mesmo é liberado um gás, o oxigênio, ou seja, o oxigênio seria um dos registros que a planta faz.” (Estudante 5).

Na figura 10 é apresentada uma nuvem de palavras com os conceitos e termos mais citados pelos estudantes em suas respostas:

Figura 10 – Nuvem de palavras da questão 1.



Fonte: Arquivos do Autor

A análise das respostas dadas pelos estudantes para a questão revela um desenvolvimento cognitivo importante na construção de conceitos relacionados ao radical “foto”, associando-os ao conceito de luz.

O fato de alguns estudantes reconhecerem que as palavras mencionadas compartilham este radical indica que estes estudantes são conscientes da raiz etimológica destas palavras, estabelecendo uma base importante para o entendimento de conceitos mais complexos. A identificação do radical “foto” como associado à luz



representa um primeiro passo na formação de um conceito mais amplo de energia luminosa.

Os estudantes que mencionam "captação de luz" e "processos que envolvem a luz" estão, portanto, conectando novos conhecimentos a experiências anteriores, como a fotossíntese, onde a luz solar é convertida em energia química. Isso demonstra uma transição de um entendimento superficial para uma compreensão mais integrada da energia luminosa.

Dessa forma, podemos perceber nas respostas dos estudantes a utilização de conceitos-em-ação descritos na Teoria dos Campos Conceituais de Gerard Vergnaud como noções ou conhecimentos prévios que os indivíduos utilizam para interpretar e dar sentido às novas situações de aprendizagem.

A associação que alguns estudantes fizeram, ao afirmar que todos os processos estão conectados à luz, sugere um teorema que implica que a luz é um elemento comum que possibilita e conecta diferentes fenômenos.

Essa associação se enquadra na Teoria de Gerard Vergnaud como um teorema-em-ação, que são proposições que os indivíduos aceitam como verdadeiras dentro de um contexto específico, permitindo que eles façam inferências ou resolvam problemas a partir delas.

Essa habilidade de estabelecer conexões entre diferentes conceitos é um indicativo do desenvolvimento do pensamento analítico e crítico. Essa dinâmica está alinhada com a teoria de Vergnaud, que sugere que a aprendizagem ocorre através da construção de significados, baseando-se em experiências e contextos de vida dos aprendizes.

Vergnaud argumenta em sua teoria que os conceitos se formam quando os indivíduos processam e reinterpretam informações baseadas em suas experiências anteriores.

Neste caso, os estudantes, ao reconhecerem os elementos comuns entre os termos e aplicá-los a novos contextos, estão se atentando para a inter-relação entre ciência, linguagem e sua experiência cotidiana, criando uma estrutura conceitual mais sólida.

Para a segunda questão apresentada aos estudantes: "*Você conhece ou já ouviu falar sobre o Efeito Fotoelétrico? Explique.*", as respostas foram bastante divergentes entre si, vejamos algumas:



- “Acho que não, mas aparentemente o professor já falou alguma coisa parecida em aula.” (Estudante 1)
- “Já ouvi fotoelétrico, imagino ser algum efeito elétrico momentâneo.” (Estudante 2)
- “O termo já ouvi falar, o efeito elétrico foi desenvolvido por Albert Einstein, mas Einstein é mais conhecido pela teoria da relatividade. Porém, o efeito fotoelétrico é bem diferente da velha teoria dos buracos negros e coisas envolvidas na relatividade.” (Estudante 3)
- “Não me recordo de ser uma palavra presente no meu dia a dia, mas já ouvi o termo.” (Estudante 4).
- “Já, mas não sei sobre, mas tenho a ideia de que precisa de algo relacionado a luz.” (Estudante 5)
- “Não, porque pra mim não é um termo muito popular.” (Estudante 6).

Ao analisarmos as respostas dos estudantes sobre o efeito fotoelétrico, fica evidente diferentes graus de compreensão sobre o tema. Essa variação indica que os estudantes estão em diferentes estágios de desenvolvimento conceitual.

Contudo, faz-se necessário aqui esclarecer, que esta dissertação não foca profundamente na abordagem epistemológica do Efeito Fotoelétrico, o que exigiria um grande arcabouço teórico para embasarmos a pesquisa. Dessa forma, considera-se como relevante neste trabalho os aspectos conceituais da teoria relacionados ao momento histórico e científico da época.

O estudante que menciona a contribuição de Albert Einstein para o efeito fotoelétrico mostra que está não apenas absorvendo conhecimento, mas também relacionando-o à história da ciência.

Essa conexão é importante, pois demonstra um nível de compreensão que vincula a teoria científica ao seu contexto histórico, enriquecendo a aprendizagem e promovendo um entendimento mais profundo do tema.

Por outro lado, a falta de familiaridade com o termo por parte de alguns estudantes é um aspecto relevante, pois sugere que o efeito fotoelétrico não está inserido conceitualmente em sua vivência cotidiana, o que pode representar um obstáculo para a construção de uma compreensão mais sólida sobre o assunto.

A Teoria dos Campos Conceituais de Gerard Vergnaud enfatiza que a aprendizagem é mais eficaz quando os estudantes têm a oportunidade de conectar novos conceitos a experiências e conhecimentos que já possuem por meio de esquemas e situações de aprendizagem.

Para estes estudantes, a ausência de familiaridade com o efeito fotoelétrico implica que lhe falta um referencial para ancorar as novas informações, o que pode limitar sua capacidade de compreender plenamente o conceito.

Isso destaca a importância para o professor de contextualizar o ensino, proporcionando experiências, situações e exemplos que conectem novas aprendizagens às vivências educativas dos estudantes.

Portanto, a diversidade nas respostas reflete um espectro de compreensão que deve ser enriquecido por intervenções pedagógicas que busquem integrar o campo conceitual do efeito fotoelétrico aos conhecimentos prévios dos estudantes, utilizando exemplos práticos do cotidiano e atividades lúdicas que tornem a aprendizagem efetiva e contextualizada.

Para a terceira questão que indagava “*Se não ouviu ou conhece, o que você entende ou imagina que seja, o Efeito Fotoelétrico?*”. Os estudantes apresentaram diversas respostas que relacionam os termos luz, energia e eletricidade como por exemplo:

- “Eu acho que fala sobre tecnologia sobre eletricidade.” (Estudante 1).
- “Algo que envolve eletricidade e luz.” (Estudante 2).
- “Efeito da eletricidade vinda da luz.” (Estudante 3).
- “É um processo que pode transformar algo que não tenha energia, podendo assim a partir desse processo ter.” (Estudante 4).
- “Fazer com que algo produza energia.” (Estudante 5).
- “Acho que está relacionado com eletricidade e luz.” (Estudante 6).
- “Imagino que seja algo com relação a luz e eletricidade.” (Estudante 7).
- “É a transformação de energia luminosa em elétrica.” (Estudante 8).

Na figura 11 é apresentada uma nuvem de palavras com os termos recorrentes percebidos nas respostas dos estudantes.

Figura 11 – Termos recorrentes nas respostas da questão 3.



Fonte: Arquivos do Autor

As respostas apresentadas pelos estudantes para a questão revelaram um quadro interessante da sua aprendizagem, refletindo tanto esforços na construção de significados, quanto lacunas no conhecimento. Os estudantes frequentemente associaram o efeito fotoelétrico a conceitos como “*eletricidade*”, “*energia*” e “*luz*”, o que demonstra uma forma de conexão cognitiva de novos termos aos conhecimen-



tos já adquiridos por eles de modo que lhes foi possível recorrer aos conceitos-em-ação evidenciados nos termos utilizados pelos estudantes e isso indica uma evolução em direção à compreensão e fortalecimento do campo conceitual relacionado ao efeito fotoelétrico.

Além disso, alguns estudantes demonstram um avanço nesse entendimento, evidenciando níveis mais avançados de compreensão, com respostas que mencionam a "*transformação de energia luminosa em energia elétrica*" ou "*eletricidade vinda da luz*". Essa compreensão é fundamental, pois vai além de simples memorização de termos e demonstra uma compreensão mais aprofundada do assunto e reflete a capacidade desses estudantes de reconhecerem e articularem princípios fundamentais do efeito fotoelétrico.

Entretanto, é importante salientar que quatro estudantes expressaram em suas respostas não entenderem o conceito ou admitiram que "*não sabem*" o significado do termo Efeito Fotoelétrico.

Essas respostas indicam lacunas no conhecimento que ainda existem, sugerindo que, apesar de algumas tentativas de conectar informações, muitos estudantes precisam ainda de maior tempo e oportunidades para desenvolverem uma compreensão sólida conceito.

Essas observações podem ser contextualizadas pela teoria de Vergnaud, que sugere que a aprendizagem é um processo gradual e que a apropriação de um campo conceitual leva tempo, assim um campo conceitual da Física pode exigir muito mais que o tempo dos três anos do ensino médio.

Esta ideia é importante para pensarmos quais conteúdos de Física devem ser priorizados nesse período da educação básica dentre uma grande quantidade de possibilidades que pode por vezes causar desinteresse dos jovens quando submetidos a exageros associados a uma aprendizagem por memorização para reproduzirem em avaliações.

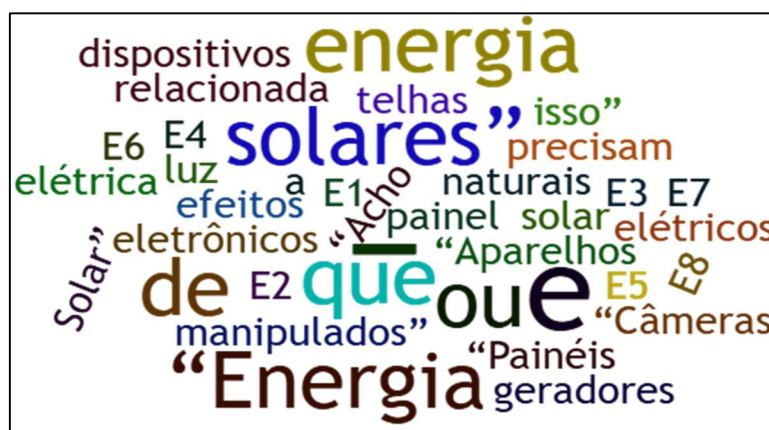
Segundo Vergnaud, para que os estudantes atinjam níveis mais complexos de conhecimento, é necessário tempo e suporte educacional. Vergnaud enfatiza que o desenvolvimento de campos conceituais ocorre por meio de um processo contínuo, onde os aprendizes ajustam suas ideias à medida que assimilam novas informações.

Ao responderem a quarta questão apresentada: “*Que tecnologias você acredita que podem estar associadas ao Efeito Fotoelétrico?*” vários estudantes citaram tecnologias ligadas à produção de energia fotovoltaica, por exemplo:

- “Acho que painel solares.” (Estudante 1)
- “Aparelhos eletrônicos, efeitos naturais ou manipulados.” (Estudante 2)
- “Energia solar e telhas que precisam de luz ou energia relacionada a isso.” (Estudante 3)
- “Painéis solares.” (Estudante 4)
- “Câmeras, dispositivos elétricos e geradores de energia elétrica. (Est. 5).
- “Energia Solar.” (Estudantes 6, 7 e 8).

As respostas dos estudantes variaram desde a identificação de tecnologias associadas a conceitos disponíveis no seu cotidiano até a expressão de incertezas sobre o tema, conforme ilustrado também na figura 12, que destaca os termos recorrentes na resposta da questão 4.

Figura 12 – Nuvem de palavras da questão 4.



Fonte: Arquivos do Autor

As respostas que mencionaram “*energia solar*” e “*painéis solares*” demonstram uma associação direta com a aplicação prática do efeito fotoelétrico, que é muitas vezes utilizado em tecnologias relacionadas à conversão de energia luminosa em eletricidade.

Essa conexão indica que alguns estudantes possuem noção de como a teoria se traduz em implicações práticas e está integrada em suas vivências, o que sugere que esses estudantes unem conhecimentos teóricos da ciência com aplicações do cotidiano, conforme destacado na teoria de Vergnaud, onde os conceitos são mais bem compreendidos em meio a contextos de vivências reais desses conceitos, traduzidas em sua teoria pelo termo situações.

As respostas que associam o efeito fotoelétrico a dispositivos elétricos, revelam uma compreensão de que a luz ou tecnologias de imagem podem estar ligadas a eletricidade, mesmo que estas associações não estejam necessariamente corretas ou diretamente relacionadas ao efeito fotoelétrico.

Essa tentativa de vincular conceitos, embora equivocada em alguns casos, é um sinal de que os estudantes estão envolvidos em um processo de tentativa de generalização e construção de significados, que é fundamental no desenvolvimento dos campos conceituais, visto que a teoria de Vergnaud enfatiza a importância do tempo e da vivência no estabelecimento de campos conceituais efetivos.

O fato de algumas respostas ainda não apresentarem um entendimento claro sobre o efeito fotoelétrico sugere que esses estudantes necessitam de novas experiências de aprendizagem que integrem o conhecimento teórico sobre o efeito fotoelétrico com as aplicações tecnológicas oriundas desse campo conceitual.

6.3 Investigação do Campo Conceitual por Experimentação

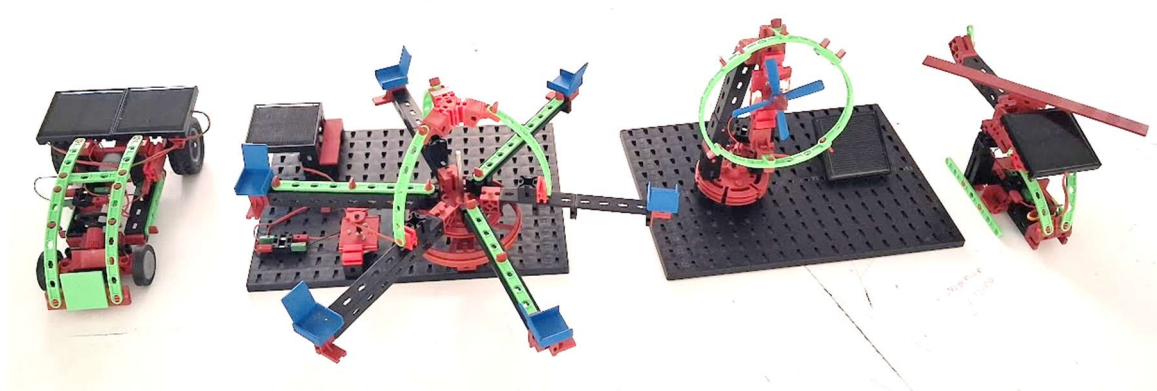
Na segunda etapa da aula ministrada no dia dois de setembro de 2024 foi realizada uma atividade experimental utilizando-se de modelos alimentados por células fotovoltaicas, oriundos dos kits de robótica educacional disponíveis na escola e que são montados pelos próprios estudantes de acordo com manuais disponíveis nos kits, conforme mostrado nas figuras 13 e 14.

Figura 13 – Estudantes montando kits de Robótica Educacional.



Fonte: Arquivos do Autor.

Figura 14 – Protótipos montados a partir dos Kits de Robótica Educacional.



Fonte: Arquivos do Autor.

Durante a atividade experimental os estudantes foram divididos em grupos de até 4 (quatro) integrantes e orientados a observarem os modelos alimentados pelas células fotovoltaicas quando expostos diretamente à luz solar; na sequência, à luz de uma lâmpada incandescente; à luz de uma lâmpada fluorescente e também à luz de uma lâmpada de led.

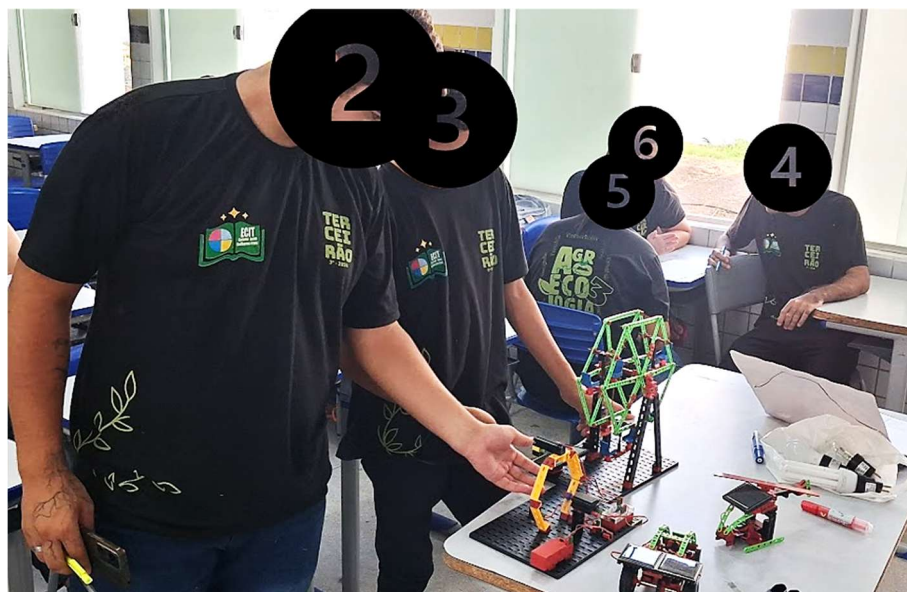
Em cada situação, foi solicitado que os estudantes fizessem anotações sobre o funcionamento dos modelos quando expostos a diferentes tipos de fontes luminosas. Para esta atividade cada grupo recebeu uma folha de anotações com quatro questionamentos sobre o que eles observaram e como poderiam explicar suas observações conforme mostrado nas figuras 15, 16 e 17.

Figura 15 – Estudantes respondendo aos questionamentos.



Fonte: Arquivos do Autor.

Figura 16 – Estudantes manipulando modelos de Robótica Educacional



Fonte: Arquivos do Autor.

Figura 17 – Estudantes respondendo questionamentos em grupos.



Fonte: Arquivos do Autor.

A exemplo do que ocorreu na primeira etapa da aula, as respostas dos estudantes para cada um dos questionamentos foram bastante diversificadas e demonstraram o domínio de uma série de conceitos relacionados à transformação de energia e alguns equívocos conceituais relacionados ao Efeito Fotoelétrico.

Para a questão a) “Qual o princípio de funcionamento das Células Fotovoltai-
cas?”, os grupos apresentaram as seguintes respostas:

- “São células que dependem da luz para o seu funcionamento correto” (Grupo 1).
- “O princípio fotoelétrico na qual as células absorvem a luz e converte em energia, na qual a força da energia é determinada pela sua intensidade” (Grupo 2).
- “O princípio de funcionamento é a luz” (Grupo 3).
- “A luz” (Grupo 4).
- “É luz impulsa a um determinado objeto e material” (Grupo 5).
- “Através da absorção de fótons, elementos da energia presentes na luz solar.” (Grupo 6).
- “Funcionam com base no efeito fotovoltaico” (Grupo 7).
- “O princípio é que as luzes incandescentes conseguem por ter mais luz gerar energia suficiente para mover objetos de forma mais facilitada.” (Grupo 8).

As respostas dos estudantes para esta questão demonstraram variadas formas de entendimentos sobre o funcionamento das células fotovoltaicas, que refletem diferentes níveis de domínio conceitual. A seguir na figura 18 é possível notar os conceitos mais utilizados pelos estudantes em suas respostas.

Figura 18 – Palavras das respostas para a questão a)



Fonte: Arquivos do Autor.

Um grupo mencionou que as células "*dependem da luz para o seu funcionamento correto*", o que mostra uma compreensão básica do papel da luz como fonte de energia.

Outros estudantes expandiram essa ideia ao relacionar a luz com os conceitos de absorção e conversão de energia, como visto na resposta que descreve a transformação da energia luminosa em eletricidade através do princípio fotoelétrico.

Essa resposta indica maior articulação entre conceitos, alinhando-se ao que Vergnaud define como invariantes operatórios, ou seja, as operações cognitivas utilizadas pelos estudantes ao compreender e aplicar o conhecimento em contextos específicos.



Além disso, a citação sobre a absorção de fótons revela uma consciência sobre os componentes físicos envolvidos no processo, evidenciando a existência na luz de “partículas” que carregam energia, uma relação que entra em um campo conceitual mais avançado do efeito fotoelétrico.

Quando um grupo afirma que *"luzes incandescentes geram energia suficiente para mover objetos"*, podemos observar a aplicação de um princípio físico na explicação do fenômeno, sugerindo que o grupo está se utilizando de um teorema-em-ação em uma situação prática, reconhecendo a relação entre diferentes fontes luminosas e sua eficiência.

Entretanto, também há respostas que se mantêm em níveis mais superficiais, como simples referências à *"luz"* sem contextualização mais aprofundada. Estas respostas indicam um conhecimento ainda incipiente e reforçam a necessidade de um trabalho pedagógico que possibilite novas situações de aprendizagem que contribua para o enriquecimento do repertório de conceitos e sua utilização pelos estudantes.

Nesse sentido, a variedade nas respostas destaca a importância de que nos próximos encontros seja possível abordar os conceitos destacados pelos estudantes em suas respostas de forma aprofundada, conectando experiências cotidianas dos estudantes a novos conhecimentos para que eles possam fortalecer sua aprendizagem dentro do campo conceitual em destaque.

Ao responderem à questão b) *"Que tipo de transformações de energia ocorreram durante o experimento?"*, alguns grupos demonstraram relevante domínio conceitual sobre as transformações de energia observadas durante a prática experimental, como se observa nas respostas a seguir:

- “A energia luminosa em elétrica e a energia mecânica (movimento)”. (Grupo 1).
- “Durante o evento a energia elétrica foi transformada em células fotovoltaicas”. (Grupo 2).
- “Transformação de energia na presença de luz solar” (Grupo 3).
- “A energia captada pela placa do carrinho convertida em torque. Torque é a força que faz a roda do carrinho girar” (Grupo 4)
- “A energia luminosa se transforma em energia elétrica gerando movimentos” (Grupo 5).
- “Foram 2 tipos de transformações: A energia luminosa é transformada em energia elétrica e a elétrica em mecânica”. (Grupo 6).
- “A energia luminosa é convertida para energia elétrica, assim transformada em movimento”. (Grupo 7).
- “Transformação da energia luminosa para energia elétrica, que resulta no movimento dos equipamentos”. (Grupo 8).

As respostas elaboradas pelos estudantes, como mostradas na figura 19, revelam uma diversidade de entendimentos correlacionados com a Teoria dos Campos Conceituais que sugere que o aprendizado ocorra em um contexto de operações cognitivas (Invariantes Operatórios) que interagem com experiências práticas (situações), formando assim os campos conceituais que orientam a compreensão de mundo pelo aprendiz.

Figura 19 – Palavras das respostas para a questão b)



Fonte: Arquivos do Autor.

Os grupos que mencionaram transformações específicas, como “a *conversão da energia luminosa em energia elétrica*” e, posteriormente, em “*energia mecânica*” relacionada ao movimento, demonstraram uma compreensão não apenas das etapas do processo, mas também da relação causal que existe entre diferentes formas de energia.

Por exemplo, quando um grupo observa que a “*energia luminosa se transforma em energia elétrica, gerando movimentos*”, isso indica uma articulação clara entre os conceitos de energia e suas transformações.

Esse tipo de articulação, Vergnaud caracteriza como invariantes operatórios, que são as operações lógicas utilizadas pelos estudantes para aplicar conceitos em diferentes situações e nesse caso, mesmo que de forma indireta, os estudantes lançam mão do teorema-em-ação da conservação de energia em processos físicos.

Além disso, a menção ao torque como a força que faz a roda do carrinho girar ilustra uma elaboração mais profunda do conceito físico em questão.



A capacidade de um dos grupos de identificar o torque como resultado da transformação de energia captada sugere um nível de análise que vai além da simples descrição do fenômeno e demonstra a utilização de um importante conceito-em-ação. Esse tipo de relação entre conceitos é importante para a formação de um campo conceitual mais profundo, onde os estudantes começam a perceber interconexões entre diferentes áreas do conhecimento físico, como o eletromagnetismo e a mecânica.

Entretanto, também são perceptíveis respostas que permaneceram em níveis mais simplistas, como a mera identificação de que houve uma *"transformação da energia em células fotovoltaicas."* ou *"Transformação de energia na presença de luz solar"* sem maiores detalhes ou aprofundamento conceitual.

Isso indica que, embora alguns grupos possuísem uma compreensão mais integrada, outros ainda necessitavam de um apoio adicional para aprofundar seus conhecimentos e enriquecer seus campos conceituais relacionados às transformações de energia.

Para a Questão c) *"Quais diferenças foram observadas ao se substituir o tipo de fonte luminosa que alimenta as células?"* as respostas dadas pelos grupos foram:

- "Com as lâmpadas de led as miniaturas não mostravam nenhum movimento, porém quando foi introduzida a lâmpada incandescente, as pequenas construções se moveram, não só pela luz, mas também pelo calor emitido pela lâmpada". (Grupo 1).
- "A sua intensidade da luz e o seu tipo de luminosidade, como a incandescente, ela tem uma intensidade maior do que as fluorescentes ou led. (Grupo 2).
- "A diversidade de luzes, tivemos a incandescente, led, fluorescente. A única que deu certo foi a incandescente." (Grupo 3).
- "A luz amarela consegue gerar mais energia do que a branca. Na utilização da luz amarela houve movimento." (Grupo 4).
- "A de led e a lâmpada fluorescente nem perto da placa funcionou. A incandescente foi a única que emitia a luz que fez os objetos funcionarem." (Grupo 5).
- "Energia luminosa e a outra energia elétrica que são trocadas por movimento." (Grupo 6).
- "Variação na quantidade de energia elétrica gerada." (Grupo 7).
- "O fato de a energia luminosa gerada por lâmpada incandescente consegue mover objetos, assim sendo, conseguindo deixá-los em movimento por meio do efeito fotoelétrico." (Grupo 8).

Em suas respostas, conforme mostrado na figura 20, os grupos relataram observações significativas sobre o desempenho das células quando expostas a dife-

rentes fontes de luz, citando a lâmpada incandescente como a mais eficaz para gerar movimento.

Figura 20 – Palavras das respostas para a questão c)



Fonte: Arquivos do Autor.

Esse reconhecimento de que a intensidade luminosa, assim como a qualidade da luz, impacta diretamente na transformação de energia demonstra uma articulação entre os conceitos que os estudantes trazem consigo e a prática experimental realizada.

Essa capacidade de realizar essa conexão é uma característica central da Teoria dos Campos Conceituais, onde os invariantes operatórios são frequentemente atualizados e reelaborados por meio de situações práticas e de reflexões.

Entretanto, também é possível notar que as respostas variam em profundidade e complexidade. Enquanto alguns grupos identificaram especificamente que *"a luz amarela consegue gerar mais energia do que a branca"*, evidenciando uma compreensão mais qualificada e detalhada da relação entre as propriedades da luz e suas consequências no funcionamento das células, outros apresentaram respostas mais superficiais, sem aprofundarem-se nas implicações do experimento.

Em uma das respostas, a relação entre a luz e a temperatura foi mencionada, alegando que *"as pequenas construções se moveram, não só pela luz, mas também pelo calor emitido pela lâmpada"* indicando que os estudantes consideraram variáveis adicionais que podem ser verdadeiras ou não ao analisarem o fenômeno.

Este tipo de raciocínio evidencia um pensamento crítico e analítico, que é fundamental para a formação de campos conceituais mais complexos. Nesse con-



texto, a identificação de que a lâmpada incandescente não apenas fornece mais luz, mas também produz calor, sugere uma hipótese de que o calor poderia influenciar o funcionamento das células fotovoltaicas e dessa forma os estudantes propuseram um teorema-em-ação, que são afirmações que podem ser verdadeiras ou não, relacionando luz e calor ao efeito fotoelétrico produzido nas células.

Ao responderem à Questão d) *“Como vocês explicam ou justificam essas diferenças observadas?”* os grupos apresentaram como respostas as seguintes afirmações:

- “O fator elétrico é mais sensível à luz amarela.” (Grupo 1).
- “A gente tem uma luz de um material e uma outra luz de outro material, e a luz incandescente é a única que emite a luz que a placa detecta.” (Grupo 2).
- “Que o fator de a energia gerada pela luz da lâmpada incandescente ser uma energia de calor onde ela consegue interagir com os objetos em repouso e os deixarem em movimento. **As outras lâmpadas possuem claro uma fonte de luz e energia, mas o fator ‘calor’ da incandescente é que faz a mágica.**” (Grupo 3, grifos nosso).
- “Pode ser explicada pela variação e a eficiência da conversão da luz em eletricidade. E da capacidade da célula fotovoltaica de aproveitar esse tipo específico de luz.” (Grupo 4).
- “A diferença de todas as outras fontes de luz é que a incandescente tem uma resistência maior e não necessita de difusor.” (Grupo 5).
- “Basicamente pelo nível de intensidade da luz, que influencia o funcionamento dos aparelhos.” (Grupo 6).
- “As duas primeiras lâmpadas testadas, a de led e a fluorescente, tinham sim bastante luz, porém eram escassas de calor, o que fez as construções não se moverem, diferente da incandescente, que conseguiu mover muito bem.” (Grupo 7).
- “O fator elétrico é mais sensível à luz amarela.” (Grupo 8).

Analogamente ao que já havia sido citado em uma das respostas da questão anterior, alguns grupos relacionaram fatores como a intensidade da luz e a quantidade de calor gerada pelas diferentes fontes de iluminação como responsáveis pela ocorrência do efeito fotoelétrico quando as placas fotovoltaicas foram submetidas à luz da lâmpada incandescente, conforme ilustrado na figura 21.

Figura 21 – Palavras das respostas para a questão d)

Fonte: Arquivos do Autor.

Alguns grupos conseguiram articular as informações em um nível mais elaborado, ao afirmarem que as lâmpadas de LED e fluorescentes tinham "muita luz, porém eram escassas de calor", enquanto outros se limitam a mencionar simplesmente que a lâmpada incandescente era a única que funcionava bem.

Estas diferenças na profundidade das explicações vão ao encontro das ideias de Vergnaud de que os conceitos são construídos a partir da experiência, e que a elaboração dos conceitos pode variar significativamente entre os estudantes, dependendo de suas vivências e das situações expostas durante o seu processo de aprendizagem.

A observação feita pelos grupos 1 e 8 de que "o fator elétrico é mais sensível à luz amarela" produzida pela lâmpada incandescente reflete um movimento em direção à compreensão dos mecanismos de transformação de energia.

Esta habilidade de relacionar características físicas (como a cor) das fontes de luz com o desempenho das células fotovoltaicas indica um avanço no campo conceitual, onde os estudantes começam a integrar diferentes dimensões do conhecimento científico relativo ao efeito fotoelétrico.

Vale ressaltar que a capacidade de justificar observações empíricas também evidencia o desenvolvimento das competências de argumentação científica e pensamento crítico, necessárias para que os estudantes avancem em suas compreensões mais complexas dentro do campo das ciências. Essa articulação cria um espaço para que os estudantes se envolvam ativamente na construção de significados,



refletindo um movimento da simples observação para explicações mais integrativas e teoricamente fundamentadas.

Portanto, ao observar as respostas dos estudantes, fica evidente que o desafio de justificar as diferenças observadas ao utilizar diferentes fontes de luz não só provoca a reflexão sobre as interações entre a luz e a matéria, mas também representa um passo significativo na formação e amadurecimento desse campo conceitual.

O envolvimento e o engajamento deles em questões que demandam não apenas respostas certas, mas também raciocínio lógico e fundamentação científica, são essenciais para promover uma aprendizagem mais profunda e duradoura, conforme enfatizado por Vergnaud.

Esta reflexão contínua é vital para a evolução do entendimento dos estudantes sobre fenômenos naturais e sobre como explicá-los, alinhando-se aos objetivos de uma educação científica e contextualizada.

6.4 Encontro 2: 09 de setembro de 2024 – 2 aulas de 50 min.

A terceira aula aconteceu no dia 09 de setembro para os estudantes 3ª Série B do Ensino Médio, iniciou-se como uma introdução e contextualização histórica da física no final do século XIX, um período marcado por grandes avanços científicos⁵ e ao mesmo tempo desafios para a compreensão dos fenômenos naturais.

Com um enfoque contemporâneo, se contextualizou a ideia de que a física clássica, embora já estabelecida e fundamentada, estava enfrentando limites em suas explicações, especialmente no que diz respeito à radiação de corpo negro e à interação entre radiação e matéria.

Nesse contexto foram apresentados aos estudantes problemas físicos da época, como a catástrofe do ultravioleta, que evidenciavam as deficiências das teorias existentes, recorrendo às observações e estudos realizados por Rayleigh e Jeans.

Para fundamentar junto com os estudantes o entendimento e compreensão do efeito fotoelétrico, apresentamos às contribuições dos estudos de Max Planck, que, em sua busca para resolver os problemas da radiação de corpo negro, introdu-

⁵ Teoria Eletromagnética da Luz de Maxwell; Desenvolvimento da Mecânica Estatística por Boltzmann



ziu a ideia da quantização da energia das radiações, inferindo que a energia absorvida ou emitida não era contínua, mas valores discretos, denominados de “quantas”.

Nesse sentido, foi salientado que a teoria da quantização da energia radiante teria preparado o terreno para que Albert Einstein, em 1905, publicasse um artigo⁶, aplicando a teoria quântica à luz e explicando a interação entre a radiação e matéria, de forma a explicar a ocorrência do efeito fotoelétrico.

Na sequência da aula foi realizada uma abordagem contextualizada e histórica sobre a descoberta do efeito fotoelétrico por Heinrich Hertz e as contribuições de Philip Lenard através de seu aparato experimental que evidenciou com mais clareza a existência do efeito fotoelétrico, sem, no entanto, conseguir explicá-lo de forma satisfatória.

Para esta aula foram utilizados recursos audiovisuais por meio de uma apresentação em formato de slides, que continham textos, imagens e ilustrações (Apêndice A).

A apresentação foi toda embasada no Capítulo de Física sobre o Efeito Fotoelétrico constante na presente dissertação, seguindo a mesma sequência de fatos e descobertas cronológicas. Também foram exibidos durante a aula vídeos explicativos como: “*A Catástrofe Ultravioleta*”, do canal Ciência Todo Dia no Youtube⁷, e o vídeo: “*Radiação de Corpo Negro – Max Planck*”, do canal Humor Quântico⁸. Esses vídeos foram utilizados para reforçar o entendimento e compreensão do contexto histórico e dos fatos que levaram ao surgimento da Teoria Quântica de Planck e consequentemente as explicações de Albert Einstein para o Efeito Fotoelétrico.

Durante a aula expositiva os estudantes se mostraram muito atentos e focados nas explicações que sempre fazia referências às respostas dadas pelos estudantes na semana anterior e também nas observações que eles fizeram sobre o experimento realizado com as placas fotovoltaicas, de forma que por meio da reflexão e discussão dessas respostas os estudantes pudessem aprimorar seu raciocínio crítico e relacionarem os conhecimentos abordados na aula com suas experiências e realidades vivenciadas, fortalecendo o campo conceitual de relação entre matéria e

⁶ Uma visão heurística da produção e transformação da luz. Albert Einstein, 1905

⁷ Disponível pelo link: https://youtu.be/LKqgBFot_H4

⁸ Disponível pelo link <https://youtu.be/kFc2bB0KN2c>

radiação, cujo principal teorema-em-ação abordado na aula foi o de quantização da energia das radiações.

Essa interação entre conhecimento e realidade torna o aprendizado dinâmico, onde o estudante é ativo na formação e sedimentação de seus próprios conceitos, facilitando a conexão entre o conhecimento científico e sua vivência diária, e evidenciando como o pensamento científico é moldado e adaptado ao longo do tempo.

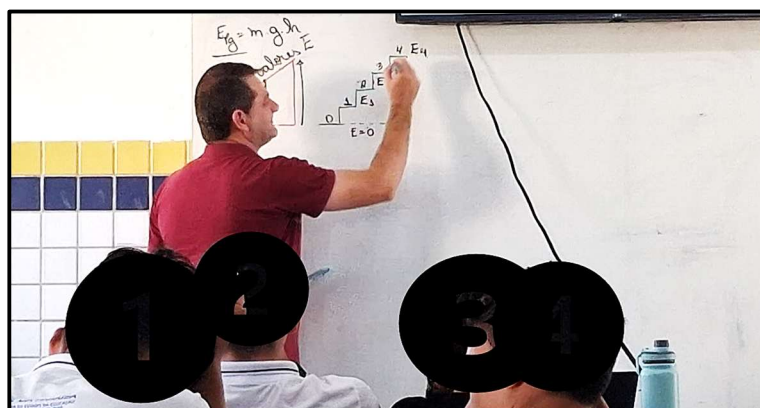
Assim, a aula foi alicerçada em princípios da Teoria dos Campos Conceituais, promovendo uma aprendizagem pautada em situações vivenciadas pelos estudantes, seus esquemas mentais e nos recursos de aprendizagem trazidos pelo professor, conforme ilustrado nas figuras 22 e 23.

Figura 22 – Estudantes atentos à aula expositiva sobre a Teoria Quântica.



Fonte: Arquivos do Autor.

Figura 13 – Exemplificação do conceito de quantização de energia.

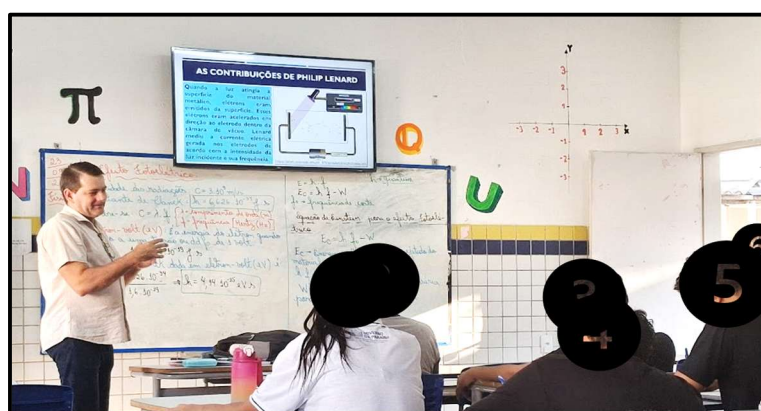


Fonte: Arquivos do Autor

6.5 Encontro 3: 16 de setembro de 2024 – 2 aulas de 50 min.

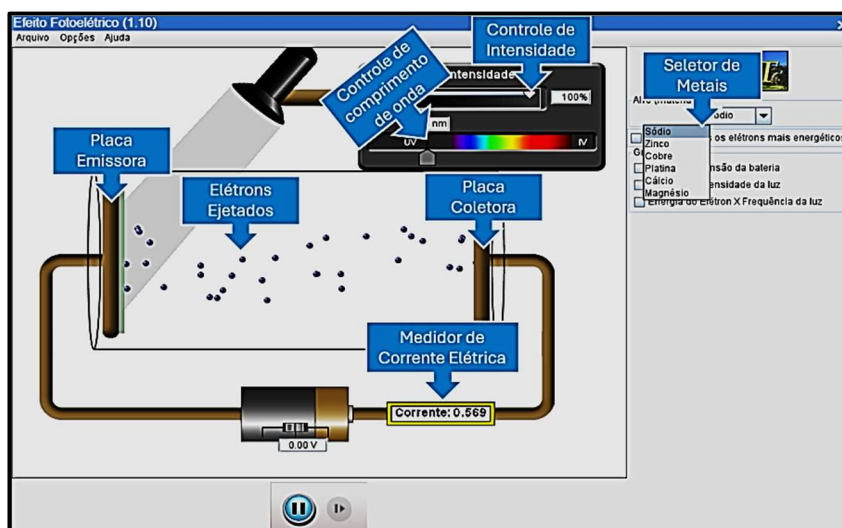
No dia 16 de setembro de 2024, dando continuidade às aulas de intervenção pedagógica, foi apresentado aos estudantes por meio de slides e imagens a descoberta do Efeito Fotoelétrico por Heinrich Hertz e os trabalhos experimentais de Philip Lenard, por meio de um Objeto Digital de Aprendizagem (ODA) que se trata de um Simulador denominado *Efeito Fotoelétrico*⁹, conforme pode ser observado nas figuras 24 e 25 abaixo.

Figura 24 – Uso do Simulador Efeito Fotoelétrico da Plataforma Phet



Fonte: Arquivos do Autor.

Figura 25 – Tela do Simulador Efeito Fotoelétrico da Plataforma Phet



Fonte: https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulations/photoelectric

⁹ Disponível na plataforma Phet através do link:
https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulations/photoelectric.

Esse simulador apresenta um aparato que nos permite utilizar os seguintes tipos de placas de diferentes metais como sódio, zinco, cobre, platina, cálcio e magnésio que pode ser iluminado com uma fonte de luz que pode ser ajustada por meio de cursores, que controlam a intensidade da luz emitida pela fonte da radiação eletromagnética e controle do valor do comprimento de onda incidente, através do qual é possível fazer referência à frequência das ondas eletromagnéticas que incidem na placa por meio da equação da velocidade das ondas eletromagnéticas ($c = \lambda \cdot f$).

Quando é atingida a frequência ideal para o metal exposto à luz, elétrons são arrancados de uma das placas, e se movem em direção à outra placa em decorrência do efeito fotoelétrico, sendo possível demonstrar como a intensidade da fonte luminosa para frequências menores que a ideal não influencia a ocorrência do fenômeno, mas afeta o número de elétrons ejetados e a velocidade de deslocamento desses elétrons, influenciando o valor de corrente elétrica gerada, quando a frequência ideal é atingida.

Durante o período de intervenção e execução da sequência didática, através de pesquisas, encontramos outra opção de simulador, denominado de *Efeito Fotoelétrico*, produzido pelo Professor Vladimir Vascak¹⁰. Esse simulador se destaca por conter um número maior de opções de metais para simulação e por exibir os valores correspondentes de frequência luminosa para cada comprimento de onda, o que pode tornar o seu uso mais didático para as simulações do fenômeno fotoelétrico, como ilustrado nas figuras 26, 27 e 28.

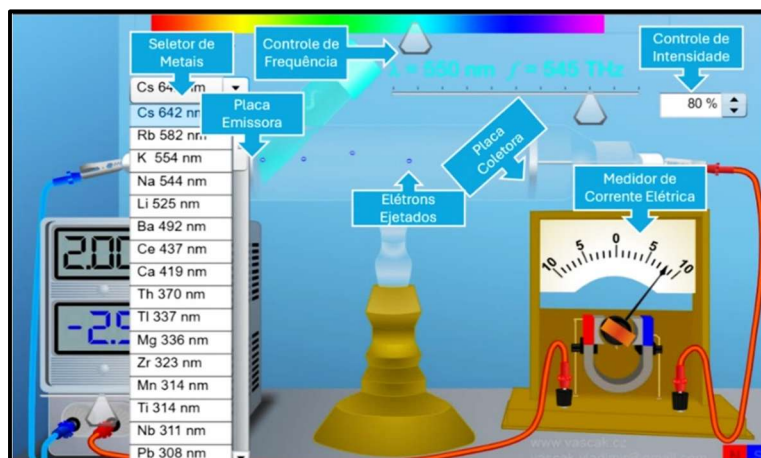
Figura 26 – Uso do Simulador Efeito Fotoelétrico da Plataforma Física na Escola.



Fonte: Arquivos do Autor.

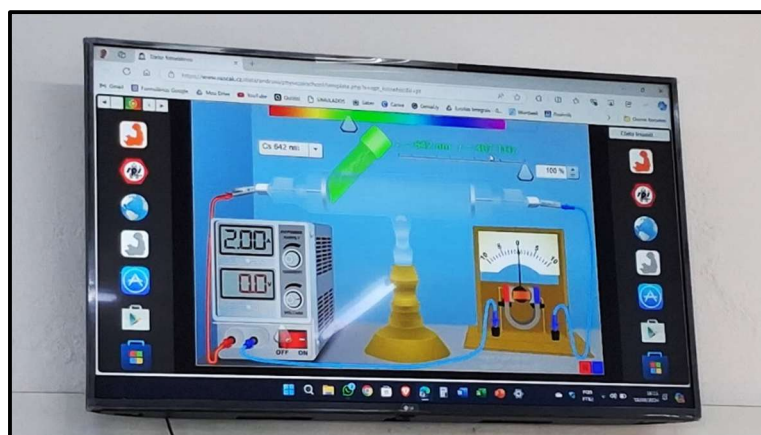
¹⁰ Disponível na plataforma *Física na Escola* através do link: [Efeito fotoelétrico](#)

Figura 27 – Tela do Simulador Efeito Fotoelétrico da Plataforma Física na Escola



Fonte: Arquivos do Autor.

Figura 28 – Uso didático da Plataforma Física na Escola



Fonte: Arquivos do Autor.

Durante a utilização dos simuladores foram direcionados aos estudantes questionamentos verbais relacionados ao que se podia evidenciar visualmente a partir da simulação.

A primeira questão perguntava sobre o que acontece quando alteramos o comprimento de onda no simulador. Diante do questionamento, um estudante observou que: “ – *Somente certos tipos de luz fazem os elétrons saírem.*”; um outro estudante disse que: “ – *Se a luz for de cor diferente pode mudar o que acontece.*”; outro estudante inferiu que: “ – *Não sei direito, mas parece que muda quando a luz muda de cor.*”; e, um estudante ainda respondeu que: “ – *Mudando o tipo de luz, pode sair mais ou menos energia.*”.



As respostas dos estudantes diante desse questionamento revela que eles tiveram uma compreensão conceitual inicial de que diferentes comprimentos de onda têm energias diferentes, fazendo uma referência ao espectro visível, associando diferentes comprimentos de ondas da luz a diferentes cores.

Essa ligação é importante para que seja possível modelar o entendimento dos estudantes sobre a relação entre a energia luminosa e as diferentes frequências do espectro visível e assim compreender mais profundamente as razões que explicam cientificamente o efeito fotoelétrico.

Na sequência da aula os estudantes foram questionados se era possível perceber na simulação a existência de uma quantidade mínima de energia para o efeito acontecer. Diante do questionamento, um estudando disse que: “– *Sim, quando a luz é fraca demais ou de cor diferente, não emite elétron.*”; outro estudante respondeu que: “– *Parece que precisa de uma luz forte ou certa para que o fenômeno aconteça.*” e ainda outro estudante observou que: “– *Talvez exista algum tipo de energia que precisa, não é qualquer luz que funciona.*”

Essas observações foram muito pertinentes e importantes pois permitiu ao professor recordar com os estudantes o fato de que na aula experimental as lâmpadas fluorescente e de led não foram capazes de mover os protótipos alimentados por células fotovoltaicas, enquanto a lâmpada incandescente sim.

Desse modo, houve uma rica oportunidade para que fizéssemos a exposição didática para discutirmos as relações entre o comprimento e a frequência das radiações e da energia associada às diferentes frequências da luz, de maneira que os estudantes pudessem compreender os fundamentos do conceito de frequência de corte que seria abordado com mais profundidade nas aulas subsequentes.

Quando questionados sobre a relação entre a intensidade da luz incidente na superfície refletora e o número de elétrons emitidos, um dos estudantes observou que: “– *Quanto mais intensa a luz, mais elétrons aparecem.*”; já um segundo estudante justificou que “*a luz forte faz mais energia e, portanto, sai mais elétrons da placa.*”; e, um terceiro estudante observou que “– *Quando se coloca a intensidade no máximo, os elétrons se movem mais rapidamente.*”

Essas respostas evidenciam que os estudantes, em uma observação inicial, reconheceram que a quantidade de elétrons emitidos está relacionada à intensidade da luz incidente e associaram diretamente um aumento na intensidade da luz a um



aumento no número de elétrons liberados e à velocidade de deslocamento dos elétrons ejetados, demonstrando uma percepção empírica do fenômeno, de modo, que pudemos demonstrar a partir dessas observações a relação entre a intensidade da luz emitida com a corrente elétrica resultante do efeito fotoelétrico, sendo que o valor da corrente elétrica pode ser inclusive observada no amperímetro associado aos simuladores.

Os estudantes também foram questionados se o efeito apresentava as mesmas características para todos os elementos disponíveis no simulador e o que se observava quando a simulação era aplicada a diferentes materiais.

Para esse questionamento, um estudante propôs que: “ – *Cada material precisa de luz diferente para emitir elétrons.*”; um segundo estudante disse que: “ – *Alguns materiais deixam sair elétrons fácil, outros precisam de luz com mais energia.*”; um terceiro estudante sugeriu que: “ – *Parece que o material altera quantos elétrons saem com a mesma luz.*”; e, um outro estudante observou que: “ – *Não é igual para todos, cada um se comporta diferente.*”

Essas observações e afirmações propostas pelos estudantes foram essenciais na construção do conceito de função trabalho de cada material, que é um importante conceito no estudo e aplicações do efeito fotoelétrico.

As respostas obtidas para os questionamentos propostos durante a utilização dos simuladores refletem um desenvolvimento progressivo dos campos conceituais dos estudantes sobre o efeito fotoelétrico à medida que novas observações e respostas são construídas por eles.

Inicialmente baseadas em percepções visuais e experimentação empírica, essas respostas podem evoluir para conceitos mais estruturados, conforme prevê a Teoria dos Campos Conceituais, a partir da mediação feita pelo professor entre as noções intuitivas e as formalizações científicas mediadas pelo ambiente de aprendizagem interativo que o simulador proporciona e também pelo material teórico utilizado durante as aulas como slides e o texto do livro didático disponível aos estudantes.

Esse ambiente de aprendizagem pode criar novas e diversas situações de onde é possível notar que os estudantes recorrem frequentemente aos invariantes operatórios (conceitos-em-ação e teoremas-em-ação) presentes em sua estrutura

cognitiva para responder aos estímulos e desafios desse ambiente, fortalecendo e consolidando a cada nova situação o campo conceitual em questão.

6.6 Encontro 4: 23 de setembro de 2024 – 2 aulas de 50 min.

A aula ministrada no dia 23 de setembro foi planejada de modo a serem vivenciados dois momentos distintos. No início da aula foi realizada uma abordagem histórico-científica sobre as explicações propostas por Albert Einstein para o efeito fotoelétrico.

Durante a explicação foram utilizados diversos recursos didáticos, conforme mostrado nas figuras 29 e 30, para ilustrar o que ocorre quando a luz incide sobre uma superfície metálica, e como a energia dos fótons pode ejetar elétrons, gerando assim corrente elétrica, que é a manifestação fenomenológica do efeito fotoelétrico.

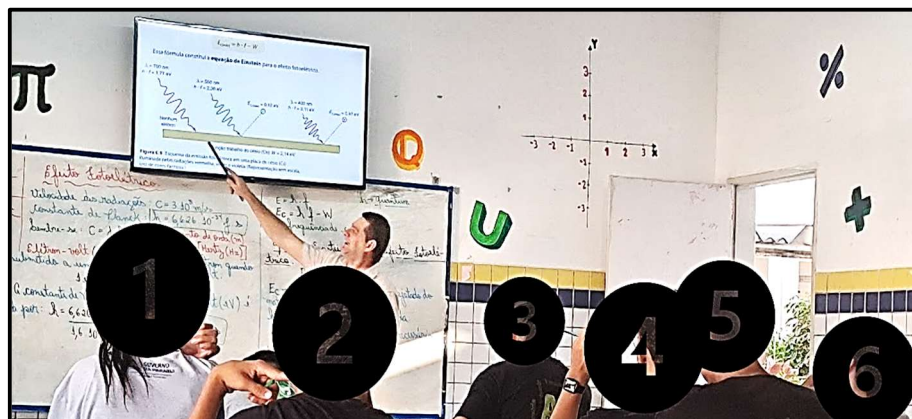
Nesse momento foram utilizadas tabelas e representações apresentadas no livro didático adotado pela escola, com a finalidade de valorizar o material disponível e acessível aos estudantes, de modo que o mesmo pudesse ser utilizado como fonte de estudos, consultas e revisão dos conceitos abordados durante as aulas de física sobre o efeito fotoelétrico.

Figura 29 – Explicação do Efeito Fotoelétrico por meio de recursos audiovisuais.



Fonte: Arquivos do Autor.

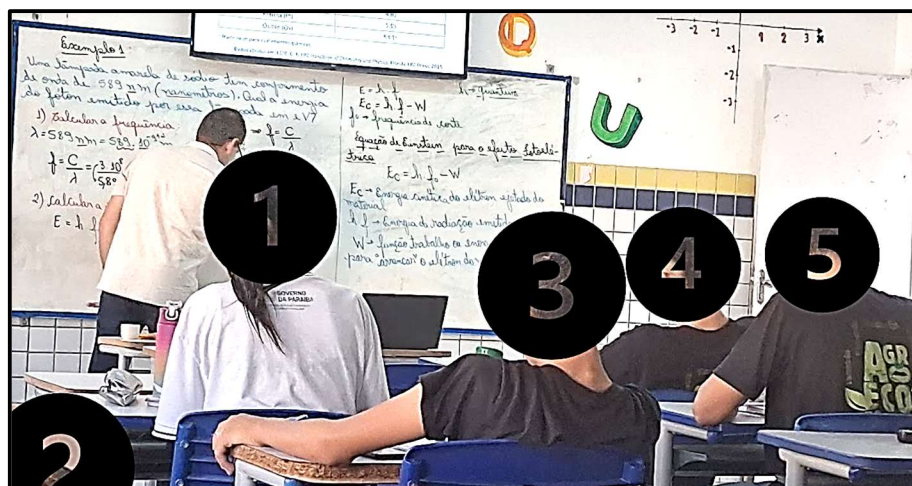
Figura 30 – Explicação da função trabalho de alguns materiais citados no livro didático.



Fonte: Arquivos do Autor.

No segundo momento da aula foi exemplificada, através de uma lista de exercícios impressos, as relações matemáticas que Einstein estabeleceu entre a energia cinética dos elétrons e a energia dos fótons incidentes, expressa pela equação $E_c = h \cdot f - W$, onde E_c é a energia cinética dos elétrons; h é a constante de Planck; f é a frequência da luz incidente e W é a função trabalho do material, conforme mostrado nas figuras 31 e 32.

Figura 31 – Explicação da Equação de Einstein para o Efeito Fotoelétrico.



Fonte: Arquivos do Autor.

Figura 34 – Cálculos na lousa da energia dos fótons expressos em elétron-volts (eV).

Exemplo 1: Uma lâmpada amarela de sódio tem comprimento de onda de 589 nm (nanômetros). Qual a energia do fóton emitido por essa lâmpada em eV?

1) Calcular a frequência: $C = \lambda \cdot f \Rightarrow f = \frac{C}{\lambda}$
 $\lambda = 589 \text{ nm} = 589 \cdot 10^{-9} \text{ m} = 5,89 \cdot 10^{-7} \text{ m}$
 $f = \frac{C}{\lambda} = \frac{3 \cdot 10^8}{5,89 \cdot 10^{-7}} = 0,51 \cdot 10^{15} \text{ Hz}$

2) Calcular a energia: $h = 4,14 \cdot 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$ → constante de Planck
 $E = h \cdot f$
 $E = 4,14 \cdot 10^{-15} \cdot (0,51 \cdot 10^{15})$
 $E = 2,11 \text{ eV}$

Exemplo 2: $\lambda = 400 \text{ nm} = 400 \cdot 10^{-9} \text{ m} = 4 \cdot 10^{-7} \text{ m}$
Calcular a energia do fóton da radiação cujo $\lambda = 400 \text{ nm}$ (violeta).
 $f = \frac{C}{\lambda} = \frac{3 \cdot 10^8}{4 \cdot 10^{-7}} \Rightarrow f = 0,75 \cdot 10^{15} \text{ Hz}$
 $E = h \cdot f$
 $E = (4,14 \cdot 10^{-15}) (0,75 \cdot 10^{15})$
 $E = 3,105 \text{ eV}$

Fonte: Arquivos do Autor.

Durante a aula foram discutidas também as aplicações tecnológicas do efeito fotoelétrico, como o funcionamento de células fotovoltaicas, placas e sensores sensíveis à luz utilizados nos mais diversos tipos de equipamentos elétricos e eletrônicos nos setores residenciais, comerciais e industriais.

Nesse momento da aula foi enfatizado também o grande aumento do setor produtivo de energias renováveis a partir da luz solar, fato que tem impactado diretamente esta região paraibana e em especial no município de São João do Rio do Peixe, PB, por meio da implementação de dois grandes complexos fotovoltaicos, sendo um já em operação, que compreende os parques solares Rio do Peixe I e II (Ver figura 35), com 70 MWp de potência instalada e outro em fase de construção, o Complexo Fotovoltaico CANIS, que inclui sete usinas com uma potência total de 323,08 MWp e ocupa uma área de 605 hectares na zona rural do município citado.

Figura 35 – Parques Solares Rio do Peixe I e II.Fonte: <https://www.energisa.com.br>

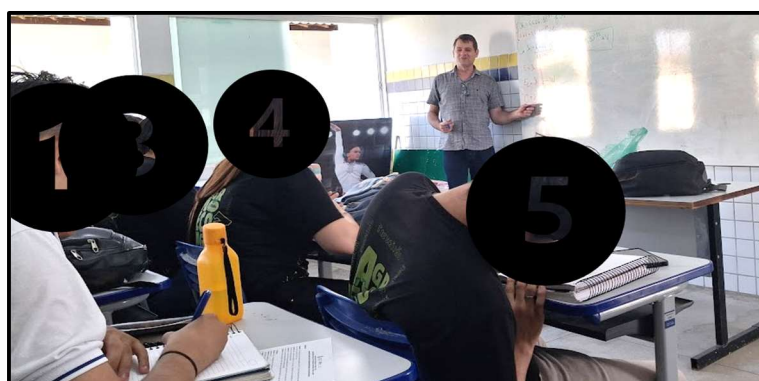
Esse contexto energético regional foi decisivo para a escolha do tema a ser abordado junto aos estudantes nessa dissertação e para a contextualização das aulas, onde foi possível discutir, mesmo que de forma resumida, os impactos positivos para a economia local como a geração de empregos e de impostos para o município e também os efeitos negativos como o desmatamento de grandes áreas para a instalação dos parques solares.

Por fim, foram discutidas também nesta aula os impactos da instalação de novas redes de transporte e distribuição da energia gerada e, a longo prazo, os impactos decorrentes do descarte dos materiais utilizados na confecção, montagem e manutenção das placas utilizadas nos sistemas fotovoltaicos.

6.7 Encontro 5: 30 de setembro de 2024 – 2 aulas de 50 min.

No dia 30 de setembro de 2024 foi realizado o quinto e último encontro de intervenção com a turma da 3ª Série B com a presença de 21 (vinte e um) estudantes. No primeiro momento foi realizada uma revisão geral dos conhecimentos históricos e conceitos científicos relacionados à descoberta e explicação do efeito fotoelétrico e a revisão de alguns exercícios envolvendo os cálculos de frequência de corte, função trabalho, energia dos fótons e energia dos elétrons ejetados dos materiais. A figura 36 mostra um recorte deste momento didático.

Figura 36 – Aula de revisão conceitual e de cálculos de variáveis.

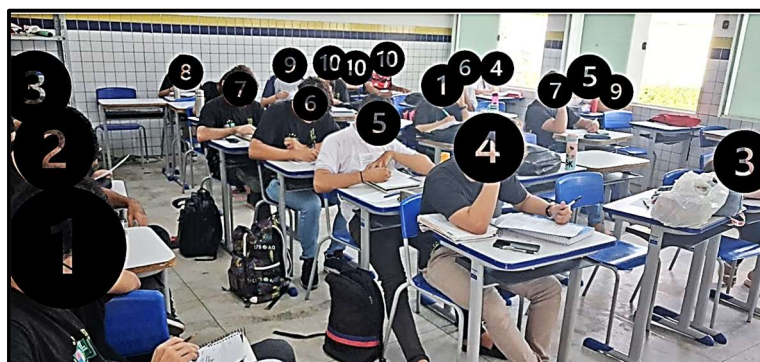


Fonte: Arquivos do Autor.

Após esse primeiro momento, foi entregue aos estudantes uma folha tarefa com 10 (dez) questões de múltipla escolha que foram respondidas pelos 21 (vinte e um) estudantes presentes e entregue posteriormente para correção, conforme demonstrado na figura 37.

A folha tarefa foi uma oportunidade para que os estudantes pudessem expressar através desse instrumento os conhecimentos obtidos durante as aulas, revelar quais conceitos foram mais bem sedimentados em sua estrutura cognitiva e dessa forma fosse possível avaliar o impacto da metodologia utilizada na aprendizagem dos estudantes.

Figura 37 – Estudantes respondendo às questões da folha tarefa



Fonte: Arquivos do Autor.

As questões de múltipla escolha e o número de acertos obtidos em cada questão são apresentados a seguir na tabela 5:

Tabela 5 – Avaliação quantitativa das questões de múltipla escolha

QUESTÃO	Acertos
1. Qual foi a contribuição de Max Planck para a Física Moderna? a) Ele descobriu a relação entre temperatura e pressão. b) Ele desenvolveu a teoria da relatividade. c) Ele introduziu a ideia de quantização da energia. d) Ele propôs que a radiação é emitida de forma contínua.	11
2. Qual constante é conhecida como a constante de Planck? a) 3×10^8 m/s b) $1,602 \times 10^{-19}$ C c) $6,626 \times 10^{-34}$ J·s d) $9,109 \times 10^{-31}$ kg	21
3. À que se referia a "catástrofe do ultravioleta"? a) À descoberta de novas partículas. b) À falha na teoria da relatividade. c) À incapacidade de se medir a radiação de corpo negro. d) À previsão de emissão infinita de energia para altas frequências da radiação.	14
4. Qual foi a principal contribuição de Philipp Lenard para a compreensão do Efeito Fotoelétrico? a) Ele desenvolveu a teoria da relatividade. b) Ele realizou experimentos que demonstravam haver interação entre luz e matéria. c) Ele propôs a ideia de quantização da energia. d) Ele desenvolveu a constante de Planck.	13



5. Qual fenômeno foi explicado por Einstein em 1905, que teve um impacto significativo para a Física Moderna? a) A difração da luz. b) A polarização da luz. c) A radiação de corpo negro. d) O Efeito Fotoelétrico.	19
6. O que os experimentos sobre o Efeito Fotoelétrico demonstraram? a) A luz é composta apenas de partículas. b) A luz não tem efeito sobre metais. c) A luz pode transferir energia para elétrons. d) A luz se comporta apenas como uma onda.	12
7. O que Einstein propôs como a explicação para o Efeito Fotoelétrico? a) A luz é composta de fótons que têm energia quantizada e interagem com os elétrons. b) A luz é uma forma de radiação térmica que interage com os elétrons. c) A luz é uma onda que não interage com elétrons. d) A luz não tem relação com a emissão de elétrons.	12
8. Qual é a condição necessária para que um elétron seja ejetado de um metal no Efeito Fotoelétrico? a) A energia do fóton deve ser suficiente para superar a energia de ligação do elétron com o material. b) A luz deve ser de baixa frequência. c) A luz deve ser refletida pelo metal. d) O metal deve estar em temperatura elevada.	19
9. Qual é a unidade de medida da energia dos fótons? a) Coulombs (C) b) Elétron-Volt (eV) c) Kelvin (K) d) Watts (W)	18
10. Qual fenômeno foi importante para a aceitação e confirmação da teoria quântica de Planck? a) A descoberta da radiação de corpo negro. b) A formulação da teoria da relatividade. c) A medição da velocidade da luz. d) A Explicação do Efeito Fotoelétrico.	13
Total de Respostas: 21 Estudantes x 10 Questões = 210 respostas	Total: 152 acertos (72,38%)

As questões propostas abordaram diversos conceitos-em-ação e teoremas-em-ação fundamentais para a compreensão da física quântica e do efeito fotoelétrico.

Entre os conceitos-em-ação, destacam-se o conhecimento da constante de Planck, tanto em seu valor numérico, quanto em sua definição para a quantização da energia; o conceito de efeito fotoelétrico como fenômeno em que a luz incidente sobre um metal provoca a ejeção de elétrons, o qual está diretamente relacionado à energia em função do comprimento de onda da radiação; a unidade de medida da energia dos fótons, o elétron-volt (eV) e também conceitos relacionados à “catástrofe do ultravioleta”, que corresponde à impossibilidade da física clássica em prever cor-



retamente a radiação de corpo negro, situando-a como um importante marco para o surgimento da Teoria Quântica.

No que se refere aos teoremas-em-ação, as questões propuseram a explicação proposta por Einstein, que aponta que a luz é composta por fótons com energia quantizada que interagem com os elétrons; o fato de que a energia do fóton deve ser suficiente para superar a energia de ligação do elétron ao metal e a capacidade dos fótons de transferirem energia para os elétrons, o que justifica a emissão dos mesmos e caracteriza o efeito fotoelétrico.

Analisando as respostas obtidas é possível inferir que os conceitos e teoremas utilizados com mais sucesso pelos estudantes incluíram a identificação do valor da constante de Planck (questão 2); a identificação do fenômeno explicado por Einstein em 1905, (questão 5); a condição necessária para que um elétron seja ejetado de um metal (questão 8) e o reconhecimento da unidade de medida da energia do fóton apresentada durante as aulas (questão 9).

Por outro lado, as questões que versavam sobre o significado da “Catástrofe do Ultravioleta” (questão 3); o trabalho experimental de Philip Lenard (questão 4); a compreensão de que a luz pode transferir energia para os elétrons (questão 6); a explicação proposta por Einstein de que a luz é composta de fótons com energia quantizada que interagem com elétrons (questão 7) e a contribuições de Planck para a Física Moderna (questões 1 e 10) tiveram uma quantidade mediana de acertos, embora ainda assim, tenham sido corretamente assinaladas por mais da metade dos estudantes presentes.

Esses indicadores demonstram que os estudantes revisitaram diversos conceitos abordados durante as aulas o que exigiu que eles mobilizassem não só os conceitos abordados, mas também análises e condições para aplicar esses conceitos, visto que cada questão apresentava três alternativas incorretas para apenas uma correta, demonstrando a necessidade da articulação entre as situações vivenciadas, os conceitos assimilados e a tomada de decisão para a solução dos desafios, características muito presentes na Teoria dos Campos Conceituais.

As respostas corretas para as questões que representam 72,38% do total de respostas obtidas sugerem que os estudantes conseguiram se utilizar de invariantes operatórios construídos e/ou fortalecidos durante as aulas, conforme mencionado na teoria de Vergnaud e a análise dos erros e acertos é uma forma de traçar a evolução



do entendimento dos estudantes dentro do campo conceitual do Efeito Fotoelétrico, apontando os avanços e as dificuldades encontradas pelos estudantes, o que é coerente com a ideia de desenvolvimento progressivo dos campos conceituais, proposta por Vergnaud, em processos educativos como o relatado nesta pesquisa.

Com respeito à avaliação formativa por rubricas, são apresentados abaixo, na tabela 6, dados relativos a um espaço amostral de 06 (seis) estudantes, por meio de seus registros e produções escolhidas de forma aleatória e avaliadas de acordo com os critérios pré-estabelecidos para exemplificação do trabalho realizado, visto que seria viável a apresentação neste documento dos dados de todos os estudantes atendidos durante a intervenção pedagógica.

Tabela 6: Resultados da Rubrica da Avaliação Formativa

COMPREENSÃO DOS CONCEITOS BÁSICOS.		ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DE RESULTADOS EXPERIMENTAIS.	CONEXÕES COM APLICAÇÕES PRÁTICAS E TECNOLÓGICAS.	CAPACIDADE DE REALIZAR ANÁLISES QUANTITATIVAS.	RELACÃO DO EFEITO FOTOELÉTRICO COM OUTROS CONCEITOS DA FÍSICA.	
Os Estudantes apresentam uma boa compreensão dos conceitos relacionados ao efeito fotoelétrico, sendo capazes de expressá-los com clareza em suas produções.		Os Estudantes realizam e interpretam com boa precisão os resultados do experimento e simulações propostas durante as aulas.	Os Estudantes estabelecem conexões significativas entre o efeito fotoelétrico e suas aplicações práticas e tecnológicas.	Os Estudantes realizam e demonstram bom entendimento das relações quantitativas no estudo de efeito fotoelétrico.	Os Estudantes, em suas produções, estabelecem conexões entre o efeito fotoelétrico e outros conceitos da Física.	
VALORES	0,0 a 2,0	0,0 a 2,0	0,0 a 2,0	0,0 a 2,0	0,0 a 2,0	SOMA
Aluno A	1,8	1,6	2,0	1,5	1,7	8,6
Aluno B	1,3	1,4	1,8	1,2	1,4	7,1
Aluno C	2,0	1,9	2,0	1,7	1,9	9,5
Aluno D	1,2	1,3	1,7	1,3	1,5	7,0
Aluno E	1,8	2,0	2,0	1,8	2,0	9,8
Aluno F	1,0	1,2	1,5	1,6	1,0	6,3
MÉDIA	1,5	1,6	1,8	1,5	1,6	8,0

Os dados apresentados na tabela x, revelam os diferentes níveis de domínio conceitual e de relações do Efeito Fotoelétrico com tecnologias modernas e outras áreas da Física pelos estudantes atendidos e quais aspectos do processo de ensino e aprendizagem devem ser observados com mais atenção pelo professor durante



MNPEF
Mestrado Nacional
Profissional em
Ensino de Física



suas aulas, de forma a contribuir para a melhoria e aprofundamento das compreensões, relações e conexões entre teoria, prática e formalização matemática, visando atender aos diferentes caminhos de construção e consolidação desse campo conceitual.



7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho dissertativo até aqui delineado demonstra com importantes registros os resultados positivos de realização de uma sequência didática fundamentada na Teoria dos Campos Conceituais de Gerard Vergnaud para o ensino do efeito fotoelétrico, articulando conceitos de Física Moderna com a aplicação tecnológica da geração de energia solar.

A pesquisa, de natureza qualitativa, partiu de um dos desafios conceituais e históricos do ensino de Física, que é a lacuna entre o conteúdo curricular e o cotidiano dos estudantes. Os objetivos preestabelecidos foram alcançados satisfatoriamente, evidenciando que a integração entre rigor teórico e contextualização prática fomenta uma aprendizagem conectada à realidade discente.

A investigação das concepções prévias dos estudantes, realizada por meio de questionários e discussões, mostrou a premissa de Vergnaud sobre a existência de um conhecimento em ação. Embora a terminologia científica do "efeito fotoelétrico" fosse pouco familiar, os alunos mobilizaram "conceitos-em-ação" e "teoremas-em-ação", recorrendo a noções intuitivas sobre luz e energia para interpretar o fenômeno.

Este diagnóstico inicial foi indispensável, pois permitiu que a intervenção pedagógica fosse estrategicamente delineada para atuar sobre essas estruturas cognitivas, promovendo sua evolução em direção ao conhecimento científico validado.

O pilar desta dissertação reside no desenvolvimento e na validação de uma engenharia didática que integrou a Teoria dos Campos Conceituais ao ensino de Física. A sequência de atividades partindo da investigação por questionamento, passando pela experimentação com kits de robótica; a ampliação conceitual com aulas expositivas e o uso de simulações (PhET), e culminando na resolução de problemas foi determinante.

A manipulação de variáveis nos simuladores, por exemplo, tornou-se um instrumento mediador fundamental, permitindo aos estudantes visualizarem a relação entre a frequência da luz e a ejeção de elétrons e inferir a existência de uma frequência de corte. Essa experimentação, tanto virtual quanto física, promoveu a revisão de hipóteses e o refinamento de seus "teoremas-em-ação", facilitando a transição para um entendimento mais formal do fenômeno.



A abordagem demonstrou também a importância da contextualização em múltiplas dimensões. A perspectiva histórica, que revisitou as contribuições de Hertz, Planck, Lenard e Einstein, situou o efeito fotoelétrico como um marco na revolução da Física do início do século XX e introduziu a complexidade da dualidade onda-partícula.

De forma complementar, a contextualização geográfica, com a presença de parques de energia solar no município de São João do Rio do Peixe conferiu uma relevância imediata e tangível ao objeto de estudo, atuando como um elemento motivador e conector entre a ciência escolar e o desenvolvimento tecnológico local.

A avaliação da aprendizagem, conduzida por meio de uma abordagem formativa (rubricas) e somativa (folha tarefa), forneceu evidências robustas do impacto da metodologia. O índice de 72,38% de acertos na folha tarefa, mais do que um dado quantitativo, é um forte indicativo de que os estudantes foram capazes de mobilizar os "invariantes operatórios" construídos e consolidados ao longo da intervenção.

Os resultados obtidos sugerem que a aprendizagem transcendeu a simples memorização, alcançando um nível de compreensão que permite a aplicação de conceitos em novas situações-problema e o engajamento e a proatividade discente observados corroboram a eficácia da abordagem em promover não apenas o domínio conceitual, mas também uma atitude mais positiva em relação às ciências.

Por fim, este trabalho não se encerra em si mesmo, mas aponta para promissoras direções futuras. A replicabilidade da sequência didática em outros contextos escolares é um passo natural para testar a generalização dos resultados e a pesquisa abre caminhos para a aplicação da Teoria dos Campos Conceituais a outros tópicos complexos da Física Moderna e para o desenvolvimento de novos materiais e tecnologias educacionais.



9 REFERÊNCIAS

ASSUNÇÃO, Thiago Vicente de; TURUDA, Charles Teruhiko. **Utilização do Arduino no desenvolvimento de um experimento didático para discussão do efeito fotoelétrico no ensino médio**. ENCITEC - Ensino de Ciências e Tecnologia em Revista, Santo Ângelo, v. 10, n. 3, p. 42-56, set./dez. 2020.

AUSUBEL, David P. **Aquisição e retenção de conhecimentos: uma perspectiva cognitiva**. Lisboa: Plátano Edições Técnicas, 2003. 243p.

BRASIL. **Lei nº 13.415, de 16 de fevereiro de 2017**. Altera as Leis nº 9.394, de 20 de dezembro de 1996, que estabelece as diretrizes e bases da educação nacional, e 11.494, de 20 de junho de 2007, que regulamenta o Fundo de Manutenção e Desenvolvimento da Educação Básica e de Valorização dos Profissionais da Educação. Diário Oficial da União, Brasília, 17 fev. 2017. Seção 1, p. 1.

BRASIL. **Lei nº 14.945, de 31 de julho de 2024**. Altera a Lei nº 9.394, de 20 de dezembro de 1996 (Lei de Diretrizes e Bases da Educação Nacional), a fim de definir diretrizes para o ensino médio, e as Leis n.º 14.818, de 16 de janeiro de 2024, 12.711, de 29 de agosto de 2012, 11.096, de 13 de janeiro de 2005, e 14.640, de 31 de julho de 2023. Diário Oficial da União, Brasília, 01 ago. 2024. p. 5

BRASIL, Ministério da Educação. **Censo Escolar 2017: notas estatísticas**. Instituto Nacional de Estudos e Pesquisas Educacionais Anísio Teixeira. Brasília, 2018. Disponível em: https://download.inep.gov.br/educacao_basica/censo_escolar/notas_estatisticas/2018/notas_estatisticas_Censo_Escolar_2017.pdf. Acesso em: 06 jul. 2024.

BRASIL, Empresa de Pesquisa Energética. **Matriz Energética e Elétrica**. Brasília, 2024. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>. Acesso em 29 nov. 2024.

BRASIL, Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. **Relatório de Gestão 2023: Relato Integrado MCTI/2023**. Brasília, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/aceso-a-informacao/prestacao-de-contas/2023/relatorio-de-gestao-mcti-exercicio-2023.pdf>. Acesso em 29 nov. 2024.

CABRAL, Carlos R. G. et al. **Utilização de experimentos analógicos e softwares para auxiliar o processo ensino aprendizagem do efeito fotoelétrico**. Anais do II ENCONTRO DO MNPEF, 2022, Brasília: Universidade de Brasília, Instituto de Física, 2022. p. 590-600.

CARVALHO, Bianca Cintra de; GOMES, Luciano Carvalhais. **Um estudo dos invariantes operatórios mobilizados por estudantes da terceira série do Ensino Médio sobre o efeito fotoelétrico**. Ensino & Pesquisa, União da Vitória, v. 20, n. 1, p. 101-118, jan./abr. 2022.



CEDRAN, D. P.; KIOURANIS, N. M. M. **Teoria dos Campos Conceituais: visitando seus principais fundamentos e perspectivas para o ensino de ciências**. ACTIO, Curitiba, v. 4, n. 1, p. 63-86, jan./abr. 2019. Disponível em: <<https://periodicos.ut-fpr.edu.br/actio>>. Acesso em: 12 ago. 2024.

COHEN-TANNOUDJI, Claude; DIU, Bernard; LALOË, Franck. **Quantum Mechanics**. Vol. 1 – 2ª Edição. Weinheim, Alemanha: Editora WILEY–VCH, 2020.

CRUZ, Ubirajara Malaquias da. **Jogo Ludophysis para explorar o efeito fotoelétrico no ensino médio por meio de uma UEPS**. 2021. 107 f. Dissertação de Mestrado em Ensino de Física – Universidade Regional do Cariri, Juazeiro do Norte – CE, 2021.

DANTAS, Claudio Rejane da Silva; MASSONI, Neusa Teresinha; SANTOS, Flávia Maria Teixeira dos. **A avaliação no Ensino de Ciências Naturais nos documentos oficiais e na literatura acadêmica: uma temática com muitas questões em aberto**. Ensaio: avaliação e políticas públicas em educação, v. 25, p. 440–482, 2017.

EISBERG, Robert; RESNICK, Robert. **Física quântica: Átomos Moléculas, Sólidos, Núcleos e Partículas**. 23ª Edição. Rio de Janeiro: Campus–Elsevier, 2010. 928 p.

ELENO, Luiz Tadeu Fernandes. **Fenômenos de Transporte: Corpo Negro**. São Paulo: USP, 2010. Disponível em: <https://computeel.org/LOM3260/assets/classes/CorpoNegro.pdf>. Acesso em 17 abr. 25.

FEITOSA, Samuel dos Santos. **Tópicos de Física Quântica em Versos de Cordel e Arte dos Quadrinhos, Ensinados à Luz de uma Unidade de Ensino Potencialmente Significativa**. 2019. 202 f. Dissertação de Mestrado em Ensino de Física – Universidade Regional do Cariri, Juazeiro do Norte, 2019.

FRAZÃO, Dilva. **Max Planck: Biografia**. São Paulo: ebiografias, 2020. Disponível em: https://www.ebiografia.com/max_planck/. Acesso em 12 mai. 24.

GOMES, Isafas Fernandes, et al. **Estudo do efeito fotoelétrico por problematização no Instituto Federal em Xapuri/AC**. REAMEC - Rede Amazônica de Educação em Ciências e Matemática, Cuiabá, v. 10, n. 1, jan./abr. 2022.

GUIMARÃES, Osvaldo. **Física: Eletromagnetismo e Física Moderna**. Osvaldo Guimarães, José Roberto Piqueira, Wilson Carron. -- 2. ed. -- São Paulo: Ática, 2016.

FRANCHI, Anna. **Considerações sobre a teoria dos campos conceituais**. In Alcântara Machado, S.D. et al. (1999). Educação Matemática: uma introdução. São Paulo. EDUC. p. 155–195.

HALIDAY, David, **Fundamentos de Física IV: Óptica e Física Moderna**. David Haliday, Robert Resnick, Jearl Walker. 10ª ed. – Rio de Janeiro: LTC, 2016.



HILGER, T. R.; OLIVEIRA, Â. M. M. **O problema dos teoremas-em-ação sobre a força de atrito na disciplina de física geral para graduação.** Revista Brasileira de Ensino de Ciência e Tecnologia, v. 5, n. 1, p. 54–70, jan./abr. 2012.

LIMA, João Paulo Rodrigues de. **Análise da força da gravidade e efeito fotoelétrico nas aulas de física no ensino médio a partir da utilização de simuladores PhET e realização de experimentos.** 2020. Dissertação de Mestrado em Ensino de Física – Universidade Regional do Cariri, Juazeiro do Norte, 2020.

LÜDKE, M. O trabalho com projetos e a avaliação na educação básica. Práticas avaliativas e aprendizagens significativas. Porto Alegre: Mediação, p. 67-80, 2003. MAGINA, S. M. **A Teoria dos Campos Conceituais: contribuições da Psicologia para a prática docente.** Disponível em: www.ime.unicamp.br/erpm2005/anais/conf/conf_01.pdf. Acesso em: 26 nov. 2024.

MARTINS, Roberto de Andrade. **A Torre de Babel científica.** Scientific American História (6): 6–13, 2006.

MARTINS, Roberto de Andrade. **A Física no final do século XIX: modelos em crise.** Roberto de Andrade Martins. São Paulo: Unicamp. Disponível em: <https://www.comciencia.br/dossies-1-72/reportagens/fisica/fisica05.htm>. Acesso em 26 abr. 25.

MARTINS, Roberto de Andrade. **História da teoria quântica: a dualidade onda-partícula, de Einstein a De Broglie.** Roberto de Andrade Martins, Pedro Sérgio Rosa. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2014.

MORAIS, Edson Pereira de. **O ensino da física moderna: o Efeito Fotoelétrico, a partir da Metodologia Fedathi.** 2022. Dissertação de Mestrado em Ensino de Física – Universidade Regional do Cariri, Juazeiro do Norte, 2022.

MOREIRA, Marco Antônio. **Grandes Desafios para o Ensino da Física na Educação Contemporânea.** Revista do Professor de Física, [S. l.], v. 1, n. 1, p. 1–13, 2017. DOI: 10.26512/rpf.v1i1.7074. Disponível em: <https://www.periodicos.unb.br/index.php/rpf/article/view/7074>. Acesso em: 24 fev. 2024.

MOREIRA, Marco Antônio. **A teoria dos campos conceituais de Vergnaud, o ensino de ciências e a pesquisa nesta área.** Investigações em Ensino de Ciências. Porto Alegre. v7, 2002 p. 7–29.

NASCIMENTO, Matheus Monteiro. **O professor de Física na escola pública estadual brasileira: desigualdades reveladas pelo Censo escolar de 2018.** Revista Brasileira de Ensino de Física. 2020, v. 42, e20200187. DOI: <https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2020-0187>

NUSSENZVEIG, Herch Moysés. **Curso de Física – Vol. 4: Ótica, Relatividade e Física Quântica.** 2ª Ed. São Paulo: Editora Blucher, 2014.



OSTERMANN, F. e MOREIRA, M.A, **Uma revisão sobre a área de pesquisa Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio**. Investigações em ensino de ciências. Porto Alegre. Vol. 5, n. 1 (jan./abr. 2000), p. 23-48

OSTERMANN, F. e MOREIRA, M.A, **Enseñanza de las ciencias**. Porto Alegre, 2020. Vol. 3. p.18.

SANTOS, Carlo Alberto dos. **A descoberta do Efeito Fotoelétrico**. Instituto de Física, UFRGS. Porto Alegre: 2002a. Disponível em: <https://www.if.ufrgs.br/einstein/efeitofotoeletricodescoberta.html>. Acesso em: 17 abr. 25.

SILVA JÚNIOR, João Mauro da; COELHO, Geide Rosa. **O ensino por investigação como abordagem para o estudo do efeito fotoelétrico com estudantes do ensino médio de um Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia**. Caderno Brasileiro de Ensino de Física, v. 37, n. 1, p. 51-78, abr. 2020.

SILVA, Francisco Edson da. **Introdução à Física Quântica**. Francisco Edson da Silva e Neemias Alves de Lima. – 1. ed. – Natal: SEDIS-UFRN, 2014.

SILVA, P. O., KRAJEWSKI, L. L., LOPES, H. S., & NASCIMENTO, D. O. do. **Os Desafios no Ensino e Aprendizagem da Física no Ensino Médio**. Revista Científica da Faculdade de Educação e Meio Ambiente - FAEMA, 9(2), 2018. p. 829–834. Disponível em: <https://revista.unifaema.edu.br/index.php/Revista-FAEMA/article/view/593>. Acesso em 28 nov. 2024

SILVA, Samuel Gonçalves da; FIGUEIREDO, Helenara Regina Sampaio. **Uma Sequência Didática Investigativa para a Aprendizagem Conceitual do Efeito Fotoelétrico**. Ensino, v. 23, n. 1, p. 39-45, 2022.

SOUSA, Francisco Ivanildo de; ATAÍDE, Ana Raquel Pereira de. **O estudo do comportamento dual da luz com a mediação da aprendizagem cooperativa: uma análise qualitativa do efeito fotoelétrico**. Experiências em Ensino de Ciências, v. 15, n. 1, p. 395-410, 2020.

TODOS PELA EDUCAÇÃO. **Anuário Brasileiro da Educação Básica 2021**. 10. ed. São Paulo: Editora Moderna, 2021. 188 p. Disponível em: <https://www.moderna.com.br/anuario-educacao-basica/2021/>. Acesso em 28 nov. 2024.

TORRES, Carlos Magno... [et al.]. **Física: Ciência e Tecnologia**. Vol. 3 – 4ª Ed. São Paulo: Moderna, 2016.

VERGNAUD, Gerard. **A Teoria dos Campos conceituais**. In: BRUN, J. Didática das matemáticas. Tradução de Maria José Figueiredo. Lisboa: Instituto Piaget, 1996. p. 155–191.

VERGNAUD, Gerard. **Teoria dos campos conceituais**. In Nasser, L. (Ed.) Anais do 1º Seminário Internacional de Educação Matemática do Rio de Janeiro, 1993. 26 p.



VERGNAUD, Gerard (trad. MORO, Maria Lucia Faria). **A criança, a matemática e a realidade**. Curitiba: Editora UFPR, 2014.

VERGNAUD, Gerard. **Todos perdem quando a pesquisa não é colocada em prática**. NOVA ESCOLA Edição 215. São Paulo: 2008. Disponível em: <https://novaescola.org.br/conteudo/960/gerard-vergnaud-todos-perdem-quando-a-pesquisa-nao-e-colocada-em-pratica>. Acesso em: 14 out 2024.

VERNIER, Fernanda Silva Pinto, et al. **Rumo a BNCC: Avaliação por Rubricas**. Sistema Anglo de Ensino, 2018. Disponível em: <http://anglosolucaoeducacional.com.br/wp-content/uploads/2018/12/Ebook-5-Avaliac%CC%A7a%CC%83o-por-Rubricas.pdf>. Acesso em: 26 nov. 2024.

YOUNG, Hugh D. **Física IV: Ótica e Física Moderna**. Hugh D. Young, Roger A. Freedman. 14ª ed. – São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2016.

10 APÊNDICES

APÊNDICE A – Slides da Apresentação utilizada durante as Aulas.



No final do século XIX, os estudos relacionados à Física estavam em um momento de pleno desenvolvimento e importantes descobertas. A física clássica, organizada sistematicamente por Isaac Newton e aperfeiçoada por diversos cientistas, como James Clerk Maxwell, explicava satisfatoriamente à época as leis da natureza e proporcionava uma descrição bastante detalhada dos fenômenos físicos conhecidos até então.

CONTEXTO HISTÓRICO



Nesse período, a comunidade científica concentrava-se em explorar e compreender os princípios básicos da mecânica, óptica e termodinâmica; e, a teoria eletromagnética de Maxwell, unificando a eletricidade e o magnetismo, trouxe grandes impactos para essa ciência, de modo que alguns físicos da época acreditavam que a Física enquanto ciência havia atingido o seu ápice e poderia explicar com facilidade todos os fenômenos observáveis no universo.

CONTEXTO HISTÓRICO



“Em 1900, o físico escocês William Thomson, mais conhecido como Lord Kelvin (1824-1907), que dera grandes contribuições ao desenvolvimento do eletromagnetismo e da termodinâmica no decorrer do século XIX, pronunciou uma famosa conferência na qual dizia sentir pena dos jovens físicos daquela época, que não teriam nada de emocionante para pesquisar, pois todas as teorias fundamentais já estavam prontas.” (Martins, 2006)

Roberto de Andrade Martins, A Torre de Babel Científica, Revista Scientific American Brasil.

CONTEXTO HISTÓRICO

Segundo relatos, William Thomsom, um dos cientistas que muito havia contribuído para os estudos da termodinâmica, chegou a recomendar aos jovens da época que não se dedicassem mais à Física. Em uma palestra para a British Association for the Advancement of Science, Thomsom teria dito que:

“Agora, não há mais nada novo para ser descoberto pela Física. Tudo o que nos resta são medições cada vez mais precisas.”

CONTEXTO HISTÓRICO

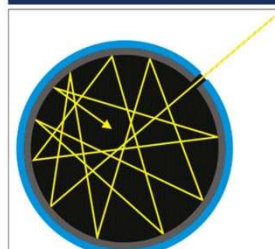
No entanto, apesar dos significativos avanços alcançados pela Física no final do século XIX, alguns experimentos passaram a desafiar a visão clássica dessa ciência. Os primeiros questionamentos desafiadores para a época surgiram do estudo da radiação de corpos aquecidos, conhecida como **radiação de corpo negro**.

CONTEXTO HISTÓRICO

RADIAÇÃO DE CORPO NEGRO

Um corpo negro é idealizado como um objeto que absorve toda a radiação incidente sobre ele, independentemente da frequência ou do comprimento de onda da radiação. Isso significa que ele não reflete nenhuma parte da radiação, apenas a absorve e a emite novamente. Ex: Carvão em Brasa, Metal ao Rubro, Fornos de Fundição, etc.

RADIAÇÃO DE CORPO NEGRO



<https://webfísica.com/física/curso-de-física-básica/aula/13-98>



Esta Foto de Autor Desconhecido está licenciado em CC BY-NC-ND

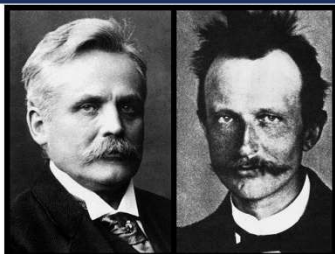
RADIAÇÃO DE CORPO NEGRO



RADIAÇÃO DE CORPO NEGRO

No final do século XIX e início do século XX, vários físicos tentaram encontrar uma fórmula matemática que descrevesse o espectro da radiação do corpo negro, mas sem sucesso. As tentativas baseadas na física clássica levavam a resultados contraditórios ou absurdos, como a chamada **catástrofe do ultravioleta**, que previa uma emissão infinita de energia para frequências muito altas.

WILHELM CARL WERNER OTTO FRITZ FRANZ WIEN



Esta Foto de Autor Desconhecido está licenciado em CC BY-SA

RADIAÇÃO DE CORPO NEGRO

A lei do deslocamento proposta por Wien afirma que o comprimento de onda para o qual a intensidade da radiação de corpo negro é máxima é inversamente proporcional à temperatura absoluta do corpo. Ou seja, quanto maior a temperatura, menor o comprimento de onda de pico e maior a frequência da radiação.

$$\lambda_{M\acute{a}x} = \frac{b}{T}$$

RADIAÇÃO DE CORPO NEGRO: LEI DE WIEN

$$\lambda_{M\acute{a}x} = \frac{b}{T}$$

Onde $\lambda_{M\acute{a}x}$ é o comprimento de onda de pico, T é a temperatura absoluta em kelvin e b é uma constante chamada de constante de deslocamento de Wien, que vale aproximadamente $2,898 \cdot 10^{-3} \text{ m.K}$ o que resulta em:

$$\lambda_{M\acute{a}x} = \frac{0,002898}{T}$$

RADIAÇÃO DE CORPO NEGRO

A lei do deslocamento de Wien explica, por exemplo, por que um pedaço de metal aquecido brilha em diferentes cores conforme sua temperatura aumenta. Quando o metal está frio, ele emite radiação infravermelha, que não é visível aos nossos olhos.



RADIAÇÃO DE CORPO NEGRO



RADIAÇÃO DE CORPO NEGRO

Conforme ele se aquece, o comprimento de onda de pico diminui e entra na faixa do vermelho, que é a cor mais próxima do infravermelho no espectro visível. Se o metal continuar se aquecendo, o comprimento de onda de pico passa pelas outras cores do espectro, até chegar no azul, que é a cor mais próxima do ultravioleta.

RAYLEIGH E JEANS



Esta Foto de Autor Desconhecido está licenciado em CC BY-SA

Uma teoria desenvolvida pelos físicos britânicos Lord Rayleigh (John William Strutt) e Sir James Jeans no final do século XIX e início do século XX previu que a intensidade deveria ir ao infinito em comprimentos de onda curtos.

Essa teoria buscava descrever como a energia da radiação é distribuída em diferentes frequências em um corpo negro, utilizando conceitos da mecânica estatística e da eletrodinâmica clássica.

Combinando fatores dessas duas áreas, Rayleigh e Jeans derivaram a seguinte expressão para a densidade espectral de energia de um corpo negro:

$$u(\nu, T) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} k_B T$$



Esta Foto de Autor Desconhecido está licenciado em CC BY-SA

$$u(\nu, T) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} k_B T$$

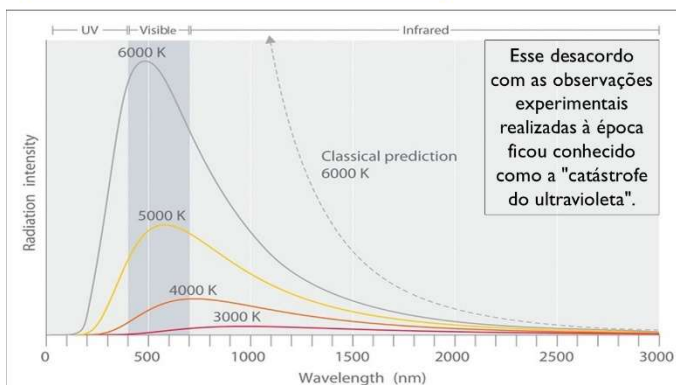
- k_B é a constante de Boltzmann, aproximadamente $1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K
- T é a temperatura absoluta, sendo:
 $T = ^\circ C + 273,15$
- c é a velocidade das ondas radiantes, aproximadamente $3 \cdot 10^8$ m/s
- ν é a frequência das radiações em Hertz.
- ν para UV $\sim 10^{18}$ Hertz



Esta Foto de Autor Desconhecido está licenciado em CC BY-SA

CATÁSTROFE DO ULTRAVIOLETA

Entretanto, por essa lei, o aumento da frequência implica em aumento da energia radiante tendendo ao infinito; ou seja, à medida que as frequências aumentavam, a distribuição de energia predita pela equação aumentava indefinidamente, levando a um resultado divergente para frequências do ultravioleta.



CATÁSTROFE DO ULTRAVIOLETA

Em temperaturas muito altas, a distribuição de energia radiante se torna aproximadamente uniforme em todas as frequências da luz visível, resultando em uma aparência branca. O Sol, por exemplo, tem uma temperatura de superfície em torno de 6000 K e emite uma intensa radiação que se aproxima do espectro de luz branca, com uma combinação de todas as cores visíveis.

CATÁSTROFE DO ULTRAVIOLETA

O gráfico qualitativo apresentado na figura 1, obtido em 1814 pelo óptico alemão Joseph von Fraunhofer (fig. 11), mostra simplificada a distribuição da intensidade da radiação emitida pelo Sol. A maior porcentagem de emissão está na faixa entre as cores laranja e azul.

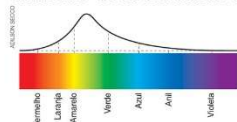


Figura 6.3 Distribuição da intensidade da radiação emitida pelo Sol.



O TRABALHO DE MAX PLANCK

No ano de 1900, Max Planck apresentou uma explicação para a catástrofe ultravioleta. Para isso, teve de admitir que a emissão de energia não era contínua. No modelo de Planck, a radiação era emitida e absorvida em pequenos “pacotes” de energia, denominados **quanta** (plural de **quantum**), de onde vem o nome teoria dos quanta, ou teoria quântica.



O TRABALHO DE MAX PLANCK

Max Planck (1858–1947), foi um renomado físico alemão e o pioneiro da teoria quântica, sendo uma figura proeminente no cenário científico. Em 1874, Planck dá início à sua vida acadêmica como estuante de física na Universidade de Munique. Entretanto, em 1877, transfere-se para Berlim, onde teve a oportunidade de estudar com grandes nomes da física, como Hermann Von Helmholtz e Gustav Kirchhof.



Esta Foto de Autor Desconhecido está licenciada em CC BY-SA-NC

A TEORIA QUÂNTICA DE PLANCK

Essa teoria teve por base duas arrojadas hipóteses sobre a origem da radiação emitida pelas partículas na superfície dos corpos aquecidos.

I. As partículas oscilantes que emitem radiação podem ter apenas determinadas quantidades de energia, em valores discretos, dados pela equação de Planck:

$$E = n \cdot h \cdot f$$

Onde: n é um número inteiro positivo, f é a frequência da radiação emitida e h é uma constante universal conhecida como **constante de Planck**.

$$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$$

A TEORIA QUÂNTICA DE PLANCK

II. As partículas emitem ou absorvem radiação em quantidades discretas denominadas **quanta** (plural de **quantum**).

Em 1926, o físico-químico estadunidense Gilbert Lewis (1875 -1946) atribuiu aos quanta o sugestivo nome de fótons, que significa “pacotes” ou “partículas” de luz, nome adotado desde então.



A TEORIA QUÂNTICA DE PLANCK

Quando Planck formulou sua teoria, ele próprio e muitos cientistas da época não consideravam os quanta entidades reais. Cientista conservador, firmemente ligado às ideias da Física Clássica, ele pensava que sua hipótese fosse apenas um “artifício matemático” para resolver a questão à qual se dedicava desde 1890, assim como boa parte dos físicos da época.

Planck derivou a equação de distribuição espectral de energia e obteve a seguinte equação para a radiação emitida pelo corpo negro:

$$u(\nu, T) = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}$$

A TEORIA QUÂNTICA DE PLANCK

O ponto fundamental da teoria de Planck foi a ousada hipótese dos níveis de energia quantizados ou estados quânticos. Isso marcou o nascimento da teoria quântica da matéria. Segundo essa hipótese, as partículas apenas absorvem ou emitem energia quando mudam de estado quântico. Enquanto permanecerem no mesmo estado quântico, nenhuma energia será absorvida ou emitida.

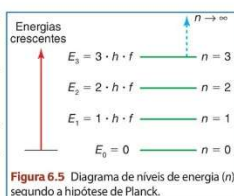


Figura 6.5 Diagrama de níveis de energia (n) segundo a hipótese de Planck.

A TEORIA QUÂNTICA DE PLANCK

Quando Planck formulou sua teoria, ele próprio e muitos cientistas da época não consideravam os quanta entidades reais. Cientista conservador, firmemente ligado às ideias da Física Clássica, ele pensava que sua hipótese fosse apenas um “artifício matemático” para resolver a questão à qual se dedicava desde 1890, assim como boa parte dos físicos da época.

A TEORIA QUÂNTICA DE PLANCK

Em carta a um amigo em 1931, Planck confessou que tomou esse caminho “numa atitude desesperada [...] pois sou contra aventuras duvidosas”. Mas “o problema tinha de ser resolvido a qualquer preço. Eu estava pronto para sacrificar minhas mais profundas convicções físicas! Eu tinha de chegar a algum resultado positivo”. Entretanto, desenvolvimentos subsequentes mostraram que a teoria dos quanta explicava muitos outros fenômenos em nível atômico, nos quais as teorias clássicas falhavam.

(VIEIRA, C. L. e VIDEIRA, A. R., Folha de S. Paulo, Folha Mais, 17 dez. 2000.)

A TEORIA QUÂNTICA DE PLANCK

Leia a Reportagem a seguir:

<https://jornal.unesp.br/2023/02/06/a-tecnologia-quantica-de-segunda-geracao-vai-chegar-ao-brasil/>

Reportagens

A tecnologia quântica de segunda geração vai chegar ao Brasil?

País conta com bons grupos de pesquisa na área, mas momento exige formar engenheiros quânticos para superar distância entre estudos teóricos e aplicações práticas.

A TEORIA QUÂNTICA DE PLANCK

Uma emissora de rádio FM transmite na frequência de 100 MHz com potência de 150 kW.

a) Qual é a energia em joule de cada fóton emitido pela antena da emissora?

b) Quantos fótons por segundo são emitidos pela antena dessa rádio?

Resolução:

a) Pela equação de Planck, a energia de cada fóton é:

$$E_{\text{fóton}} = h \cdot f \Rightarrow E_{\text{fóton}} = 6,626 \cdot 10^{-34} \cdot 100 \cdot 10^6 \therefore E_{\text{fóton}} = 6,626 \cdot 10^{-26} \text{ J}$$

b) A potência da emissora de rádio é de 150 kW (150.000 W), ou seja, em 1 s, a antena fornece 150.000 J para os fótons. Portanto, o número de fótons emitidos, em 1 s, é:

$$n_{\text{fóton}} = \frac{150.000}{6,626 \cdot 10^{-26}} \Rightarrow n_{\text{fóton}} = 2,26 \cdot 10^{30}$$

Com potência de 150 kW, a antena emite cerca de $2,26 \cdot 10^{30}$ fótons em 1 s.

A DESCOBERTA DO EFEITO FOTOELÉTRICO PROFESSOR CLAUDIO REINKE



A DESCOBERTA DO EFEITO FOTOELÉTRICO



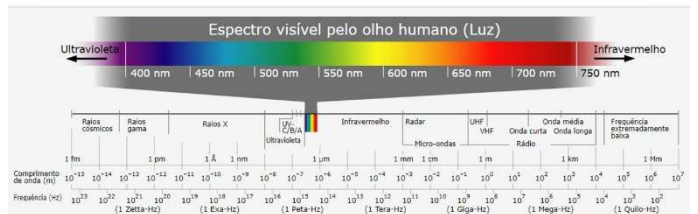
Esta Foto de Autor Desconhecido está licenciado em CC BY-SA-NC

Em meados da década de 1880, o físico alemão Heinrich Hertz, desenvolveu uma série estudos e experimentos para testar a existência das ondas eletromagnéticas previstas anteriormente por James Clerk Maxwell.



Esta Foto de Autor Desconhecido está licenciado em CC BY-SA-NC

A DESCOBERTA DO EFEITO FOTOELÉTRICO



A DESCOBERTA DO EFEITO FOTOELÉTRICO

No ano de 1887, Hertz se utilizou de um oscilador composto por esferas de bronze bem polidas, cada qual interligada a uma bobina e posicionadas a uma pequena distância entre si, de modo que permitiam a ocorrência de faíscas entre elas sob a influência de elevadas tensões elétricas aplicadas ao conjunto.



<http://www.saimento.eng.br/istoria/hertz/Resonador+detetor.jpg>

A DESCOBERTA DO EFEITO FOTOELÉTRICO

Em sua concepção, Hertz postulou que, se as previsões concebidas por Maxwell estivessem corretas, então a geração de ondas eletromagnéticas ocorreria paralelamente às faíscas emitidas. Hertz construiu também um receptor simples que consistia em uma espira aberta, na qual duas pequenas esferas também estavam separadas por uma distância pequena em suas extremidades. O receptor foi colocado a uma pequena distância do oscilador.





A DESCOBERTA DO EFEITO FOTOELÉTRICO

Uma observação intrigante, surgiu quando Hertz, diante da dificuldade em visualizar a faísca secundária produzida por indução no receptor, adotou uma prática alternativa, erigindo um invólucro de proteção em torno do sistema experimental, buscando conter a dissipação da luminosidade resultante da faísca no receptor. Entretanto, essa intervenção provocou uma redução notável na amplitude da faísca secundária.

A DESCOBERTA DO EFEITO FOTOELÉTRICO

Por meio de uma sequência detalhada e metódica de experimentos com diferentes frequências de luz, Hertz não somente comprovou a sua intuição primária, como também consolidou a convicção de que a luz possuía uma capacidade intrínseca de induzir a geração de faíscas no receptor e que essa capacidade estava fortemente associada à região do espectro eletromagnético caracterizada como luz ultravioleta.

AS CONTRIBUIÇÕES DE PHILIP LENARD

Experimentos realizados pelo físico alemão Philipp Lenard em 1903 foram fundamentais para a compreensão das características e grandezas associadas ao efeito fotoelétrico, embora não o tenha explicado de modo plausível.



A DESCOBERTA DO EFEITO FOTOELÉTRICO

De acordo com a teoria de Maxwell, se ondas eletromagnéticas fossem geradas durante o faiscamento do aparato, elas induziriam uma corrente na espira receptora e ela produziria um centelhamento entre suas esferas. E foi o que ocorreu quando Hertz ligou seu oscilador, produzindo assim a primeira transmissão e recepção de ondas eletromagnéticas que se tem notícia.

A DESCOBERTA DO EFEITO FOTOELÉTRICO

No curso de suas investigações, Hertz verificou que o fenômeno em questão não possuía natureza eletrostática, dado que fenômeno permanecia inalterado na presença de materiais isolantes ou condutores utilizados na construção do invólucro de proteção. Isso indicava para Hertz que de alguma forma que a incidência de luz sobre o conjunto intensificava o faiscamento observado em seu receptor.

A DESCOBERTA DO EFEITO FOTOELÉTRICO

Esta descoberta, um tanto acidental, constitui um marco significativo para a compreensão da interação entre a radiação eletromagnética e a matéria. Ainda que o pleno entendimento acerca desta descoberta, denominada mais tarde de efeito fotoelétrico, estivesse aquém de sua compreensão, Hertz foi pioneiro em sua observação experimental e não dedicou estudos em entendê-la ou explicá-la.

AS CONTRIBUIÇÕES DE PHILIP LENARD

Lenard, que trabalhava com Heinrich Hertz, criou um aparato experimental, consistindo basicamente em uma câmara de vácuo na qual ele colocou um material metálico, geralmente zinco, que estava sendo estudado à época. A câmara de vácuo permitia controlar o ambiente e eliminar quaisquer efeitos indesejados, como a interferência do ar.

AS CONTRIBUIÇÕES DE PHILIP LENARD

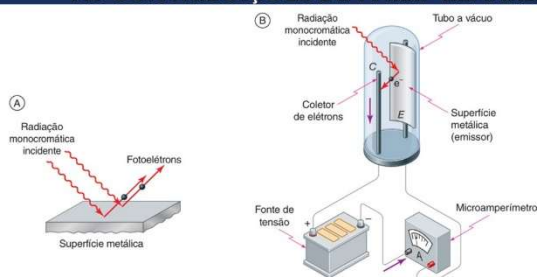
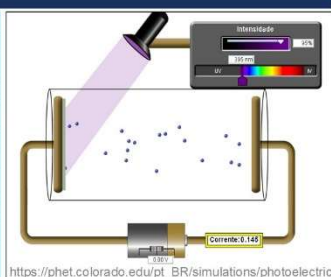


Figura 6.7 (A) Fotoelétrons emitidos pela ação da radiação eletromagnética incidente em uma superfície metálica; (B) circuito utilizado para o estudo do efeito fotoelétrico. (Representações sem escala, uso de cores-fantasia.)

AS CONTRIBUIÇÕES DE PHILIP LENARD

Quando a luz atingia a superfície do material metálico, elétrons eram emitidos da superfície. Esses elétrons eram acelerados em direção ao eletrodo dentro da câmara de vácuo. Lenard mediu a corrente elétrica gerada nos eletrodos de acordo com a intensidade da luz incidente e sua frequência.



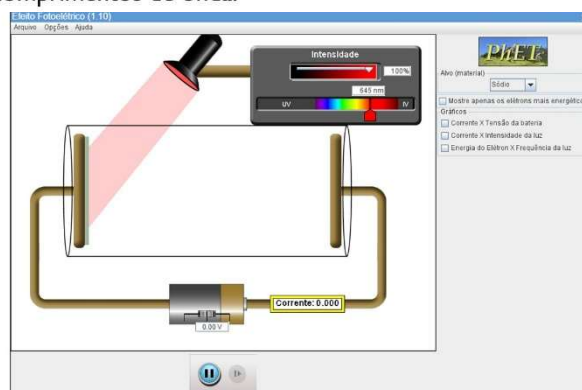
https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulations/photoelectric

AS CONTRIBUIÇÕES DE PHILIP LENARD

Lenard a partir desse experimento observou que ao aumentar a intensidade da luz incidente, isso levava a um aumento na corrente elétrica gerada, indicando que mais elétrons estavam sendo emitidos da superfície metálica. Também percebeu que, ao aumentar a frequência da luz incidente, a corrente elétrica não aumentava linearmente. Em vez disso, havia um ponto de frequência abaixo do qual não importava quanto a intensidade da luz fosse aumentada, os elétrons não seriam emitidos.

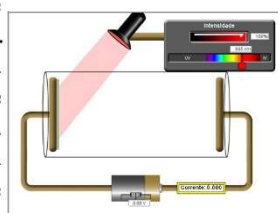
AS CONTRIBUIÇÕES DE PHILIP LENARD

Ele colocou um eletrodo na câmara, próximo à superfície do material metálico, que seria atingido pelos elétrons emitidos. Lenard então, utilizou-se de uma fonte de luz, geralmente uma lâmpada de descarga, que emite radiação eletromagnética em uma faixa de frequência conhecida e variava a frequência da luz incidente, que é a frequência da luz que atinge a superfície metálica, alterando a lâmpada ou utilizando filtros de cores para selecionar diferentes comprimentos de onda.



AS CONTRIBUIÇÕES DE PHILIP LENARD

Acima dessa frequência, a corrente aumentava significativamente. Lenard também mediu a energia cinética dos elétrons emitidos. Ele observou que a energia cinética máxima dos elétrons aumentava com a frequência da luz incidente e era independente da intensidade da luz.



SIMULADOR DE EFEITO FOTOELÉTRICO



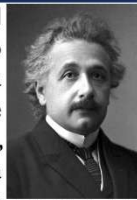
https://www.vascik.cz/data/android/physicschool/template.php?js=opt_fotoelek&l=pt

AS CONTRIBUIÇÕES DE PHILIP LENARD

O experimento de Philipp Lenard sobre o efeito fotoelétrico foi um dos primeiros indícios de que a luz possuía característica de partícula, ao contrário da visão tradicional da luz como uma onda contínua e foi um marco importante para a compreensão da natureza dual da luz e na confirmação das teorias quânticas emergentes do final do século XIX.

O EFEITO FOTOELÉTRICO EXPLICADO À LUZ DE ALBERT EINSTEIN

Coube ao físico alemão Albert Einstein o papel fundamental para a explicação teórica do Efeito Fotoelétrico a partir de uma interpretação baseada na teoria quântica de Max Planck. Seu trabalho, publicado em 1905, foi uma das contribuições mais influentes para o desenvolvimento da mecânica quântica e teve um impacto significativo na compreensão da natureza dual da luz como onda-partícula.



Esta Foto do Autor Desconhecido está licenciada em CC-BY-SA

Entretanto, os fatos mostravam uma realidade um pouco diferente. Investigações mais aprofundadas sobre o fenômeno, realizadas por um dos alunos de Heinrich Hertz, o físico húngaro-alemão Phillip E. A. von Lenard (1862-1947), estabeleceram algumas características para o efeito fotoelétrico:

1. Nenhum fotoelétron é observado se a radiação iluminante tem uma frequência inferior a certo valor, denominado **frequência de corte** (f_0), que é uma característica do metal iluminado.
2. Se a frequência da radiação iluminante excede a frequência de corte, observa-se que o número de fotoelétrons emitidos é proporcional à intensidade da radiação incidente no metal.
3. O fluxo de fotoelétrons aparece praticamente no mesmo instante em que a radiação iluminante incide no metal. Medições indicam que a emissão ocorre em menos de 1 ns (1 nanossegundo = 10^{-9} s) após o início da iluminação.
4. A energia cinética máxima dos fotoelétrons ($E_{c(max)}$) aumenta linearmente com o aumento da frequência da radiação iluminante.

O EFEITO FOTOELÉTRICO EXPLICADO À LUZ DE ALBERT EINSTEIN

Einstein utilizou em sua teoria quântica da luz os resultados observados no experimento de Efeito Fotoelétrico de Philipp Lenard. Ele propôs que, quando a luz atinge uma superfície metálica, ela transfere sua energia para elétrons na superfície. Se a energia de um fóton incidente for suficiente para superar a energia de ligação dos elétrons no metal, esses elétrons serão ejetados da superfície, criando assim, uma corrente elétrica.

O EFEITO FOTOELÉTRICO EXPLICADO À LUZ DE ALBERT EINSTEIN

Einstein relacionou a energia de um fóton (E) com sua frequência (f) usando a já conhecida equação de Planck:

$$E = h \cdot f$$

Onde:

E = Energia do fóton

h = Constante de Planck, aproximadamente $6,626 \cdot 10^{-34}$ J.s

f = Frequência da onda luminosa

O EFEITO FOTOELÉTRICO EXPLICADO À LUZ DE ALBERT EINSTEIN

Por meio da Física Clássica e da teoria ondulatória da luz não é possível explicar certas características do efeito fotoelétrico.

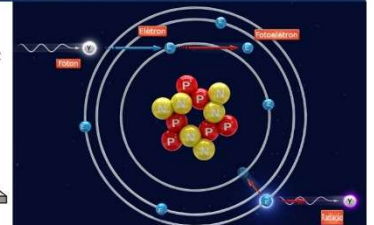
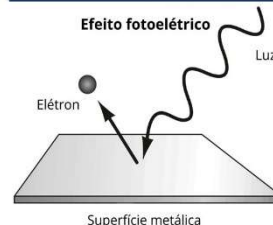
Com base na visão clássica, esperava-se que o efeito fotoelétrico apresentasse as seguintes características:

- O efeito fotoelétrico deveria ocorrer com qualquer radiação iluminante, independentemente de sua frequência.
- A energia dos elétrons extraídos deveria aumentar ilimitadamente com o aumento da intensidade da radiação iluminante utilizada, uma vez que tal intensidade é proporcional ao quadrado da intensidade do campo elétrico oscilante da radiação, e um campo elétrico mais intenso aplicaria uma força de maior intensidade sobre o elétron.
- Um elétron só seria emitido depois de armazenar energia em quantidade maior que sua energia de ligação ao material. Para uma radiação iluminante de baixa intensidade, o intervalo de tempo necessário para isso seria grande o suficiente para ser observado um atraso considerável na emissão de elétrons.

O EFEITO FOTOELÉTRICO EXPLICADO À LUZ DE ALBERT EINSTEIN

Em seus trabalhos, Einstein partiu da hipótese de que a luz não era apenas uma onda eletromagnética, como previsto pela teoria clássica de Maxwell, mas possuía também, propriedades discretas de partículas e a partir dessa hipótese, Einstein propõem que a luz poderia ser quantizada, ou seja, emitida e absorvida em unidades discretas de energia, às quais denominou de “átomos de luz”.

O EFEITO FOTOELÉTRICO EXPLICADO À LUZ DE ALBERT EINSTEIN



O EFEITO FOTOELÉTRICO EXPLICADO À LUZ DE ALBERT EINSTEIN

$$E = h \cdot f$$

Essa equação expressa a ideia de que a energia dos fótons é diretamente proporcional à frequência da luz. Isso significa que fótons de frequências mais altas têm mais energia e por isso são capazes de arrancar elétrons da superfície iluminada.

O EFEITO FOTOELÉTRICO EXPLICADO À LUZ DE ALBERT EINSTEIN

Albert Einstein introduziu também em seus estudos, o conceito de "função trabalho" (W), que representa a energia mínima necessária para ejetar um elétron da superfície de um material. Essa energia mínima está associada a uma frequência mínima da radiação incidente, denominada de frequência de corte (f_0). Se a energia de um fóton incidente ($h \cdot f$) for maior ou igual à função trabalho ($h \cdot f \geq W$), o elétron pode ser ejetado da superfície. Caso contrário, o efeito fotoelétrico não seria observado.

$$E_{C(\text{máx})} = h \cdot f - W$$

Essa fórmula constitui a **equação de Einstein** para o efeito fotoelétrico.

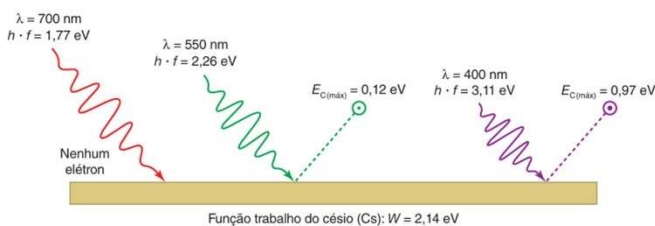


Figura 6.9 Esquema da emissão fotoelétrica em uma placa de césio (Cs) iluminada pelas radiações vermelha, verde e violeta. (Representação sem escala, uso de cores-fantasia.)

Uma lâmina de sódio é "iluminada" com radiação de comprimento de onda 300 nm. A função trabalho do sódio vale 2,36 eV. Determine:

- a frequência de corte (f_0) do sódio;
- o comprimento de onda de corte (λ_0) do sódio;
- a energia dos fótons incidentes;
- a energia cinética máxima dos fotoelétrons emitidos.

(Dados: $h = 4,14 \cdot 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$; $c = 3,0 \cdot 10^8 \text{ m/s}$)

Resolução:

- a) Na equação de Einstein do efeito fotoelétrico, quando $f = f_0$, $E_{C(\text{máx})} = 0$. Então:

$$W = h \cdot f_0 \Rightarrow 2,36 = 4,14 \cdot 10^{-15} \cdot f_0 \Rightarrow f_0 = 5,70 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$$

- b) Como $c = \lambda_0 \cdot f_0$, temos: $\lambda_0 = \frac{c}{f_0} \Rightarrow \lambda_0 = \frac{3,0 \cdot 10^8}{5,70 \cdot 10^{14}} \Rightarrow \lambda_0 = 5,26 \cdot 10^{-7} \text{ m} = 526 \text{ nm}$

- c) A energia dos fótons incidentes é calculada por: $E = h \cdot f = h \cdot \frac{c}{\lambda}$

Então:

$$E = \frac{4,14 \cdot 10^{-15} \cdot 3 \cdot 10^8}{300 \cdot 10^{-9}} \Rightarrow E = 4,14 \text{ eV}$$

- d) A energia cinética máxima dos fotoelétrons ($E_{C(\text{máx})}$) é dada por:

$$E_{C(\text{máx})} = h \cdot f - W \Rightarrow E_{C(\text{máx})} = 4,14 \text{ eV} - 2,36 \text{ eV} \Rightarrow E_{C(\text{máx})} = 1,78 \text{ eV}$$

O EFEITO FOTOELÉTRICO EXPLICADO À LUZ DE ALBERT EINSTEIN

De acordo com a equação de Einstein para o efeito fotoelétrico, não existem dois materiais com frequências de corte e funções trabalho iguais. As grandezas f_0 e W são características intrínsecas de cada material estudado.

Einstein também explicou a relação entre a energia cinética (E_c) dos elétrons e a energia do fóton incidente. A energia cinética dos elétrons é dada por:

$$E_c = h \cdot f - W.$$

A tabela abaixo mostra valores da função trabalho (W) para metais usuais.

Valores da função trabalho (W) para metais usuais	
Metal	W (eV)
Césio (Cs)	2,14
Sódio (Na)	2,36
Magnésio (Mg)	3,66
Alumínio (Al)	4,16
Ferro (Fe)	4,74
Cobre (Cu)	4,82
Platina (Pt)	5,53
Ósmio (Os)	5,93*

* Maior valor para os elementos químicos.

Dados obtidos em: LIDE, D. R. *CRC Handbook of Chemistry and Physics*. Flórida: CRC Press, 2015.

REFERÊNCIAS

- EISBERG, Robert; RESNICK, Robert. **Física quântica: Átomos Moléculas, Sólidos, Núcleos e Partículas**. 23ª Edição. Rio de Janeiro: Campus-Elsevier, 2010. 928 p.
- ELENO, Luiz Tadeu Fernandes. **Fenômenos de Transporte: Corpo Negro**. São Paulo: USP, 2010. Disponível em: <https://computeel.org/LOM3260/assets/classes/CorpoNegro.pdf>. Acesso em 17 abr. 25.
- FRAZÃO, Diíva. **Max Planck: Biografia**. São Paulo: ebiografias, 2020. Disponível em: https://www.ebiografia.com/max_planck/. Acesso em 12 mai. 24.
- MARTINS, Roberto de Andrade. **História da teoria quântica: a dualidade onda-partícula, de Einstein a De Broglie**. Roberto de Andrade Martins, Pedro Sérgio Rosa. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2014.
- NUSSENZVEIG, Herch Moysés. **Curso de Física – Vol. 4: Ótica, Relatividade e Física Quântica**. 2ª Ed. São Paulo: Editora Blucher, 2014.
- TORRES, Carlos Magno... [et al.]. **Física: Ciência e Tecnologia**. Vol. 3 – 4ª Ed. São Paulo: Moderna, 2016.



MNPEF
Mestrado Nacional
Profissional em
Ensino de Física

SBF
SOCIEDADE BRASILEIRA DE FÍSICA

CAPES

APENDICE B – PRODUTO EDUCACIONAL

UNIVERSIDADE REGIONAL DO CARIRI - URCA

DEPARTAMENTO DE FÍSICA

MESTRADO NACIONAL PROFISSIONAL EM ENSINO DE FÍSICA

POLO 31

PRODUTO EDUCACIONAL

**SEQUÊNCIA DIDÁTICA PARA ESTUDO DO EFEITO FOTOELÉTRICO NA PERSPECTIVA
DA TEORIA DOS CAMPOS CONCEITUAIS.**

AUTORES: Claudio Reinke, Claudio Rejane da Silva Dantas.

**Juazeiro do Norte-CE
2025**

Claudio Reinke

Este produto educacional é parte integrante da dissertação: *EFEITO FOTOELÉTRICO E GERAÇÃO DA ENERGIA SOLAR NA PERSPECTIVA DOS CAMPOS CONCEITUAIS COM ESTUDANTES DO ENSINO MÉDIO DO MUNICÍPIO DE SÃO JOÃO DO RIO DO PEIXE-PB*, desenvolvida no âmbito do Programa de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física, polo 31 – URCA/CE Juazeiro do Norte – CE, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

APRESENTAÇÃO

Estimados Professores, este material foi elaborado como um guia, oferecendo a você, uma proposta para o ensino do Efeito Fotoelétrico para estudantes do Ensino Médio da Educação Básica. A sua concepção teórica e metodológica é fundamentada na Teoria dos Campos Conceituais de Gerard Vergnaud, buscando proporcionar uma aprendizagem articulada dos conceitos físicos com situações práticas e o cotidiano social.

A intenção é promover um ambiente de aprendizagem colaborativo, onde o conhecimento é construído de forma gradual, partindo de noções mais simples para as de maior complexidade.

A jornada de aprendizagem se inicia com uma investigação para identificar o nível de conhecimento dos estudantes e suas próprias concepções sobre o Efeito Fotoelétrico. Em seguida, a abordagem se torna prática com a proposta de realização de experimentos utilizando células fotovoltaicas expostas a diferentes fontes luminosas.

A partir das observações e hipóteses levantadas, o professor conduz a etapa de ampliação conceitual, na qual faz a exposição formal do conteúdo utilizando recursos diversificados como slides, vídeos e animações.

Para aprofundar a compreensão das interações microscópicas, a sequência incorpora o uso de simuladores digitais que permitem aos alunos manipularem variáveis como comprimento de onda e intensidade da luz. Posteriormente, o foco se desloca para a aplicação dos conhecimentos em uma aula expositiva focada na resolução de problemas e exercícios de aprofundamento.

Ao longo do percurso, a avaliação proposta é de caráter formativo e contínuo, por meio de rubricas que analisam o desenvolvimento de múltiplas competências. Esse método avalia desde a compreensão dos conceitos básicos e a interpretação de resultados até a capacidade de realizar análises quantitativas, considerando a participação ativa dos estudantes em todas as fases.

A estrutura da sequência apresenta-se como um caminho coeso, porém flexível, permitindo que você, docente, adapte os recursos e estratégias à sua realidade, oferecendo uma experiência de ensino-aprendizagem ativa e contextualizada sobre um dos temas fundamentais da Física Moderna.

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

SUMÁRIO:

1. Introdução.....	5
2. A Teoria dos Campos Conceituais de Gerard Vergnaud.....	6
3. Sequência Didática para o Ensino do Efeito Fotoelétrico.....	9
3.1 Investigação do Campo Conceitual por Questionamentos.....	10
3.2 Investigação do Campo Conceitual por Experimentação.....	10
3.3 Ampliação do Campo Conceitual por meio de Aula Expositiva.....	11
3.4 Ampliação do Campo Conceitual por meio de simuladores.....	12
3.5 Resolução de Problemas e Proposta de Atividades.....	15
3.6 Avaliação de Desempenho e Domínio do Campo Conceitual.....	15
4. Considerações Finais.....	19
5. Referências.....	21

1. Introdução

O ensino de Física Moderna, e em especial do Efeito Fotoelétrico, na Educação Básica representa um desafio constante para os professores e estudantes, sobretudo quando os conceitos são abordados de forma puramente abstrata e desvinculada de aplicações práticas. Buscando superar parte desse desafio e promover uma aprendizagem contextualizada, a presente sequência foi desenvolvida como uma proposta metodológica que visa permitir aos estudantes o estabelecimento de conexões significativas entre os conceitos teóricos e as situações que lhes dão sentido.

Para nortear esta proposta, foi adotada como principal referencial teórico e metodológico a Teoria dos Campos Conceituais (TCC) de Gerard Vergnaud. Um dos fundamentos dessa teoria é a articulação contante entre o conjunto de conceitos, as situações que desafiam os estudantes a aplicarem esses “conceitos-em-ação” e as diversas formas de representação utilizadas para ilustrá-los “Teoremas-em-ação”.

A teoria preconiza uma progressão de conhecimentos, iniciando por noções mais simples e avançando gradualmente para as de maior complexidade, a fim de facilitar a construção do saber. Nesse processo, o professor atua como um mediador, criando um ambiente de aprendizagem colaborativa e observando os invariantes operatórios — os conhecimentos implícitos e explícitos utilizados pelos estudantes — para melhor guiar o processo de aprendizagem.

A utilização desta sequência em sala de aula visa estimular a participação ativa dos estudantes por meio de diferentes recursos e metodologias. A proposta promove o desenvolvimento de habilidades de raciocínio e resolução de problemas ao confrontá-los com desafios práticos e experimentos.

Além disso, a abordagem considera a avaliação formativa como parte contínua do processo, permitindo que os estudantes reflitam sobre seu próprio aprendizado. O resultado esperado não é apenas a assimilação de conteúdo, mas a formação de um entendimento mais profundo, contextualizado e eficiente do campo conceitual do Efeito Fotoelétrico, validando esta sequência como uma ferramenta importante para o ensino de Física em nossas escolas.

2. A Teoria dos Campos Conceituais de Gerard Vergnaud

A Teoria dos Campos Conceituais, desenvolvida pelo psicólogo e educador matemático francês Gerard Vergnaud (1933-2021), oferece uma estrutura teórica e metodológica eficaz para compreender como os aprendizes constroem e se utilizam do conhecimento ao longo de suas existências.

Trata-se de uma teoria psicológica do conceito, ou melhor, da **conceitualização do real**, que permite situar e estudar as filiações e ruptura do ponto de vista de seu conteúdo conceitual. Ela também possibilita analisar a relação entre os conceitos enquanto conhecimentos explícitos e os invariantes operatórios implícitos nos comportamentos dos sujeitos em determinadas situações, bem como aprofundar a análise das relações entre significados e significantes. (Vergnaud, 1990. P. 133, Grifos nossos).

Formado em matemática e filosofia e com doutorado em psicologia sob a orientação de Jean Piaget, Vergnaud propõe uma teoria psicológica da conceitualização do real. Sua abordagem se destaca por analisar a dinâmica da aprendizagem como um processo de constante evolução e ressignificação, que se estende por um longo período, muitas vezes ultrapassando o tempo escolar. (FRANCHI, 1999)

A teoria busca explicar como o conhecimento é mobilizado em diversas situações, focando na relação entre os conceitos explícitos e os "invariantes operatórios" — conhecimentos implícitos que guiam as ações dos sujeitos.

Vergnaud argumenta que um conceito não pode ser reduzido à sua definição formal; seu sentido é construído por meio da resolução de problemas e da interação com múltiplas situações. Essa perspectiva ressalta a importância de um ensino para além da memorização, promovendo a utilização do conhecimento em contextos práticos e pleno de significados. (VERGNAUD, 1990).

Um dos pilares da teoria é a definição de Campo Conceitual como um conjunto de situações cujo domínio exige a articulação de diversos conceitos, procedimentos e representações simbólicas.

Por exemplo, o campo conceitual da multiplicação engloba não apenas a operação matemática, mas também noções de proporcionalidade, combinação e área, além de diferentes estratégias e propriedades como a comutatividade e a distributividade. (VERGNAUD, 1993)

Para analisar a construção do conhecimento, Vergnaud introduz o tripleto (S, I, R), onde S representa o conjunto de situações (a realidade ou referente), I o signi-

ficado (os invariantes e a compreensão do sujeito) e R o significante (as formas de representar o conhecimento, como a linguagem matemática, equações, modelos etc.). Essa estrutura ilustra a interconexão fundamental entre a realidade, o pensamento e a ação. (VERGNAUD, 1998)

A teoria dos campos conceituais propõe que a aprendizagem e a compreensão dos conceitos e teoremas não se limitam à memorização de definições e provas, mas envolvem a capacidade de aplicar esses conhecimentos em contextos variados, o que é essencial para o desenvolvimento de competências cognitivas complexas. (CEDRAN, et al, 2019).

As competências cognitivas complexas referem-se às habilidades que envolvem um alto nível de processamento mental, como análise, síntese, avaliação e resolução de problemas. Elas vão além do simples conhecimento formal e incluem a capacidade de aplicar o conhecimento em situações novas e complexas.

Essas competências são desenvolvidas por meio da realização de tarefas e situações que exigem pensamento crítico, como raciocínio lógico, argumentação, e a capacidade de trabalhar com conceitos em várias disciplinas ou áreas do conhecimento.

Na Teoria dos Campos Conceituais, o desenvolvimento dessas competências é entendido como um processo que ocorre através da interação entre o conhecimento teórico e prático, com base em situações de aprendizagem relevantes. (CEDRAN, et al, 2019).

Outro elemento central da Teoria de Vergnaud são os esquemas, definidos como a organização invariante do comportamento para uma determinada classe de situações. Os esquemas são as estruturas cognitivas que permitem ao sujeito agir de forma operatória, sendo compostos por conhecimentos implícitos chamados de invariantes operatórios.

Estes invariantes são as regras e princípios que permanecem constantes em diferentes contextos, permitindo a transferência de aprendizagem. Os invariantes operatórios se manifestam de duas formas principais:

- Conceitos-em-ação: Categorias ou propriedades que o indivíduo considera pertinentes e aplica de forma intuitiva para resolver um problema, sem necessariamente ter consciência da definição formal. (VERGNAUD, 1996)

- Teoremas-em-ação: Proposições consideradas verdadeiras sobre o real que guiam a ação do sujeito, mesmo que ele não conheça a demonstração formal do teorema ou sua total validade. (VERGNAUD, 1996)

Em sua Teoria dos Campo Conceituais, Gerard Vergnaud foi para além das ideias de seu mentor, Jean Piaget. Embora ambos vissem a aprendizagem como um processo progressivo, Piaget focou em estágios universais do desenvolvimento cognitivo.

Vergnaud, por sua vez, deu ênfase à importância do conteúdo específico do conhecimento e do contexto das situações em que ele é acessado durante a aprendizagem, tornando sua teoria mais aplicada à didática. Ele expandiu a noção de esquema de Piaget, conectando-a diretamente à relação entre o aprendiz e a situação de aprendizagem, representada no termo sujeito-em-situação. (MOREIRA, 2002; FRANCHI, 1999)

A Teoria dos Campos Conceituais é, portanto, considerada uma abordagem neopiagetiana que oferece um valioso referencial para a educação, especialmente nas áreas de Matemática, Física e outras ciências. Ela propõe que o ensino deve ser organizado em torno de situações diversificadas e contextualizadas com a realidade, permitindo que os estudantes construam uma compreensão profunda e integrada dos conceitos aprendidos ao longo de sua existência. (CEDRAN, et al, 2019).

A teoria dos campos conceituais, em nosso entender, é uma contribuição significativa para a educação, pois oferece uma visão dinâmica e integrada do conhecimento, reconhece a diversidade e a complexidade das situações que envolvem a aprendizagem, e valoriza o papel do sujeito na construção e na mobilização do conhecimento, tendo implicações diretas no ensino e aprendizagem, pois propõe que os estudantes sejam expostos a situações diversificadas e contextualizadas, que estimulem o seu raciocínio e a sua criatividade.

Além disso, a teoria defende que os conceitos não sejam ensinados de forma isolada, mas integrados em campos mais amplos e complexos, que reflitam as relações entre eles.

Vergnaud dedicou a sua vida à pesquisa e à formação de professores, especialmente de matemática, tendo orientado diversos professores brasileiros, publicado inúmeros livros e artigos sobre a sua teoria e as suas aplicações, deixando um legado inestimável para a educação em diversos países.

3. Sequência Didática para o Ensino do Efeito Fotoelétrico.

Uma sequência didática fundamentada na Teoria dos Campos Conceituais de Gerard Vergnaud transcende a mera transmissão tradicional de conhecimento e para ser exitosa e completa, ela deve ser concebida como um percurso investigativo através de um campo de situações concretas e desafiadoras.

Tal percurso deve, necessariamente, mapear o campo conceitual, ativar os esquemas dos estudantes através de problemas, promover a elaboração de invariantes operatórios pela ação e reflexão e, por fim, introduzir a representação formal como ferramenta para consolidar e expressar o conhecimento construído.

Ao adotar essa perspectiva, o ato de ensinar reconhece a complexidade da aprendizagem e valoriza o papel ativo do sujeito, fomentando uma compreensão verdadeiramente significativa e duradoura dos conceitos de Física.

Na utilização desta sequência didática é importante identificar os conceitos centrais que serão explorados e como eles se relacionam com as situações práticas que os estudantes vivenciarão durante as aulas, permitindo que esses conceitos sejam vivenciados em contextos educativos reais.

Além disso, deve ser levado em conta a progressão dos conteúdos a serem ensinados, começando por conceitos mais simples e avançando para aqueles que envolvem maior complexidade, de modo a facilitar a construção gradual do conhecimento e o fortalecimento do domínio do campo conceitual em estudo.

Outro aspecto a ser considerado é a diversidade de representações e formas de abordagem dos conteúdos, utilizando diferentes recursos didáticos e metodologias que promovam a participação ativa dos estudantes. A proposta de situações-problemas que desafiam os estudantes a aplicarem os conceitos em ação é essencial, pois promove o desenvolvimento de habilidades de raciocínio e resolução de problemas.

Também é importante considerar a utilização da avaliação formativa ao longo do processo. Nesse sentido, é importante que o professor atue como mediador, promovendo um ambiente de aprendizagem colaborativa onde os estudantes possam discutir, questionar e construir conhecimentos de forma conjunta. Essa abordagem não apenas enriquece a experiência de aprendizagem, mas também contribui para a formação de um entendimento mais profundo e contextualizado do campo conceitual em questão.

Com base nessas premissas e reflexões, apresentamos a seguir as etapas da Sequência Didática para o estudo do Efeito Fotoelétrico estruturada de forma a ser coerente, progressiva e alinhada aos princípios da Teoria dos Campos Conceituais de Vergnaud, validando-a como um importante referencial teórico e metodológico para o ensino de Física.

A seguir, na tabela 1, é apresentado um quadro síntese das etapas, objetivos, elementos dos fundamentos teóricos utilizados em cada etapa e os recursos e dinâmicas empregadas em cada momento da sequência.

Tabela 1 – Quadro Síntese da Sequência Didática

ETAPA	OBJETIVO PRINCIPAL	FUNDAMENTO TEÓRICO EM (VERGNAUD)	RECURSOS DINÂMICAS
I Questionamentos prévios.	Diagnosticar conhecimentos prévios e ativar esquemas mentais.	Invariantes operatórios e situações-problema.	Discussão oral com questões de natureza etimológica e conceituais.
II Experimentação	Vincular conceitos a fenômenos observáveis.	Conceitos-em-ação em situações concretas.	Kits alimentados por células fotovoltaicas e análise em grupo.
III Aulas Contextualizadas	Sistematizar conhecimentos científicos.	Validação e modelagem de conceitos.	Slides, vídeos, animações e leitura dirigida.
IV Uso de Simuladores	Explorar relações quantitativas e limites do fenômeno.	Esquemas, Teoremas e Conceitos-em-Ação mediados por ferramentas.	Simuladores (PhET/Vascak), manipulação de variáveis.
V Resolução de Problemas	Aplicar conceitos em cálculos e contextos reais.	Teoremas-em-ação e formalização matemática.	Exercícios analíticos e conceituais.
VI Avaliação Formativa	Verificar domínio conceitual multidimensional.	Rubricas baseadas em competências integradas ao Campo Conceitual.	Critérios de desempenho

Na sequência é descrito os métodos, recursos e dinâmicas que a serem adotadas em cada etapa da sequência didática para sua mais eficiente utilização.

3.1 Investigação do Campo Conceitual por Questionamentos.

Nesse primeiro momento, o professor pode iniciar a aula trazendo alguns questionamentos para que os estudantes respondam e assim, possa identificar o nível de conhecimento deles sobre conceitos relacionados ao efeito fotoelétrico. Nesse primeiro momento, podem ser utilizadas questões do tipo:

- 5) *“O que as palavras fotografia, fotossíntese, fotocópia, fotossensível têm em comum e qual o significado do radical compartilhado por esses termos?”*
- 6) *“Você conhece ou já ouviu falar sobre o Efeito Fotoelétrico? Explique.”*
- 7) *“Mesmo se não ouviu ou conhece, que você entende ou imagina que seja, o Efeito Fotoelétrico?”*
- 8) *“Que tecnologias você acredita que podem estar associadas ao Efeito Fotoelétrico?”*

As respostas fornecidas pelos estudantes devem ser coletadas analisadas, refletidas e comentadas pelo professor posteriormente, de modo que eles consigam estabelecer a relação dos termos com radical etimológico foto com o espectro visível da luz, suas interações com a matéria e as tecnologias associadas ao efeito.

3.2 Investigação do Campo Conceitual por Experimentação.

Na sequência da aula, utilizando-se de kits de robótica educacional, brinquedos ou outros equipamentos alimentados por células fotovoltaicas, deve ser realizado um experimento, onde as células fotovoltaicas dos modelos devem ser expostas diretamente à luz solar, logo após, à luz de uma lâmpada incandescente; posteriormente, à luz de uma lâmpada fluorescente e/ou de led e em cada situação, solicitar que os estudantes façam anotações e observações sobre o comportamento dos equipamentos alimentadas pelas células fotovoltaicas. Essa atividade pode ser realizada em grupos ou de forma demonstrativa pelo professor a depender da quantidade de material disponível para o experimento.

A partir do experimento, os estudantes podem ser divididos em grupos de trabalho com até 4 integrantes e responderem questões do tipo:

- e) *“Qual o princípio de funcionamento das células fotovoltaicas?”*
- f) *“Que tipo de transformações de energia ocorreram durante o experimento?”*
- g) *“Quais diferenças foram observadas ao se substituir o tipo de fonte luminosa que alimentava as células?”*
- h) *“Como vocês explicam ou justificam essas diferenças observadas?”*

Após responderem as questões propostas, os estudantes podem ser convidados a fazer a socialização e discussão de suas respostas com os demais grupos. Nesse momento, o professor deve observar e anotar as respostas de forma a perceber os invariantes operatórios (Conceitos-em-ação e Teoremas-em-ação) utilizados pelos estudantes e argumentos pertinentes ao campo conceitual que será abordado em profundidade nas próximas aulas.

3.3 Ampliação do Campo Conceitual por meio de Aula Expositiva.

Nessa etapa, o professor deve iniciar uma exposição do conteúdo referente ao Efeito Fotoelétrico por meio de materiais diversificados, como slides ilustrados, vídeos explicativos, animações e recursos visuais, como diagramas e gráficos, para facilitar a compreensão dos conceitos e princípios relativos ao tema.

Um pré-requisito para a utilização dessa sequência didática seria que os estudantes já tivessem conhecimentos sobre a Teoria Quântica de Planck e quantização de energia.

Caso, isso ainda não seja uma realidade para os estudantes, esses assuntos podem ser tratados pelo professor no início de sua aula expositiva por meio de seu material didático e partir de aí destacar os experimentos realizados por Heinrich Hertz, Philipp Lenard e por fim detalhar os argumentos propostos por Albert Einstein para explicar o Efeito Fotoelétrico.

Durante a aula expositiva, o professor deve recorrer aos argumentos e conceitos trazidos pelos estudantes nas atividades anteriores, evidenciando, validando e modelando esses argumentos de acordo com o saber científico apresentado em textos disponíveis aos estudantes ou nas fontes bibliográficas utilizadas pelo professor para compor o seu material de apresentação.

Na sequência deve ser recomendado aos estudantes a leitura do capítulo que trata do Efeito Fotoelétrico no livro didático utilizado pela escola. Essa leitura

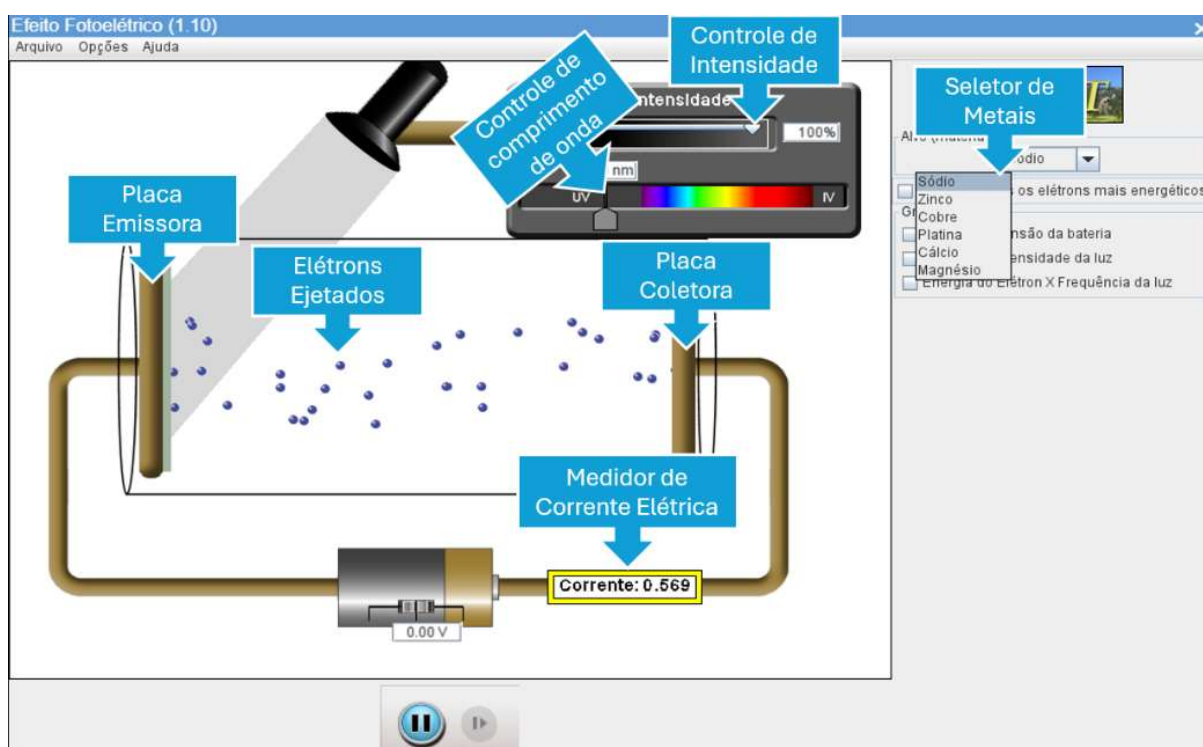
pode ser feita em sala, caso haja tempo hábil ou como uma atividade complementar extraclasse. Durante a leitura, os estudantes devem ser orientados a fazer apontamentos de conceitos, conhecimentos e dúvidas por meio de anotações em seu material de estudo (cadernos ou bloco de notas).

3.4 Ampliação do Campo Conceitual por meio de simuladores

Nessa quarta etapa da sequência, a proposta é que seja apresentado aos estudantes um Objeto Digital de Aprendizagem (ODA) que se trata de um Simulador do Efeito Fotoelétrico disponível na plataforma **Phet** da Universidade do Colorado através do link: https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulations/photoelectric/about.

Na figura 1 apresentamos a tela inicial do simulador e as barras para controle das variáveis e elementos do ambiente simulado.

Figura 1 – Tela do Simulador Efeito Fotoelétrico da Plataforma PHET



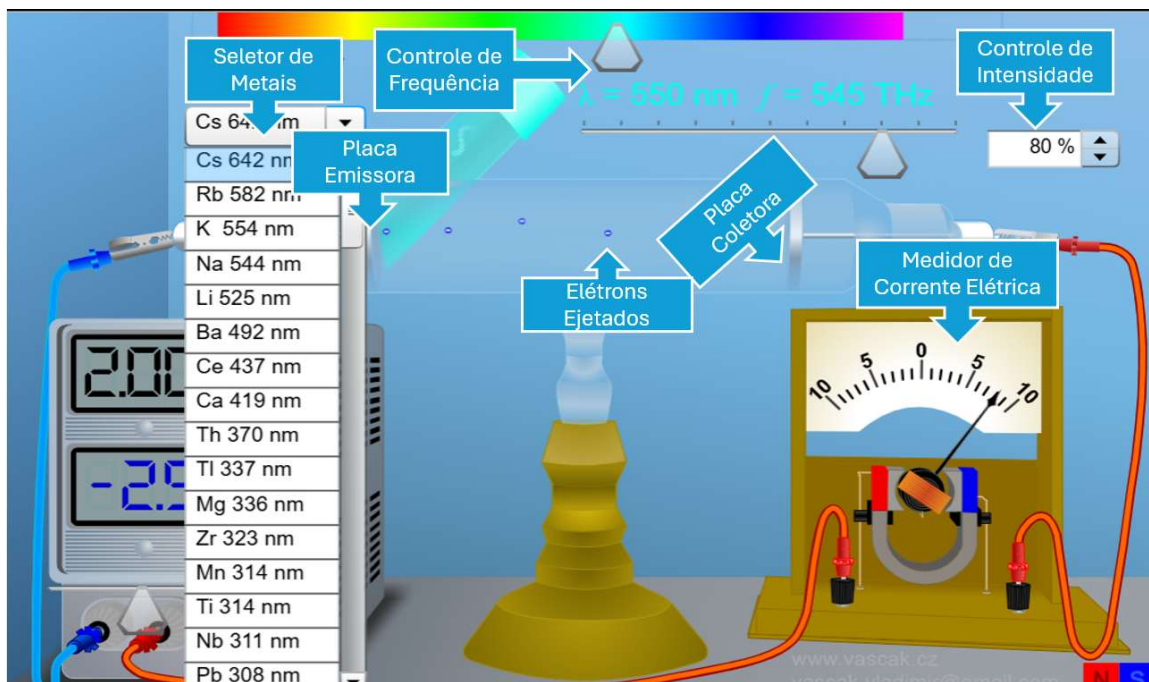
Fonte: https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulations/photoelectric

Uma outra opção é a utilização do Simulador *Efeito Fotoelétrico*, produzido pelo Professor Vladimir Vascak e disponível na plataforma *Física na Escola* através do link: [Efeito fotoelétrico](#). Esse simulador se destaca por conter um número maior de opções de metais para simulação e por exibir os valores correspondentes de fre-

quência luminosa para cada comprimento de onda, o que torna o seu uso mais didático para as simulações do fenômeno fotoelétrico, sem a necessidade de cálculos para obtenção de valores da frequência luminosa em função do comprimento de onda.

Na figura 2 apresentamos a tela inicial do simulador e as barras para controle das variáveis e elementos do ambiente simulado.

Figura 2 – Tela do Simulador Efeito Fotoelétrico da Plataforma Física na Escola



Fonte: <https://www.vascak.cz/data/android/physicsatschool>

O professor deve orientar os estudantes quanto ao funcionamento e operacionalização do simulador adotado para suas aulas, que pode ser utilizado em computadores ou smartphones, e, permitir que os estudantes manipulem o ODA, variando os comprimentos de ondas da fonte luminosa, sua intensidade e testando essas variações em diferentes materiais disponíveis em cada um dos simuladores, de modo, que os estudantes possam perceber como ocorrem as interações entre fótons e elétrons, observando que a energia dos fotoelétrons depende da frequência da radiação incidente e não da intensidade desta.

Entender que para cada metal, existe uma frequência mínima da radiação eletromagnética abaixo da qual não são produzidos fotoelétrons, por mais intensa que seja esta radiação. Para isso, o professor lançará mão de alguns questionamen-

tos que serão respondidos pelos estudantes organizados em grupos, durante ou após a manipulação do simulador.

Como exemplo, deixamos as seguintes questões como modelo:

- e) *“Qual é a relação entre a intensidade da luz incidente na superfície refletora e o número de elétrons emitidos?”*
- f) *“O que acontece quando alteramos o comprimento de onda no simulador?”*
- g) *“É possível perceber a existência de uma quantidade mínima de energia para o efeito acontecer?”*
- h) *“O efeito apresenta as mesmas características para todos os elementos disponíveis na simulação? Explique o que se observa ao aplicarmos a simulação em diferentes materiais.”*

Após esse período de utilização do simulador, o professor mediará um momento de sistematização das observações e informações obtidas durante a aula, retomando também as observações realizadas durante o experimento da etapa 3.2, onde é possível verificar que a radiação emitida por uma lâmpada de led ou fluorescente não é capaz de fazer funcionar satisfatoriamente as células fotovoltaicas, enquanto a radiação emitida pela lâmpada incandescente a faz funcionar como quando exposta à radiação solar.

Espera-se que as respostas obtidas para os questionamentos propostos durante a utilização dos simuladores reflitam um desenvolvimento progressivo dos campos conceituais dos estudantes sobre o efeito fotoelétrico à medida que novas observações e respostas são construídas por eles. Inicialmente baseadas em percepções visuais e experimentação empírica, essas respostas podem evoluir para conceitos mais estruturados, conforme prevê a Teoria dos Campos Conceituais, a partir da mediação feita pelo professor entre as noções intuitivas e as formalizações científicas mediadas pelo ambiente de aprendizagem interativo que o simulador proporciona e também pelo material teórico utilizado durante as aulas como slides, imagens, vídeos e textos didáticos disponíveis aos estudantes.

Esse ambiente de aprendizagem cria diferentes situações em que será possível notar que os estudantes recorrem frequentemente aos invariantes operatórios (conceitos-em-ação e teoremas-em-ação) presentes em sua estrutura cognitiva para responder aos estímulos e desafios desse ambiente, fortalecendo e consolidando a cada nova situação o campo conceitual relacionado ao Efeito Fotoelétrico.

3.5 Resolução de Problemas e Proposta de Atividades.

Nessa etapa, propomos que seja ministrada uma aula expositiva por meio da utilização de uma atividade impressa com exemplos de questões e exercícios de aprofundamento das características mais relevantes do Efeito Fotoelétrico, explorando tópicos como cálculos da função trabalho; cálculo da energia de um fóton, relação matemática entre frequência e energia, entre outros.

À medida em que o professor explica e resolve as questões impressas, fará discussões dos resultados obtidos, aprofundando os conceitos apresentados nas aulas anteriores e trazendo novos elementos ao conteúdo, como as deduções matemáticas do Efeito Fotoelétrico e exemplos de sua aplicação em sistemas de pequena e grande escala, como os kits ou equipamentos utilizados no experimento da etapa 3.2 e os sistemas de geração de energia fotovoltaica presentes em muitas casas e cidades brasileiras.

Após esse momento, o professor poderá entregar aos estudantes, uma folha tarefa com questões inéditas, ou adaptadas que serão resolvidas e devolvidas ao professor para correção, apontamentos e feedbacks que serão dados à turma em aulas posteriores.

A sugestão é que a folha tarefa contenha questões fechadas com alternativas, sendo apenas uma alternativa correta e questões de cálculos das variáveis do efeito fotoelétrico, onde os estudantes possam expressar os conhecimentos obtidos durante as aulas.

3.6 Avaliação de Desempenho e Domínio do Campo Conceitual

Durante o desenvolvimento e execução desta sequência didática em sala de aula, propomos um método de avaliação para verificação da evolução e domínio do campo conceitual do Efeito Fotoelétrico por parte dos estudantes, através de uma avaliação formativa de processo, contínua e validada por meio de rubricas e que possam ser convertidas em uma nota de forma a cumprir as exigências de médias somativas adotadas pela maioria dos sistemas de ensino brasileiros.

As rubricas empregadas como mecanismos de avaliação, possibilitam avaliar o avanço e desempenho dos estudantes por meio de critérios particulares e objetivos e podem ser empregadas ou escolhidas de diversas maneiras. Para Ludke

(2003, p. 74) *“as rubricas partem de critérios estabelecidos especificamente para cada curso, programa ou tarefa a ser executada pelos alunos e estes são avaliados em relação a esses critérios”*.

Na mesma linha de pensamento, Vernier et al. (2018, p. 05) define rubricas como *“meios de avaliação ou autoavaliação, geralmente apresentada na forma de tabelas, que são construídas e modificadas com base nas habilidades, competências e atitudes que se deseja avaliar nos alunos ou professores”*.

Avaliar por meio de rubricas fornece para o processo de ensino-aprendizagem diversos pontos positivos. Além de atribuir aos estudantes o papel de protagonistas do seu processo de aprendizagem, elas simplificam a atribuição de notas, diversificando as ferramentas avaliativas no método somativo, e, na avaliação sobre o desenvolvimento de competências e habilidades pelos estudantes, as rubricas são os instrumentos mais apropriados (VERNIER et al., 2018), pois permitem entender as os níveis de habilidades que os estudantes dominam e, desta forma, propor atividades adequadas para que o estudante as aprimore durante as aulas.

Nesse processo de avaliação formativa são considerados os aspectos relacionados à proatividade e protagonismo dos estudantes em relação ao processo de ensino e aprendizagem, como a manipulação dos instrumentos e materiais de ensino; as discussões promovidas e alimentadas em grupos; as apresentações de argumentos e hipóteses; as produções realizadas em cada etapa e outros elementos que possam validar a efetiva participação dos estudantes nesse processo.

Dessa forma, os estudantes podem ser avaliados, conforme seu desempenho durante as aulas e poderão receber uma nota de até 10 (dez) pontos com base nos critérios definidos pela rubrica descrita na tabela 2 e que deve ser apresentada previamente para os estudantes no início do desenvolvimento da sequência didática em sala.

A seguir na tabela 2 é apresentado um modelo de planilha para utilização das rubricas de avaliação formativa junto aos estudantes durante o processo de implementação e desenvolvimento da sequência didática.

Tabela 2 – Rubrica para Avaliação Formativa da Sequência Didática.

COMPREENSÃO DOS CONCEITOS BÁSICOS.		ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DE RESULTADOS EXPERIMENTAIS.	CONEXÕES COM APLICAÇÕES PRÁTICAS E TECNOLÓGICAS.	CAPACIDADE DE REALIZAR ANÁLISES QUANTITATIVAS.	RELACÃO DO EFEITO FOTOELÉTRICO COM OUTROS CONCEITOS DA FÍSICA.	
Os Estudantes apresentam uma boa compreensão dos conceitos relacionados ao efeito fotoelétrico, sendo capazes de expressá-los com clareza em suas produções.		Os Estudantes realizam e interpretam com boa precisão os resultados do experimento e simulações propostas durante as aulas.	Os Estudantes estabelecem conexões significativas entre o efeito fotoelétrico e suas aplicações práticas e tecnológicas.	Os Estudantes realizam e demonstram bom entendimento das relações quantitativas no estudo de efeito fotoelétrico.	Os Estudantes, em suas produções, estabelecem conexões entre o efeito fotoelétrico e outros conceitos da Física.	
VALORES	0,0 a 2,0	0,0 a 2,0	0,0 a 2,0	0,0 a 2,0	0,0 a 2,0	SOMA
Aluno A						
Aluno B						
Aluno C						
Aluno D						
Aluno E						
Aluno F						
....						

A avaliação formativa, realizada de forma contínua ao longo das etapas, não deve ser vista como um mero instrumento de classificação, mas como um mecanismo diagnóstico que permite ao professor e aos próprios estudantes refletirem sobre o processo e ajustarem suas compreensões. O objetivo final transcende o aprendizado do Efeito Fotoelétrico em si, mas busca validar em sala de aula um referencial que promova um entendimento mais profundo e contextualizado da Física e seus conceitos.

4. Considerações Finais:

Com base na sólida estrutura teórica e na abordagem prática até aqui delineada, apresentamos esta sequência didática para o estudo do Efeito Fotoelétrico, não como um roteiro inflexível, mas como um referencial metodológico adaptável a diferentes realidades e contextos educacionais.

É fundamental compreender que o sucesso desta sequência está intrinsecamente ligado à adoção de uma postura pedagógica específica, na qual o professor assume o papel de mediador de um processo de aprendizagem colaborativo.

A expectativa central é que o foco seja deslocado da simples exposição de conteúdo para a construção conjunta do conhecimento. Para isso, é indispensável que o docente esteja atento às contribuições dos estudantes, validando seus argumentos e modelando-os de acordo com o saber científico, conforme proposto na etapa 3.3 de ampliação conceitual.

Consequentemente, o diferencial desta proposta reside em sua inerente flexibilidade. O professor não deve se sentir restrito aos materiais específicos citados, mas encorajado a adaptá-los à sua realidade.

Na etapa de experimentação, por exemplo, a sugestão de uso de kits de robótica educacional, brinquedos ou outros equipamentos alimentados por células fotovoltaicas abre um leque de possibilidades que dependem dos recursos disponíveis e das múltiplas possibilidades de obtenção desses itens.

Da mesma forma, na etapa de simulação, foram apresentadas duas alternativas de Objetos Digitais de Aprendizagem, mas outras ferramentas com propósitos similares podem ser empregadas.

Até mesmo a folha de tarefas para resolução de problemas pode ser composta por questões inéditas, ou adaptadas pelo próprio professor, que pode moldá-la para melhor atender ao nível de sua turma e aos seus objetivos pedagógicos. Essa capacidade de adaptação garante que a sequência tenha vida própria e possa ser implementada em diferentes contextos educacionais.

Por fim, a abrangência desta sequência didática vai além de um único tópico da Física. Ao iniciar com questionamentos etimológicos, passar por experimentos práticos, aprofundar-se com o uso de simuladores e culminar na resolução de problemas quantitativos, a proposta promove o desenvolvimento de um vasto campo

conceitual. A estrutura de avaliação por rubricas reflete essa amplitude, valorizando desde a "compreensão dos conceitos básicos" até a capacidade de relacionar o Efeito Fotoelétrico com "outros conceitos da Física" e suas "aplicações práticas e tecnológicas".

Ao engajar os estudantes em discussões, análises e atividades práticas, a sequência não ensina apenas o conteúdo, mas fomenta habilidades essenciais de raciocínio, argumentação e resolução de problemas.

Conclui-se, assim, que este produto educacional se constitui como um convite para o professor transformar suas aulas, oferecendo um caminho estruturado e coerente para que os estudantes se tornem protagonistas de sua aprendizagem e construam uma visão mais ampla e cheia de significados em relação à Física e seus Campos Conceituais.

5. Referências

CEDRAN, D. P.; KIOURANIS, N. M. M. **Teoria dos Campos Conceituais: visitando seus principais fundamentos e perspectivas para o ensino de ciências**. ACTIO, Curitiba, v. 4, n. 1, p. 63-86, jan./abr. 2019. Disponível em: <<https://periodicos.ut-fpr.edu.br/actio>>. Acesso em: 12 ago. 2024.

EISBERG, Robert; RESNICK, Robert. **Física quântica: Átomos Moléculas, Sólidos, Núcleos e Partículas**. 23ª Edição. Rio de Janeiro: Campus–Elsevier, 2010. 928 p.

FRANCHI, Anna. **Considerações sobre a teoria dos campos conceituais**. In Alcântara Machado, S.D. et al. (1999). Educação Matemática: uma introdução. São Paulo. EDUC. p. 155–195.

LÜDKE, M. O trabalho com projetos e a avaliação na educação básica. Práticas avaliativas e aprendizagens significativas. Porto Alegre: Mediação, p. 67-80, 2003. MAGINA, S. M. **A Teoria dos Campos Conceituais: contribuições da Psicologia para a prática docente**. Disponível em: www.ime.unicamp.br/erpm2005/anais/conf/conf_01.pdf. Acesso em: 26 nov. 2024.

MOREIRA, Marco Antônio. **A teoria dos campos conceituais de Vergnaud, o ensino de ciências e a pesquisa nesta área**. Investigações em Ensino de Ciências. Porto Alegre. v7, 2002 p. 7–29.

OSTERMANN, F. e MOREIRA, M.A, **Uma revisão sobre a área de pesquisa Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio**. Investigações em ensino de ciências. Porto Alegre. Vol. 5, n. 1 (jan./abr. 2000), p. 23-48

VERGNAUD, Gerard. **A Teoria dos Campos conceituais**. In: BRUN, J. Didática das matemáticas. Tradução de Maria José Figueiredo. Lisboa: Instituto Piaget, 1996. p. 155–191.

VERGNAUD, Gerard. **Teoria dos campos conceituais**. In Nasser, L. (Ed.) Anais do 1º Seminário Internacional de Educação Matemática do Rio de Janeiro, 1993. 26 p.

VERNIER, Fernanda Silva Pinto, et al. **Rumo a BNCC: Avaliação por Rubricas**. Sistema Anglo de Ensino, 2018. Disponível em: <http://anglosolucaoeducacional.com.br/wp-content/uploads/2018/12/Ebook-5-Avaliac%CC%A7a%CC%83o-por-Rubricas.pdf>. Acesso em: 26 nov. 2024.