

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE FÍSICA

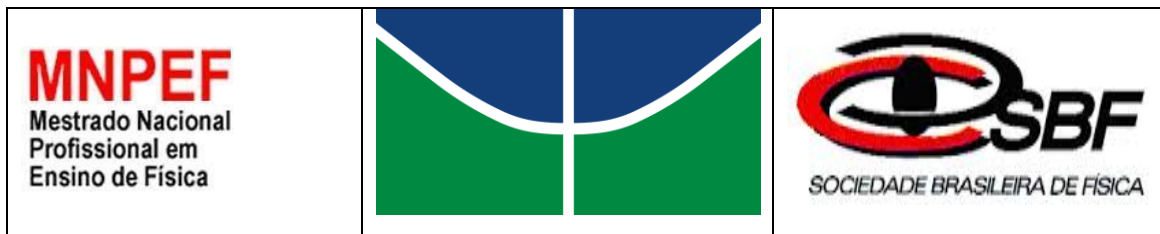
**A SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL COMO TECNOLOGIA
DIGITAL PARA ORGANIZAÇÃO AVANÇADA E MEDIAÇÃO
PEDAGÓGICA DO EFEITO FOTOELÉTRICO**

FELIPE ALVES DE ARAUJO NASCIMENTO

Dissertação de Mestrado em Ensino de Física

Orientador: Prof. Dr. Marcello Ferreira

Brasília/DF
maio/2023



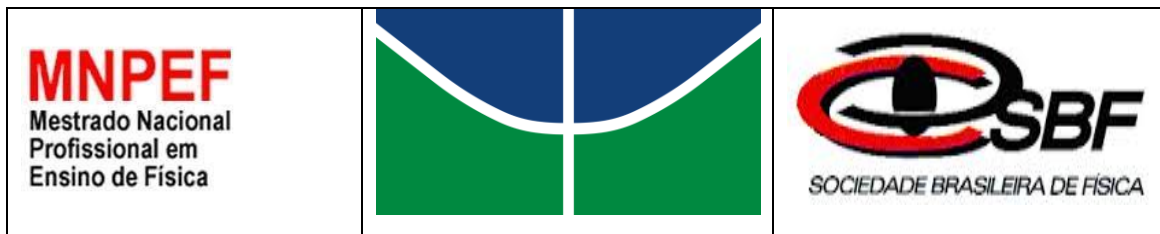
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE FÍSICA

**A SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL COMO TECNOLOGIA
DIGITAL PARA ORGANIZAÇÃO AVANÇADA E MEDIAÇÃO
PEDAGÓGICA DO EFEITO FOTOELÉTRICO**

FELIPE ALVES DE ARAUJO NASCIMENTO

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação da Universidade de Brasília, do Curso de Mestrado Profissional de Ensino de Física (MNPEF), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.
Orientador: Prof. Dr. Marcello Ferreira.

Brasília/DF
maio/2023



**A SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL COMO TECNOLOGIA DIGITAL
PARA ORGANIZAÇÃO AVANÇADA E MEDIAÇÃO PEDAGÓGICA
DO EFEITO FOTOELÉTRICO**

FELIPE ALVES DE ARAUJO NASCIMENTO

Orientador: Prof. Dr. Marcello Ferreira

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação da Universidade de Brasília, do Curso de Mestrado Profissional de Ensino de Física (MNPEF), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física

Aprovada por:

Dr. Marcello Ferreira (UnB)

Dr. Olavo Leopoldino da Silva Filho (UnB)

Dr. Michel Corci Batista (UTFPR)

Brasília/DF

maio/2023

FICHA CATALOGRÁFICA

S586p Nascimento, Felipe Alves de Araujo

A Simulação Computacional como Tecnologia Digital para Organização Avançada e Mediação Pedagógica do Efeito Fotoelétrico / Felipe Alves de Araujo Nascimento – Brasília: UnB / IF, 2023.

viii, 123 f.: il.;30cm.

Orientador: Marcello Ferreira

Dissertação (mestrado) – UnB / Instituto de Física / Programa de Pós-Graduação de Mestrado Profissional no Ensino de Física.

Referências Bibliográficas: f. 74-77.

1. Efeito fotoelétrico. 2. Aprendizagem significativa. 3. Unidade potencialmente significativa. I. Nascimento, Felipe Alves de Araujo. II. Universidade de Brasília, Instituto de Física, Programa de Pós-Graduação do Mestrado Profissional em Ensino de Física. A simulação Computacional como Tecnologia Digital para Organização Avançada e Mediação Pedagógica do Efeito Fotoelétrico.

Porque sou eu que conheço os planos que tenho para vocês, diz o Senhor, planos de fazê-los prosperar e não de causar dano, planos de dar a vocês esperança e um futuro.

(BÍBLIA SAGRADA, Jeremias 29,11)

Dedico esta dissertação à minha esposa, Marina Maciel Diniz, e ao meu filho, Davi Diniz Nascimento.

AGRADECIMENTOS

Eu agradeço a Deus por esta titulação, que é fruto de uma promessa dele para mim; e por ter me sustentado com a Sua mão direita durante um período muito complicado em todas as áreas da minha vida. Hoje, vejo que o processo a que fui submetido me tornou mais firme nos princípios bíblicos, mais competente e mais preparado para a próxima fase acadêmica.

Agradeço, em especial, à minha esposa, que passou por este processo junto comigo, firme e fiel; e por ter feito o papel de pai, para os meus filhos, nas muitas vezes em que estive ausente; também, pela compreensão e por compartilhar vários momentos de estudo comigo.

Agradeço à minha mãe, Líria, e à minha mãe, Nilda que está nos braços do Pai, e ao meu pai, Martins por terem me dado todo o suporte em minha formação, como ser humano, cristão, profissional e pai, que estava ao alcance deles. Serei eternamente grato a vocês três. Agradeço, em especial, às minhas irmãs Alessandra, Célia, Jussara e aos respectivos cônjuges que, indiretamente, apoiaram-me nesta jornada.

Agradeço a todos os membros da família da minha esposa que, de forma indireta, também me ajudaram a ter êxito nos meus estudos.

Agradeço ao meu orientador, prof. Dr. Marcello Ferreira, pela exímia competência, qualificação, paciência, pelos conselhos e persistência em me manter no Programa de Pós-Graduação *stricto sensu*.

Agradeço a todos os professores do Mestrado Profissional em Ensino de Física da UnB, em especial ao prof. Dr. Marcello Ferreira, pela condução no curso de Fundamentos Teóricos em Ensino e Aprendizagem; e à profa. Dra. Vanessa de Carvalho, pela condução dos cursos de Eletromagnetismo e Física Contemporânea. Esses professores conduziram aulas, a meu ver, de forma excelente.

Agradeço ao colega de trabalho e prof. Dr. Eleandro Philippsen, que me auxiliou com a construção do problema de pesquisa.

Agradeço também aos professores Olavo L. S. Filho; Michel Corci; Khalil Portugal e Antonio Marques pela avaliação e pelas contribuições com esta dissertação.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior — Brasil (CAPES) — Código de Financiamento 001, a quem agradeço imensamente.

RESUMO

O efeito fotoelétrico foi descoberto no fim do século XIX, por Hertz; e explicado por Albert Einstein, no início do século XX, ao aderir às ideias de Max Planck, acerca da quantização da energia emitida pelos osciladores harmônicos do corpo negro, e casar o viés experimental ao teórico. Esse fenômeno evidenciou o caráter corpuscular da luz e está inserido nos primórdios da Física quântica; assim, é necessária à sua compreensão para um entendimento da Física quântica, dentro de uma linha histórica da Física. Um dos grandes desafios da educação do século XXI é o reconhecimento das características do estudante, indissociável de uma sociedade marcada pela hiperconectividade e pela inteligência coletiva que, segundo Pierre Lévy, constitui-se o principal motor da cibercultura. Essa “bolha” digital influenciou nas características da geração Z, cujos indivíduos são chamados de nativos digitais, na forma como consomem, comportam, trabalham e, principalmente, como se relacionam e aprendem. Essa geração não responde bem às relações unilaterais e, por consequência, ao ensino tradicional. Um tipo de TDIC (Tecnologia Digital da Informação e Comunicação) que o presente trabalho indica, como um possível enfrentamento para a mediação (adequação da linguagem entre os professores e estudantes de tal geração), é uma sequência didática ambientada em recursos de um simulador computacional, que busca a descentralização da perspectiva narrativa e memorística, em detrimento àquela da mediação como dialogia e crítica. Os simuladores não substituem a realidade, mas torna mais fácil compreender situações que requerem alto nível de abstração. O uso das simulações computacionais dinamiza sistemas físicos que, no ensino tradicional, são abordados de forma estática. Esta dissertação tem como objetivo geral investigar a eficácia de uma Unidade Potencialmente Significativa (UEPS), aplicada no Ensino Médio, à luz da teoria da aprendizagem de David Ausubel, que propõe a utilização de um simulador computacional desenvolvido pela Universidade do Colorado, disponível na plataforma PhET, para o ensino do efeito fotoelétrico, via UEPS, como instrumento de organização avançada dentro da Teoria da Aprendizagem Significativa. O produto educacional foi estruturado em quatro aulas, de 50 minutos, aplicado e avaliado em uma escola particular do DF, nos meses de outubro e novembro de 2021, a propósito de uma pesquisa translacional.

Palavras-chave: Ensino de Física; Efeito Fotoelétrico; Simulador Computacional; Unidades de Ensino Potencialmente Significativas; Organizador Avançado; Tecnologias Digitais da Informação e Comunicação.

ABSTRACT

The photoelectric effect was discovered at the end of the 19th century by Hertz and explained by Albert Einstein in the beginning of the 20th century by adhering to Max Planck's ideas about the quantization of energy emitted by blackbody harmonic oscillators, marrying the experimental bias to the theoretical one. This phenomenon evidenced the corpuscular character of light and it is inserted in the beginnings of quantum physics, being necessary for an understanding of quantum physics within a historical line of physics. One of the great challenges of education in the 21st century is the recognition of the student's characteristics, which are inseparable from a society marked by hyperconnectivity and collective intelligence, which, according to Pierre Lévy, constitutes the main engine of cyberculture. These individuals are called digital natives. This digital "bubble" influenced the characteristics of generation Z: the way they consume, behave, work and, mainly, how they relate and learn. This generation does not respond well to unilateral relationships and, consequently, to traditional teaching. A type of DICT (Digital Information and Communication Technology) that this present work indicates as a possible confrontation for mediation (adaptation of language between teachers and students of that generation), is a didactic sequence set in resources of a computational simulator, seeking the decentralization of the narrative and memoristic perspective to the detriment of that of mediation as dialogue and criticism. The simulators do not replace reality but make it easier to understand situations that require a high level of abstraction. The use of computer simulations streamlines physical systems that in traditional teaching are approached in a static way. This dissertation has the general objective of investigating the effectiveness of a Potentially Significant Unit (UEPS) applied in high school, in the light of David Ausubel's theory of learning, which proposes the use of a computational simulator developed by the University of Colorado available at PhET platform, for teaching the photoelectric effect, via UEPS, as an advanced organization tool within the Theory of Meaningful Learning. The educational product was structured in four fifty-minute classes, applied and evaluated in a private school in the Federal District in the month of October and November in 2021 as part of a translational research.

Keywords: Physics Teaching; Photoelectric Effect; Computational Simulator; Meaningful Teaching Units; Advanced Organizer; Digital Information and Communication Technologies.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Plataforma PhET: Efeito Fotoelétrico	18
Figura 2 – Diferenciação progressiva e reconciliação integrativa.....	25
Figura 3 – Representação de uma onda eletromagnética	33
Figura 4 – Espectro eletromagnético	34
Figura 5 – Montagem experimental para o efeito fotoelétrico	36
Figura 6 – Variação de i com V	36
Figura 7 – Variação de i com a frequência da luz	37
Figura 8 – Esquema para o efeito fotoelétrico.....	38
Figura 9 – Energia cinética máxima pela frequência	39
Figura 10 – Modelo para corpo negro	41
Figura 11 – Gráfico de $I \times \lambda$ para três valores de temperatura	42
Figura 12 – Distribuição espectral da radiação térmica	43
Figura 13 – Levantamento de Subsunçores, por meio do Mentimeter	46
Figura 14 – Questionário-problematizador acerca do comportamento dual da luz.....	47
Figura 15 – Legenda do simulador	48
Figura 16 – Questionário-problematizador acerca do simulador computacional.....	48
Figura 17 – Questionário-problematizador acerca do simulador	48
Figura 18 – O problema da radiação do corpo negro	50
Figura 19 – Catástrofe do ultravioleta	50
Figura 20 – Ajuste da representação dos fótons no simulador PhET	51
Figura 21 – Coordenadas do gráfico energia x frequência no simulador	54
Figura 22 – Aula acerca de aplicações tecnológicas do efeito fotoelétrico.....	55
Figura 23 – Mural Colaborativo no Padlet	55
Figura 24 – Turma criada no Google Sala de Aula	57
Figura 25 – Nuvem de palavras para obtenção de subsunçores	59
Figura 26 – Conceituação de palavras	59
Figura 27 – Resposta ao questionário problematizador, acerca da dualidade onda-partícula..	60
Figura 28 – Resposta à questão 1	60
Figura 29 – Resposta à questão 2	60
Figura 30 – Resposta à questão 3	61
Figura 31 – Resposta à questão 4	61
Figura 32 – Orientação para avaliação da UEPS.....	63
Figura 33 – Orientação para avaliação da UEPS.....	64
Figura 34 – Mural colaborativo no Padlet acerca de hidrostática	64
Figura 35 – Avaliação da UEPS. Mural colaborativo no Padlet	65
Figura 36 – Comentários nas postagens do mural colaborativo.....	65

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Análise dos subsunçores.....	67
Gráfico 2 – Análise qualitativa das conceituações	68
Gráfico 3 – Análise da primeira organização avançada	68
Gráfico 4 – Análise da segunda organização avançada.....	69
Gráfico 5 – Análise do processo avaliativo na mediação pedagógica, por meio do simulador PhET	71

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Análise do processo avaliativo na mediação pedagógica, por meio do simulador PhET	70
Quadro 2 – Proposta de alteração à UEPS: primeiro encontro	74
Quadro 3 – Proposta de alteração à UEPS: segundo encontro	75

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	12
CAPÍTULO 1 — FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	22
1.1 A Teoria da Aprendizagem Significativa (TAS).....	22
1.1.1 Subsunção.....	23
1.1.2 Organizadores Avançados	24
1.1.3 Diferenciação Progressiva e Reconciliação integrativa.....	25
1.1.4 Aprendizagem Significativa: Condições	26
1.2 Unidades de Ensino Potencialmente Significativa (UEPS).....	26
1.2.1 Princípios	26
1.2.2 Aspectos Sequenciais	27
1.2.3 Aspectos Transversais	27
CAPÍTULO 2 — EFEITO FOTOELÉTRICO	29
2.1 A Natureza da Luz, da Antiguidade ao Século XX.....	29
2.2 A Descoberta do Efeito Fotoelétrico por Hertz	35
2.3. A Montagem Experimental para o Efeito Fotoelétrico	35
2.4. Os Limites da Física Clássica para Descrição do Efeito Fotoelétrico.....	40
2.5. A ideia do Quanta	40
2.6. A solução de Einstein para o efeito fotoelétrico.....	43
2.7. A conservação de Energia no Efeito Fotoelétrico	44
CAPÍTULO 3 — METODOLOGIA	46
3.1. Estrutura do Produto Educacional	46
3.2 Aplicação do Produto Educacional.....	56
CAPÍTULO 4 — RESULTADOS E ANÁLISES.....	67
CAPÍTULO 5 — CONSIDERAÇÕES FINAIS	73
REFERÊNCIAS	76

INTRODUÇÃO

O efeito fotoelétrico foi descoberto no fim do século XIX, por Hertz e explicado por Albert Einstein, no início do século XX, ao aderir às ideias de Max Planck, acerca da quantização da energia emitida pelos osciladores harmônicos do corpo negro, e casar o viés experimental ao teórico. Esse fenômeno evidenciou o caráter corpuscular da luz e está inserido nos primórdios da Física quântica; assim, é necessária à sua compreensão para um entendimento da Física quântica, dentro de uma linha histórica da Física. Atualmente, sabe-se que a sua compreensão contextualizada e aplicada leva o estudante a compreender muita tecnologia inserida no dia a dia da humanidade, como: o cinema falado, sensores fotossensíveis, máquinas industriais e outras aplicações tecnológicas. No ensino de Física, o estudo das radiações e a sua interação com a matéria fazem parte da legislação brasileira.

Os Parâmetros Curriculares Nacionais para o Ensino Médio (PCNEM) posicionam o estudo da matéria e radiação como um dos temas estruturadores do ensino de Física, Tema Estruturador 5: Matéria e Radiação. O documento sugere competências específicas relacionadas com a importância do estudo das radiações, no Ensino Médio (EM), com o intuito de criar no estudante um senso de criticidade, quanto a riscos e benefícios durante a utilização de diferentes radiações no dia a dia, reconhecê-las no espectro eletromagnético, relacioná-las com as tecnologias atuais e avaliar a sua relação com a Física Médica. Além disso, estabelece a importância de abordar a interação da radiação com a matéria, para que o estudante compreenda o arcabouço fenomenológico envolvido com esse tópico, por exemplo, a fotocélula. E por último, construir a capacidade de avaliação das radiações não ionizantes, que interagem com o ambiente e sistemas biológicos (BRASIL, 2006).

A Base Nacional Comum Curricular (BNCC) propõe a competência específica 1 para ciências da natureza e suas tecnologias, com o objetivo de:

Analisar fenômenos naturais e processos tecnológicos, com base nas relações entre matéria e energia, para propor ações individuais e coletivas que aperfeiçoem processos produtivos, minimizem impactos socioambientais e melhorem as condições de vida em âmbito local, regional e/ou global (BRASIL, 2018, p. 554).

Dentro dessa perspectiva da competência específica 1, está inserido o estudo do espectro eletromagnético e a interação da radiação com a matéria, assuntos diretamente ligados com o fenômeno do efeito fotoelétrico.

A BNCC também propõe a compreensão, o uso e a criação de tecnologias digitais, de forma não arbitrária, na 5ª competência geral para a Educação Básica:

Compreender, utilizar e criar tecnologias digitais de informação e comunicação de forma crítica, significativa, reflexiva e ética nas diversas práticas sociais (incluindo as escolares) para se comunicar, acessar e disseminar informações, produzir conhecimentos, resolver problemas e exercer protagonismo e autoria na vida pessoal e coletiva. (BRASIL, 2018, p. 9).

A FMC é prevista como tema estruturador para o Ensino Médio, por meio dos documentos oficiais: PCNEM e BNCC. Apesar disso, o que fica evidenciado é que em grande parte das escolas brasileiras, o conteúdo de FMC é, na maioria das vezes, tratado no fim do 3º ano do Ensino Médio ou às vezes até negligenciado. Segundo Zanetic (1999), ainda no fim do século XX, em grande parte das escolas brasileiras, o ensino é voltado para a Física anterior ao século XX, a ciência responsável por explicar uma gama de fenômenos e que é capaz dar base ao entendimento de novas tecnologias. Segundo Ostermann e Moreira (2001), as justificativas para a inserção de tópicos de ensino sobre FMC no Ensino Médio são: proporcionar, ao estudante, contato com a área de pesquisa atual, incentivo para formar mais jovens nas áreas científicas, divulgar os desenvolvimentos das ciências e tecnologia para a população e outras. Terrazzan (1992) defende que muitos fenômenos e tecnologias inseridas no dia a dia das pessoas só podem ser compreendidos por intermédio do estudo da FMC. Ele ainda completa que a formação do indivíduo deve ser global, para que este tenha a capacidade de influenciar, efetivamente, na realidade em que vive; e essa participação está diretamente ligada com a sua compreensão da mesma realidade.

Os ingleses Shabajee e Postlethwaite (2000) apontam quatro justificativas para a inserção da FMC no currículo da Educação Básica, na Inglaterra. Dentre elas, destaca-se uma, no campo da cognição. Acerca disso, eles ressaltam que o não posicionamento da Física do século XX nos currículos dificultaria a aprendizagem posterior de tópicos de FMC, já que a estrutura cognitiva de crianças tem dificuldade em alterar informações que já foram aprendidas, de forma limitada.

Segundo Terrazzan (1992), a escolha dos conteúdos de FMC no Ensino Médio deve privilegiar leis gerais e conceitos fundamentais, e diminuir a cobrança quanto à matemática. Uma das dificuldades mais relevantes a se considerar é a compatibilidade da Física Clássica com a Física Moderna, durante os três anos do Ensino Médio. Ele propõe duas possíveis soluções: tratar os tópicos de FMC, decorrente dos limites da Física Clássica ou, simplesmente, tratar apenas da Física após o século XX. Outra dificuldade relevante a se ponderar é a desqualificação dos docentes para ministrar esse assunto no Ensino Médio.

Segundo a Organização das Nações Unidas para a Educação, Ciência e Cultura (UNESCO, 2018), as TDICs podem contribuir para o acesso universal à educação, à equidade, à qualidade e para a formação docente.

O período pandêmico da Covid-19 marcou, historicamente, a humanidade. Segundo a Organização Mundial de Saúde (OMS, 2022), a estimativa de mortes causadas pelo vírus, de forma direta ou indireta, entre o dia 1 de janeiro de 2020 a 31 de dezembro de 2021 foi de, aproximadamente, 14,9 milhões de pessoas, consideradas um excesso de mortalidade. Durante esse período, houve uma nova organização das relações de trabalho, convívio marcado pelo isolamento social, comércio e na educação. A pandemia revelou um grande despreparo para situações emergenciais na educação, já que houve grandes dificuldades e desafios enfrentados, principalmente, no modo como se ensina e se aprende. O isolamento social causou a migração das salas de aulas físicas para as salas virtuais, apoiadas por TDIC (Tecnologias Digitais da Informação e Comunicação). De acordo com Mill, Oliveira e Ferreira (2022) e Santos *et al.* (2022), essa nova realidade escolar, durante o período pandêmico, expôs gestores, professores, estudantes, sistemas de ensino, formuladores de políticas públicas e currículos a grandes desafios e dificuldades que, por outra perspectiva, causou uma corrida rumo à qualificação, reflexão e atualização pedagógica quanto às tecnologias digitais da informação.

Um dos grandes desafios da educação do século XXI é o reconhecimento das características do estudante, indissociável de uma sociedade marcada pela cibercultura, hiperconectividade e a inteligência coletiva que, segundo Lévy (1999), constitui-se o principal motor. Lévy (1999, p. 26) prevê a velocidade dessas modificações socioculturais que a tecnologia provocou “Enquanto ainda questionamos, outras tecnologias emergem na fronteira nebulosa onde são inventadas as ideias, as coisas e as práticas”. O autor também destaca a forma como se estabelece a relação da tecnologia com a sociedade e a cultura “[...] em vez de enfatizar o impacto das tecnologias, poderíamos igualmente pensar que as tecnologias são produtos de uma sociedade e de uma cultura” (LÉVY, 1999, p. 22). Segundo ele, o campo cognitivo e educacional sofre implicações do ciberespaço:

[...] o ciberespaço suporta tecnologias intelectuais que amplificam, exteriorizam e modificam numerosas funções cognitivas humanas: memória (bancos de dados, hiperdocumentos, arquivos digitais de todos os tipos), imaginação (simulações), percepção (sensores digitais, telepresença, realidades virtuais), raciocínios (inteligência artificial, modelização de fenômenos complexos) (LÉVY, 1999, p. 157).

Segundo Lévy (1999), as tecnologias intelectuais corroboram para as novas formas de acesso à informação e novos estilos de raciocínio e conhecimento, como as simulações. Dessa

forma, as tecnologias intelectuais aumentam o potencial da inteligência coletiva, por poderem ser compartilhadas com muitos indivíduos.

A hiperconectividade foi, primeiramente, citada por dois sociólogos canadenses, Anabel Quan-Haase e Barry Wellman, no artigo chamado *“How computer-mediated hyperconnectivity and local virtuality foster social networks of information and coordination in a in a community of practice”*. Ao utilizar o termo, os cientistas se referiam a indivíduos que estão constantemente conectados a múltiplos meios de comunicação, como e-mails, internet, redes sociais, reuniões remotas, telefones, entre outros (CIRILO, 2019). Adrian Cheok, da Universidade de Londres, e autor do livro *Hyperconnectivity and the future of internet communication* (UPPERTOOLS, 2016, n.p.), professor de computação, define que: “[...] a hiperconectividade não se refere apenas à tecnologia que permite a comunicação e interação, mas também ao impacto que os recursos tecnológicos em ambiente digital têm na vida das pessoas, nos negócios, no governo e, principalmente, no comportamento social”.

De acordo com Prensky (2001), a geração Z é composta por indivíduos que nasceram em um contexto em que a sociedade já tinha passado por uma transformação do mundo analógico para o digital, meados dos anos 1990 até o ano de 2005. Esses indivíduos são chamados nativos digitais, pois já nasceram na era digital. Essa “bolha” digital influenciou nas características da geração Z, na forma como eles consomem, comportam, trabalham e, principalmente, como aprendem. É possível afirmar que, atualmente, essa geração se tornou hiperconectada.

Na esfera da aprendizagem, as TDICs possuem significado para a geração Z, pois afeta, diretamente, uma das condições para que ocorra a aprendizagem significativa, que é o interesse do indivíduo em aprender o tópico de ensino, de maneira não literal e arbitrária. Essa geração não responde bem a relações unilaterais e, portanto, o mesmo ocorre com o ensino tradicional. De acordo com Perrenoud (2000, p. 139), “[...] as novas tecnologias podem reforçar a contribuição dos trabalhos pedagógicos e didáticos contemporâneos, pois permitem que sejam criadas situações de aprendizagens ricas, complexas e diversificadas”. Segundo Rosa (1995, p.185), “[...] o tratamento de dados em tempo real, a simulação de fenômenos físicos, a aula remota são algumas das contribuições ao ensino de Física que o uso de computadores pode oferecer”.

É importante ressaltar que o uso, por si só, da tecnologia, de forma arbitrária, que mantém os padrões metodológicos tradicionais e não leva a resultados diferentes. De acordo com Silva (2011), não há evolução no ensino e aprendizagem, ao usar TDIC com a lógica da memorização e reprodução de conteúdos. Para que a ferramenta exerça, de forma plena, seu

papel, é necessária uma translação do papel do professor do ensino tradicional para um papel mediador, de forma a inserir o discente em um contexto de aprendizagem ativa.

Um tipo de TDIC que esse trabalho indica, como uma possível solução para adequação da linguagem entre os professores, a sequência didática e o estudante nascido na geração Z é o simulador computacional, de forma que o docente, somado à utilização da TDIC, descentralize a aula da sua figura e ocupe o papel de mediador.

Além disso, o professor deve ter o cuidado de conhecer o fenômeno descrito pelo simulador, com profundidade, para que tenha discernimento dos limites da modelagem.

Medeiros e Medeiros (2002, p. 81) afirmam:

Uma animação não é, jamais, uma cópia fiel do real. Toda animação, toda simulação está baseada em uma modelagem do real. Se essa modelagem não estiver clara para professores e educandos, se os limites de validade do modelo não forem tornados explícitos, os danos potenciais que podem ser causados por tais simulações são enormes. Tais danos tornar-se-ão ainda maiores se o modelo contiver erros grosseiros.

É importante destacar que, além de outras utilidades, o simulador computacional pode ser posicionado no planejamento do professor, como um meio capaz de induzir problematizações, questionamentos, observações, interações com o software e levantamento de hipóteses:

Um outro aspecto importante no uso dessas simulações é o fato do aluno poder atuar de forma independente na busca do entendimento da situação mostrada, fazendo ele mesmo perguntas e procurando as respostas sobre uma dada situação Física, num processo de autorreflexão, diferentemente de uma atividade automática ou meramente reprodutiva de situação semelhante já vista, como são muitas das atividades usualmente propostas aos estudantes (MIRANDA; BECHARA, 2004, p. 2).

Desde a época de Galileu, a experimentação tem sido peça fundamental na história da Física. Polito (2016) posiciona a experimentação como um princípio metodológico, e o único capaz de julgar proposições científicas. No ensino de Física, a experimentação exerce papel muito importante, pois possibilita a associação, por parte do aluno, entre teoria e prática. Segundo Reis (2013), a experimentação deve ser centrada em metodologias ativas, e gerar habilidades nos estudantes de entendimento, atuação e de julgamentos acerca dos avanços da tecnologia que os circundam socialmente. De acordo com Vilaça (2012), a experimentação, por si só, não altera o cenário de aprendizagem, necessita, portanto, de uma metodologia fundamentada para que se alcancem os objetivos de aprendizagem.

Nem toda escola, no Brasil, possui espaço físico e recursos financeiros para montar e manter um laboratório de Física em suas dependências. Souza (2020) afirma que as simulações

computacionais são uma alternativa ao problema que se pode ter com a estrutura física necessária para realizar outros tipos de experimentos.

As simulações computacionais são modelos da realidade que, geralmente, estão disponíveis gratuitamente na internet, e são uma alternativa aos laboratórios analógicos, roteirizados e de bancada que possuem alto custo, ocupam grandes espaços físicos e demandam experiência para sua utilização. De acordo com Macêdo *et al.* (2012), as simulações computacionais permitem manipular o evento, modificar e conhecer as grandezas físicas envolvidas no fenômeno. Segundo Ferreira *et al.* (2021), os simuladores não substituem a realidade, mas torna de mais fácil compreensão situações que requerem alto nível de abstração. Tavares (2008) destaca que o uso das simulações computacionais dinamiza sistemas físicos que, no ensino tradicional, são abordados de forma estática.

Fiolhais e Trindade (2003, p. 268) apontam que:

As principais características que a realidade virtual disponibiliza em benefício da educação são a imersão (a maioria das sensações provém do ambiente virtual), interatividade (navegação livre, escolha do referencial, etc.) e a manipulação (ações realizadas pelo utilizador tal como no mundo real).

Por sua vez, Yamamoto e Barbeto (2001, p. 222) relatam que:

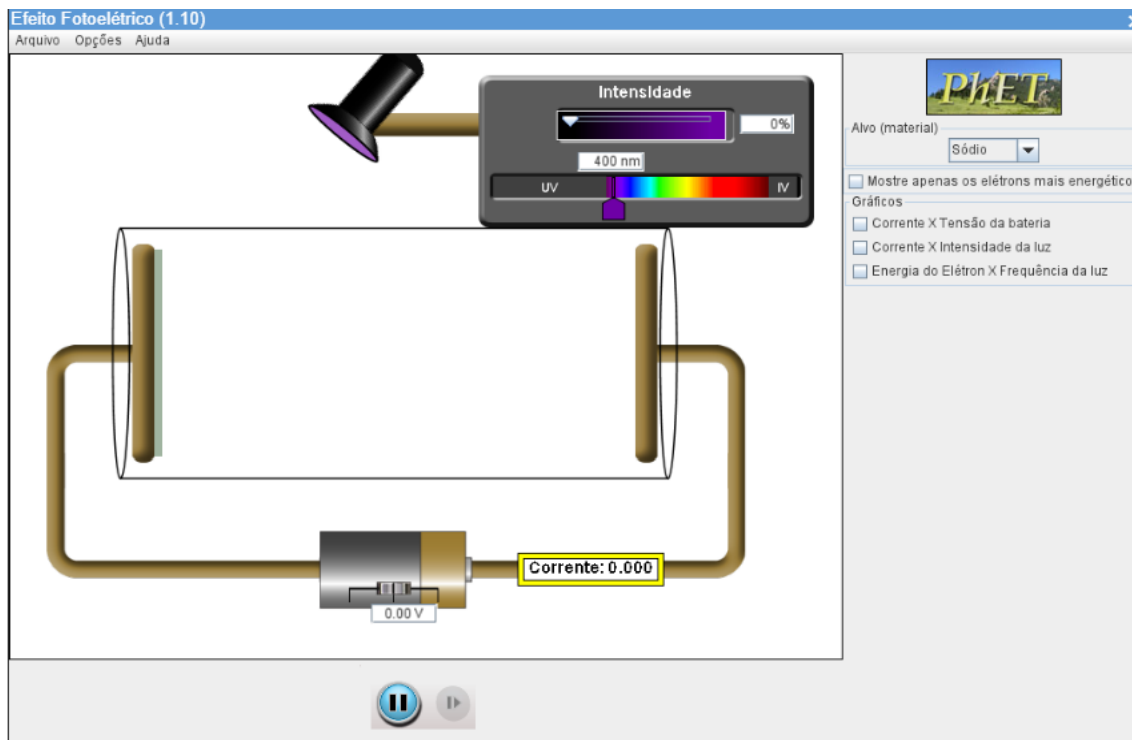
Uma das observações mais claras que se faz quando se utiliza demonstrações baseadas em simulações em computador, é que os alunos, de maneira geral, se tornam mais participativos. A possibilidade de rapidamente mudar parâmetros, e verificar a consequência dos movimentos estudados, incita os estudantes a querer conhecer o comportamento dos sistemas físicos nas mais diversas situações. Este tipo de maneira, mais interativa, é um dos elementos que pode tornar o processo de ensino mais eficiente.

De maneira geral, todos os autores citados reconhecem a potencialidade do simulador computacional e acreditam na contribuição que pode ser dada ao ensino de Física, em especial, a um tópico de Física Moderna que possui considerável grau de abstração.

O simulador escolhido foi o “Efeito Fotoelétrico”, Figura 1, da plataforma Physics Education Technology (PhET), desenvolvido pela Universidade do Colorado, nos Estados Unidos da América. Segundo Arantes *et al.* (2010), a PhET tem por objetivo popularizar, a professores e estudantes, os simuladores computacionais para fenômenos físicos. O simulador é de fácil acesso, manipulação e entendimento, devido à diagramação, bem como a alteração dos parâmetros do fenômeno, como: material metálico em que incide luz, comprimento de onda, intensidade da luz, gráficos da corrente x tensão da bateria, corrente x intensidade da luz, energia do elétron x frequência da luz, energia do elétron x frequência da luz, ajuste da

representação corpuscular ou ondulatória da luz, ajuste da tensão da bateria, voltímetro e amperímetro.

Figura 1 – Plataforma PhET: Efeito Fotoelétrico



Fonte: Captura de tela do PhET

Para a escolha do simulador computacional da plataforma PhET, foram, previamente, analisados outros dois simuladores de plataformas distintas. O primeiro foi o da plataforma Educaplus.org, que é um simulador de baixo nível de abstração, possui alguns ajustes como intensidade da luz e frequência, diversos materiais para que incida luz, representa bem a relação intensidade da luz e número de fótons emitidos e a relação frequência da luz e energia dos fotoelétrons, medidores como voltímetro e amperímetro. Porém, percebe-se, ao utilizar o simulador, que a falta de praticidade em ter que lançar a luz diversas vezes e a impossibilidade de gerar gráficos prejudica a análise do fenômeno. O segundo simulador foi o da plataforma Vascak, que possui uma diagramação que remete a uma montagem experimental laboratorial positiva, pois, indiretamente, possibilita ao aluno a noção da montagem experimental no mundo real, apesar de não permitir ao usuário manipular a montagem dos equipamentos. Além disso, possui poucos ajustes, os principais são: frequência, comprimento de onda, intensidade da luz e materiais para incidir luz. Este não foi escolhido, pois além de possuir menor quantidade de ajustes que o da plataforma PhET, também não fornece gráficos para abordagem qualitativa e quantitativa do fenômeno.

É importante ressaltar que, neste trabalho, foram utilizadas outras ferramentas adjacentes, como o Mentimeter, um aplicativo que permite gerar nuvem de palavras, a partir de respostas de um grupo de indivíduos; o Padlet, que permite a construção de murais colaborativos; a Microsoft Teams, que é uma ferramenta de streaming muito usada para aulas e reuniões durante o período pandêmico; o Google Classroom, que é uma ferramenta que possibilita a criação de turmas e permite a função de repositório; o Google Formulários, que foi utilizado para disponibilizar, ao grupo de estudantes, questionários problematizadores, avaliações; e, por último, e a plataforma Youtube, que possibilitou postar e assistir vídeos explicativos.

No âmbito do MNPEF, existem publicações que corroboram para a utilização da TDIC como o simulador PhET no ensino de Física. Vilar (2020) utilizou TDIC por meio de vídeos, aplicativos para celular, Google Sala de Aula; e os simuladores da plataforma PhET como ferramenta central em uma sequência de dez aulas de 50 minutos. Segundo Vilar (2020, p. 49),

[...] o simulador ajudou o aluno na compreensão, entendimento e detalhamento dos fenômenos, contribuindo para visualizar conceitos mais abstratos, além de despertar a participação, facilitando assim, que os alunos relacionassem os fenômenos com os conceitos simulados.

Pereira (2018) propõe a utilização do simulador “Ondas em Corda”, da plataforma PhET, para o ensino de ondas para o 9º ano do Ensino Fundamental. O ponto-chave da sequência de aulas é a utilização roteirizada do simulador. O produto educacional foi aplicado em uma escola privada no estado do RJ. O autor relata que durante a 5ª e 6ª aula, em que o simulador foi utilizado pelos estudantes, eles demonstraram anseios para aprender a ondulatória, e posteriormente, para aprender outros tópicos de ensino utilizando essa ferramenta tecnológica. Tal fato indica o seu potencial em engajar o estudante. Conclui-se que a ferramenta tecnológica traz resultados positivos à aprendizagem, porém, indicaram o seu uso concomitantemente com outros recursos pedagógicos. Matias (2019) utilizou o simulador da plataforma PhET para o estudo de lançamentos de foguetes de garrafa PET, em uma atividade investigativa antecedente à uma oficina de construção de foguetes. A aplicação do produto educacional ocorreu em cidades próximas à Recife-PE, em duas aplicações que ocorreram em duas escolas estaduais da rede pública de ensino. O autor conclui que a modelagem computacional contribuiu para o protagonismo, interesse, participação, atenção e, conseqüentemente, para o aprendizado dos estudantes. Já Silva (2015) utilizou a simulação para o efeito fotoelétrico, de forma roteirizada, também da plataforma PhET, em uma sequência de três encontros, em turmas de 3º ano do EM, no estado do Rio de Janeiro, em um colégio

estadual. O autor concluiu que houve um aumento significativo na participação dos estudantes e na qualidade das suas respostas.

No âmbito de outros mestrados de ensino de ciências, Freitas (2017) utilizou o simulador roteirizado para o efeito fotoelétrico da plataforma PhET, o mesmo proposto por este trabalho, um produto educacional que foi aplicado em três escolas estaduais, no estado de Minas Gerais, em três encontros de aula. Ele concluiu que a utilização da simulação computacional contribui para a compreensão do fenômeno, por parte dos estudantes, inclusive de uma característica abstrata do fenômeno, a frequência de corte. Todos os professores que aplicaram a sequência de aulas enfatizaram a facilidade que a modelagem proporcionou para introduzir o tópico de ensino em Física moderna.

Com base nessa busca por trabalhos que utilizaram os simuladores computacionais no ensino de Física, pode-se concluir que a utilização dessa modelagem da plataforma PhET para o ensino de tópicos de Física Moderna é relevante, pois facilita a compreensão de fenômenos abstratos, aumenta o interesse e participação dos estudantes, assim como traz qualidade à participação, às suas respostas e indagações ao decorrer da sequência didática.

O presente trabalho tem como pressuposto teórico a teoria da aprendizagem significativa (TAS), idealizada por Ausubel (1968), e que tem como ponto-chave o conhecimento prévio, ou seja, os conhecimentos que o indivíduo já possui, em relação a determinada área do conhecimento. O papel inicial do docente é identificar o que o estudante já sabe a respeito de determinado assunto, e em seguida, ensinar o que se pretende, de acordo com esses conhecimentos prévios. Aprender significativamente, ao contrário da aprendizagem mecânica, ocorre quando o indivíduo acessa, cognitivamente, o que aprendeu e consegue aplicá-lo, em diversos outros contextos e situações de diferentes níveis de complexidade. Dentro daquelas tecnologias digitais que este trabalho utiliza, vale destacar o simulador computacional e o aplicativo Mentimeter. Dentro da TAS e ao longo da sequência didática, essas tecnologias exercem funções específicas. O Mentimeter é utilizado como um dispositivo identificador de conhecimentos prévios; já o simulador computacional, como um organizador avançado e mediador pedagógico. Dentro da teoria Ausubeliana, o organizador avançado possui função crucial, pois ele faz a ligação entre o conhecimento prévio e a nova informação. E a forma de se alinhar a TAS é por intermédio de uma Unidade de Ensino Potencialmente Significativa (UEPS), de acordo com os oito aspectos sequenciais propostos por Moreira (2011) e Ferreira *et al.* (2020).

Esta dissertação tem como objetivo geral investigar a eficácia de uma UEPS aplicada no Ensino Médio, à luz da teoria da aprendizagem de David Ausubel (1968), que propõe a

utilização de um simulador computacional para o ensino do efeito fotoelétrico, desenvolvido pela Universidade do Colorado, disponível na plataforma PhET, como instrumento de organização avançada e mediação pedagógica dentro da TAS. Assim, pode-se dizer que a UEPS incorpora, em seu eixo principal, uma TDIC. Como objetivos específicos, propõe-se: pesquisar a utilização de TDIC, em sequências didáticas direcionadas para o público da geração Z, em dissertações de mestrado, produtos educacionais e artigos; desenvolver, aplicar e avaliar a UEPS, em uma turma de 3º ano do Ensino Médio, da rede particular de ensino, localizada na região administrativa do Guará (Distrito Federal); e, por último, investigar possíveis melhorias após a aplicação da UEPS, por meio da avaliação e propor alterações à sequência didática.

Esta dissertação propõe uma UEPS, descrita no produto educacional, que vise à aprendizagem significativa do efeito fotoelétrico. Esta foi estruturada em quatro aulas de 50 minutos, aplicada em uma escola da rede particular, em uma turma do 3º ano do Ensino Médio, em 2021, durante a pandemia da Covid-19 que, por legislação emergencial, foi permitida a modalidade de ensino híbrida.

Esta dissertação é composta por esta introdução; seguida do capítulo 1, que apresenta o referencial teórico escolhido para o ensino do efeito fotoelétrico, que engloba o referencial metodológico necessário para a construção da UEPS. O capítulo 2 é composto pelas discussões acerca do fenômeno do efeito fotoelétrico: aspectos históricos, aspectos conceituais e matemáticos envolvidos com tópico de ensino. O capítulo 3 corresponde à descrição acerca do produto educacional e da sua aplicação. No capítulo 4, apresentam-se os resultados obtidos e faz-se a sua análise. Por último, no capítulo 5, faz-se as considerações finais. Nos apêndices A e B, tem-se o produto educacional e a avaliação da UEPS, respectivamente.

CAPÍTULO 1 — FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Esta dissertação é parte de um compromisso epistemológico com a perspectiva de aprendizagem significativa, cunhada por Ausubel (1968), e desenvolvida, no Brasil, sobretudo por Moreira (2011). Esse compromisso implica considerar que o produto cognitivo será, para além de memorizações e reproduções (eventualmente presentes, mas nunca centrais), proposições autônomas e recontextualizadas, por parte do sujeito submetido a uma mediação pedagógica, que aqui, é a relação estabelecida, dialógica e culturalmente, entre professor, estudante, conteúdo e tecnologia digital de suporte.

Esta pesquisa faz parte de uma concepção cognitivista (portanto, descritiva) do processo e não do resultado da instrução. Ela vincula a aprendizagem à interação e à organização de material instrucional, na estrutura cognitiva do indivíduo, da perspectiva de que esta é resultado, principalmente, daquilo que o indivíduo já sabe. Há, acessoriamente, uma ideia de que o conceito é independente do léxico (da forma como se descreve em uma linguagem), de não arbitrariedade (isto é, de que não se pode aprender por imposição de sentidos, mas por negociação), de que conceitos abstratos ou genéricos pressupõem uma abordagem que utiliza material potencialmente significativo, sucedida pela possibilidade de diferenciação e de reconciliação, engajamento dos envolvidos e, finalmente, a habilitação de soluções de mesma natureza para distintas categorias de problemas. Os desenhos didáticos (sejam eles quais forem), na perspectiva da aprendizagem significativa, são as estruturas que materializam a mediação pedagógica de tais pressupostos. Há, assim, uma relação orgânica e indistinguível entre referencial cognitivo e teoria educacional subjacente (SILVA FILHO; FERREIRA, 2018; SILVA FILHO *et al.*, 2021).

Uma aprendizagem significativa, assim, perpassa elementos indicados pelas teorias que a subjazem e que são amplamente reconhecidas em processos instrucionais, de tal natureza, a que podemos denominar como elementos intermediários ou recursais: conhecimento prévio, organizador avançado, material potencialmente significativo, hierarquia crescente de complexidade dos significados, recontextualização e reelaboração autônoma. São esses os elementos descritos, a seguir, e que fazem parte da estrutura desta pesquisa desde as suas premissas até a análise e a crítica de seus resultados.

1.1 A Teoria da Aprendizagem Significativa (TAS)

De acordo com Moreira (2011), independentemente do nível de ensino, os docentes apresentam os conhecimentos que adquiriram em sua formação e carreira e os estudantes

estabelecem a meta de decorar, gravar e reproduzi-los em uma avaliação. Portanto, as discussões e o tópico de ensino estão centrados no docente, que tem como produto final a aprendizagem mecânica. A teoria de David Ausubel propõe outro caminho: a aprendizagem significativa.

Segundo Moreira (1999), os teóricos cognitivistas defendem que a aprendizagem ocorre por meio do acúmulo organizado de um conjunto de informações, na mente do indivíduo, chamado estrutura cognitiva. Ausubel foi um representante do cognitivismo e tem como núcleo de sua teoria a chamada aprendizagem significativa.

A aprendizagem significativa ocorre quando uma nova informação se relaciona com um subsunçor localizado em determinada estrutura cognitiva. Para Ausubel (1968), o arranjo das informações, nessa estrutura cognitiva, é organizado de acordo com uma hierarquia conceitual, de forma que conceitos específicos são ligados, ou assimilados, a análogos mais gerais e inclusivos. É importante ressaltar que, de acordo com a teoria, não há uma simples influência direta dos conceitos já existentes com a nova informação e sim uma modificação na estrutura cognitiva do indivíduo, por causa da nova informação. Uma aprendizagem de natureza significativa é caracterizada pela aplicabilidade ressignificada de conhecimentos, em problemáticas de contexto social e cultural, a partir da mobilização da arquitetura cognitiva prevista no modelo. Por outro lado, na aprendizagem mecânica, a nova informação não é ancorada a um subsunçor, é armazenada, de maneira arbitrária, na estrutura cognitiva do indivíduo. Apesar disso, Ausubel não posiciona os dois tipos de aprendizagem como opostas, mas sim um contínuo.

Outro ponto importante na TAS é o material de ensino. Este deve relacionar-se, de maneira substantiva, com a estrutura cognitiva, ou seja, o sentido de determinado conceito deve permanecer inalterado, ainda que o contexto sofra modificações. Além disso, a relação estabelecida entre o material de ensino e a estrutura cognitiva deve ser não arbitrária, de forma que o indivíduo não apenas memorize conceitos e preposições ou que faça relações sem relevância ou sem sentido. Um material que possua essas características é chamado de potencialmente significativo.

1.1.1 Subsunção

O conceito do subsunçor, na teoria de aprendizagem significativa, é fundamental, pois é por meio dele que uma nova informação se ancora na estrutura cognitiva do indivíduo. Portanto, pode-se defini-lo, abstratamente, como conceitos ou proposições relevantes,

preexistentes em determinada estrutura cognitiva. “Subsunçores seriam, então, conhecimentos prévios especificamente relevantes para a aprendizagem de outros conhecimentos” (MOREIRA, 2012, p. 10). Na estrutura cognitiva do indivíduo, pode existir subsunçores em diferentes níveis de diferenciação, e é importante destacar que, quando uma nova informação é ancorada no subsunçor, ele também se modifica, tornando-se ainda mais estável, claro e diferenciado.

A aprendizagem mecânica tem seu papel. Quando o indivíduo não possui, em sua estrutura cognitiva, subsunçores para a ancoragem de uma nova informação, em um primeiro momento, a aprendizagem deve ser mecânica e possibilitar a formação de um subsunçor. À medida que a nova informação interage com o recém-formado subsunçor, este se torna, gradativamente, mais bem elaborado e mais capaz de servir como subsunçor para outras informações.

1.1.2 Organizadores Avançados

De acordo com Moreira (2012), quando um tópico de ensino não é familiar, pode-se introduzir, em um primeiro momento, um material com maior nível de abstração, generalidade e inclusividade, que possibilitará conexões entre a estrutura cognitiva e a nova informação, a fim de viabilizar a aprendizagem significativa.

Esses materiais são denominados **organizadores avançados**¹ e podem ser divididos em dois tipos: explicativo e comparativo. O primeiro é usado quando o material de aprendizagem não é familiar ao sujeito cognoscente, na forma de conhecimento como um ponto de partida. Já o segundo, quando há familiaridade com o material de aprendizagem, isto é, “[...] ajudará o aprendiz a integrar novos conhecimentos à estrutura cognitiva e, ao mesmo tempo, a discriminá-los de outros conhecimentos já existentes nessa estrutura, que são, essencialmente, diferentes, mas que podem ser confundidos” (MOREIRA, 2012, p.11).

O organizador avançado, então, é um mediador cognitivo que pode ser expositivo ou comparativo e objetiva introduzir — como hiato — conhecimentos até então abstratos ou complexos. Suas regras de formação envolvem comparar, em detrimento de expor; apoiar situações cognitivas altamente introdutórias; aduzir técnicas ou modelos significativamente

¹ Segundo Ferreira *et al.* (2020, p. 2-3), “No que podemos classificar como sua teoria de assimilação, Ausubel define como *advanced organizer* — literalmente, ‘organizador avançado’ — o dispositivo que desempenha um papel estruturante de um processo cognitivo. Nas traduções para a língua portuguesa, autores como Moreira (2008) preferiram denominá-lo ‘organizador prévio’. Isso se deu para prover melhor aceção, sem prejuízo à conotação original do termo”.

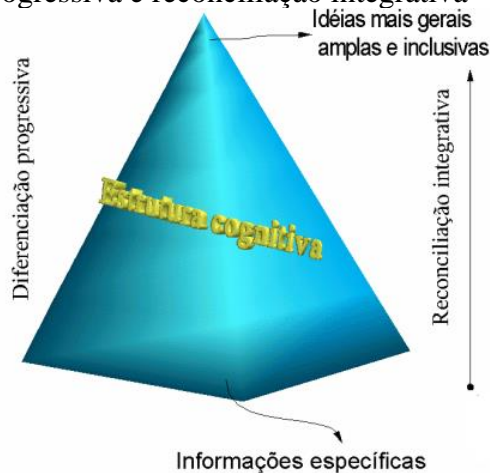
abstratos; representar significados, de forma acessível e sustentável, anteriormente à alocação de abstrações e proposições complexificadas, genéricas e inclusivas. No ensino de Física, em particular, esse recurso é fundamental, pois os elementos constitutivos de seu conhecimento, como ciência natural e de forte recursividade empírica e lógico-proposicional, requerem, recorrentemente, a adoção de estruturas e estágios preliminares, ilustrativos, comparativos, modelares ou representacionais do conhecimento.

As formulações de Ausubel (1968) para a aprendizagem significativa, como descritas, a seguir, são estruturas de explicação e consecução (portanto, fortemente consequenciais) de modelos instrucionais (nesse caso, de mediação pedagógica), que fazem recurso original à organização avançada.

1.1.3 Diferenciação Progressiva e Reconciliação integrativa

Da perspectiva da instrução, a diferenciação progressiva ocorre quando se dispõem as matérias de ensino, de maneira que os conceitos mais gerais e inclusivos são, progressivamente, diferenciados. Para Ausubel, o ser humano consegue aprender, mais facilmente, quando se parte de um todo e se diferencia, progressivamente, os conceitos e ideias. A segunda hipótese usada por Ausubel é a de que a estrutura cognitiva do ser humano é hierárquica, de forma que os conceitos e ideias mais gerais e inclusivas estão no topo e, progressivamente, ancoram-se conceitos e ideias mais diferenciadas e menos inclusivas. “A reconciliação integrativa, por sua vez, é o princípio segundo o qual a instrução também deve explorar relações entre ideias, apontar similaridades e diferenças importantes e reconciliar discrepâncias reais ou aparentes” (MOREIRA, 2011, p. 19). O esquema, a seguir, auxilia no entendimento desses dois processos (Figura 2).

Figura 2 – Diferenciação progressiva e reconciliação integrativa



1.1.4 Aprendizagem Significativa: Condições

Para Moreira (1999), existem duas condições para que ocorra aprendizagem significativa:

1. o material a ser ensinado deve se relacionar com a estrutura cognitiva do aprendiz, de maneira não arbitrária e não literal, isto é, ser uma unidade potencialmente significativa; e
2. o estudante deve ter interesse e disposição para relacionar o novo conteúdo, de forma não arbitrária e substantiva, com a sua estrutura cognitiva.

É importante destacar o papel do discente nesse processo de aprendizagem. Este deve ter interesse em aprender, significativamente, e, portanto, não apenas decorar fórmulas, equações, gráfico e treinar para uma avaliação classificatória, baseada em um decoro de questões previamente selecionadas pelo professor,

De acordo com Moreira e Masini (1982, p. 14):

[...] independentemente de quão potencialmente significativo seja o material a ser aprendido, se a intenção do aprendiz é, simplesmente, a de explicá-lo arbitrariamente e literalmente, tanto o processo de aprendizagem como seu produto serão mecânicos ou sem significado. (Reciprocamente, independente de quão predisposto para aprender estiver o indivíduo, nem o processo nem o produto serão significativos se o material não for potencialmente significativo).

1.2 Unidades de Ensino Potencialmente Significativa (UEPS)

Segundo Moreira (2011) e Ferreira *et al.* (2020), as unidades de ensino potencialmente significativas são sequências didáticas apoiadas na TAS com vistas à aprendizagem significativa, de um tópico de ensino. De maneira resumida, descreve-se, a seguir, os princípios, aspectos sequenciais e os aspectos transversais para a construção de uma UEPS.

1.2.1 Princípios

- O conhecimento prévio é o ponto mais importante para que se alcance a aprendizagem significativa.
- O indivíduo pode decidir aprender, mecanicamente, mas desse modo, não alcança a aprendizagem significativa.
- Os organizadores prévios formam uma ponte entre a nova informação e os conhecimentos prévios.
- As situações-problema instigam o indivíduo a aprender, significativamente, e estas devem ser apresentadas em nível crescente de complexidade.

- A avaliação da aprendizagem deve buscar evidências de aprendizagem.
- O professor é posicionado como criador da situação-problema.

1.2.2 Aspectos Sequenciais

1. Definir, de forma clara e precisa, o tópico de ensino que se deseja ensinar, pois, dessa forma, podem-se definir os subsunçores necessários à aprendizagem.
2. Criar um ambiente para que os subsunçores sejam externalizados.
3. Propor uma situação-problema, em nível introdutório, com base na etapa anterior, que funcionará como organizador prévio.
4. Inserir tópicos de ensino mais gerais, amplos e inclusivos e diferenciá-los, progressivamente.
5. Propor uma nova situação-problema, e retomar conceitos gerais, com maior nível de complexidade e etapa de reconciliação integrativa.
6. Concluir a UEPS, inserindo uma nova situação-problema que trate de pontos do tópico de ensino, com maior nível de complexidade, considerando a diferenciação progressiva e a reconciliação integrativa, de forma que a nova informação seja integrada aos conhecimentos avançados.
7. As avaliações da unidade potencialmente significativa (UEPS) ocorrerão, durante o processo de ensino e aprendizagem.
8. Por fim, deve-se avaliar a eficácia da UEPS, que pode acontecer, por meio de uma avaliação somativa, que permita identificar indícios de aprendizagem significativa.

1.2.3 Aspectos Transversais

- Privilegia-se a diversificação de estratégias de ensino e o questionamento a respostas prontas.
- Apesar da UEPS prever momentos didáticos coletivos, pode-se também propor momentos individuais.

O produto educacional apresentado no apêndice desta dissertação, constitui-se como uma UEPS, de acordo com os oito aspectos sequenciais apresentados no subtópico anterior. Esta propõe dois encontros de 1h40 cada. No primeiro encontro, ocorre a externalização de conhecimentos prévios, por intermédio da plataforma Mentimeter, que utiliza nuvens de palavras; e um momento de discussão com o objetivo de conceituar as palavras externalizadas pelos estudantes, no momento anterior; e por último, aplicam-se organizadores prévios para o

efeito fotoelétrico: um vídeo que trata da dualidade onda-partícula e um simulador computacional para o efeito fotoelétrico da plataforma PhET de Colorado, ambos conduzidos por questionários orientadores. O segundo encontro é dividido em três momentos distintos. No primeiro momento, o mais curto, aborda-se, historicamente, por intermédio de uma história em quadrinhos, o contexto em que o fenômeno do efeito fotoelétrico estava inserido. No segundo momento, abordam-se os tópicos principais do fenômeno do efeito fotoelétrico, com o uso do mesmo simulador para o efeito fotoelétrico, com base na diferenciação progressiva. Por último, em um terceiro momento, segue-se para a etapa de reconciliação integrativa, em que foi proposto cinco temas de aplicações do efeito fotoelétrico, que, em grupos, deverão gravar um vídeo e montar um mural colaborativo, de forma a dividir essa atividade em momentos coletivos e em momentos individuais.

CAPÍTULO 2 — EFEITO FOTOELÉTRICO

2.1 A Natureza da Luz, da Antiguidade ao Século XX

A luz foi uma fonte de energia essencial para os seres vivos, desde a formação do planeta Terra, até a atualidade. Até o século XVII, houve pouca evolução do entendimento do que é a luz e de seus fenômenos. Entre os filósofos da antiguidade, o caráter corpuscular da luz imperava.

Ainda no mesmo período histórico, já se tinha noção da propagação retilínea da luz, porém, associada ao fato de que os raios partiam dos olhos para os objetos, como Euclides (ca. 325 a.C. a 265 a. C.) defendeu em seu tratado “*Optica*”.

Para Demócrito (460-357 a.C), um dos idealizadores do Atomismo, a luz tinha origem nos objetos e atingia os olhos das pessoas, para então causar a visão. Ele pertencia a uma escola de pensamento: o atomismo, assim como Epicuro (c.a. 341-270 a.C.) e Lucrecio (c.a. 98-55 a.C.). Eles acreditavam que as partículas que formavam a natureza eram muito pequenas, eternas, indivisíveis e mais, que preenchiam o espaço vazio, em movimentos aleatórios, que combinavam umas com as outras, ao acaso, e formavam a matéria.

Platão (428-348 a.C) era um seguidor das ideias pitagóricas, de que a visão era causada do olho para fora. Ou seja, as partículas eram lançadas do globo ocular.

O filósofo grego Empédocles (493-430 a.C.) explicava a luz, a visão e o mundo, com base em quatro elementos fundamentais: fogo, ar, terra e água. Para ele, a luz e a visão estavam relacionadas com o elemento fogo. Os olhos emitiam um raio visual, que tocava nos objetos e retornava para a pupila, e assim, trazia informações, em uma espécie de fogo interno. Já a partir dos objetos, emanava um fogo externo, que transportava suas informações, como a cor e a forma. A visão era causada pela interação entre o fogo interno e o fogo externo.

Para Aristóteles (384-322 a.C.), o meio material exercia um papel primordial, em sua teoria da luz e da visão. Ele acreditava que a luz era uma qualidade dos corpos transparentes, como o ar, mas que para enxergar, era necessária a presença de uma fonte luminosa, como o sol. Em sua teoria, a luz não podia assumir o papel de matéria, pela incapacidade de dois corpos ocuparem o mesmo lugar. Não existia espaço vazio, na esfera celeste, o éter ocupava o espaço como quintessência, e na Terra, os espaços vazios eram preenchidos pelo ar, um dos quatro elementos fundamentais de Empédocles.

O século XVII foi marcado por intenso desenvolvimento na óptica, principalmente por causa dos instrumentos ópticos e a descoberta de fenômenos ópticos. Esse período foi marcado por trabalhos de Galileu Galilei (1564-1642) e Robert Hooke (1635- 1703). Ainda nesse século,

surgiram interesses em pesquisas acerca da natureza e comportamento da luz, prismas, dispersão da luz e até o funcionamento do olho (MOMM, 2017).

De acordo com Ortega e Moura (2020), Descartes foi uma figura importante, nesse período de desenvolvimento da ciência. Foi contra o atomismo, defendeu que a matéria era formada por três elementos: o primeiro, que constituía os corpos luminosos era o mais rápido de todos, altamente moldável e com alto poder de penetração; o segundo elemento era inerente aos corpos transparentes; e o terceiro e último, ligado aos corpos macroscópicos e opacos. Ele defendeu a instantaneidade da velocidade da luz, uma pressão que transmitia, ao longo da matéria, e a sua imaterialidade. Segundo Polito (2016), Descartes foi o primeiro a explicar, mecanicamente, a luz e as cores. A luz, posicionada como um corpúsculo; e as cores, como propriedades dos corpos, resultante da velocidade de rotação dos corpúsculos sobre a estrutura fisiológica do olho. Essas ideias de Descartes acabaram, ainda no século XVII, por agregar as contribuições de Francesco Grimaldi (1618-1663), descobridor da difração da luz; e de Robert Hooke e Robert Boyle, que descobriram o fenômeno de interferência.

Segundo Ortega e Moura (2020), ainda no mesmo século, Huygens propõe uma teoria ondulatória, um modelo vibracional, ou seja, considerava a luz como uma onda, porém, não se previam características, como: frequência, comprimento de onda e amplitude. Ele negou, veementemente, o modelo corpuscular para luz, e justifica a velocidade, o espalhamento e o cruzamento de raios sem desvio. Ele considerava que a luz se propagava em meios materiais e, para isso, recorreu à ideia do éter. Polito (2016) destaca que ele contribui com o famoso princípio de Huygens, até atualmente presente na óptica geométrica, e lançou mão do conceito de frente de onda, porém o seu modelo não explicava o fenômeno de interferência, por não ser um modelo com ondas periódicas.

Newton, em sua obra “Óptica”, em 1704, propôs um novo modelo para a dispersão da luz. Em sua publicação, a luz branca era composta de raios de luz de diversas cores, de forma que cada cor sofria um desvio distinto dentro do prisma. Ainda no século XVII, Newton desenvolveu um modelo corpuscular, baseado em princípios mecânicos, como a inércia e o impulso para a luz, que explicava alguns fenômenos, como: reflexão, refração, dispersão no prisma e anéis de Newton. A teoria de Newton ganhava crédito na comunidade científica, principalmente, com o advento do éter dinâmico.

No início do século XIX, Thomas Young propôs um modelo ondulatório, que não tinha a mesma inconsistência do modelo de Huygens e a falta de periodicidade. Young realiza um experimento de dupla fenda, em que se pode analisar interferências e difrações para a luz e ondas mecânicas, fenômenos até então não explicados pela teoria corpuscular de Newton. Com

isso, levantou a hipótese de que a luz é uma onda longitudinal e, mais tarde, chegou à conclusão de que as ondas luminosas eram transversais, após polarizarem a luz, com filtros polarizadores perpendiculares, e elas não se interferirem (POLITO, 2016). Para elucidar o experimento da dupla fenda, segundo Rocha (2002, p. 234):

Thomas Young fez passar um feixe luminoso (luz solar) através de dois orifícios construídos com um alfinete em um papel grosso e obteve pela primeira vez, em um anteparo, uma Figura de interferência luminosa, composta de faixas escuras e claras, alternadamente. Para conseguir um feixe luminoso adequado, ele fez passar, primeiramente, num obstáculo com um orifício.

De acordo com Ortega e Moura (2020), no fim do século XIX, os físicos Fizeau (1819-1896) e Jean Bernard L. Foucault (1819-1868), por meio de montagens experimentais distintas, mediram o valor da velocidade da luz (314.000 km/s). E mais: provaram que a velocidade da luz no ar é maior que na água, o que contrariava, na época, o modelo corpuscular de Newton.

Polito (2016) aponta que a relação entre a eletricidade e o magnetismo foi descoberta em 1820, por Christian Oersted (1777 – 1851), em um laboratório de circuitos elétricos, onde conseguiu perceber uma relação entre a corrente elétrica e movimentações de agulhas imantadas, que estavam próximas. Segundo Ribeiro *et al.* (2016), baseado nos trabalhos de Michael Faraday (1791–1867), James Clerk Maxwell (1831–1879) compilou as equações fundamentais do eletromagnetismo, que por sua vez, possibilitou concluir a respeito da existência de ondas eletromagnéticas, com velocidade finita e igual à velocidade da luz. Segundo Polito (2016), descobriram que essas ondas eram formadas por campos elétricos e magnéticos, mutuamente induzidos e perpendiculares entre si e à direção de propagação, transversais, e geradas por correntes elétricas variáveis, em um fio condutor.

Segundo Griffiths (2011, p. 332), Maxwell unificou o eletromagnetismo, por meio das quatro equações:

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{1}{\epsilon} \rho \quad (\text{i})$$

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

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (\text{iii})$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu \mathbf{J} + \mu \epsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (\text{iv})$$

Em que \mathbf{E} é o vetor campo elétrico, \mathbf{B} é o vetor indução magnética, ϵ é a permissividade elétrica do meio; seu valor, no vácuo, é de $\epsilon = 8,8541878176 \times 10^{-12}$ F/m; μ é a permeabilidade magnética do meio, no vácuo, seu valor é $\mu = 4\pi \times 10^{-7}$ T.m/A. Elas demonstram como as características do meio de propagação influência nos campos elétrico e magnético, em que \mathbf{J} é

a densidade de corrente elétrica; ρ é a densidade de cargas elétricas; e ∇ é um operador vetorial e pode atuar em uma função escalar, como gradiente; e em uma função vetorial, como divergente, por meio do produto escalar; e como rotacional, por intermédio do produto vetorial.

Segundo Halliday, Resnick e Walker (2016), as equações de Maxwell explicam uma gama de fenômenos envolvidos com o eletromagnetismo: bússola, motores elétricos, eletrodomésticos, equipamentos de comunicação, telecomunicações e radares. Por meio delas, pode-se deduzir equações da eletrostática, como a lei de Coulomb e até equações da ótica. A equação (i), chamada Lei de Gauss, expressa o divergente de \mathbf{E} , e relaciona o fluxo elétrico à presença de cargas elétricas isoladas; a equação (ii) expressa o divergente de \mathbf{B} , o que significa, fisicamente, que não existem monopolos magnéticos; e por último, a equação (iii) é chamada Lei de Faraday e expressa o rotacional de \mathbf{E} , e aponta relação entre um campo elétrico induzido e o fluxo magnético; a equação (iv) chamada Lei Ampere Maxwell, expressa o rotacional de \mathbf{B} , e relaciona a variação do fluxo elétrico e a corrente elétrica ao campo magnético induzido.

Como citado anteriormente, Maxwell deduziu o valor da velocidade das ondas eletromagnéticas, por meio das equações do eletromagnetismo, e então, concluiu que a luz tem natureza eletromagnética. A seguir, apresenta-se o cálculo da velocidade da luz, em função das características elétricas e magnéticas do meio de propagação, de acordo com Griffiths (2011, p. 227).

Em locais em que $\rho = J = 0$, as equações Maxwell podem ser escritas, da seguinte maneira:

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = 0 \quad (\text{i})$$

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

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (\text{iii})$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu\epsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (\text{iv})$$

Pode-se manipular as equações, de forma que o campo elétrico fique separado do campo magnético, então, primeiramente, aplica-se o rotacional na equação (iii):

$$\begin{aligned} \nabla \times (\nabla \times \mathbf{E}) &= \nabla \times \left(-\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}\right) \\ \nabla (\nabla \cdot \mathbf{E}) - \nabla^2 \mathbf{E} &= -\frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times \mathbf{B}) \\ \nabla (\nabla \cdot \mathbf{E}) - \nabla^2 \mathbf{E} &= -\mu\epsilon \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \end{aligned} \quad (3)$$

Sabendo que $\nabla \cdot \mathbf{E} = 0$, então, o resultado da equação (3) é:

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \mu\epsilon \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \quad (4)$$

Em uma segunda etapa análoga, aplica-se o rotacional em (iv):

$$\begin{aligned}\nabla \times (\nabla \times \mathbf{B}) &= \nabla \times \left(\mu \epsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \right) \\ \nabla (\nabla \cdot \mathbf{B}) - \nabla^2 \mathbf{B} &= \mu \epsilon \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times \mathbf{E}) \\ \nabla (\nabla \cdot \mathbf{B}) - \nabla^2 \mathbf{B} &= \mu \epsilon \frac{\partial^2 \mathbf{B}}{\partial t^2}\end{aligned}\quad (5)$$

Com base na equação (ii), tem-se que $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$, então, o resultado da equação (5) é:

$$\nabla^2 \mathbf{B} = \mu \epsilon \frac{\partial^2 \mathbf{B}}{\partial t^2}\quad (6)$$

Pode-se calcular a velocidade das ondas eletromagnéticas, ao igualar as equações (4) ou (6), com a equação de onda, a seguir:

$$\begin{aligned}\nabla^2 f &= \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 f}{\partial t^2} \\ \frac{1}{v^2} &= \mu \epsilon,\end{aligned}$$

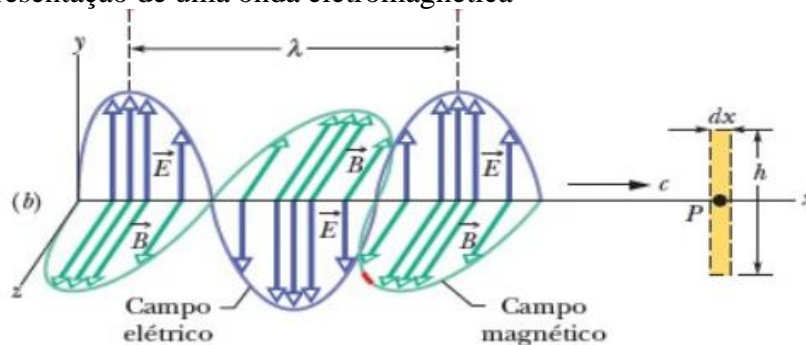
considerando que $v = c$ e, notação de que se refere a velocidade da luz, isola-se a velocidade da luz:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu \epsilon}}.$$

Obtém-se a velocidade das ondas eletromagnéticas que, no vácuo, é, aproximadamente $c = 3.10^8$ m/s.

De acordo com Tipler (2001), as ondas eletromagnéticas possuem um campo elétrico e outro magnético em fase perpendiculares entre si e perpendiculares à direção de propagação, portanto, todas as ondas eletromagnéticas são classificadas como transversais, de forma que a direção de propagação é dada pelo produto vetorial $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$, conforme o modelo apresentado na Figura 3.

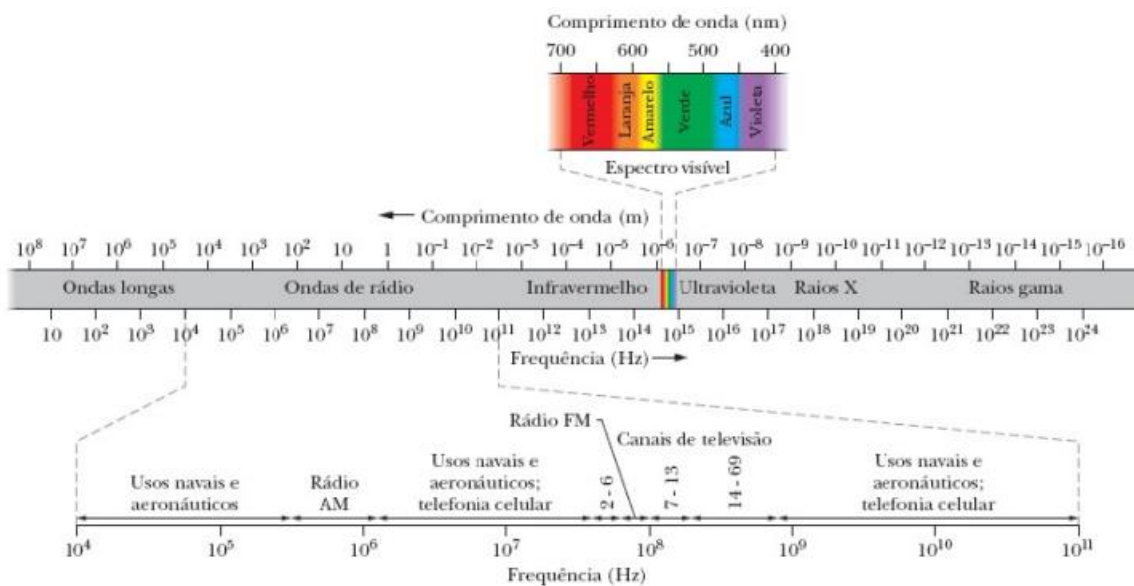
Figura 3 – Representação de uma onda eletromagnética



Fonte: Halliday, Resnick e Walker (2016, p. 4)

O espectro eletromagnético, Figura 4, é uma espécie de tabela que diferencia os sete tipos de ondas eletromagnéticas pelo comprimento de onda e frequência, do maior para o menor comprimento de onda, que são: rádio, micro-ondas, infravermelho, luz visível, ultravioleta, raio x, raio gama. É importante destacar que é um espectro contínuo, dessa forma, um grupo pode superpor outro. A partir desse grande espectro, existe a pequena faixa que alcança o comprimento de onda entre cerca de 400 e 700 nm, que corresponde à luz visível.

Figura 4 – Espectro eletromagnético



Fonte: Halliday, Resnick e Walker (2016, p. 2)

Segundo Young e Freedman (2016) durante a história da Física, foram realizados vários experimentos com a luz, com o objetivo de investigar a sua natureza. Foi verificado que os fenômenos ondulatórios, como: reflexão, refração, interferência, polarização e difração, apontavam um caráter ondulatório para a luz. Outros experimentos como o efeito compton; e o efeito fotoelétrico já demonstravam um caráter corpuscular. Eisberg e Resnick (1979, p. 51) confirmam o caráter corpuscular da luz, ao interagir com a matéria no efeito fotoelétrico e em outros fenômenos:

Três processos (o efeito fotoelétrico, o efeito Compton e a produção de pares) envolvem o espalhamento ou a absorção de radiação pela matéria. Dois processos (*bremstrahlung* e aniquilação de pares) envolvem a produção de radiação. Em cada caso obteremos evidências experimentais de que a radiação se comporta como uma partícula em sua interação com a matéria, diferentemente do comportamento ondulatório que apresenta quando se propaga.

No século XX, mais precisamente, em 1928, Bohr enunciou o princípio da complementaridade, que afirma que a descrição corpuscular é complementar à descrição

ondulatória, de forma que passam a ser necessárias as duas descrições para determinar a natureza da luz, do qual origina o termo: dualidade onda-partícula. De acordo com o princípio de Bohr, as duas descrições não são necessárias, ao mesmo tempo, para análise de um mesmo evento (YOUNG; FREEDMAN, 2016).

2.2 A Descoberta do Efeito Fotoelétrico por Hertz

Em 1887, na tentativa de confirmação da teoria ondulatória de Maxwell, Hertz, ao manipular descargas elétricas entre eletrodos de polaridades opostas, percebeu, acidentalmente, que a emissão de descarga elétrica era facilitada, a partir do momento que se faz incidir luz sobre um dos eletrodos (NUSSENZVEIG, 1998; PERUZZO; POTTKER; PRADO, 2014; EISBERG; RESNICK, 1979). Hertz descreve o experimento e fala a respeito da influência da luz no centelhamento:

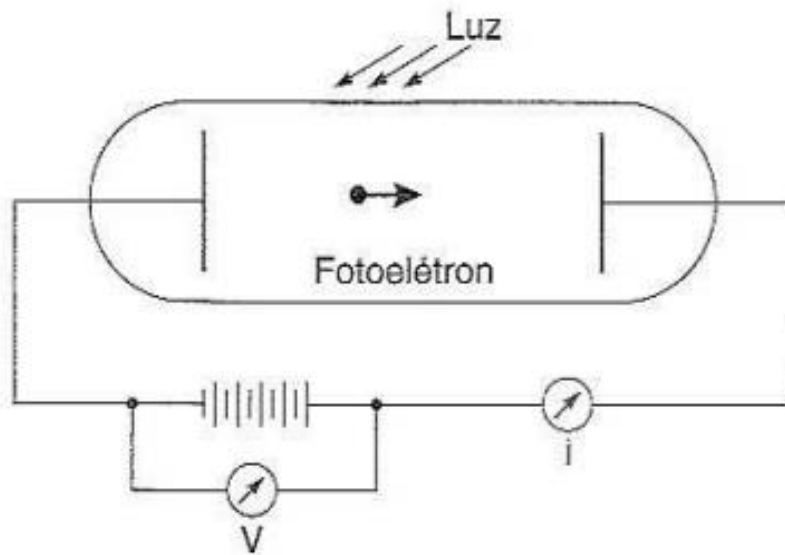
Em uma série de experimentos para estudar os efeitos da ressonância entre oscilações elétricas muito rápidas, que executei e publiquei recentemente, duas das centelhas elétricas eram produzidas pela mesma descarga de uma bobina de indução e, portanto, ocorriam simultaneamente. Uma dessas centelhas, a centelha A, era a centelha de descarga da bobina de indução e servia para excitar a oscilação primária. A segunda, centelha B, estava associada à oscilação induzida ou secundária. Ocasionalmente, coloquei o centelhador B no interior de uma caixa escura para poder observar melhor as centelhas; ao fazer isso, observei que o tamanho das centelhas era visivelmente menor quando o centelhador B estava dentro da caixa (TIPLER, 2001, p. 88).

Em 1899, P. Lenard demonstrou, por intermédio de experimentos que, elétrons eram emitidos da superfície do cátodo, quando exposto à radiação eletromagnética da região do ultravioleta; esse processo de eletrização de uma superfície metálica foi chamado efeito fotoelétrico.

2.3. A Montagem Experimental para o Efeito Fotoelétrico

Segundo Nussenzveig (1998), a Figura 5, a seguir, representa, esquematicamente, a montagem experimental para o efeito fotoelétrico. Nessa representação, há uma ampola de vidro, geralmente, de quartzo transparente à luz ultravioleta que, no seu interior, há alto vácuo, superfície limpa e polida, e dois eletrodos conectados aos terminais positivo e negativo de um gerador elétrico, em que se estabelece uma diferença de potencial V . No cátodo, há uma placa metálica, que recebe luz de frequência ν e intensidade i_0 . Os elétrons, chamados fotoelétrons, são ejetados em direção ao eletrodo do lado oposto, o que forma uma corrente fotoelétrica de intensidade I , identificável pelo amperímetro.

Figura 5 – Montagem experimental para o efeito fotoelétrico

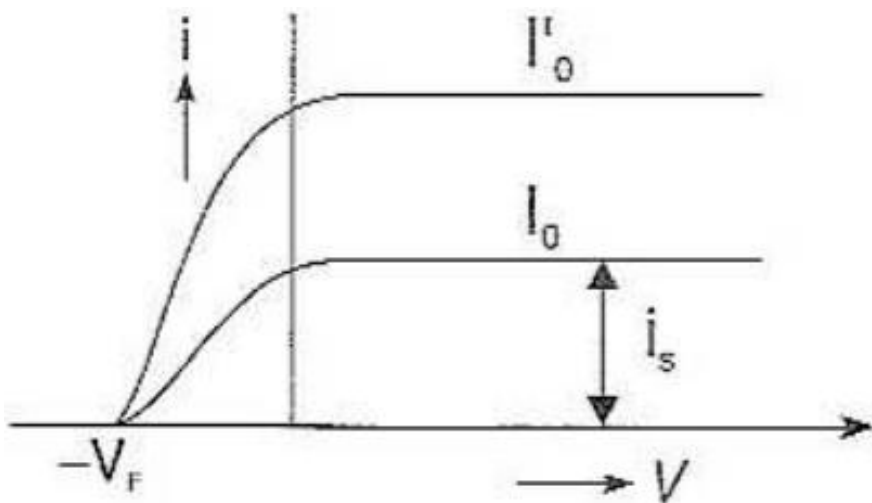


Fonte: Nussenzveig (1998, p. 250)

Para um material específico do cátodo, fixam-se os parâmetros da radiação incidente. Aplica-se uma diferença de potencial V positiva, e observa-se que todos os fotoelétrons que foram ejetados do cátodo chegam ao ânodo, que corresponde a uma corrente elétrica i_s , chamada corrente elétrica de saturação, representada na Figura 6.

Ainda acerca da Figura 6, se as polaridades forem invertidas, a corrente fotoelétrica começa a sofrer frenagem. De acordo com que se aumenta $|V|$, percebe-se que a corrente fotoelétrica sofre diminuição contínua em sua intensidade, até que $V = -V_f$ onde a corrente fotoelétrica é anulada, de forma que $V_f (>0)$ é dito potencial de frenagem.

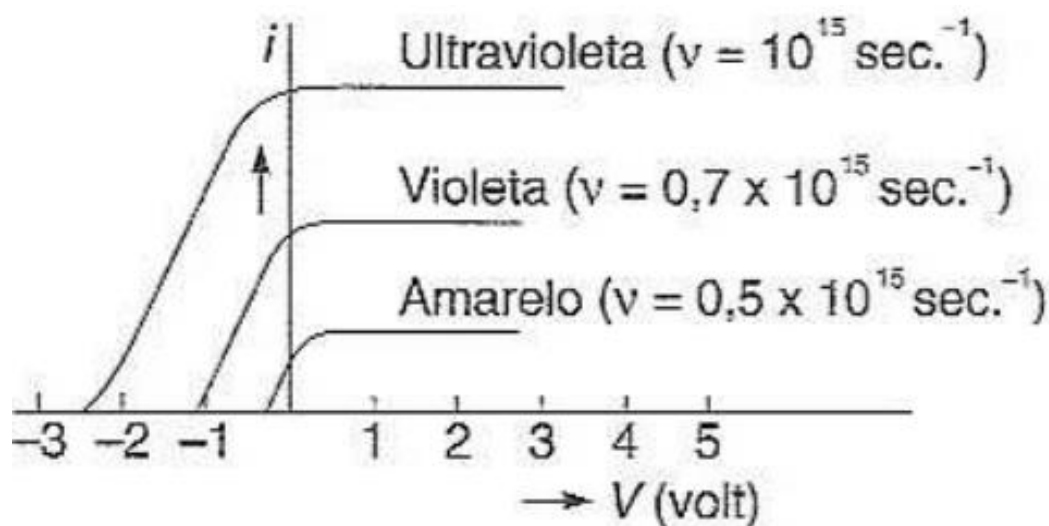
Figura 6 – Variação de i com V



Fonte: Nussenzveig (1998, p. 250)

Ao aumentar a intensidade da luz incidente de I_0 para I'_0 , percebe-se que a curva mantém o mesmo aspecto, a não ser pela corrente fotoelétrica i , que aumenta, proporcionalmente. Isso ocorreu devido ao aumento do número de elétrons ejetados pelo material iluminado, de forma que esse valor é diretamente proporcional à intensidade da luz, conforme Figura 7.

Figura 7 – Variação de i com a frequência da luz

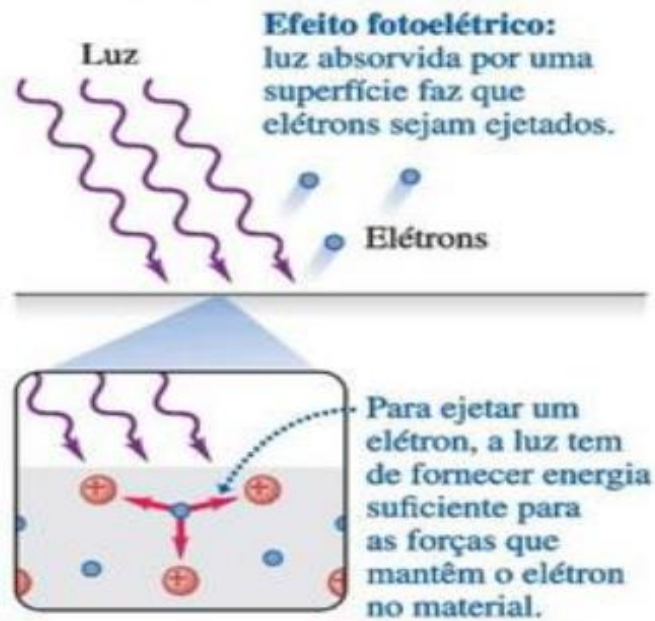


Fonte: Nussenzveig (1998, p. 250)

Ao fixar a intensidade da luz i_0 e aumentar a frequência da luz ν , percebe-se que o potencial de frenagem V_f aumenta. Para a maioria dos metais, o efeito fotoelétrico só acontece para a luz da região do ultravioleta; já para os metais alcalinos, percebe-se o fenômeno para a luz visível, para os menores comprimentos de onda. Ao fixar a frequência ν e modificar o metal do cátodo, percebe-se que o potencial de frenagem V_f também sofre alteração, ou seja, o potencial de frenagem é característica inerente ao metal do cátodo.

A luz incidente fornece energia suficiente ao elétron, conforme Figura 8, que se encontra na estrutura atômica do metal, para se desprender da atração elétrica, que pode ser diferente para cada elétron, e forma, assim, a corrente fotoelétrica.

Figura 8 – Esquema para o efeito fotoelétrico



Fonte: Young, Freedman (2016, p. 203)

Com relação à direção de movimento dos elétrons emitidos, Nussenzveig (1998, p. 251) ressalta que:

Como os elétrons no interior do cátodo podem ter uma distribuição de energias (num metal, existem elétrons livres) e podem provir de profundidades diferentes, os elétrons arrancados devem ter direções de movimento diferentes e velocidades (energias cinéticas) diferentes.

Ao considerar um elétron de massa m_e e velocidade v , pode-se definir sua energia cinético como:

$$T = \frac{1}{2} m_e \cdot v^2 \quad (7)$$

A diferença de potencial retardadora, capaz frear um elétron, de carga igual a $-e$, pode ser dada por:

$$e \cdot v = \frac{1}{2} m_e \cdot v^2 \quad (8)$$

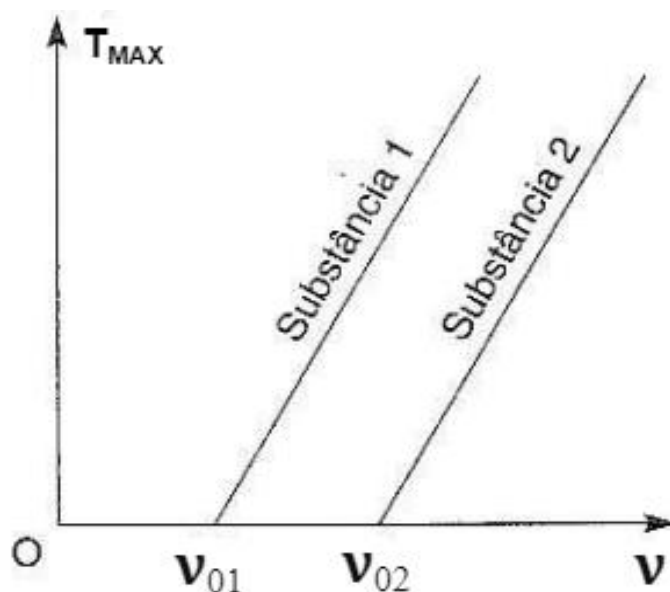
Dessa forma, o potencial de frenagem capaz de frear elétrons com energia cinética máxima, associada à velocidade máxima dos elétrons v_m , na direção perpendicular ao cátodo é dado por:

$$\frac{1}{2} m_e \cdot v_m^2 = eV_f \quad (9)$$

A Figura 9 relaciona a energia cinética máxima T_{max} dos elétrons, em função da frequência ν da radiação incidente, à frequência. Percebe-se que não é para qualquer valor de

frequência da onda incidente que o efeito fotoelétrico ocorre, a frequência mínima para que o fenômeno ocorra é ν_0 , e que ela varia, em função do material do cátodo. Segundo Halliday, Resnick e Walker (2016), a energia mínima necessária para liberar o elétron do átomo do metal é chamada função trabalho (W), também, varia em função do metal. Sendo E , a energia fornecida pela radiação eletromagnética, pode-se estabelecer que, se $h\nu > W$, o elétron será emitido do metal com energia cinética. Se $h\nu < W$, então, o elétron continuará preso na estrutura do átomo; e por último, se $h\nu = W$, então, o elétron será liberado do metal com energia cinética nula.

Figura 9 – Energia cinética máxima pela frequência



Fonte: Adaptado de Nussenzveig (1998, p. 253)

De acordo com Peruzzo, Pottker e Prado (2014), os cientistas que estudavam esse fenômeno, chegaram às seguintes conclusões: a não dependência de V_f com a intensidade da luz incidente na placa metálica do cátodo e a não dependência entre a intensidade da luz i_0 e a energia cinética dos fotoelétrons. Existia uma frequência (ν_0) da luz incidente chamada frequência de corte. A ejeção dos fotoelétrons apenas acontecia, para luz com frequência $\nu \geq \nu_0$, conforme Figura 9. A frequência de corte também varia, em função do material da placa metálica. A intensidade da luz não influenciava a energia cinética dos fotoelétrons e sim a frequência da luz incidente, como pode-se observar na Figura 9. A ejeção dos fotoelétrons, após a incidência da luz de frequência acima da frequência de corte, é praticamente instantânea.

2.4. Os Limites da Física Clássica para Descrição do Efeito Fotoelétrico

Como aponta Peruzzo, Pottker e Prado (2014), em 1887, Hertz, ao tentar gerar e captar ondas eletromagnéticas, percebeu que, ao incidir luz sobre alguns metais, estes ejetavam elétrons da estrutura. Para Tipler (2001), Philipp Lenard submeteu essas partículas a um campo magnético e descobriu que a razão q/m era muito próxima do resultado obtido por J.J. Thomson, e concluiu que as partículas emitidas eram elétrons. Segundo Peruzzo, Pottker e Prado (2014), Lenard demonstrou, experimentalmente, que o número de elétrons ejetados do material dependia da intensidade da luz, evento pelo qual só acontecia, a partir de determinado comprimento de onda da luz. A Física clássica não conseguia explicar esses resultados, pois, de acordo com ela, a luz é uma onda eletromagnética, que faria o elétron oscilar na mesma frequência da onda. Se a amplitude de oscilação do elétron ultrapassar um valor-limite, então, a carga negativa seria lançada do metal, lembrando que amplitude está diferentemente ligada à intensidade da onda (brilho). De acordo com Halliday, Resnick e Walker (2016), a Física clássica, ao aumentar a intensidade da luz, os elétrons ejetados deveriam adquirir maior energia e não um maior número de elétrons ejetados. Percebe-se, claramente, a limitação da Física clássica, em explicar os resultados experimentais de Lenard.

2.5. A ideia do Quanta

Considera-se um meio material de temperatura T_1 e inserido neste, um corpo de temperatura T_2 emitindo, absorvendo ou em equilíbrio térmico. A radiação térmica é a radiação eletromagnética emitida por um corpo de temperatura T . Então, percebe-se que o corpo emite mais radiação para o meio do que absorve dele, quando a sua temperatura $T_2 > T_1$. Se a temperatura do meio for maior que a do corpo, ou seja, $T_1 > T_2$; então, este absorverá radiação térmica do meio. E por último, se $T_1 = T_2$, pode-se dizer que não há mais troca de radiação térmica, nem absorção e nem emissão.

Um corpo que não permite a passagem de luz por ele, corpos opacos, ao incidir radiação sobre ele, uma parcela é absorvida e a outra refletida; alguns tipos de corpos permitem maior absorção e outros maior reflexão. O fenômeno de absorção causa um aumento da energia de movimento dos elétrons e a aceleração dessas cargas causa a emissão de radiação eletromagnética.

Quando se aumenta a temperatura de um corpo, esta passa a emitir radiação eletromagnética, da região do vermelho, e se desloca em direção aos comprimentos de ondas menores, até chegar a uma coloração muito próxima de branco. Observe o espectro visível, na

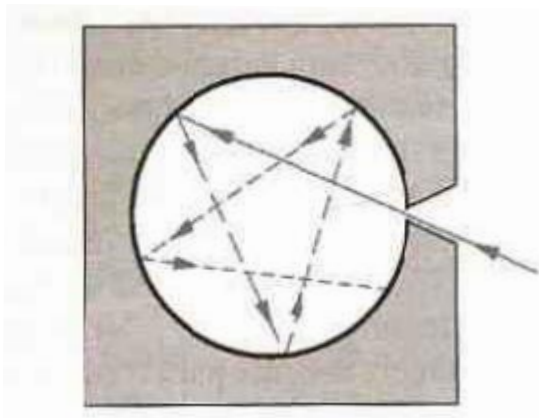
Figura 4, de forma que a frequência e a intensidade da onda emitida sofrem aumento com o aumento da temperatura.

Em 1860, Kirchhoff propõe o modelo idealizado do corpo negro (Figura 10) que, conceitualmente, pode ser definido como aquele corpo que absorve toda radiação que incide sobre ele; e todo corpo que é um absorvedor também é um bom emissor de radiação térmica. Esse grupo de corpos tem seu espectro de energia dependente apenas do comprimento de onda e da temperatura. Em 1879, Josef Stefan, por meios experimentais; e, em 1884, Ludwig Boltzmann, por meios teóricos, descobrem uma relação matemática entre a intensidade da radiação (I) e a temperatura (T), independentemente das características do corpo:

$$I(T) = \sigma \cdot T^4, \quad (10)$$

em que é dependente de uma constante que vale $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{k}^2$

Figura 10 – Modelo para corpo negro



Fonte: Tipler (2001, p. 84)

Experimentalmente, obteve-se que o comprimento de onda λ , para o qual a radiação é máxima, é inversamente proporcional à temperatura absoluta:

$$\lambda \propto \frac{1}{T}.$$

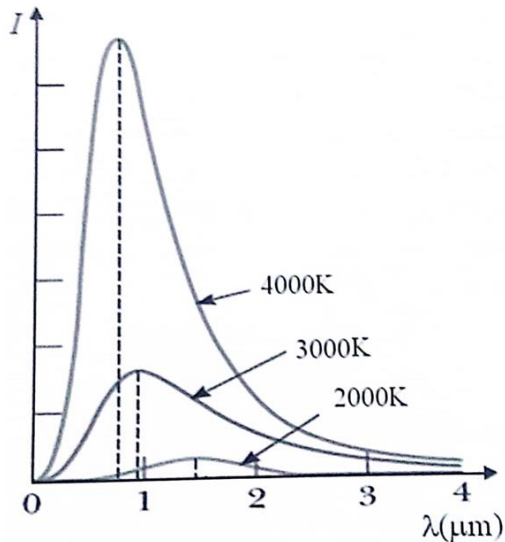
Portanto, encontrou-se a lei de Wien:

$$\lambda_{\max} T = 2,898 \cdot 10^{-3} \text{ (mK)} \quad (11)$$

No início do século XX, Lord Rayleigh e James Jeans trabalharam, do ponto de vista teórico, na questão do espectro de radiação do corpo negro, baseado no eletromagnetismo de Maxwell e na Física Estatística Clássica. Para isso, consideraram um corpo negro ideal de cavidade L, conforme a Figura 11, e isotérmica. Toda radiação que adentra na cavidade é absorvida pela parede e seus átomos se comportam como osciladores e emitem radiação

eletromagnética; de forma que, com o aumento da temperatura, a quantidade de energia total emitida aumenta e desloca o espectro de emissão para comprimentos de onda menores.

Figura 11 – Gráfico de $I \times \lambda$ para três valores de temperatura



Fonte: Peruzzo, Pottker e Prado (2014, p. 117)

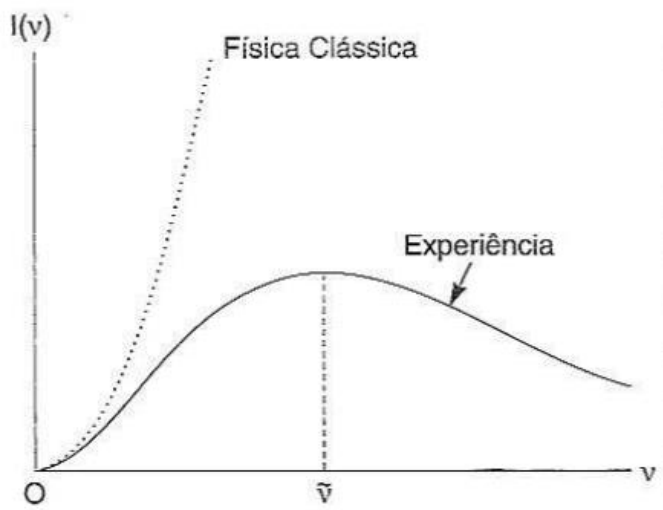
Considerando que o corpo negro passe a emitir radiação de todo o espectro eletromagnético, chegou-se à equação:

$$I(\lambda, T) = \frac{2\pi c K T}{\lambda^4} \quad (12)$$

Em que $c = 3.10^8$ m/s e corresponde à velocidade da luz no vácuo, K é a constante de Boltzmann $k = 1,38.10^{-23}$ j/K.

A lei de Rayleigh-Jeans, como já citado, é teórica e não concordava com os resultados experimentais da época, para pequenos comprimentos de onda, conforme apresentado na Figura 12. Essa falha da lei clássica para determinada região do espectro eletromagnético foi chamada de catástrofe do ultravioleta, por Paul Ehrenfest (PERUZZO; POTTKER; PRADO, 2014).

Figura 12 – Distribuição espectral da radiação térmica



Fonte: Adaptado de Nussenzveig (1998, p. 247)

Segundo Polito (2016) e Peruzzo, Pottker e Prado (2014). A solução para o problema do corpo negro apareceu ainda no início do século XX, durante os estudos a respeito do corpo negro, por Max Planck, na tentativa de adequar uma lei teórica aos dados experimentais.

$$I(\lambda, T) = \frac{8\pi hc}{\lambda^5} \frac{1}{(e^{\frac{hc}{kT\lambda}} - 1)} \quad (13)$$

Max Planck assumiu que as paredes da cavidade se comportavam como osciladores harmônicos carregados, amortecidos com dipolos oscilantes que absorvem e emitem radiação eletromagnética. Por fim, considerou que a forma com que os osciladores e a radiação eletromagnética trocavam energia era quantizada, em quantidades discretas em proporcionais à frequência ν de oscilação da onda eletromagnética, em que h é a constante de Planck, $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ J.s, o que tornou, mais tarde, uma das constantes fundamentais da natureza.

$$E_n = n h \cdot \nu \quad (14),$$

em que “ n ” é um número inteiro positivo.

2.6. A solução de Einstein para o efeito fotoelétrico

Em 1905, Einstein publicou um artigo em que aplica as ideias de quantização da energia de Planck para solução da incompatibilidade do fenômeno do efeito fotoelétrico, com a Física Clássica. De acordo com Tipler (2001, p. 89):

Einstein propôs que a quantização da energia usada por Planck no problema do corpo negro fosse uma característica universal da luz. Em vez de estar distribuída uniformemente no espaço no qual se propaga, a luz é constituída por quanta isolados de energia hf . Quando um desses quanta, denominados

fótons, chega à superfície do catodo toda sua energia é transferida para um elétron.

De acordo com Eisberg, Resnick (1979), é de vital importância entender que os fótons evidenciam o caráter corpuscular da luz, assim como no efeito Compton e na produção de pares. Já no experimento da dupla fenda de Huygens, que evidenciou o caráter ondulatório da luz, que sofre difração e interferência: “Einstein não concentrou sua atenção na forma ondulatória familiar com que a luz se propaga, mas sim na maneira corpuscular com que ela é emitida ou absorvida” (EISBERG; RESNICK, 1979, p. 55).

Segundo Halliday, Resnick e Walker (2016), Einstein definiu que um quantum de luz também pode ser definido pela equação 14, de maneira que a menor energia do fóton é $h\nu$. Se uma onda possuir energia maior que $h\nu$, então, ela será um múltiplo inteiro desse quantum: $n.h\nu$, em que n é um número inteiro. Dessa forma, ele definiu a lei de conservação de energia para o elétron da seguinte maneira:

$$h\nu = T_{\max} + W \quad (15)$$

Em que $h\nu$ representa a energia fornecida pelo fóton ao cátodo, W é a função trabalho do material e a T_{\max} representa a energia cinética máxima com que o elétron é lançado.

As noções acerca do entendimento clássico do efeito fotoelétrico, a quantização da energia proposta por Max Planck e a solução apresentada por Einstein, para o efeito fotoelétrico, são tópicos de caráter historiográfico, que facilitam a localização da Física Quântica dentro da história da Física, e reforça a importância de que sejam aprendidos, significativamente, pelos estudantes. Assim, também são importantes tópicos de ensino envolvidos diretamente com o efeito fotoelétrico: corrente fotoelétrica, relação entre energia dos elétrons e frequência da luz e frequência de corte, relação entre a intensidade da luz e quantidade de elétrons ejetados da placa metálica, função trabalho, potencial de frenagem e a equação de Einstein.

2.7. A conservação de Energia no Efeito Fotoelétrico

Segundo Eisberg, Resnick (1979), o fóton é a partícula de luz que transporta consigo energia e momento linear, sem possuir matéria. A conservação de energia, na emissão de um fóton, pode ser dada pela diferença entre os níveis de energia do oscilador:

$$E_{n+1} - E_n = (n + 1) h\nu - nh\nu = h\nu \quad (16)$$

Sabendo que:

$$c = \lambda\nu \quad (17)$$

Ao substituir a equação (17) na equação (16):

$$E_{\text{fóton}} = E_{n+1} - E_n = \frac{hc}{\lambda} \quad (18),$$

em que h é a constante de Planck, já definida anteriormente.

CAPÍTULO 3 — METODOLOGIA

3.1. Estrutura do Produto Educacional

O produto educacional foi estruturado como uma UEPS, para o ensino do efeito fotoelétrico, dividida em dois encontros, cada um com duas aulas de 50 minutos. A UEPS foi organizada em planos de aulas, conforme sugerido por Ferreira e Silva Filho (2019), e aplicada como pesquisa translacional (FERREIRA *et al.*, 2021).

Nas etapas subsequentes, será descrita a estrutura do produto educacional, suas atividades, seus objetivos, a avaliação de presença de subsunçores e avaliação geral da sequência didática.

O primeiro encontro tem duração prevista de 1h40, e será dividido em três momentos. No primeiro momento, os objetivos são identificar a presença de subsunçores, para a compreensão do fenômeno do efeito fotoelétrico, assim como aplicar organizadores avançados, para facilitar a compreensão do fenômeno do efeito fotoelétrico. Em uma atividade individual, de 20 minutos, utiliza-se uma TDIC, o Mentimeter, para o levantamento de subsunçores. O programa possibilita submeter os estudantes a uma situação problema, cujo resultado consta na (Figura 13).

Figura 13 – Levantamento de Subsunçores, por meio do Mentimeter



Fonte: Captura de tela do Mentimeter

Com base nessa situação, fazer uma captura da estrutura cognitiva dos indivíduos, por meio de conceitos ou palavras que, de forma direta ou indireta, estejam relacionadas com

determinado assunto, que nesse caso, é o efeito fotoelétrico. Em seguida, espelha-se o resultado do questionamento e, rapidamente, explica-se a formação da nuvem de palavras, de forma que os estudantes entendam que as palavras mais recorrentes ficam em destaque e palavras que possuem grau de ligação se posicionam próximas umas das outras. Para os próximos 30 minutos de aula, propõe-se uma atividade coletiva, em grupos on-line e presenciais, com o objetivo de conceituar as palavras da nuvem. Essas atividades buscaram encontrar os seguintes subsunçores: (I) Energia e sua conservação; (II) Definição de uma onda; (III) características de uma onda (frequência, comprimento de onda, amplitude); (IV) classificação da uma onda incidente quanto à sua natureza; e (V) conceitos relacionados à estrutura da matéria.

Ainda no primeiro encontro, segue-se para a etapa de aplicação de um organizador avançado, de duração próxima de 15 minutos, que consiste na utilização do recurso multimídia, para assistir a um vídeo a respeito do experimento da dupla fenda e o comportamento dual. O vídeo é apresentado pelo Dr. Quantum, do filme "Quem Somos Nós? Uma Nova Evolução"; portanto, possui linguagem adequada ao público que compõe a geração Z. O material aborda o assunto, de maneira geral e inclusiva, por isso, pode ser usado como um organizador avançado. Após o vídeo, propõe-se um momento breve de discussão acerca do comportamento dual e orienta-se que respondam a um questionário problematizador postado no Google Formulários, Figura 14.

Figura 14 – Questionário-problematizador acerca do comportamento dual da luz

Com base no vídeo sobre a dualidade onda partícula e nos momentos de discussão, responda a questão-problema abaixo:

Imagine um feixe de luz de alta frequência que incide sobre uma placa metálica. *
Foi observado que a placa após um curto intervalo de tempo se torna positivamente carregada. Nessa situação, a onda eletromagnética se comporta como onda ou como partícula? Explique sua resposta.

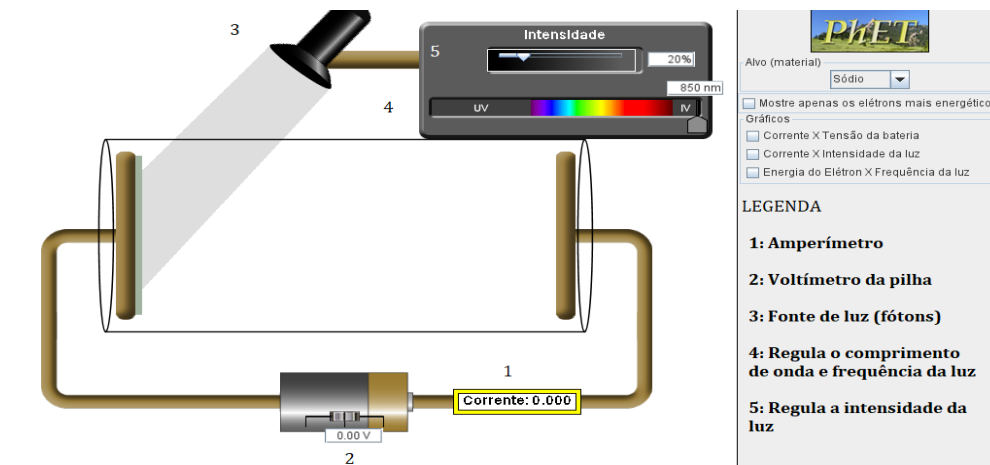
Sua resposta

Fonte: Captura de tela do Google Formulários

Para os próximos 35 minutos da sequência didática, conduz-se os alunos a uma sala de informática, para que seja aplicado outro organizador avançado, o simulador da plataforma PhET, para o ensino do efeito fotoelétrico, a TDIC central deste trabalho. Nos primeiros

instantes, abre-se o simulador e compartilha-se a tela com o grupo de estudantes que está remoto, e por meio de espelhamento do recurso multimídia para o grupo de estudantes que está presencial para explicar as funcionalidades do simulador utilizando a legenda, conforme Figura 15.

Figura 15 – Legenda do simulador



Fonte: Captura de tela do PhET

Em seguida, disponibiliza-se o link para acesso ao simulador para o efeito fotoelétrico, por meio do Google Sala de Aula; e o link para o Google Formulários, que disponibilizará um questionário-problematizador (roteiro), para que os estudantes manipulem a modelagem e respondam, conforme ilustram as Figura 16 e Figura 17.

Figura 16 – Questionário-problematizador acerca do simulador computacional

QUESTÃO 1

Abra o simulador computacional. Vá na barra de ferramentas e abra a aba de "opções". Em seguida selecione: " mostre os fótons". Por que o simulador permite essa visualização? O que são fótons? *

Sua resposta

QUESTÃO 2

Existe uma energia mínima para que ocorra o efeito fotoelétrico? Explique com base nas observações feitas por você. Caso seja necessário trace o gráfico ENERGIA x FREQUÊNCIA. *

Sua resposta

Fonte: Captura de tela Google Sala de Aula

Figura 17 – Questionário-problematizador acerca do simulador

Questão 3

Fixe o valor da intensidade da luz para um valor diferente de zero. Existe um valor máximo para o comprimento de onda para que ocorra o efeito fotoelétrico? *

Sua resposta

Questão 4

Os fótons são partículas de luz que possuem energia e momento linear. Ao se chocarem contra o metal eles transferem essa energia para quem? observe o fenômeno ocorrer no simulador.

Sua resposta

Fonte: Captura de tela Google Sala de Aula

O segundo encontro, com duração total de 1h40, será utilizado o recurso multimídia e o espelhamento de tela pelo Microsoft Teams, em toda a aula. Esse último encontro tem como objetivos: compreender, historicamente, o efeito fotoelétrico; obter o entendimento clássico para o efeito fotoelétrico, a quantização da energia de emissão do corpo negro, a solução de Einstein para o efeito fotoelétrico, a solução de Einstein para o efeito fotoelétrico, do ponto de vista conceitual; a corrente fotoelétrica e a sua identificação no simulador; a relação entre energia dos fotoelétrons e a frequência da luz incidente no metal e da frequência de corte; a relação entre intensidade da onda luminosa e o número de elétrons ejetados do material; o conceito da função trabalho; o potencial de frenagem; e por último, a Física e a Matemática da equação de Einstein para o efeito fotoelétrico.

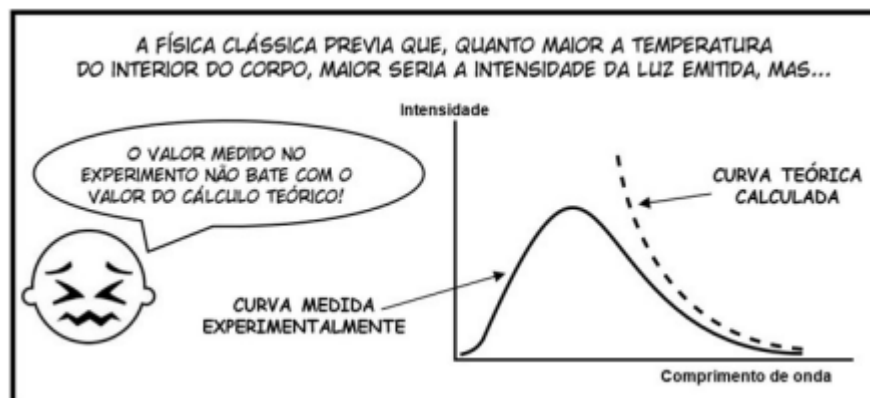
O primeiro momento, com duração em torno de 15 minutos, compreende-se em uma introdução ao fenômeno do efeito fotoelétrico, em uma abordagem histórica, por meio de uma história em quadrinhos, presente no artigo de Corrêa e Arthur (2021). Propõe-se contemplar o entendimento clássico do efeito fotoelétrico, o efeito fotoelétrico como um dos problemas não solucionados pela Física Clássica, a quantização da energia proposta por Max Planck, em 1900, e, por fim, a solução de Einstein para o efeito fotoelétrico. A seguir, a Figura 18 – O problema da radiação do corpo negro; e a Figura 19 – Catástrofe do ultravioleta, são trechos da história em quadrinhos.

Figura 18 – O problema da radiação do corpo negro



Fonte: Corrêa e Arthury (2021, p. 79)

Figura 19 – Catástrofe do ultravioleta



Fonte: Corrêa e Arthury (2021, p. 79)

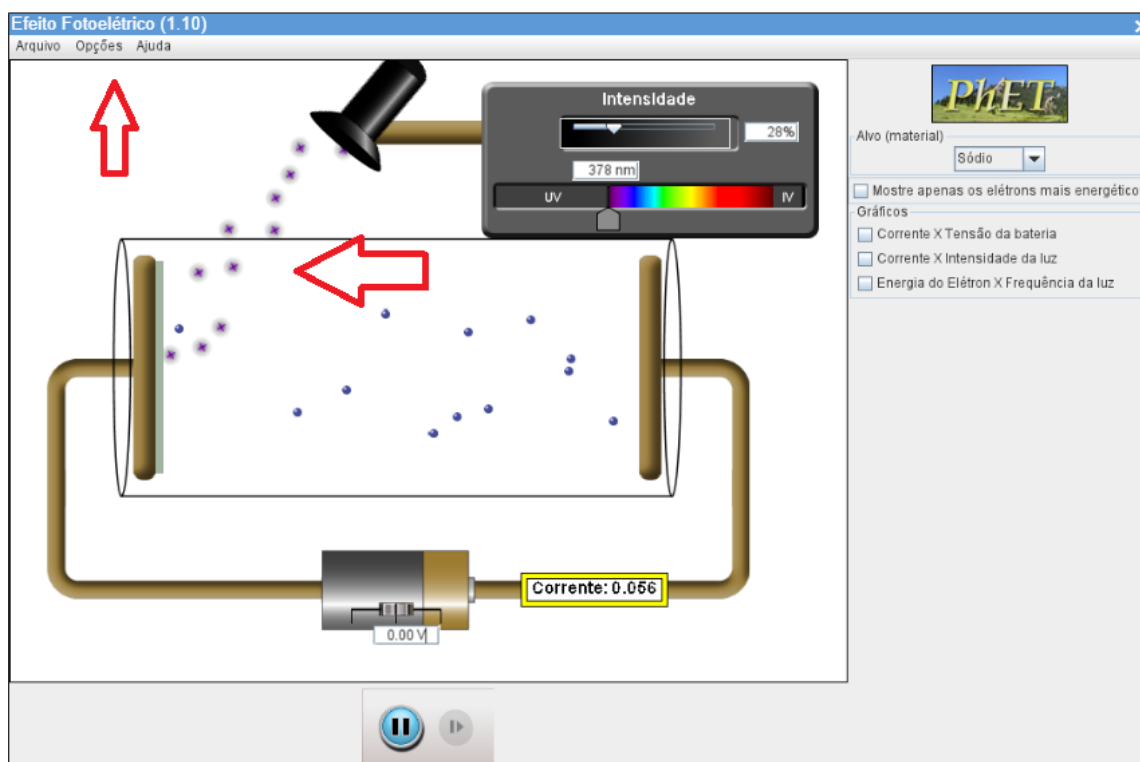
Dependendo da quantidade e da qualidade do envolvimento dos estudantes nessa introdução histórica, percebem-se evidências de aprendizagem. Caso o professor julgue necessário, ele pode solicitar um texto descritivo, que responda às seguintes perguntas: qual o entendimento da Física clássica para o efeito fotoelétrico? Por que a Física clássica não conseguiu resolver/entender o efeito fotoelétrico? Qual foi a proposta dada por Max Planck para resolver o problema da catástrofe do ultravioleta? Como Einstein conseguiu explicar o fenômeno do efeito fotoelétrico?

No segundo momento da aula, o professor seguirá, pelos próximos 50 minutos; e aborda cada uma das características do fenômeno do efeito fotoelétrico, por meio do simulador computacional: a corrente fotoelétrica, a relação entre energia dos elétrons e frequência da luz e frequência de corte, a relação entre a intensidade da luz e quantidade de elétrons ejetados da placa metálica, a função trabalho, o potencial de frenagem e a interpretação Física e Matemática da equação de Einstein para o efeito fotoelétrico. Para essas etapas de abordagem conceitual,

aconselha-se que os estudantes acompanhem no simulador, junto com o professor; desta forma, o envolvimento e o interesse tendem a ter maior qualidade.

Para abordar a corrente fotoelétrica, seleciona-se uma frequência/comprimento de onda, que provocará a corrente no simulador; aponta-se a leitura no amperímetro; e faz-se as seguintes perguntas: 1) Qual o nome desse fenômeno? 2) Se o gerador elétrico não está aplicando uma diferença de potencial no circuito (veja o voltímetro), o que causou esse fluxo de cargas elétricas? 3) Vimos, nas aulas anteriores, que a luz se comporta como partícula nesse fenômeno (primeiro encontro); portanto, ela transfere energia e momento linear para as partículas subatômicas do metal; qual partícula recebe essa energia? Pode-se selecionar o modelo corpuscular para luz no simulador, na barra “opções” > “mostre os fótons”, conforme ilustrado na Figura 20. Em seguida, após os estudantes responderem oralmente ou pelo chat do Teams, o professor define o conceito de corrente fotoelétrica. A pergunta 1 busca evidências de aprendizagem relacionadas ao reconhecimento do fenômeno no simulador computacional. A pergunta 2 busca evidências acerca da relação de causa e efeito entre a luz incidente, de frequência acima da frequência de corte e de energia acima da função trabalho do material, e a emissão de fotoelétrons. Caso o estudante não consiga responder as perguntas 1 e 2, lança-se a pergunta 3, que fará conexão com momentos do primeiro encontro, que tratam a respeito da conservação de energia entre os fótons e os elétrons da placa metálica.

Figura 20 – Ajuste da representação dos fótons no simulador PhET



Fonte: Captura de tela da plataforma PhET

Para abordagem da relação entre energia dos elétrons e frequência da luz e definição da frequência de corte no simulador, deve-se manter o sódio como alvo, fixar o valor de intensidade da luz em um valor próximo de 50% e alterar o comprimento de onda, a partir dos maiores, em direção aos menores valores, paulatinamente, até que o fenômeno ocorra. E após isso, continuar diminuindo o comprimento de onda, até atingir o seu menor valor. Esse procedimento fará com que o estudante observe que, conforme diminui o comprimento de onda da onda incidente e, conseqüentemente, aumenta a sua frequência, a energia dos fotoelétrons também aumenta. Em seguida, para que os estudantes observem que a intensidade da luz não causa o fenômeno, fixar o comprimento de onda para valores em que não vão ocorrer o efeito fotoelétrico, por exemplo, na faixa do vermelho (em torno de 750 nm) e aumentar a intensidade da luz até o seu valor máximo.

Em seguida, deve-se fazer as seguintes perguntas: 4) O fenômeno ocorre para qualquer valor de comprimento de onda e frequência? 5) Com base na observação, qual a relação de proporcionalidade entre a frequência da luz incidente e a energia cinética dos elétrons emitidos da placa metálica? Após um momento de discussão com os alunos, definir o conceito de frequência de corte e a relação de proporcionalidade entre a frequência da luz incidente e a energia cinética dos fotoelétrons. Em seguida, fazer a pergunta 6) Qual equação determina a relação de proporcionalidade entre a frequência da onda incidente e a energia cinética dos fotoelétrons? Após um momento de discussão, definir, matematicamente, a equação e completar a discussão abrindo o gráfico energia do elétron x frequência da luz. As perguntas 4 e 5 buscam evidências de aprendizagem acerca da relação de proporcionalidade entre a frequência da onda incidente e a energia cinética dos fotoelétrons, além de evidências acerca da frequência de corte. Por último, a pergunta 6 busca evidências de aprendizagem a respeito da matematização da pergunta 4, ou seja, acerca da equação de Einstein para o efeito fotoelétrico.

Para discutir a relação entre a intensidade da luz incidente e a quantidade de elétrons emitidos da placa, é preciso ajustar o comprimento de onda para em torno de 440 nm e pedir que os estudantes observem o aumento da intensidade da luz, concomitantemente à observação do amperímetro. Fazer a pergunta 7) Qual a relação de proporcionalidade entre a intensidade da luz incidente e o número de elétrons ejetados da placa metálica? Após um momento de discussão acerca da pergunta, abrir, no simulador, o gráfico energia da corrente x intensidade da luz e definir, em conjunto com os estudantes, a relação de proporcionalidade entre a corrente

fotoelétrica e a intensidade da onda incidente. A pergunta 7 busca evidências de aprendizagem a respeito da relação de proporcionalidade entre a intensidade da luz e a corrente fotoelétrica.

Para abordagem da frequência de corte, selecionar, no simulador, o gráfico energia do elétron x frequência da luz. Para cada metal disponível (sódio, zinco, cobre, platina, cálcio e magnésio), deve-se ajustar o comprimento de onda da luz incidente, conseqüentemente, a energia fornecida. Dessa forma, os estudantes devem observar que, para cada material, existe um valor de energia mínima necessária para ejeção dos elétrons. Definir, conceitualmente, a função trabalho; e matematicamente, a relação entre a função trabalho e a frequência de corte.

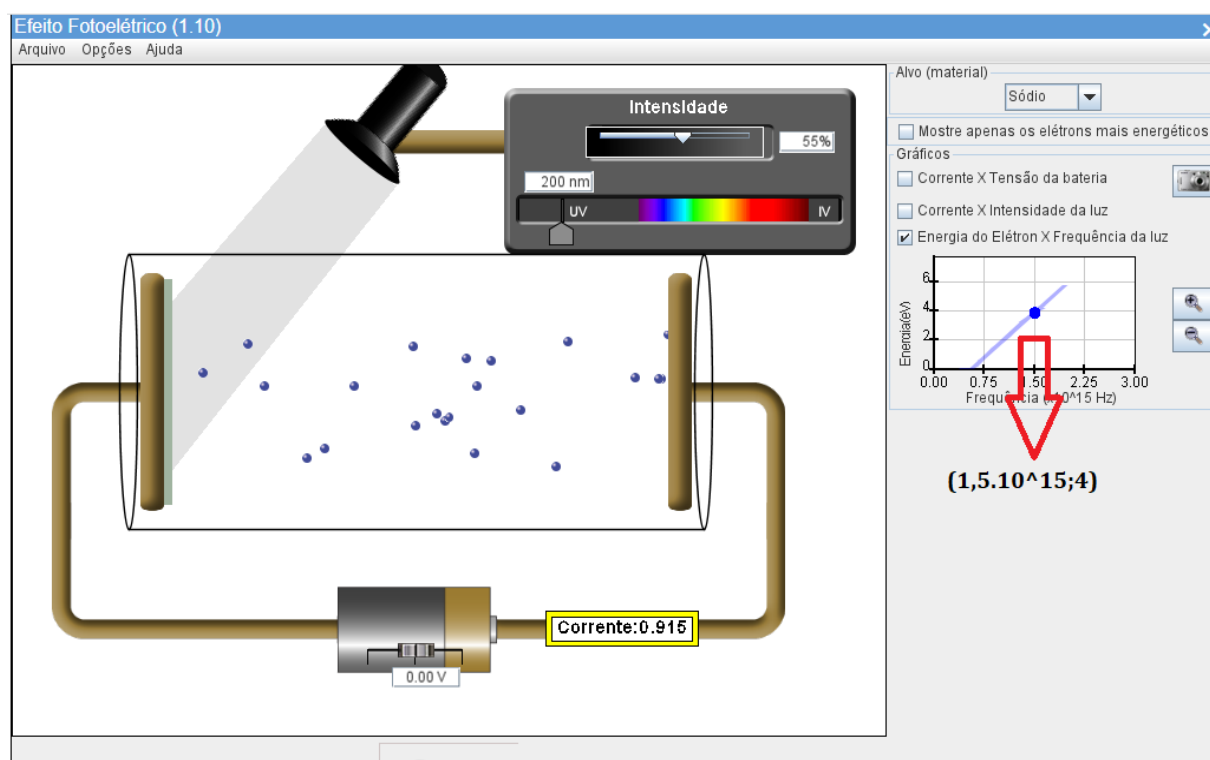
Para que se aborde o potencial de frenagem, deve-se solicitar que a turma observe o comportamento do amperímetro e dos procedimentos. É preciso ajustar o simulador, para que cause a ejeção de elétrons e, em seguida, aplicar uma D.D.P (diferença de potencial elétrico) negativo, no gerador elétrico, além de aumentar, gradativamente, o valor da tensão elétrica, até que a corrente fotoelétrica freie completamente. Fazer a pergunta 8) Observando o comportamento do amperímetro durante os procedimentos, qual a funcionalidade do potencial elétrico gerado na placa metálica? Em seguida, sem alterar a D.D.P, diminuir o comprimento de onda, dando movimento novamente aos elétrons, ajustar o potencial de frenagem e fazer a pergunta 9) O que vocês podem concluir, após toda essa observação, em relação ao potencial de frenagem e a frequência da onda incidente na placa metálica? Após um momento de discussão, selecionar o gráfico corrente x tensão na bateria para definição do potencial de frenagem. A pergunta 9 busca evidências de aprendizagem acerca do aumento do potencial na placa de sódio, ocasionado pelo aumento da energia dos fótons incidentes; dessa maneira, o potencial de frenagem também deverá se deslocar para outro valor.

Para abordar a interpretação física e matemática da equação de Einstein para o efeito fotoelétrico, é preciso fazer as perguntas 10 e 11. 10) Se uma onda incidente fornecer mais energia do que a função trabalho de um material, o que acontecerá com os elétrons? 11) Qual o tipo de energia que eles adquirem? Se necessário, pode-se manter a corrente fotoelétrica no simulador. Fazer a pergunta 12) Como vocês podem estabelecer uma relação matemática de conservação de energia, entre a energia adquirida pelo elétron, a energia fornecida pelos fótons e a função trabalho do metal? Após algum tempo de discussão, definir a equação de Einstein para o efeito fotoelétrico. A pergunta 10 busca evidências de aprendizagem a respeito do que ocorre com os elétrons quando $h.f > w$, ou seja, quando acontece de a energia dos fótons ser maior que a função trabalho. A pergunta 11 busca evidências de aprendizagem relacionada à energia e sua conservação, em que são aplicadas no contexto do efeito fotoelétrico. A pergunta

12 busca evidências de aprendizagem relacionadas à habilidade de equacionar a conservação de energia entre as partes envolvidas no fenômeno.

Na próxima etapa, deve-se obter o valor da função trabalho do sódio, por meio das informações fornecidas pelo gráfico energia x frequência, conforme apresentado na Figura 21, e a equação de Einstein para o efeito fotoelétrico. Os únicos metais em que o gráfico (energia x frequência) gerado pelo simulador consegue fornecer em um par ordenado para o procedimento é o sódio ou zinco. Portanto, escolheu-se o sódio, arbitrariamente, tendo em vista que o procedimento para obtenção da função trabalho para o zinco é o mesmo. Lembrando que a constante de Planck, a ser usada na equação 4, é $h = 4,13 \cdot 10^{-15} \text{ eV}\cdot\text{s}$.

Figura 21 – Coordenadas do gráfico energia x frequência no simulador



Fonte: Captura de tela da plataforma PhET

Para a avaliação da UEPS, propõe-se uma atividade de sala de aula invertida assíncrona, por meio do Google Sala de Aula, conforme Figura 22. Os estudantes devem se dividir em grupos, de acordo com os temas relacionados a aplicações do efeito fotoelétrico, conforme descrito, a seguir.

- O efeito fotoelétrico em controles remotos e óculos de visão noturna.
- CCD (Charge-Coupled Device ou dispositivo de carga acoplada): O efeito fotoelétrico e os pixels.

- c) O efeito fotoelétrico e a radiação ionizante.
- d) O efeito fotoelétrico em máquinas industriais.
- e) O efeito fotoelétrico e o cinema falado.

Figura 22 – Aula acerca de aplicações tecnológicas do efeito fotoelétrico

O Efeito Fotoelétrico e sua aplicações tecnoló... :

Prof. Felipe Nascimento postou uma nova atividade: Aplicações ...Data de entrega: 27 de out. 23:59

⋮

Item postado em 11:25 Editado às 11:34

Bom dia a todos,
A sequência de aula sobre o efeito fotoelétrico acontecerá no modelo de sala de aula invertida. Essa é uma oportunidade para vocês conhecerem algumas tecnologias que estão direta ou indiretamente relacionadas ao nosso dia a dia. Portanto, a proposta é que vocês se dividam em cinco grupos de tamanho aproximadamente iguais e por grau de afinidade se apropriem de um dos temas abaixo:

- a) O efeito fotoelétrico em controles remoto e óculos de visão noturna;
- b) CCD (Charge-Coupled Device ou dispositivo de carga acoplada): O efeito fotoelétrico e os pixels;
- c) O efeito fotoelétrico e a radiação ionizante;
- d) O efeito fotoelétrico em máquinas industriais;
- e) O efeito fotoelétrico e o cinema falado.

Em seguida, proponho que vocês gravem um vídeo apresentando esses temas de forma a fazerem conexões com o conteúdo estudado. O vídeo deve ser postado na plataforma "You Tube", no modo não listado, e enviado o link por essa atividade postada para vocês.

0

Entregue

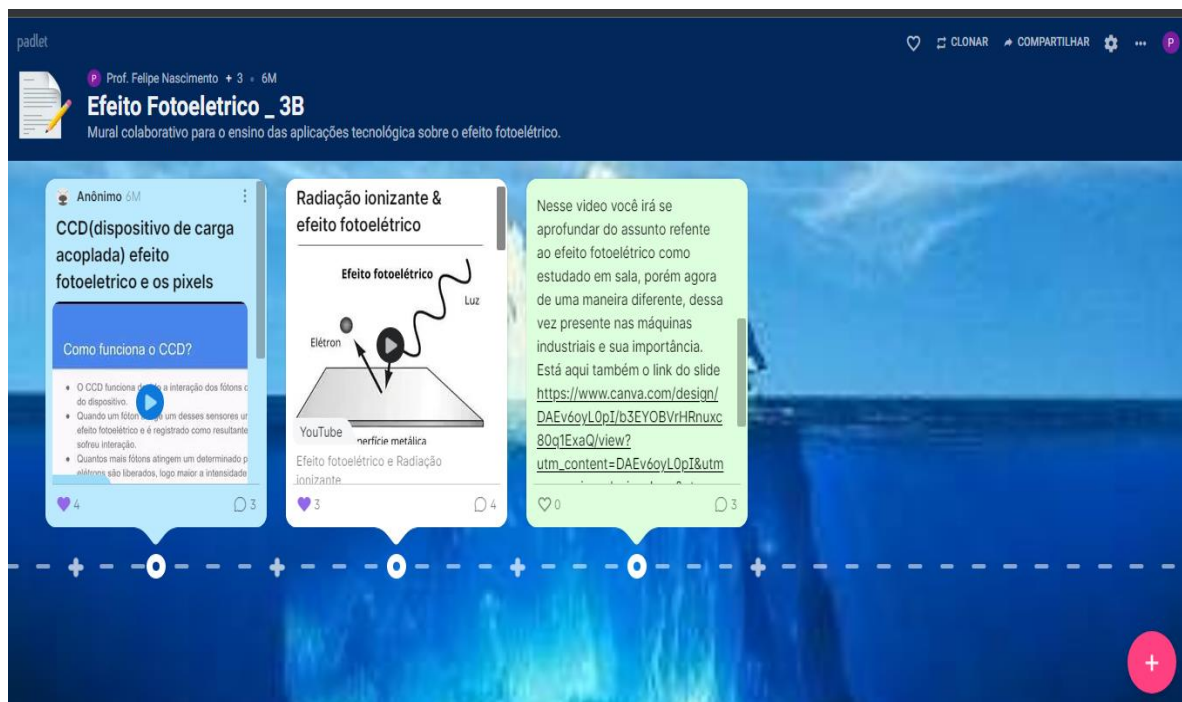
40

Trabalhos atribuídos

Fonte: Captura de tela do Google Sala de Aula

A proposta é que cada grupo leia a respeito do assunto — o professor pode indicar a leitura —, e gravar um vídeo de, no máximo, três minutos de duração, publicar na plataforma Youtube, no modo “não listado”, e em seguida, postar o vídeo na plataforma Padlet junto a um texto resumo; assim, formar um mural colaborativo de aplicações a respeito do efeito fotoelétrico, ilustrado na Figura 23.

Figura 23 – Mural Colaborativo no Padlet



Fonte: Captura de tela da plataforma PhET

Após as últimas postagens, deve-se abrir um prazo para que os grupos acessem as postagens de grupos alheios e façam comentários pertinentes ao assunto do vídeo. Dessa forma, propõem-se temas em que os estudantes retomarão ao fenômeno para explicá-lo em outro contexto que não foi tratado na UEPS. Pode-se reconhecer que os discentes aprenderam, significativamente, quando for possível colher evidências, por intermédio do mural colaborativo montado no Padlet, e não em comportamentos finais, de aprendizagem, como:

- compreensão das características do efeito fotoelétrico;
- identificação de conceitos;
- capacidade de explicar o fenômeno;
- aplicar o fenômeno para resolver problemas.

3.2 Aplicação do Produto Educacional

O produto educacional foi aplicado em uma turma do 3º ano, do Ensino Médio, de um colégio privado, em uma região administrativa do Distrito Federal, entre os meses de outubro e novembro de 2021, que envolveu o professor-pesquisador, o professor supervisor na Pós-Graduação e 35 estudantes. Estes tinham entre 16 e 17 anos de idade, pertenciam ao espectro socioeconômico médio, provenientes de famílias de trabalhadores, com conhecimentos usuais em tecnologias digitais e sem conhecimentos avançados em Física.

A escola possui uma estrutura tecnológica abundante: recurso multimídia em todas as salas de aulas, inclusive na sala de informática; laboratório de informática com computadores recentes; webcams nos computadores dos docentes; e quadro branco na sala de informática. A modalidade de ensino era o híbrido, devido à crise sanitária decorrente das infecções causadas pelo vírus SARS-COV. Portanto, grande parte dos estudantes participavam da aula, remotamente, e uma pequena parcela, presencialmente. O autor desta dissertação atuou na instituição no ano da aplicação do produto educacional, em todas as turmas do Ensino Médio. Cabe ressaltar que a turma em que a UEPS foi aplicada, na maioria, eram estudantes do colégio desde o primeiro ano do Ensino Médio; portanto o professor os acompanhou, pedagogicamente, nessa jornada até o fim do ano letivo de 2021.

A sequência didática foi aplicada, efetivamente, do início ao fim, em uma turma do 3º ano B, em que cerca de 18 estudantes eram frequentes nas aulas. É importante ressaltar que a sequência didática foi aplicada no fim do ano, época em que a maioria da turma já estava aprovada e somado o cansaço, por estar próximo às férias. No início da sequência de aulas, começaram a participar 51 estudantes, das turmas do 3º ano A e 3º ano B. Porém, a turma A não acompanhou a aplicação do produto educacional até o fim, pois a coordenação pedagógica solicitou um horário para uma palestra externa com essa turma. Durante as aulas, os estudantes foram, de modo geral, participativos e colaboraram com a integridade dos dados colhidos. Algumas semanas antes da aplicação do produto, os estudantes foram orientados, em relação às quatro aulas de 50 minutos, que seriam reservadas para aplicação e avaliação do produto educacional; e em relação aos programas/aplicativos a serem usados durante as aulas, inclusive o Google Sala de Aula, que serviu como repositório e que requer a enturmação dos estudantes, por meio de uma conta do Gmail. Na Figura 24, apresentam-se os estudantes enturmados no Google Sala de Aula:

Figura 24 – Turma criada no Google Sala de Aula

Professores



Prof. Felipe Nascimento

Alunos

51 alunos



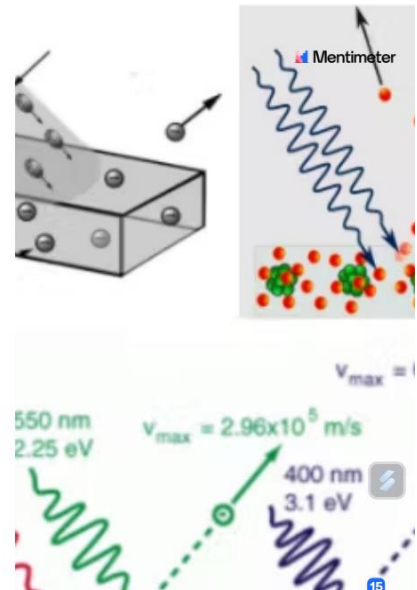
Fonte: Captura de tela do Google Sala de Aula

A primeira e a segunda aula do produto educacional ocorreram no mesmo dia, dia 25 de outubro de 2021. Os estudantes aparentavam estar confiantes na sequência didática, que é uma proposta alternativa e mais conveniente à atual geração de estudantes, do que uma sequência de aulas tradicionais. Houve participação efetiva de alguns estudantes que estavam presencial e remotamente, o que, de início, mostrou uma boa proposta de UEPS, já que os anos de 2020 e 2021 foram marcados por grande esmorecimento dos alunos, quanto à participação nas aulas remotas. Eles relataram que não conseguiam assistir às aulas remotas tradicionais, por não participarem ativamente dela e acabavam dormindo.

Na primeira aula, que durou 50 minutos, os estudantes presenciais foram conduzidos ao laboratório de informática, local onde o professor acessou a aula remotamente. No primeiro momento, pediu-se para os estudantes acessarem a plataforma Mentimeter, por meio de um link disponibilizado pelo professor e respondessem à pergunta que apareceu para cada um deles no programa, ilustrado na Figura 25. Esse primeiro momento ocorreu como planejado, sem qualquer problema de acesso ao site ou dúvida do que se deveria fazer. Ao término do período de respostas ao Mentimeter foram obtidas quinze respostas. Em seguida foi espelhada à turma a nuvem de palavras e, Figura 25, feita a explicação do funcionamento da TDIC. Por último foi solicitado que os estudantes se reunissem em grupos de dois a quatro pessoas para a conceituação das palavras da nuvem no Google Sala de Aula, seja presencialmente, ou por via Microsoft Teams ou por qualquer outra TDIC que fosse possível a comunicação entre eles. Foi solicitado veemente pelo professor que os estudantes não pesquisassem sobre as palavras, no intuito de se obter apenas conhecimentos prévios.

Figura 25 – Nuvem de palavras para obtenção de subsunções

Aponte palavras relacionadas de forma direta ou indireta com o fenômeno que ocorre na figura .



Fonte: Captura de tela do Mentimeter

A Figura 26 mostra uma conceituação feita por duas estudantes. Houve grande participação na conceituação. Por último, foi solicitado que um estudante presencial e outro do remoto apresentassem a conceituação de palavras à turma, etapa marcada por conceitos claros e bem definidos.

Figura 26 – Conceituação de palavras

- 25 de out. de 2021
- Comprimento de Onda: é a distância do valores em um padrão da onda.
 - Efeito fotoelétrico: é um fenômeno que tem o envolvimento de fotóns.
 - Eletromagnetismo: seria o estudo de fenômenos ligados ao magnetismo e a eletricidade.
 - Heinrich Hertz- físico que provou a existência de ondas eletromagnéticas.
 - Energia de fótons- energia carregada por um único fóton.
 - Radiação- processo de deslocamento de energia através de partículas ou ondas eletromagnéticas em movimento.

Fonte: Captura de tela Google Sala de Aula

Ainda no dia 25 de outubro, nos últimos 50 minutos de aula, no período da manhã, foi iniciada uma explicação das atividades propostas para aquele horário, disponíveis na plataforma Google Sala de Aula, que consistiam em um vídeo a respeito da dualidade onda-partícula e um questionário acerca do vídeo. Este recurso foi criado em formato multimídia e disponibilizado por meio do Microsoft Teams para toda a turma. O momento de discussão a respeito do vídeo aconteceu durante a sua exibição e, em seguida, foi liberado tempo para que os estudantes respondessem o questionário. Um total de 11 estudantes apresentaram suas respostas, e uma delas é mostrado na Figura 27.

Figura 27 – Resposta ao questionário problematizador, acerca da dualidade onda-partícula

Com base no vídeo sobre a dualidade onda partícula e nos momentos de discussão, responda a questão-problema abaixo:

✓ Imagine um feixe de luz de alta frequência que incide sobre uma placa metálica. Foi observado que a placa após um curto intervalo de tempo se torna positivamente carregada. Nessa situação, a onda eletromagnética se comporta como onda ou como partícula? Explique sua resposta. * 1 / 1

A onda eletromagnética irá se comportar como partícula, pois as partículas que possibilitam essa ionização positiva na placa.

Fonte: Captura de tela do Google Formulários

Em seguida, inicia-se a aplicação da próxima organização avançada, o simulador PhET seguido de um questionário-problematizador. O professor inicia o momento, falando a respeito das funcionalidades do simulador, vantagens e desvantagens de uma simulação computacional em comparação com a experimentação tradicional. O docente abre, também, o questionário-orientador para fazer explanações e dar exemplos. As Figura 28, Figura 29, Figura 30 e Figura 31 apresentam respostas ao questionário de um estudante, como exemplo.

Figura 28 – Resposta à questão 1

QUESTÃO 1

Abra o simulador computacional. Vá na barra de ferramentas e abra a aba de "opções". Em seguida selecione: " mostre os fótons". Por que o simulador permite essa visualização? O que são fótons?

O simulador permite essa visualização com o objetivo de deixar mais visual a passagem de fótons. Os fótons são pequenas partículas a nível subatômico que se originam da lâmpada, no experimento, e possuem uma carga.

Fonte: Captura de tela Google Formulários

Figura 29 – Resposta à questão 2

QUESTÃO 2

Existe uma energia mínima para que ocorra o efeito fotoelétrico? Explique com base nas observações feitas por você. Caso seja necessário trace o gráfico ENERGIA x FREQUÊNCIA.

Sim, existe uma frequência mínima para arrancar os elétrons da placa. Proporcionando o efeito fotoelétrico.

Fonte: Captura de tela do Google Formulários

Figura 30 – Resposta à questão 3

Questão 3

Fixe o valor da intensidade da luz para um valor diferente de zero. Existe um valor máximo para o comprimento de onda para que ocorra o efeito fotoelétrico?

Sim, valores superiores a 540 não proporcionam o efeito fotoelétrico

Fonte: Google Formulários

Figura 31 – Resposta à questão 4

Questão 4

Os fótons são partículas de luz que possuem energia e momento linear. Ao se chocarem contra o metal eles transferem essa energia para quem? observe o fenômeno ocorrer no simulador.

A energia é transferida para o metal e o fóton é atraído para o lado positivo do sistema.

Fonte: Captura de tela do Google Formulários

A aplicação do questionário necessitou de mais tempo para sua aplicação. Dessa forma, o professor solicitou que aqueles que não tivessem terminado a atividade, continuassem a fazê-la em casa, mas que terminasse até o início da próxima aula. Foram obtidas dez respostas. A segunda aula de 50 minutos foi finalizada de acordo com o previsto, a não ser a questão do tempo adicional para o questionário.

O primeiro momento do segundo encontro teve duração em torno de 20 minutos e foi conduzido por meio de uma interação dialogada, possibilitada pela história em quadrinhos da Revista do Professor de Física, uma abordagem dos primórdios da Física Quântica. Houve maior interação do grupo de estudantes que estavam presencialmente. Alguns estudantes

relataram ser uma forma de aprendizagem inovadora, em comparação às aulas tradicionais. Por ser uma etapa de contextualização histórica do efeito fotoelétrico, não houve questionamentos ou participações relevantes.

Em seguida, foi iniciado o segundo momento, de duração em torno de 13 minutos, que consistiu na abordagem de uma parcela do fenômeno do efeito fotoelétrico, com o uso do simulador PhET, como mediador pedagógico, em uma interação entre o professor e os estudantes. Nessa etapa da sequência, foi abordada a relação entre o comprimento de onda e frequência, o reconhecimento do efeito fotoelétrico, a corrente fotoelétrica, diferenciação entre energia cinética dos elétrons e quantidade de elétrons emitidos, relação entre frequência da luz e energia dos fotoelétrons e relação entre a intensidade da luz e a quantidade de elétrons emitidos pela placa metálica. Foi percebido um envolvimento muito maior dos estudantes, quando comparado ao momento de contextualização histórica, inclusive com perguntas qualitativas, pertinentes ao assunto: “O que aconteceria se fosse aplicada uma diferença de potencial positiva, após ser gerado o fenômeno do efeito fotoelétrico no simulador?”; “Por que para uma intensidade de 22% e um comprimento de onda de 532 nm são emitidos fotoelétrons, porém, o amperímetro não marca um valor de corrente fotoelétrica?”

No dia 3 de novembro de 2021, por mais 50 minutos, a sequência didática foi reiniciada, e retomados os pontos abordados na última aula. Na sequência, foi definido o conceito de frequência de corte, e utilizado como aporte, além do aparato experimental do simulador, o gráfico energia x frequência. Durante essa definição da frequência de corte, demonstrou-se novamente que, para a placa de sódio, comprimentos de onda próximos e maiores à região do ultravioleta ocorre o efeito fotoelétrico, porém para a placa de zinco, a energia fornecida pelos fótons não foi suficiente para provocar o fenômeno. Foi surpreendente o fato de os estudantes apresentarem respostas a perguntas relacionadas a assuntos ainda não abordados. Por exemplo, foi perguntado pelo professor, ao encontrar a frequência de corte no simulador, juntamente com estudantes: Qual o nome dessa frequência mínima capaz de gerar o efeito fotoelétrico? Um dos estudantes respondeu: “frequência de corte”.

Em um outro momento, em uma interação dialogada acerca da energia que o fóton deve fornecer para o elétron, para ejetá-lo do material, um estudante perguntou: “O nome dessa energia é energia de ligação?”. No diálogo, e conseqüentemente, na manipulação do simulador, foi evidenciado que cada material possui uma frequência de corte específica, além disso, foi discutido que, associada a essa frequência, existe um comprimento de onda de corte, já que as duas grandezas, frequência e comprimento de onda, são grandezas inversamente proporcionais. Ao fim da abordagem a respeito de frequência de corte, foi perguntado pelo professor: “Qual a

definição de frequência de corte?” Os estudantes responderam: “É a frequência mínima capaz de gerar o efeito fotoelétrico”.

Para abordagem da função trabalho, utilizou-se a discussão a respeito da frequência de corte para chegar à conclusão a respeito do conceito da função trabalho, com ênfase ao fato de que cada material possui uma função trabalho distinta. Foi definido, também, matematicamente, em função da “função trabalho do material”. Nesse momento, foi aberta uma janela na aula para se definir também o “ev”. Para se definir o potencial de frenagem, gerou-se a corrente fotoelétrica e, em seguida, aplicou-se uma D.D.P negativa nos eletrodos capazes de zerar a leitura do amperímetro. O professor, então, pergunta: “Qual a função desse potencial negativo?” Um estudante respondeu: “zerar a função trabalho, logo em seguida corrigiu, zerar o efeito fotoelétrico”. Depois, definiu-se o potencial de frenagem como aquele capaz de frear a corrente fotoelétrica gerada no simulador computacional. E repetiu-se o processo, de encontrar o potencial de frenagem, para um valor menor de comprimento de onda. O professor pergunta: “Conforme se aumenta a frequência da onda incidente o acontece com o potencial de frenagem?”. Os estudantes responderam: “o potencial também aumenta”. Por fim, a discussão foi finalizada e selecionado o gráfico corrente x tensão na bateria para a sua interpretação

Para a discussão acerca da equação de Einstein para o efeito fotoelétrico, foi perguntado pelo professor: “Como podemos relacionar a energia da onda incidente com a função trabalho e a energia cinética?”. Os estudantes responderam: “a soma entre a energia cinética do elétron e a função trabalho é igual à energia da onda incidente”. Em seguida, foi discutido o gráfico que representa a equação de Einstein. Por fim, espelhou-se a Figura 21 para o cálculo da função trabalho do sódio e utilizou-se as coordenadas pré-selecionadas no gráfico da Figura e foi possível chegar ao valor de 2,2 ev. Durante esse processo, o professor pediu à turma para pesquisar, com o uso de seus smartphones, o valor da constante de Planck, em elétron volt; porém, um dos estudantes já tinha o valor anotado e, por isso, respondeu prontamente o valor da constante.

Por fim, para se avaliar a UEPS, os temas de aplicações para o efeito fotoelétrico foram disponibilizados para o grupo de estudantes, para que eles escolhessem, gravassem um vídeo de, no máximo, cinco minutos, publicassem na plataforma Youtube, postassem na plataforma Padlet e, por último, fizessem comentários agregadores nas postagens dos outros grupos. Todas as orientações foram disponibilizadas pela plataforma Google Sala de Aula, conforme Figura 32 e Figura 33.

Figura 32 – Orientação para avaliação da UEPS



Aplicações do Efeito Fotoelétrico 3 ano B



Prof. Felipe Nascimento • 5 de out. de 2021 Editado às 10 de nov. de 2021

100 pontos

Data de entrega: 27 de out. de 2021, 23:59

APENAS PARA O 3 B

Bom dia a todos,

A sequência de aula sobre o efeito fotoelétrico acontecerá no modelo de sala de aula invertida. Essa é uma oportunidade para vocês conhecerem algumas tecnologias que estão direta ou indiretamente relacionadas ao nosso dia a dia. Portanto, a proposta é que vocês se dividam em cinco grupos de tamanho aproximadamente iguais e por grau de afinidade se apropriem de um dos temas abaixo:

- O efeito fotoelétrico em controles remoto e óculos de visão noturna;
- CCD (Charge-Coupled Device ou dispositivo de carga acoplada): O efeito fotoelétrico e os pixels TEMA ESCOLHIDO;
- O efeito fotoelétrico e a radiação ionizante;
TEMA ESCOLHIDO
- O efeito fotoelétrico em máquinas industriais;
TEMA ESCOLHIDO
- O efeito fotoelétrico e o cinema falado.

Fonte: Captura de tela do Google Sala de Aula

Figura 33 – Orientação para avaliação da UEPS

Em seguida, proponho que vocês gravem um vídeo (No máximo 3 min) apresentando esses temas de forma a fazerem conexões com o conteúdo estudado. O vídeo deve ser postado na plataforma "You Tube", no modo não listado, e postado no PADLET, link abaixo:

<https://padlet.com/felipefisica2008/56mjd19fd86xl6x5>

Faça um resumo do vídeo e adicionem à postagem. Não esqueça de colocar no título o tema que vocês escolheram.

Para finalizar peço que façam comentários pertinentes ao assunto do vídeo nos outros temas (ETAPA INDIVIDUAL).

DATA POSTAGEM DO VIDEO NO PADLET: 14/11 até as 23:59 h

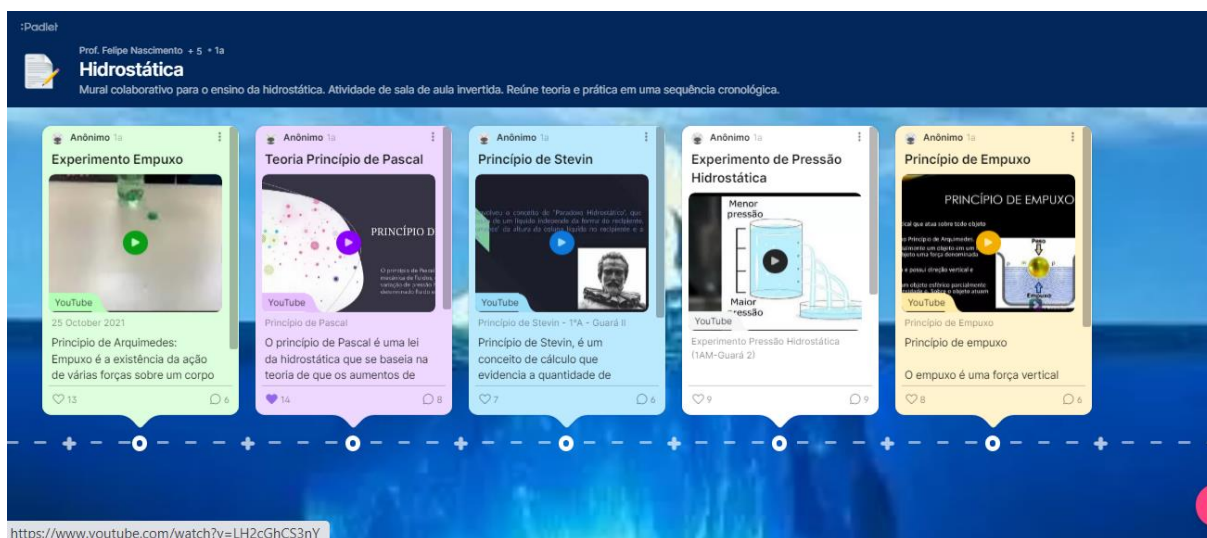
DATA PARA VOCÊS FAZEREM OS COMENTARIOS INDIVIDUAIS: 15/11 até as 23:59 h

Conto com vocês!

Fonte: Captura de tela do Google Sala de Aula.

Como exemplo de mural colaborativo, usou-se um trabalho acerca de hidrostática, feito com outra turma, e ilustrado na Figura 34.

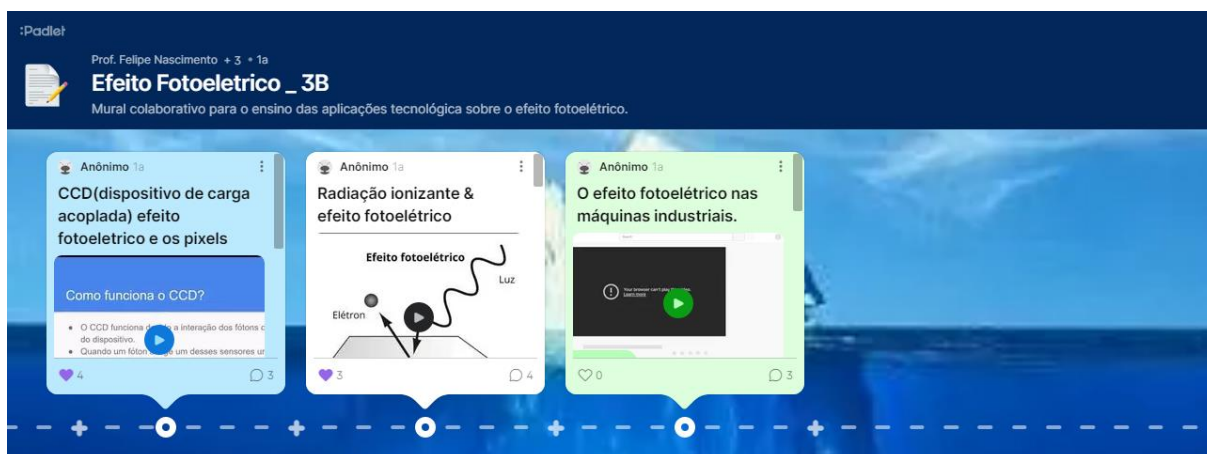
Figura 34 – Mural colaborativo no Padlet acerca de hidrostática



Fonte: Captura de tela do Padlet

É importante ressaltar que 13 estudantes participaram, efetivamente, da avaliação da UEPS e montaram o mural colaborativo no Padlet, Figura 35.

Figura 35 – Avaliação da UEPS. Mural colaborativo no Padlet



Fonte: Captura de tela do Padlet

Na Figura 36, são apresentados alguns comentários feitos pelos discentes, nas postagens do mural colaborativo. A avaliação da UEPS se encontra de forma completa no apêndice B.

Figura 36 – Comentários nas postagens do mural colaborativo.

*De acordo com o efeito fotoelétrico, algumas substâncias possuem a propriedade de absorver fótons e liberar elétrons. O que pode ser claramente exemplificado na funcionalidade do sensor CCD, por ser um painel composto de múltiplas fotocélulas, produtoras de elétrons, que formarão uma corrente elétrica e posteriormente serão descarregadas uma a uma, de modo que permaneçam acopladas na saída do painel, dando sentido a seu nome "dispositivo de cargas acopladas"(Ana Beatriz Lopes de Almeida)
– ANÔNIMO*

Esse processo fotoelétrico responsável pela geração de imagens digitais, tem seu início, quando o feixe luminoso interage com a superfície do CCD, e ocorre a liberação de elétrons por meio do efeito fotoelétrico. A quantidade de elétrons liberados é proporcional à intensidade do feixe. Para a captura de uma imagem colorida, é necessária a utilização de filtros para luz verde, vermelha e azul sobre a superfície do CCD. Um sofisticado sistema eletrônico transforma a carga elétrica liberada pelo efeito fotoelétrico em sinal digital. (Luíza) – ANÔNIMO

Fonte Captura de tela do Padlet

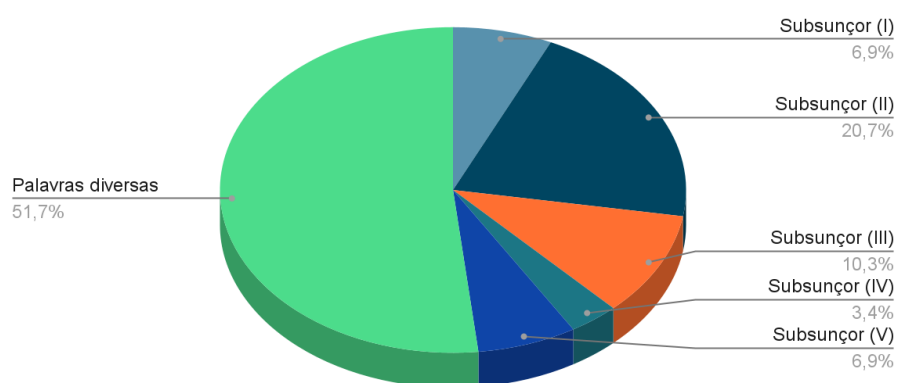
Dessa forma, no dia 15 de novembro de 2021, finaliza-se a aplicação e avaliação do produto educacional, com os comentários nas postagens do mural colaborativo. Em seguida, será feita a análise dessa aplicação.

CAPÍTULO 4 — RESULTADOS E ANÁLISES

Na seção “Proposta de avaliação”, apresenta-se no plano de aula do primeiro encontro do produto educacional, os subsunçores que foram investigados e necessários para a ancoragem da nova informação. Os subsunçores são: (I) energia e sua conservação; (II) reconhecimento de uma onda (III); características de uma onda; (IV) classificação de uma onda quanto à sua natureza; e (V) conceitos relacionados à estrutura da matéria. A Figura 25 mostra o resultado da busca de subsunçores, com o uso do Mentimeter; e percebe-se alta recorrências das palavras que estão diretamente ligadas ao fenômeno do efeito fotoelétrico, como: efeito fotoelétrico, emissão de elétrons, Hertz, comprimento de onda e frequência. Isso indica que os estudantes já tiveram um primeiro contato com o fenômeno, antes da sequência de aulas do presente trabalho. Percebe-se a exposição de 29 palavras distintas, envolvidas, direta ou indiretamente, com o fenômeno do efeito fotoelétrico. Em relação ao subsunçor (I), existem 6,89% expressões escritas de baixa recorrência; o subsunçor (II), 20,68% expressões escritas de alta recorrência apenas para “ondas eletromagnéticas”; o subsunçor (III), 10,34% expressões escritas e percebe-se alta recorrência para comprimento de onda e frequência; o subsunçor (IV), 3,44% expressões escritas; porém, esse subsunçor possui alta recorrência entre o grupo de estudantes, e em relação ao subsunçor (V), existem 6,89% expressões escritas de baixa recorrência, conforme Gráfico 1.

Gráfico 1 – Análise dos subsunçores

Análise dos Subsunçores



A nuvem de palavras foi formada por 15 estudantes. Acredita-se que a baixa participação dos estudantes foi devida a essa aplicação ocorrer no 3º trimestre, momento em que eles já estariam cansados, aprovados e focados na preparação para vestibulares. Um

segundo ponto a se destacar foi que essa turma também já estava há quase dois anos no 1º ano no ensino remoto; e no ano da aplicação do produto educacional no ensino híbrido, modelo de ensino desmotivador segundo os estudantes. Alguns diziam que quando estavam no ensino remoto dormiam durante os seis horários. Um terceiro ponto foi a carga emocional que os seres humanos, em geral, ficaram submetidos durante o período pandêmico, acompanhada por muitas perdas de vidas e poder aquisitivo.

Na conceituação de palavras da nuvem, participaram 20 estudantes, em grupos de quantidade de pessoas aleatórias. Houve 59 conceituações de palavras. Uma parcela de 57,62% foram aquelas conceituações corretas ou com pequenos erros que não prejudicam o próprio conceito da grande correspondente. Outra parcela, de 32,20%, foi composta por aquelas tentativas que não conseguiram conceituar a grandeza corretamente ou que escreverem algo relacionado à própria grandeza. E, por último, uma parcela igual a 3,38% se refere àquelas tentativas de conceituação com erros graves, conforme Gráfico 2.

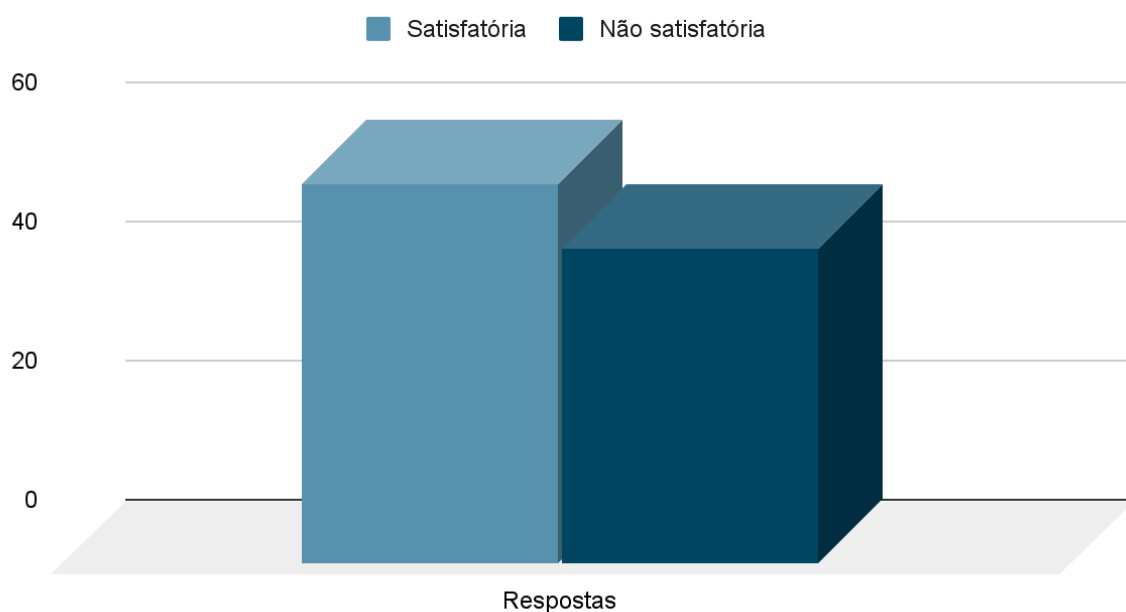
Gráfico 2 – Análise qualitativa das conceituações



Percebe-se que, após as duas análises, a existência de subsunçores e com nível qualitativo aceitável para se aplicar a sequência de aulas, porém, a aplicação da organização avançada foi utilizada com o intuito de nivelar o grupo de estudantes, já que as análises não foram individuais; e aumentar a quantidade e a qualidade dos subsunçores já existentes. Em relação à primeira organização avançada, que ocorreu por meio do vídeo acerca da dualidade onda-partícula, 11 estudantes responderam ao questionário-problematizador. Uma parcela referente a 54,54% apresentou respostas satisfatórias; e o restante do grupo de estudantes, 45,46%, não apresentaram resultados satisfatórios após o vídeo, conforme Gráfico 3.

Gráfico 3 – Análise da primeira organização avançada

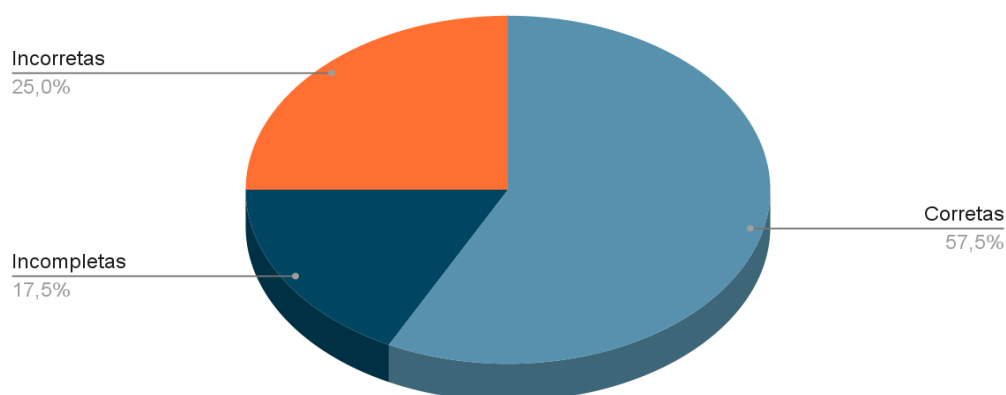
Análise do vídeo como organizador avançado



Observa-se que, por meio da análise das respostas dos estudantes ao questionário-problematizador, existe um grande número de estudantes que compreenderam o comportamento de partícula, em um contexto do efeito fotoelétrico, mesmo que não declarado de forma direta no problema. Mas existe uma parcela significativa de estudantes que não conseguiram compreender a ideia genérica e resumida, tratada no vídeo acerca da dualidade onda-partícula. A segunda organização avançada, que foi a utilização do simulador computacional da plataforma PhET para o efeito fotoelétrico, teve dez participantes. No total, foram analisadas 40 questões, que variaram em quatro tipos. Com a utilização do simulador PhET, a parcela de respostas corretas foi maior, em comparação com a primeira organização avançada, o que demonstra a potencialidade da modelagem como organizador avançado, conforme Gráfico 4.

Gráfico 4 – Análise da segunda organização avançada

Análise do simulador como organizador avançado



Durante o processo de mediação pedagógica, com o uso do simulador computacional PhET para se abordar as características do efeito fotoelétrico, foram feitas 12 perguntas, que estão numeradas, durante toda a aula, no intuito de fazer curtas avaliações orais do processo de ensino. A análise dessas perguntas, que foi possível por intermédio da gravação da aula, está disposta no Quadro 1.

Quadro 1 – Análise do processo avaliativo na mediação pedagógica, por meio do simulador PhET

	Perguntas	Expressão oral esperada: respondida pelo estudante	Intervenção feita pelo professor?
1	Qual o nome desse fenômeno?	Sim	Não
2	Se o gerador elétrico (pilha) não está aplicando uma diferença de potencial no circuito (veja o voltímetro), o que causou esse fluxo de cargas elétricas?	Sim	Não
3	Foi visto nas aulas anteriores, que a luz se comporta como partícula (primeiro encontro) nesse fenômeno, portanto, ela transfere energia e momento linear para as partículas subatômicas do metal. Qual partícula subatômica recebe essa energia?	Sim	Não
4	O fenômeno ocorre para qualquer valor de comprimento de onda e frequência?	Sim	Não
5	Com base na observação, qual a relação de proporcionalidade entre a frequência da luz incidente e a energia cinética dos elétrons emitidos pela placa metálica?	Sim	Não

6	Qual a equação que determina a relação de proporcionalidade entre a frequência da onda incidente e a energia dos fotoelétrons?	Não	Sim
7	Qual a relação de proporcionalidade entre a intensidade da luz incidente e o número de elétrons ejetados da placa metálica?	Sim	Não
8	Observando o comportamento do amperímetro, durante os procedimentos, qual a função do potencial elétrico gerado pela placa metálica?	Sim	Não
9	O que vocês podem concluir, após toda essa observação, em relação ao potencial de frenagem e a frequência da onda incidente na placa metálica?	Não	Sim
10	Se uma onda incidente fornecer mais energia do que a função trabalho de um material, o que acontecerá com os elétrons?	Sim	Não
11	Qual tipo de energia eles adquirem?	Sim	Não
12	Como vocês podem estabelecer uma relação matemática de conservação de energia entre a energia adquirida pelo elétron, a energia fornecida pelos fótons e a função trabalho do metal?	Sim	Não

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Percebe-se, por meio da análise do Quadro 1 e do Gráfico 5 que, durante a mediação pedagógica apoiada pelo simulador computacional, houve grande participação assertiva dos estudantes, e foram necessárias poucas intervenções do professor. O resultado apresenta a efetividade das organizações avançadas, principalmente, a que se utilizou a modelagem. Além disso, revela a adequação da linguagem fenomenológica para uma geração hiperconectada, que favoreceu o aumento de interesse e participação dos estudantes. Infelizmente, não houve interações orais com o grupo de estudantes, que estavam participando da aula de forma remota, no segundo encontro, porém eles já apresentavam tal comportamento desde o 1º ano do Ensino Médio, independentemente da metodologia utilizada nas aulas.

Gráfico 5 – Análise do processo avaliativo na mediação pedagógica, por meio do simulador PhET

Análise do processo avaliativo na mediação pedagógica através do simulador PhET.



Por fim, realizou-se a análise da avaliação da UEPS feita pelos estudantes. O grupo 1, formado por dois integrantes, gravou um vídeo de duração próxima de dois minutos e escolheu o tema: CCD (Charge-Coupled Device ou dispositivo de carga acoplada): o efeito fotoelétrico e os pixels. Os estudantes explicaram o que é o CCD, seu funcionamento, sua relação com o efeito fotoelétrico e aplicações do CCD, em vários ramos da sociedade. Fizeram comentários agregadores nas duas outras postagens. O grupo 2, com seis integrantes, escolheu como tema o efeito fotoelétrico e a radiação ionizante. O vídeo possui, aproximadamente, dois minutos de duração, em que os estudantes definiram a radiação ionizante, e em seguida, abordaram a sua interação com a matéria. O grupo 3, formado por cinco integrantes, gravou um vídeo, de duração aproximada de seis minutos, que contém uma explicação breve acerca do efeito fotoelétrico, foi citada a relação do fenômeno com o efeito fotovoltaico e, por último, explicado, com detalhes, o funcionamento e os tipos de sensores fotoelétricos. As apresentações contemplaram, na íntegra, os temas e sua relação com o fenômeno, ou seja, os estudantes conseguiram aplicar o que aprenderam durante a sequência de aulas, aplicado em outro contexto. É importante ressaltar que não se busca comportamentos finais e sim indícios de aprendizagem significativa; portanto, entende-se que o grupo de estudantes apresentou esses indícios.

CAPÍTULO 5 — CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta dissertação teve como objetivo desenvolver, aplicar e avaliar um produto educacional em uma turma de 3º ano do Ensino Médio, em instituição privada de ensino do DF, desenvolvido à luz da TAS de Ausubel (1968) e organizado por uma UEPS, conforme proposto por Moreira (2011), para o ensino do efeito fotoelétrico apoiado por TDIC, que tem como ferramenta principal o simulador computacional da plataforma PhET utilizado como organização avançada e mediação pedagógica. Após a análise minuciosa dos dados gerados pelas avaliações que ocorreram durante e no fim da aplicação da sequência didática, foi possível inferir que, aqueles estudantes que participaram de toda as aulas, cerca de 72% apresentaram indícios de aprendizagem significativa, segundo os critérios apresentados por Ausubel (1968), Ferreira *et al.* (2020) e Ferreira *et al.* (2021b).

No fim da busca e conceituação de subsunçores, que ocorreu no primeiro encontro, foi possível concluir que os estudantes já tinham sido expostos ao fenômeno do efeito fotoelétrico pelo autor desta dissertação em uma sequência de aulas tradicionais (duas aulas de 50 minutos cada), com vistas à preparação para uma prova interna à instituição escolar. Apesar disso, uma parcela considerável de estudantes, 38,1%, não possuía clareza nas definições dos subsunçores. Após serem aplicadas às organizações avançadas, percebeu-se que o número de acertos orais, durante a mediação pedagógica, possibilitada pelo simulador computacional para o efeito fotoelétrico, passou para 84%, o que indica maior participação, efetividade e qualidade nas respostas dos estudantes. Dessa forma, os resultados sugerem que a incorporação de uma TDIC na UEPS, de forma não arbitrária, causa receptividade, participação e, por fim, indícios de aprendizagem significativa. A utilização do simulador da plataforma PhET possibilitou a abordagem de todos os tópicos previstos no plano de aula do produto educacional, sem necessidade de adaptações.

Durante a aplicação, percebeu-se uma efetiva participação de 13 estudantes, que nem sempre participavam de outras aulas que abordaram outros assuntos. Em contrapartida, um grande grupo de estudantes, que estavam remotamente, 62,8%, participaram de apenas algumas aulas ou não participaram de qualquer aula da sequência didática proposta por este trabalho. Esse resultado refletiu o grande problema que se instalou na educação durante a pandemia da Covid-19, principalmente, nos anos de 2020 e 2021: baixos índices de participação e aprendizagem camuflada, por algumas vezes, por sistemas de avaliações deficitários. Outros

fatores que corroboraram para a baixa participação desse grupo de estudantes foi o cansaço excessivo, devido ao fim de um ano letivo; o foco na preparação para provas externas; e o fato de uma grande parcela já estarem aprovados internamente.

Em turmas com histórico de baixa participação, sugerem-se adaptações nos planos de aulas, no sentido de reduzir a quantidade de aulas e, conseqüentemente, tornar a UEPS mais curta. Essa sugestão pode se concretizar ao reduzir a quantidade de tópicos abordados na seção 5.2, do segundo encontro, sem eliminar, portanto, ferramentas que exerceram papel ímpar dentro da TAS, como o momento de obtenção de subsunçores, a organização avançada e a mediação pedagógica por meio da simulação computacional, segundo o que é apresentado nos Quadro 2 e Quadro 3.

Quadro 2 – Proposta de alteração à UEPS: primeiro encontro

	Primeiro Encontro
Etapa focada na subsunção: Uso do Mentimeter	Primeiro momento A: Levantamento de subsunçores, por meio do Mentimeter. Duração: em torno de 15 minutos
	Primeiro momento B: compartilhamento da nuvem de palavras com a turma e explicação acerca do funcionamento do Mentimeter. Duração: em torno de 5 minutos
	Primeiro momento C: conceituação de palavras em grupos Duração: em torno de 30 minutos
Etapa focada na organização avançada: Simulador PhET	Terceiro momento: Aplicação do segundo organizador avançado. Explicam-se as funcionalidades do simulador para o efeito fotoelétrico. Manipulação orientada do simulador Duração: em torno de 35 minutos

Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

Quadro 3 – Proposta de alteração à UEPS: segundo encontro

Segundo Encontro	
Contextualização histórica	Abordagem histórica sobre o efeito fotoelétrico via história em quadrinhos (revista do professor de Física). Duração: em torno de quinze minutos.
Etapa de Mediação Pedagógica via simulador computacional PhET	Utilização do simulador da plataforma PhET “Efeito Fotoelétrico” para abordagem da corrente fotoelétrica, a relação entre energia dos elétrons e frequência da luz, frequência de corte, relação entre a intensidade da luz e quantidade de elétrons ejetados da placa metálica, a função trabalho, o potencial de frenagem. Duração: em torno de quinze minutos.
Reconciliação Integrativa e Avaliação da UEPS	Gravação e edição de vídeos explicativos sobre as aplicações do efeito fotoelétrico e montagem de mural colaborativo no Padlet. Após a postagem, cada grupo deve comentar a postagem dos outros grupos. Avalia-se a eficácia da UEPS identificando evidências de aprendizagem ao longo do mural colaborativo montado e comentado pelos grupos no Padlet. Atividade remota

Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

Dessa forma, a análise dos dados gerados pelas avaliações presentes na UEPS indicou que os objetivos apresentados foram satisfatoriamente alcançados, e permitiu a validação do produto educacional para aplicação e utilização por outros docentes, ressalvadas as adaptações contextuais necessárias.

REFERÊNCIAS

ARANTES, A. R.; MIRANDA, M. S.; STUDART, N. Objetos de aprendizagem no ensino de Física: usando simulações do PhET. **A Física na Escola**, v. 11, n. 1, p. 27-31, 2010.

AUSUBEL, D. P. **Educational psychology**: a cognitive view. New York: Holt, Rinehart and Winston, 1968.

AUSUBEL, D. P.; ROBINSON, F. G. **School learning**: An introduction to educational psychology. New York: Holt, Rinehart and Winston, 1969.

BONFIM, D. D. S.; COSTA, P. C. F.; NASCIMENTO, W. J. A abordagem dos três momentos pedagógicos no estudo de velocidade escalar média. **Experiências em Ensino de Ciências**, v. 13, n. 1, p. 187-197, Mato Grosso, 2018.

BRASIL. **Orientações Curriculares Para o Ensino Médio**: Ciências da Natureza, Matemática e suas Tecnologias. Brasília: Ministério da Educação, Secretaria de Educação Básica, 2006. Disponível em: http://portal.mec.gov.br/seb/arquivos/pdf/book_volume_02_internet.pdf. Acesso em: 23 fev. 2023.

BRASIL. **Base Nacional Comum Curricular**. Brasília: Ministério da Educação, 2018. Disponível em: http://basenacionalcomum.mec.gov.br/images/BNCC_EI_EF_110518_versaofi. Acesso em: 23 fev. 2023.

CIRILO, R. S. **Hiperconectados**: Perfil e Comportamento dos Nativos Digitais. 2019. 133f. Dissertação (Programa de Pós- graduação em Comunicação Social) — Universidade Metodista de São Paulo, São Bernardo do Campo, São Paulo.

CORRÊA, A. R.; ARTHURY, L. H. M. Afinal o que é Física Quântica? Uma História em Quadrinhos para uso no Ensino Médio. **Revista do Professor de Física**, v. 5, n. 1, p. 70-96, Brasília, 2021. Instituto de Física — Universidade de Brasília.

EDUCAPLUS.ORG. **Efecto Fotoeléctrico**. n.d. Disponível em: <http://www.educaplus.org/luz/lcomopartícula.html>. Acesso em: 2 fev. 2023.

EISBERG, R.; RESNICK, R. **Física Quântica**: Átomos, Moléculas, Sólidos, Núcleos e Partículas. 1. ed. [S.l.]: Editora Campus, 1979.

FERREIRA, M.; SILVA FILHO, O. L. S. Proposta de plano de aula para o ensino de Física. **Physicae Organum**, v. 5, n. 1, p. 39-44, Brasília, 2019.

FERREIRA, M.; SILVA FILHO, O. L.; MOREIRA, M. A.; FRANZ, G. B.; PORTUGAL, K. O.; NOGUEIRA, D. X. P. Unidades de Ensino Potencialmente Significativa sobre Óptica Geométrica apoiada por Vídeos, Aplicativos e Jogos para Smartphones. **Revista Brasileira de Ensino de Física**. v. 42, 2020. <https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2020-0057>

FERREIRA, M.; SILVA FILHO, O. L.; STRAPASSON A.; PORTUGAL, K. O.; MACIEL, A. C. Simuladores Digitais no Contexto de Gagné e Vygotsky: Uma proposta de Intervenção

Didática sobre Eletricidade e Circuitos Elétricos. **Revista de Enseñanza de la Física**, v. 33, n. 3, p. 75-88. 2021.

FERREIRA, M.; COUTO, R. V. L.; SILVA FILHO, O. L.; PAULUCCI, L.; MONTEIRO, F. F. Ensino de astronomia: uma abordagem didática a partir da Teoria da Relatividade Geral. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 43, p. 1-13, 2021b. <https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2021-0157>.

FIOLHAIS, C.; TRINDADE, J. Física no Computador: o computador como uma ferramenta no Ensino e na aprendizagem das ciências Físicas. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 25, n. 3, p. 259-272.

FREITAS, F. F. **Utilização das Tecnologias da Informação (TIs) para o Ensino de Física Moderna no Ensino Médio**. 2017. 73f. Dissertação (Mestrado em Ensino de Ciências) — Universidade Federal de Ouro Preto, UFOP, Ouro Preto.

GRIFFITHS, D. J. **Eletrodinâmica**. 4. ed. São Paulo: Pearson Education, 2011.

HALLIDAY, D; RESNICK, R; WALKER, J; BIASI, R. S. **Fundamentos de Física: Óptica e Física Moderna**. v. 4, 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

KOPP, F. A.; ALMEIDA, V. Analogias e metáforas no ensino de Física Moderna apresentadas nos livros didáticos aprovados pelo PNLD 2018. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 36, n. 1, p. 69-98, 2019. <https://doi.org/10.5007/2175-7941.2019v36n1p69>.

LÉVY, P. **Cibercultura**. Trad. Carlos Irineu da Costa. São Paulo: Editora 34, 1999.

MACÊDO, A. J.; DICKMAN, A. G.; ANDRADE, I. S. F. Simulações computacionais como ferramentas para o ensino de conceitos básicos de eletricidade. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 29, n. Especial 1, p. 562 -613, 2012. <https://doi.org/10.5007/2175-7941.2012v29nesp1p562>.

MATIAS, M. P. **Simulação no PhET (Physics Education Technology) para Lançamento de Projéteis e Oficina de Construção e Lançamento de Foguetes de Garrafas Pet**. 2019. 120f. Dissertação (Mestrado em Ensino de Física) — Universidade Federal Rural de Pernambuco, UFRPE, Recife.

MEDEIROS, A; MEDEIROS, C. F. Possibilidades e limitações das simulações computacionais no ensino da Física. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 24, n. 2, p.77-86, 2002.

MILL, D.; OLIVEIRA, A.A.; FERREIRA, M. Jornadas Formativas Mediadas por Tecnologias Digitais no Ensino Superior: Aportes para Pensar Atividade Assíncronas. **Revista da FAEBA**, v. 31, n. 65, p. 201-22, 2022. <https://dx.doi.org/10.21879/faeaba2358-0194.2022.v31.n65.p201-224>

MIRANDA, R. M.; BECHARA, M. J. Uso de simulações em disciplinas básicas de mecânica em um curso de licenciatura em Física. In: **Encontro de Pesquisa em Ensino de Física**, 9., 2004, Jaboticatubas, MG. Atas. São Paulo: Sociedade Brasileira de Física, 2004. p. 1-12.

MOMM, A. M. P. **Uma abordagem histórico-cultural do efeito fotoelétrico para o ensino médio**. 2017. 103f. Dissertação (Mestrado em Ensino de Física) — Universidade de Santa Catarina, UFSC, Santa Catarina.

MONTEIRO, M. A.; NARDI, R.; FILHO, J. B. B. A sistemática incompreensão da teoria quântica e as dificuldades dos professores na introdução da Física moderna e contemporânea no ensino médio. **Ciência & Educação**, v. 15, n. 3, p. 557-580, 2009.

MOREIRA, M.A.; MASINI, E.A.F. **Aprendizagem significativa**: a teoria de David Ausubel. São Paulo: Editora Moraes, 1982.

MOREIRA, M. A. **Teorias de aprendizagem**. São Paulo: Editora Pedagógica e Universitária (EPU), 1999.

MOREIRA, M. A. Organizadores prévios e aprendizagem significativa. **Revista Chilena de Educación Científica**, v. 7, n. 2, p.23-30, 2008.

MOREIRA, M. A. Unidades de *enseñanza* potencialmente significativas – UEPS. **Aprendizagem Significativa em Revista**, v. 1, n. 2, p. 43-63, 2011.

MOREIRA, M. A. O que é afinal aprendizagem significativa? **Revista Curriculum, La Laguna**, v. 25, p. 29-56, 2012.

MOREIRA, M. A. Aprendizagem significativa: um conceito subjacente. *In: Actas del Encuentro Internacional sobre el Aprendizaje Significativo, 2019*, Burgos, España. p. 19-44.

NUSSENZVEIG, H. M. **Curso de Física Básica: Ótica, Relatividade e Física Quântica**. São Paulo: E. Blücher, 1998.

OMS. **Excesso de mortalidade associado à pandemia de COVID-19 foi de 14,9 milhões em 2020 e 2021**. Organização Panamericana de Saúde, 2022. Disponível em: <https://www.paho.org/pt/noticias/5-5-2022-excesso-mortalidade-associado-pandemia-covid-19-foi-149-milhoes-em-2020-e-2021>. Acesso em: 7 mar. 2023.

ORTEGA, D.; MOURA, B. A. Uma abordagem histórica da reflexão e da refração da luz. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 42, p.1-16, 2020. <https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2019-0114>

OSTERMANN, F.; MOREIRA, M. A. Uma revisão bibliográfica sobre a área de pesquisa "Física moderna e contemporânea no Ensino Médio". **Investigações em Ensino de Ciências**, v. 5, n. 1, p. 23-48, 2000.

PEREIRA, R. R. **O Uso do Simulador PhET como Recurso Didático Para o Ensino de Ondas no 9º Ano do Ensino Fundamental**. 2018. 98f. Dissertação (Mestrado em Ensino de Física) — Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda, Rio de Janeiro.

PERRENOUD, P. **Dez Novas Competências para Ensinar**. Porto Alegre: Artmed, 2000.

PERUZZO, J. POTTKER, W. E.; PRADO, T. G. **Física Moderna e Contemporânea das Teorias Quânticas e Relativísticas às Fronteiras da Física**. v. 1. São Paulo: Livraria da Física, 2014.

PINTO, A. C.; ZANETIC, J.; É Possível Levar a Física Quântica para o Ensino Médio? **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, v. 16, n. 1, p. 7-34, 1999.

POLITO, A. M. M. **A Construção da Estrutura Conceitual da Física Clássica**. São Paulo: Livraria da Física, 2016.

PRENSKY, M. Digital Natives, Digital Immigrants. *In*: PRENSKY, M. **On the Horizon**. NCB University Press, v. 9, n. 5, p. 1-6, 2001.

RIBEIRO, A. R.; COELHO, L.; BERTOLAMI, O.; ANDRÉ, R. Luz: História, Natureza e Aplicações. **Para os físicos e amigos da Física**, v. 39, n. 1/ 2, p. 6-13, 2016.

ROCHA, J. F. M. **Origens e evolução das ideias da Física**. EDUFBA: Salvador, 2002.

ROSA, P. R. S. O uso de computadores no ensino de Física. Parte I: potencialidades e uso real. **Revista Brasileira de Ensino de Física**. v. 17, n. 2, p. 182-195, 1995.

SHABAJEE, P.; POSTLETHWAITE, K. What happened to modern physics? **School Science Review**, v. 81, n. 297, p. 51-56.

SILVA, A. M. **Uso do computador no processo de ensino e aprendizagem**: Norteadores teóricos - metodológicos da prática de professores dos anos iniciais da rede municipal de São José do Rio Preto. 2011. 175f. Dissertação de Mestrado (Educação) — Universidade Estadual Paulista (UNESP), Presidente Prudente, São Paulo. 2015

SILVA FILHO, O. L.; FERREIRA, M. Teorias da Aprendizagem e da Educação como Referenciais em Práticas de Ensino: Ausubel e Lipman. **Revista do Professor de Física**, v. 2, n. 2, p. 104-125, 2018.

SILVA FILHO, O. L.; FERREIRA, M.; POLITO, A. M. M.; COELHO, A. L. M. de B. Normatividade e descritividade em referenciais teóricos na área de ensino de Física. **Pesquisa e Debate em Educação**, v. 11, n. 1, p. 1-33, 2021.

SILVA FILHO, O. L.; FERREIRA, M. Modelo teórico para levantamento e organização de subsunções no âmbito da Aprendizagem Significativa. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 44, p. 1-13, 2022. <https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2021-0339>.

SILVA, R. M. **Sequência didática multimídia para o ensino do efeito fotoelétrico**. 2015. 108f. Dissertação (Mestrado Profissional de Ensino de Física) — Instituto de Ciências Exatas, Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda.

SOUZA, F. O.; NOVAIS, J. W. Z.; OLIVEIRA, A. G.; JAUDY, R. R.; ZANGESKI, D. S. O. Simulações PhET: a teoria aliada à prática experimental nas aulas de química. **Revista Zeiki**, v. 1, n. 1, p. 19-35, 2020.

TAVARES, R. Animações interativas e mapas conceituais: uma proposta para facilitar a aprendizagem significativa em ciências. **Revista online Ciência & Cognição**, v. 13, n. 2, p. 99-108, 2008.

TERRAZZAN, E. A. A inserção da Física moderna contemporânea no ensino de Física na escola de 2º grau. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, v. 9, n. 3, p. 209-214, 1992.

TIPLER, P.A.; LIEWELLYN, R. A. **Física Moderna**, v. 4., 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2001.

UNESCO. **TIC na educação do Brasil**. n.d. Disponível em <https://pt.unesco.org/fieldoffice/brasil/expertise/ict-education-brazil>. Acesso em: 7 mar. 2023.

UPPERTOOLS. **Hiperconectividade**: como ela ainda vai transformar os negócios. 2016. Disponível em: <https://www.uppertools.com.br/blog/hiperconectividade-como-ela-ainda-vai-transformar-os-negocios/>. Acesso em: 26 fev. 2023.

VASCAK. **Efeito Fotoelétrico**. 2019. Disponível em: https://www.vacak.cz/data/android/physicsatschool/template.php?s=opt_fotoefekt&l=pt. Acesso em: 2 mar. 2023.

VILAÇA, G. M. **Revisão Bibliográfica**: a experimentação no Ensino de Física. 2012. 10f. Relatório do Programa institucional de Bolsa de Iniciação à Docência (Licenciatura em Física). Universidade de São João del Rei, Minas Gerais.

VILAR, R. C. C. **Uma Estratégia de Ensino Diferenciada para o Estudo de Tópicos de Física Moderna**. 2020. 111f. Dissertação (Mestrado em Ensino de Física) — Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Vitória da Conquista.

YAMAMOTO, I., BARBETA, V. B. Simulações de experiências como ferramenta de demonstração virtual em aulas de teoria de Física. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 23, n. 2, p. 215-225. <http://dx.doi.org/10.1590/S1806-11172001000200013>.

YOUNG, H. D.; FREEDMAN, R. A. **Física IV - Ótica e Física Moderna**. São Paulo: Pearson Addison Wesley, 2016.