

MNPEF
Mestrado Nacional
Profissional em
Ensino de Física



UNIVERSIDADE FEDERAL DE RORAIMA
SOCIEDADE BRASILEIRA DE FÍSICA - SBF
MESTRADO NACIONAL PROFISSIONAL EM
ENSINO DE FÍSICA
POLO 38 UFRR - CAMPUS UFRR / PARICARANA



Wladimir Ferreira Parente

**Uma Sequência Didática para a Física Quântica: a Experimentação no Ensino
do Efeito Fotoelétrico.**

Boa Vista - RR

2019

Wladimir Ferreira Parente

Uma Sequência Didática para a Física Quântica: a Experimentação no Ensino do Efeito Fotoelétrico.

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal de Roraima no 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. Dsc. Mikael Souto Maior de Sousa

Coorientador: Prof. Dsc. Roberto Câmara de Araújo

Boa Vista - RR

2019

Dados Internacionais de Catalogação na publicação (CIP)
Biblioteca Central da Universidade Federal de Roraima

P228s Parente, Wladimir Ferreira.

Uma sequência didática para a Física Quântica : a experimentação no ensino do efeito fotoelétrico / Wladimir Ferreira Parente. – Boa Vista, 2019.

89 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Mikael Souto Maior de Sousa.

Coorientador: Prof. Dr. Roberto Câmara de Araújo.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Roraima, Programa de Pós-Graduação em Física.

1 - Ensino de Física. 2 - Efeito fotoelétrico. 3 - Unidades de ensino potencialmente significativas. I - Título. II - Sousa, Mikael Souto Maior de (orientador). III - Araújo, Roberto Câmara de (coorientador).

CDU - 539:372

Ficha Catalográfica elaborada pela Bibliotecária/Documentalista:
Maria de Fátima Andrade Costa - CRB-11/453-AM

**UMA SEQUÊNCIA DIDÁTICA PARA A FÍSICA QUÂNTICA: A
EXPERIMENTAÇÃO NO ENSINO DO EFEITO FOTOELÉTRICO**

WLADIMIR FERREIRA PARENTE

Orientador (es):

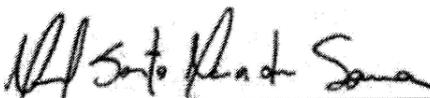
Orientador: Prof. Dsc. Mikael Souto Maior de Sousa

Coorientador: Prof. Dsc. Roberto Câmara de Araújo

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal de Roraima no 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 em: 19 de Fevereiro de 2020.

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. MIKAEL SOUTO MAIOR DE SOUSA¹
Orientador



Prof. Dr. ANDERSON ALVES DE LIMA²
Examinador Externo- UFPB



Prof. Dr. CASSIO SANGUINI SERGIO
Examinador Interno

Boa Vista – RR
Fevereiro de 2020

1, 2: as assinaturas dos Professores Mikael Souto Maior de Sousa e Anderson Alves de Lima constam digitalizadas sob autorização dos mesmos, conforme consta em ata, tendo em vista que os referidos Professores participaram da Banca à distância.

*Dedico esta dissertação à minha Família
que me faz melhor a cada dia.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço:

- Ao Grande Arquiteto do Universo por me dar sabedoria para aprender Física.
- À minha Esposa e Filha por todo Amor e paciência ao me apoiar durante o processo de escrita do presente trabalho.
- Aos meus Pais e Irmãos por todo carinho.
- Ao meu Orientador, Professor Doutor Mikael Souto Maior de Sousa pela dedicação e cuidado para que nosso trabalho se realizasse com qualidade.
- Ao meu Co-orientador, Professor Doutor Roberto Câmara de Araújo pela colaboração na escrita do trabalho.
- Ao Colegiado do MNPEF pela dedicação em nos proporcionar aulas excelentes.
- Aos Professores membros da Banca de Qualificação por dispuserem seu tempo para apreciar este trabalho e por suas colocações e críticas construtivas para a melhoria do mesmo.
- Aos Professores membros da Banca de Defesa da Dissertação pela disponibilidade em colaborar com o presente trabalho.
- Ao meu Irmão Walter Parente por ser meu incentivador no estudo da Física e por toda ajuda na confecção dos experimentos utilizados no trabalho.
- Ao meu Amigo Irmão Italo Malinowski pelo apoio e incentivo durante o processo de estudo para o Mestrado e pelo Companheirismo sempre presente nas nossas aulas de Física.
- Aos meus Alunos, principais motivos pelos quais busco melhorar a cada dia como Professor.
- Aos amigos que fiz na Fundação Bradesco pela alegria em ser Educador com vocês.
- O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Um Professor nunca deve desacreditar do sonho de um Aluno. Às vezes aquele Aluno precisa apenas de uma palavra de incentivo para tornar seu sonho real.

RESUMO

UMA SEQUÊNCIA DIDÁTICA PARA A FÍSICA QUÂNTICA: A EXPERIMENTAÇÃO NO ENSINO DO EFEITO FOTOELÉTRICO

A Física Moderna e Contemporânea (FMC)¹ está presente no cotidiano e graças aos seus avanços tecnológicos foram possíveis hoje termos aparelhos como smartphones, notebooks, GPS etc. Devido à importância desse ramo da Física estar presente no cotidiano dos educandos se faz necessário, como se prevê na BNCC², a inserção desse ramo no ensino básico. Entretanto, muitas vezes essa nova Física é deixada de lado às vezes por despreparo por parte dos professores e, outras vezes por questões conteudistas no que tange aos processos de vestibulares/ENEM. Sendo assim, esta pesquisa visa a implementação do ensino de Física Moderna, em especial ao processo de quantização da energia e o efeito fotoelétrico, através de abordagens metodológicas ativas buscando dar significância aos conteúdos abordados para os discentes do ensino básico. Para isso, utilizou-se a ideia de Unidade de Ensino Potencialmente Significativa proposta por Moreira para a construção de uma sequência didática voltada para a formação de um aluno crítico e pesquisador com relação ao ambiente que o cerca.

Palavras-chave: Ensino de Física, Efeito Fotoelétrico, Unidades de Ensino Potencialmente Significativas.

¹ Durante toda a Dissertação o termo FMC refere-se à Física Moderna e Contemporânea.

² Base Nacional Comum Curricular.

ABSTRACT

A TEACHING SEQUENCE FOR QUANTUM PHYSICS: THE EXPERIMENTATION IN PHOTOELECTRIC TEACHING

Modern physics is present in our lives and thanks to its technological advances it was possible today to develop devices such as smartphones, notebooks, GPS etc. Due to the importance of this branch of physics being present in the daily life of students, it is necessary, as predicted in the BNCC, the insertion of this branch in basic education. However, in many cases this new physics is sometimes neglected by teachers insecurity and sometimes by contentious questions regarding the entrance exams/ENEM processes. Therefore, this research aims at implementation of Modern Physics teaching, in particular the energy quantization process and the photoelectric effect, through active methodological approaches seeking to give meaning to the contents addressed to the students of the basic education. For this, we used the idea of Potentially Significant Teaching Unit proposed by Moreira for the construction of a didactic sequence focused on the formation of a critical student and researcher in relation to the surrounding environment.

Key-words: Physics Teaching, Photoelectric Effect, Potentially Significant Units.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

1	Experimento realizado por Millikan para a determinar a carga elementar, cujo valor é de aproximadamente $1,6 \cdot 10^{-19}C$	17
2	Gráfico da dependência experimental de R_T e de T com relação à frequência.	20
3	Correção de Planck representada pela linha sólida com relação à Lei de Rayleigh-Jeans representada pela linha tracejada.	22
4	Tubo de raios catódicos: aparelho no qual Hertz percebeu que descargas elétricas entre dois eletrodos ocorrem mais facilmente quando um dos eletrodos recebe luz ultravioleta.	25
5	Gráfico de corrente i em função da voltagem V de dados obtidos com o aparelho da figura 4.	26
6	Gráfico das medidas de Millikan do potencial limite no sódio em várias frequências.	27
7	Resultados obtidos por Compton para quatro valores do ângulo de espalhamento θ	28
8	Diagrama esquemático do equipamento usado por Compton.	29
9	Simulador PhET incidindo radiação na cor verde (comprimento de onda de 535 nm) e intensidade de 32% numa placa de sódio.	38
10	Simulador PhET incidindo radiação na cor verde (comprimento de onda de 535 nm) e intensidade de 100% numa placa de sódio.	39
11	Simulador PhET incidindo radiação ultravioleta (comprimento de onda de 259 nm) e intensidade de 32% numa placa de zinco.	39
12	Simulador PhET incidindo radiação ultravioleta (comprimento de onda de 259 nm) e intensidade de 100% numa placa de zinco.	40
13	Alunos assistindo ao vídeo sobre a catástrofe ultravioleta.	43
14	Discussão sobre as palavras anotadas no quadro.	44
15	Questionário de verificação de aprendizagem aplicado ao final do primeiro encontro.	45
16	Mapa conceitual elaborado por um aluno.	46
17	Mapa conceitual elaborado por um aluno.	47
18	Roteiro experimental para se calcular a constante de Planck.	48
19	Roteiro experimental para se calcular a constante de Planck.	49
20	Alunos realizando atividade experimental para se calcular a constante de Planck.	50
21	Alunos realizando atividade experimental para se calcular a constante de Planck.	50

22	Vídeo de um experimento sobre o efeito fotoelétrico.	51
23	Questionário passado aos alunos como avaliação qualitativa.	52
24	Tabelas e questionário realizado pelos alunos no último encontro.	53
25	Formulário respondido online pelos alunos após o último encontro.....	54
26	Formulário respondido online pelos alunos após o último encontro.....	54
27	Nesse gráfico mostramos o nível de formação dos professores que participaram da pesquisa.	61
28	Nesse gráfico mostramos a formação específica dos professores que participaram da pesquisa. Vemos que em sua totalidade todos são graduados em Física.	61
29	Nesse gráfico mostramos o tempo de exercício na função de docente em Física. Em sua maioria, os professores que participaram dessa pesquisa tem mais de oito anos na profissão.	62
30	Nesse gráfico observa-se que todos os professores envolvidos afirmam ter conhecimento sobre a disciplina de Física Moderna durante seu período de graduação.	62
31	Nesse gráfico observa-se que 71,4% dos professores envolvidos afirmam que os alunos são capazes de compreender a importância desse ramo da Física, enquanto que 28,6% afirma que os alunos não são capazes de compreender.	63
32	Nesse gráfico observa-se que 71,4% dos professores envolvidos não lecionam FMC no ensino básico e que apenas 28,6% afirmam que lecionam esse ramo da Física.	63
33	Experimento sobre o efeito fotoelétrico realizado com a finalidade de investigar os subsunçores dos alunos.	65
34	Experimento sobre quantização de energia com o intuito de medir a constante de Planck.....	68
35	Simulador PhET incidindo radiação na cor verde (comprimento de onda de $535nm$) e intensidade de 32% numa placa de sódio.	72
36	Simulador PhET incidindo radiação na cor verde (comprimento de onda de $535nm$) e intensidade de 100% numa placa de sódio.	73
37	Simulador PhET incidindo radiação ultravioleta (comprimento de onda de $259nm$) e intensidade de 32% numa placa de zinco.	73
38	Simulador PhET incidindo radiação ultravioleta (comprimento de onda de $259nm$) e intensidade de 100% numa placa de zinco.....	73
39	Tabela para adicionar o comprimento de onda máximo necessário para que os elétrons fiquem na iminência de serem arrancados.....	74
40	Tabela para adicionar a frequência de corte.....	74
41	Tabela para adicionar a função trabalho (ϕ).	75

42	Correção de Planck representada pela linha sólida com relação à Lei de Rayleigh-Jeans representada pela linha tracejada.	79
43	Experimento sobre o efeito fotoelétrico realizado com a finalidade de investigar os subunçores dos alunos.	85
44	Experimento sobre o efeito fotoelétrico realizado com a finalidade de investigar os subunçores dos alunos.	86
45	Experimento montado.	86
46	Experimento para o cálculo da constante de Planck.	88

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	REVISÃO DE LITERATURA	5
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICO-PEDAGÓGICA NAS PRÁTICAS DE ENSINO	8
3.1	Zona de Desenvolvimento Proximal (ZDP).....	8
3.2	Aprendizagem Significativa.....	9
3.3	Unidades de Ensino Potencialmente Significativas	13
3.4	Metodologias Ativas.....	13
4	DA QUANTIZAÇÃO DA ENERGIA AO EFEITO FOTOELÉTRICO	16
4.1	Quantização da Carga Elétrica e o Experimento de Millikan	16
4.1.1	Quantização da carga elétrica.....	16
4.1.2	Experimento de Millikan	16
4.2	Radiação do Corpo Negro	18
4.2.1	Lei de Stefan-Boltzmann	19
4.2.2	Lei de Rayleigh-Jeans.....	21
4.2.3	A quantização da Energia de Planck.....	22
4.3	O Efeito Fotoelétrico	24
4.4	Raios X e Efeito Compton.....	28
5	METODOLOGIA	31
5.1	Quanto à Natureza	31
5.2	O Produto Educacional	34
5.2.1	Considerações Éticas	35
5.2.2	Procedimentos metodológicos e aplicação do Produto Educacional	35
5.2.2.1	Etapas de desenvolvimento da UEPS	36
6	DISCUSSÃO QUALITATIVA DOS RESULTADOS	42
6.1	Primeira aplicação	42
6.2	Segunda aplicação	45
6.3	Terceira aplicação.....	47
6.4	Quarta aplicação	51
6.5	Quinta aplicação.....	52
7	CONCLUSÕES	55
	REFERÊNCIAS	58
A	QUESTIONÁRIO DE SONDAÇÃO DOS PROFESSORES DE FÍSICA	61
A.1	Nível máximo de escolaridade	61
A.2	Graduação na área específica	61

A.3	Experiência em sala de aula	62
A.4	Física Moderna e Contemporânea na formação docente.....	62
A.5	Importância da Física Moderna e Contemporânea no Ensino Básico...	62
A.6	Física Moderna e Contemporânea lecionada no Ensino Médio	62
A.7	Considerações sobre o questionário	62
	B PRODUTO EDUCACIONAL	64
B.1	APRESENTAÇÃO.....	64
B.2	O PLANO DE AULA.....	64
B.3	PROPOSTA PARA AULA EXPOSITIVA	77
B.3.1	Quantização da Carga Elétrica e o Experimento de Millikan	77
B.3.1.1	Quantização da carga elétrica.....	77
B.3.1.2	O Experimento de Millikan	78
B.3.2	Radiação do Corpo Negro	78
B.3.2.1	A quantização da Energia de Planck.....	79
B.3.3	O Efeito Fotoelétrico	81
	C MANUAL DE MONTAGEM DOS EXPERIMENTOS.....	84
C.1	Experimento com LDR	84
C.2	Experimento para medir a constante de Planck.....	87
	D FORMULÁRIO DE AVALIAÇÃO DOS EDUCANDOS.....	89
D.1	Formulário de avaliação dos educandos - 1ª aplicação	89
D.2	Formulário de avaliação dos educandos - 2ª aplicação	89

1 INTRODUÇÃO

A Física Moderna e Contemporânea (FMC) proporcionou, graças aos seus estudos, diversos avanços tecnológicos. Hoje temos aparelhos como smartphones, notebooks, GPS, portas que se abrem e fecham sozinhas, lâmpadas de postes que se acendem ao entardecer etc., devido aos progressos alcançados pela Física.

Os estudantes se sentem curiosos em saber como as coisas funcionam e, por vezes, recorrem ao professor de Física para que ele esclareça suas dúvidas, mas nem sempre o professor está apto a explicar o funcionamento dos equipamentos eletrônicos. Segundo os PCN ¹

Espera-se que o ensino de Física, na escola média, contribua para a formação de uma cultura científica efetiva, que permita ao indivíduo a interpretação dos fatos, fenômenos e processos naturais, situando e dimensionando a interação do ser humano com a natureza como parte da própria natureza em transformação (PCN, 2000, p. 22).

A ciência e a tecnologia têm avançado em prol da melhoria na qualidade de vida da população principalmente em questões de saúde e de geração de energia elétrica. De acordo com a Base Nacional Comum Curricular:

A Ciência e a Tecnologia tendem a ser encaradas não somente como ferramentas capazes de solucionar problemas, tanto os dos indivíduos como os da sociedade, mas também como uma abertura para novas visões de mundo (BRASIL, 2017, p. 547).

Aprender FMC faz com que o estudante entenda o mundo em que vive, principalmente no que diz respeito às tecnologias. Valadares e Moreira (1998) fala da importância de se introduzir conceitos básicos de física moderna fazendo sempre uma ligação entre a física estudada em sala de aula e a física derivada dos fenômenos cotidianos do aluno.

De acordo com os PCN+²:

Física Moderna serão indispensáveis para permitir aos jovens adquirir uma compreensão mais abrangente sobre como se constitui a matéria, de forma que tenham contato com diferentes e novos materiais, cristais líquidos e lasers presentes nos utensílios tecnológicos, ou com o desenvolvimento da eletrônica, dos circuitos integrados e dos microprocessadores (BRASIL, 2002, p. 70).

¹ Parâmetros Curriculares Nacionais.

² PCN+ refere-se aos Parâmetros Curriculares Nacionais voltados para o Ensino Médio.

É importante que a Física seja reconhecida não como um produto que se encontra pronto, mas como um processo ocorrido ao longo da história da humanidade e que contribui no desenvolvimento de diferentes tecnologias, sendo ainda impulsionado por elas (BRASIL, 2002).

Com o mundo cada vez mais tecnológico e com, atualmente, uma maior possibilidade de acesso aos recursos derivados desse avanço, em especial pelos jovens, é de se considerar que seja cada vez mais necessária a inserção dos tópicos de Física Moderna e Contemporânea (FMC) no Ensino Médio (Santos et. al, 2016).

Uma das barreiras enfrentadas para a introdução da FMC no ensino médio é o ensino voltado para as provas de ingresso às universidades. De acordo com Mozena e Ostermann (2016, p. 328) "no ensino médio, o currículo tem sido definido na sala de aula por influências externas, como os exames nacionais (por exemplo, ENEM e vestibulares) e os livros didáticos".

De acordo com Mozena (2014, p. 327), a BNCC é apresentada "como uma promessa de regular a Educação Básica no país e melhorar a qualidade do seu ensino reconhecido como falido". Porém, destaca que essa base pode servir para um retrocesso, pois formaliza o ensino focado em rankings, tendo a qualidade da educação a característica de algo mensurável (MOZENA, 2014).

Dentre as competências específicas de ciências da natureza e suas tecnologias para o Ensino Médio presentes na BNCC, destaca-se "analisar situações-problema e avaliar aplicações do conhecimento científico e tecnológico e suas implicações no mundo" (BNCC, 2017, p. 539). Sendo assim, as escolas podem adotar um currículo no qual a FMC se encaixe e os alunos tenham a oportunidade de entender que a Física explica o mundo ao qual pertencem.

A influência crescente dos conteúdos de Física Moderna e Contemporânea para o entendimento do mundo criado pelo homem atual, bem como a inserção consciente, participativa e modificadora do cidadão neste mesmo mundo, define, por si só, a necessidade de debatermos e estabelecermos as formas de abordar tais conteúdos na escola de 2º grau (TERRAZAN, 1992, p. 209).

Neste trabalho será tratado, mais especificamente, o efeito fotoelétrico através da realização de um experimento de baixo custo que consiste em uma placa protoboard, LED's de diversas cores, bateria de 9 V, fios de ligação e um multímetro, que será utilizado para calcular a constante de Planck.

Tal experimento será realizado como forma de buscarmos um conhecimento educacional de natureza própria, que em sala de aula extrapole a relação de conteúdos

científicos matematizados, fazendo uma ligação direta das relações teoria-prática capaz de contribuir na formação dos estudantes.

Durante a realização do experimento, serão utilizadas as metodologias ativas, visto que propomos a necessidade de que o aluno do ensino médio se torne um aluno pesquisador. Na metodologia ativa, o aluno está diretamente envolvido na sua aprendizagem. O professor deixa de lado o papel de detentor do conhecimento e passa a ser um facilitador da aprendizagem e não mais o protagonista como nas aulas que seguem o modelo tradicional.

Nesse modelo metodológico, o aluno deve conseguir se desenvolver no sentido de aprender a aprender, de ser um aluno questionador, um sujeito crítico que consiga resolver problemas, deve adquirir informações e saber o que fazer com essas informações.

Segundo Moran (2015), a metodologia ativa busca não apenas o ensino, mas a aprendizagem de conceitos e sua aplicabilidade na vida cotidiana do sujeito, não substituindo as aulas expositivas tradicionais e servindo como auxiliares na busca de uma melhor aprendizagem para o aluno, que deve se envolver ativamente no próprio processo de aprendizagem, em busca da resolução de problemas, da leitura e escrita de certos temas e da explicação de conteúdos para os colegas, tornando-se assim proativo no desenvolvimento do seu próprio conhecimento onde a aula se torna um espaço de trocas, de resultados e de pesquisa.

A quantidade de aulas de Física nas escolas, tanto públicas quanto privadas, de Boa Vista/Roraima, é semelhante à maioria das escolas do Brasil: duas horas/aula (públicas) e três horas/aula (privadas) de Física por semana. Quase sempre há a falta de laboratório e outros meios que poderiam auxiliar no ensino, como por exemplo, computadores, projetor de imagens e televisores.

Através de pesquisa com os professores graduados em Licenciatura em Física das escolas da rede pública e privada de Boa Vista-RR, fez-se um levantamento sobre os assuntos tratados na FMC e constatou-se que todos os entrevistados tiveram durante sua formação aulas que abordaram tópicos de Física Moderna e Contemporânea (FMC) e todos concordam com a importância do ensino desse ramo da Física no ensino médio. Porém, uma minoria dos professores (28,6%) acha que os alunos não estão aptos a compreender a FMC no ensino médio. Uma minoria (28,6%) leciona conteúdos de FMC nas escolas onde trabalha. Todos os professores que lecionam FMC no ensino médio abordam conteúdos de Física Quântica, sendo que 50% deles abordam o conceito de efeito fotoelétrico.

Considerando-se a ideia de que a FCM pode ser vista com entusiasmo tanto por parte dos professores, quanto dos alunos, o presente trabalho tem como objetivo

elaborar uma sequência didático-pedagógica partindo da utilização de um experimento de baixo custo e fácil realização sobre efeito fotoelétrico buscando a implementação do ensino da física quântica no ensino básico. Promovendo o protagonismo do aluno e a construção do conhecimento significativo durante todo o processo.

Neste trabalho, a sequência didático-pedagógica proposta, bem como a metodologia utilizada para sua aplicação, sofreram influência direta da experiência do autor como professor desses conteúdos na escola em que leciona e do levantamento de dados com base no questionário aplicado a três escolas públicas e três escolas particulares da cidade Boa Vista – RR que mostram como essa temática é abordada em sala de aula.

Esta dissertação está dividida em 7 capítulos, respectivamente: no 1º, apresentamos a introdução ao problema proposto por esta dissertação. No 2º, expomos a revisão de literatura na qual nos baseamos para escrever este trabalho. No 3º, tratamos da fundamentação teórico-pedagógicas que fundamentam nosso trabalho. No 4º, desenvolvemos os conceitos físicos da quantização da energia proposta por Planck e utilizadas por Einstein para generalização do efeito de quantização, o que levou a quantização da luz para explicação do efeito fotoelétrico. No 5º, trazemos a nossa proposta metodológica de aplicação do produto educacional vinculado³. No 6º, apresentamos a discussão qualitativa dos resultados após a análise dos dados obtidos mediante a aplicação do nosso produto. No 7º, apresentamos nossas conclusões.

Além do mais, nesta dissertação encontram-se 4 apêndices. No Apêndice A mostramos os dados da pesquisa sobre como os professores das escolas públicas e privadas de Boa Vista RR enxergam a FMC no contexto escolar. No Apêndices B e C encontram-se o nosso produto educacional de maneira descritiva, sendo o Apêndice B a sequência didática proposta e o Apêndice C o manual de montagem dos experimentos propostos. No Apêndice D encontra-se os formulários de entrada e saída após a aplicação do produto, com a finalidade de promover uma autoavaliação do pesquisador e da aplicação do produto.

³ Nosso produto educacional consiste numa sequência didática com abordagens experimentais seguindo as UEPS (Unidades de Ensino Potencialmente Significativas) propostas por Moreira.

2 REVISÃO DE LITERATURA

A experimentação no ensino de Física é forte aliada ao que os PCN's nos pedem quanto ao fato de desenvolvermos a capacidade interpretativa dos alunos acerca do tema estudado e dos problemas do seu dia a dia (BRASIL, 2000). Cremos que, para fortalecermos os conceitos expostos em aulas teóricas, há necessidade da aula prática, momento no qual as teorias se exteriorizam e o aluno pode visualizar o que aprendeu teoricamente.

De acordo com Borges (2002, p. 298),

Muito do que se faz nas aulas de Física em nossas escolas de ensino médio e universidades (...) preocupando-se mais com a apresentação das definições, conceitos e fórmulas que os alunos memorizam para resolver exercícios. (...) Não se trata, pois, de contrapor o ensino experimental ao teórico, mas de encontrar formas que evitem essa fragmentação no conhecimento, para tornar a aprendizagem mais interessante, motivadora e acessível aos estudantes.

Conforme se lê em Gaspar e Monteiro, 2005, p. 232:

A atividade de demonstração experimental em sala de aula, particularmente quando relacionada a conteúdos de Física, apesar de fundamentar-se em conceitos científicos, formais e abstratos, tem por singularidade própria a ênfase no elemento real, no que é diretamente observável e, sobretudo, na possibilidade simular no micro-cosmo formal da sala de aula a realidade informal vivida pela criança no seu mundo exterior.

A experimentação requer preparo por parte do professor, pois a falta de planejamento pode transformar sua tentativa de aula diferenciada em um problema. Os estudantes poderão não perceber outros propósitos para a aula prática a não ser os de verificar e comprovar fatos e leis científicas, tentando fazer com que seu experimento produza o resultado previsto pela teoria, ou que alguma regularidade deva ser encontrada, logo, deve-se entender que experimentos são passivos de erros.

Na opinião de Grasselli e Gardelli (2014, p. 2), a experimentação na disciplina de Física “visa diminuir as dificuldades dos alunos do Ensino Médio na assimilação de conteúdos desta disciplina com a possibilidade de gerar o interesse e estímulo para a aprendizagem”. Dessa maneira, os professores podem buscar na experimentação uma maneira de superar tais dificuldades e instigar o aluno a compreender os fenômenos físicos tratados no experimento.

Vale ressaltar que há diferença entre resultados de um mesmo experimento feito praticamente nas mesmas situações como, por exemplo, a marcação do tempo em que

uma esfera desce um plano inclinado e isso deve estar bem claro aos alunos antes da aula experimental começar. Deve-se ensinar o método científico, momento no qual o estudante compreende que fazer ciência significa descobrir fatos e leis pela aplicação de um método experimental indutivo e fazer invenções a fim de facilitar a aprendizagem e compreensão de conceitos.

Segundo Borges (2002, p. 298), é "necessário que procuremos criar oportunidades para que o ensino experimental e o ensino teórico se efetuem em concordância, permitindo ao estudante integrar conhecimento prático e conhecimento teórico".

Para que as atividades práticas sejam eficazes, devem ser atenciosamente planejadas, levando-se em conta os objetivos pretendidos, os recursos disponíveis e as ideias prévias dos estudantes sobre o assunto, sendo assim, é importante a anterior ocorrência de uma aula teórica, em que as dúvidas serão sanadas antes da aula prática, bem como as ideias prévias dos estudantes acerca do assunto serão discutidas.

Para Gaspar e Monteiro (2005, p, 249), "o papel do professor como agente do processo, no entanto, não deve ser entendido apenas do ponto de vista da capacidade de operar com o equipamento e do domínio conceitual dos conteúdos apresentados na demonstração".

Segundo Saad:

A utilização de aulas com demonstrações em Ciências, com ampla participação coletiva, tem-se mostrado constituir em importante ferramenta para despertar o interesse dos estudantes pelos fenômenos exibidos e pelos desafios em conhecer os respectivos "porquês" (SAAD, 2005, p. 7).

Para Grasselli e Gardelli (2014, p. 2), a prática de experimentações

gera o estímulo para a aprendizagem mediante a observação, análise, exploração, planejamento e o levantamento de hipóteses que possibilitam aos alunos desenvolver suas habilidades, tornando-a mais significativa pelo estabelecimento de vínculos entre conceitos físicos e fenômenos naturais vivenciados.

Borges (2002, p. 300), enfatiza que

o laboratório pode proporcionar excelentes oportunidades para que os estudantes testem suas próprias hipóteses sobre fenômenos particulares, para que planejem suas ações, e as executem, de forma a produzir resultados dignos de confiança.

Gaspar e Monteiro (2005, p. 249), explicam que "a demonstração experimental em sala de aula não é um recurso pedagógico auto-suficiente - (...) ela depende da ação do professor, de sua capacidade de fazê-la funcionar adequadamente".

Outro ponto importante que pode ser tratado nas aulas de física através de experimentos é a questão ambiental que vivemos. O aumento mundial no consumo de energia elétrica implica na busca de novas fontes de energia. As fontes renováveis têm adquirido grande importância como forma de minimizar os efeitos da mudança climática. As placas solares, apesar do custo elevado para instalação e manutenção, são uma das principais fontes de energia limpa.

De acordo com o Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito (CRESESB, 2018), o Sol fornece $1,5 \cdot 10^{18} kWh$ de energia por ano para a superfície terrestre, quantidade de energia dez mil vezes maior do que o consumo mundial de energia elétrica.

Acreditamos que os experimentos de Física permitem aos alunos a exploração de acontecimentos correlacionados entre a Física e a realidade, descrevendo a natureza a partir de si mesma. As aulas experimentais ampliam a importância do trabalho em grupo, criando discussões nas quais os alunos desenvolvam o seu cognitivismo, e suas ideias expostas poderão ser discutidas até que o grupo chegue a determinada conclusão. Dessa forma, as aulas de Física se tornarão mais atrativas e, com isso, haverá influência no indivíduo ao estímulo da sua curiosidade, bem como o incentivo à ampliação do seu raciocínio.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICO-PEDAGÓGICA NAS PRÁTICAS DE ENSINO

Este trabalho está fundamentado a partir da Teoria da Aprendizagem Significativa de David P. Ausubel (2003), o qual utilizou o termo aprendizagem significativa no sentido em que novas ideias interagem simbolicamente com o que o aprendiz já sabe, juntamente com as aplicações das Metodologias ativas de Moran (2015), nas quais o mesmo afirma que aprendemos desde que nascemos a partir de situações concretas, que pouco a pouco conseguimos ampliar e generalizar, denominado método indutivo, e aprendemos também a partir de ideias ou teorias para testá-las, a posteriori, no concreto, denominado método dedutivo ¹. Nessa perspectiva, utilizamos a ideia de UEPS, proposta por Moreira, para fazer uma sequência lógica que facilite a aprendizagem significativa dos educandos. É interessante observar também que, para Vygotsky (1987), um conceito somente pode tornar-se consciente e submeter-se ao controle deliberado quando começa a fazer parte de um sistema.

Se consciência significa generalização, a generalização, por sua vez, significa a formação de um conceito supra-ordenado que inclui o conceito dela como caso específico. Um conceito supra-ordenado implica a existência de uma série de conceitos subordinados, e pressupõe também uma hierarquia de conceitos de diferentes níveis de generalidade. Assim, o conceito dado é inserido em um sistema de relações de generalidade. (VYGOTSKY, 2001, p. 80).

Para Vygostky, o conhecimento não muda de espontâneo para científico de uma hora para a outra. Quando o sujeito internaliza um novo conceito, uma série de outros conhecimentos foram necessárias para sua formação. Tais conceitos são organizados em hierarquia, sendo um conceito relevante na formação do outro. Um conceito se torna consciente quando faz parte de um sistema.

3.1 Zona de Desenvolvimento Proximal (ZDP)

Segundo Schroeder (2007), a teoria de Vygotsky diz que o desenvolvimento do ser humano se dá na relação entre o sujeito e a natureza. Porém, essa relação tem a emergência da consciência, sendo assim um fenômeno que é social e cultural passa a caracterizá-lo como humano. Afirma ainda que os processos mentais superiores se desenvolvem não somente através de processos biológicos, mas também por compartilhamentos de consciências. O sujeito tanto age sobre fatores sociais, históricos e culturais quanto sofre a ação destes.

¹ No método indutivo, o indivíduo, após considerar um número suficiente de casos particulares, conclui uma verdade geral. A indução, ao contrário da dedução, parte de dados particulares da experiência sensível.

Vygotsky utiliza o conceito de Zona de Desenvolvimento Proximal (ZDP) para explicar as transformações que acontecem no indivíduo por meio da ação de um professor que ajuda o indivíduo a compreender certos assuntos que não conseguiu de forma espontânea. Para Vygotsky, a aprendizagem não acontece apenas durante as interações do indivíduo com o seu meio físico, mas ocorre, principalmente, através de interações sociais.

As intervenções deliberadas do professor são muito importantes no desencadeamento de processos que poderão determinar o desenvolvimento intelectual dos seus estudantes, a partir da aprendizagem dos conteúdos escolares, ou, mais especificamente, dos conceitos científicos (SCHROEDER, 2007, p. 296).

Na visão de Vygotsky (2001), o processo de aprendizagem ocorre a partir da formação de conceitos pela criança, tomando como fundamento uma comparação entre dois esquemas conceituais: o que a criança já sabe mesmo antes de entrar na escola, denominado conceitos espontâneos, e aquilo que possa se juntar, interage com aquilo que ela sabe e consegue enriquecê-lo e modificá-lo, sendo resultado da aprendizagem, e denominado por ele de conceitos científicos. Essa teoria corrobora com o que defende Ausubel quanto ao conhecimento preexistente na estrutura cognitiva do indivíduo.

3.2 Aprendizagem Significativa

Durante sua vida, o estudante vai adquirindo conhecimentos de várias maneiras: em brincadeiras na rua, em jogos, com a família. Esses conhecimentos são guardados em sua estrutura cognitiva e podem ser usados posteriormente, bem como se modificar para dar novos significados àquele conhecimento, ou seja, esse subsunçor pode se modificar para ajudar na internalização de novos conhecimentos.

Moreira (2012, p. 2) diz que “subsunçor é o nome que se dá a um conhecimento específico, existente na estrutura de conhecimentos do indivíduo, que permite dar significado a um novo conhecimento que lhe é apresentado ou por ele descoberto”. Logo, para que novos conhecimentos sejam adquiridos o aluno deverá ter em sua estrutura cognitiva conhecimentos prévios que sejam relevantes.

Seguindo as ideias de Ausubel et al. (1980), subsunçor é uma estrutura altamente organizada na estrutura cognitiva em que há uma hierarquia conceitual, capaz de armazenar experiências prévias do sujeito. Quando o aluno não dispõe de subsunçores ou os subsunçores existentes não são suficientes e nem satisfatórios para serem utilizados na aquisição de uma nova aprendizagem, deve-se utilizar de organizadores prévios.

No seu cotidiano, o sujeito (aluno) tem interações diversas com livros, pessoas, filmes, revistas etc., e essas interações criam certo conhecimento em sua estrutura cognitiva. Um dia, esses conhecimentos poderão servir de base para a aquisição de novos conceitos que podem colaborar com uma aprendizagem significativa. Na visão de Silva e Schirlo (2014), os organizadores prévios poderão servir como ativadores de subsunçores presentes na estrutura cognitiva do aluno, mas que não estavam sendo utilizados. No pensamento de Neto (2013), organizadores prévios são conteúdos que devem ser estudados antes, formando um elo entre o que ele sabe e o que deseja saber, evitando assim a aprendizagem mecânica e garantindo a aprendizagem significativa.

Para Ausubel (2003), quando o organizador interage com os subsunçores na estrutura cognitiva, ele fornece um apoio para que o material diferenciado seja incorporado e fique retido na estrutura cognitiva do sujeito, aumentando a capacidade de diferenciação entre materiais com ideias semelhantes. Pode-se pensar, por exemplo, em diferentes leis presentes nos conteúdos de Física. Na 1ª Série do Ensino Médio o estudante conhece a lei de Newton da Gravitação Universal e entende que a força gravitacional é inversamente proporcional ao quadrado da distância que separa os corpos. Na 3ª Série ele passa a conhecer a lei de Coulomb, e percebe que a força elétrica é inversamente proporcional ao quadrado da distância que separa as cargas, podendo a qualquer momento fazer uma associação entre essas leis notando que elas têm algo em comum.

Levando em consideração o pensamento de Moreira (2012), na aprendizagem significativa há uma interação entre novos conhecimentos – que adquirem significado para o sujeito – e conhecimentos prévios – que adquirem maior estabilidade cognitiva. Durante essa interação, o subsunçor adquire cada vez mais estabilidade e diferenciação, com mais significados de maneira progressiva, facilitando novas aprendizagens. De acordo com Pelizzari et al. (2001-2002), a aprendizagem se torna mais significativa quando novos conteúdos são incorporados a conhecimentos prévios, já existentes, na estrutura cognitiva do aluno.

É papel do professor servir como mediador desse conhecimento. Cabe a ele ajudar na integração entre os subsunçores e os novos conhecimentos. Segundo Gomes et al. (2009-2010, p. 26), “a aprendizagem significativa deve incentivar o estudante a aplicar a informação de forma prática; assim, ela se integra mais facilmente – e de forma mais completa –, sendo valorizada de acordo com seu significado”.

Para Ausubel et al. (1980), para que haja aprendizagem significativa o sujeito (aluno) deve estar disposto a aprender, tendo em sua estrutura cognitiva ideias-âncora relevantes para relacionar o material estudado; e, ao mesmo tempo, o material que será utilizado nos estudos (livro, aula, aplicativo, vídeo) deve ser potencialmente significativo, ou seja, deve ter significado lógico, com novas informações que possam

estar relacionadas às ideias preexistentes na estrutura cognitiva do aluno, pois o aluno atribui significado aos materiais. Assim, as aulas devem ser diferenciadas e o material utilizado deve ajudar nesse sentido, visto que quando há interesse por parte dos alunos e não há uma aula atrativa, fica mais difícil que ocorra a aprendizagem significativa.

Pelizzari et al. (2002), afirma que cada aluno enquanto aprendiz, filtra aquilo que tem ou não significado para si. A aprendizagem significativa nas palavras de Klausen (2017, p. 6404), “parece ocorrer por meio de processos: explorando, fracassando, tentando, corrigindo, obtendo dados, elaborando conjecturas, testando-as, construindo explicações”.

De acordo com Neto (2013), a aprendizagem mecânica é caracterizada pela indisposição do aluno em aprender significativamente ou pelo material utilizado nos estudos não ser potencialmente significativo, ou seja, não colaborar para que haja aprendizagem significativa. Reitera, porém, que aprendizagem significativa e aprendizagem mecânica não são dicotômicas, ou seja, podem caminhar juntas. Caso o aluno queira decorar conteúdos a aprendizagem será mecânica e não significativa. O conteúdo que deve ser aprendido tem que ser potencialmente significativo, mas cada indivíduo busca naquele assunto um significado para si.

O que mais se observa nas escolas são as situações em que o aluno estuda apenas para passar na prova. Um dia depois da avaliação tudo aquilo que ele estudou já foi esquecido. Segundo Moreira (2012), quando há aprendizagem significativa isso não ocorre, mas pode acontecer de um subsunçor bastante elaborado de obliterar, ou seja, diminuir ao ponto de seus significados não serem mais tão claros. Isso geralmente ocorre quando o subsunçor não é utilizado com frequência, porém esse esquecimento pode ser superado e a aprendizagem sobre ele é possível de forma relativamente rápida. Caso esse esquecimento seja total, não houve aprendizagem significativa.

Os subsunçores podem interagir entre si, organizando-se constantemente numa forma dinâmica. Assim, na estrutura cognitiva do sujeito há um complexo organizado de subsunçores e suas inter-relações. Para Moreira (2012), Ausubel em sua teoria diz que os subsunçores se referem ao conhecimento conceitual. Há uma estrutura hierárquica desses subsunçores, onde alguns são subordinados a outros. Porém, essa hierarquia pode mudar se houver uma aprendizagem superordenada (um novo conceito passa a subordinar conhecimentos prévios) onde um subsunçor passa a incorporar outros. Esse processo de atribuição de novos significados a um subsunçor é chamado de diferenciação progressiva. Existe um outro processo simultâneo a esse chamado de reconciliação integradora (ou integrativa) que consiste em eliminar diferenças aparentes, resolver inconsistências, integrar significados, fazer superordenações.

Para aprender significativamente é necessário saber diferenciar os antigos dos novos conhecimentos adquiridos para que sejam claras as diferenças entre eles

(aprendizagem significativa subordinada, onde o novo conhecimento adquire significado quando interage com algum conhecimento prévio) e também realizar a reconciliação integradora (aprendizagem significativa superordenada – ocorre com menos frequência). Esses dois processos são simultâneos e necessários para a construção cognitiva.

Ausubel (2003) trata o conhecimento prévio como a mais importante das variáveis necessárias para uma aprendizagem significativa, porém algumas vezes esse conhecimento prévio pode vir a dificultar ou bloquear a aprendizagem, afirmando também que a aprendizagem significativa pode não ser a correta, e também não é aquela que nunca esquecemos, mas existe desde que o sujeito atribui significados a certo conhecimento fazendo com que ele interaja com conhecimentos prévios.

De acordo com Pelizzari, et al. (2002, p. 39), "Ausubel propõe distinguir dois eixos ou dimensões diferentes que originarão, a partir dos diversos valores que possam tomar em cada caso, as classes diferentes de aprendizagem", sendo elas: a aprendizagem significativa e a aprendizagem memorística.

No primeiro tipo de aprendizagem destaca-se a aprendizagem receptiva: o aprendiz recebe o conhecimento em sua forma final, ou seja, o aprendiz não precisa descobrir para aprender. Pode ser uma aula, um livro, uma experiência em laboratório de ciências ou uma simulação computacional no laboratório de informática. Não há passividade, pois o indivíduo deve tentar relacionar os novos conhecimentos aos já existentes em sua estrutura cognitiva. Destacando-se também a aprendizagem por descoberta: o aprendiz deve descobrir o que vai aprender. Mesmo assim, deve haver as condições para a aprendizagem significativa: conhecimento prévio e predisposição para aprender. Não é necessário aprender por descoberta para aprender significativamente (PELIZZARI, et al. 2002).

No segundo tipo de aprendizagem, a memorística, segundo Pelizzari et al. (2002), há uma delimitação entre a aprendizagem significativa e a aprendizagem mecânica. Quando um novo conteúdo é relacionado de maneira substancial e não-arbitrária na estrutura cognitiva prévia do aluno, mais próximo se encontra da aprendizagem significativa e quanto menos relações se estabelece entre o novo conteúdo e os subsunçores, mais próximo se encontra da aprendizagem mecânica.

Seguindo o que trata Ausubel (2003), o conhecimento adquirido de maneira significativa pode ser lembrado por muito mais tempo que numa aprendizagem mecânica, aumentando assim a capacidade de aprender outros conteúdos mais facilmente mesmo que haja esquecimento da informação original e, ainda que esquecida, para ser relembada fica muito mais fácil.

3.3 Unidades de Ensino Potencialmente Significativas

Moreira (2011) afirma que, uma forma de colaborar na aprendizagem significativa, é a utilização de Unidades de Ensino Potencialmente Significativas (UEPS), que são sequências de ensino com fundamentação teórica, no intuito de que haja aprendizagem significativa, não mecânica, podendo estimular a pesquisa aplicada em ensino, voltada diretamente para a sala de aula.

Para que ocorra a aprendizagem significativa, as UEPS são propostas “como recurso facilitador [...] por meio da estruturação do processo de ensino na forma de sequência didática, com etapas a serem desenvolvidas”. (SOUZA, PINHEIRO, 2019, p. 116)

Moreira (2011) diz que as UEPS organizam-se em oito etapas: definir o tópico a ser abordado; criar situações que levem o aluno a externalizar aquilo que sabe sobre o tópico (subsunçores); levando-se em conta o conhecimento prévio do aluno, propor situações-problema simples; apresentar o conhecimento a ser ensinado/aprendido, indo de um aspecto geral para um aspecto mais específico; utilizar explicação oral, vídeo ou texto que explique o aspecto geral tratado; retomar as características mais relevantes do conteúdo buscando uma reconciliação integrativa, ou seja, fazer o vínculo entre os novos conhecimentos e os conhecimentos prévios; avaliar processualmente a aprendizagem; avaliar as UEPS notando evidências de aprendizagem significativa.

Segundo Souza e Pinheiro (2011), as três primeiras fases das UEPS tratam da organização do conhecimento a ser estudado, momento no qual o professor deve identificar os subsunçores de seus estudantes e/ou criar pontes de ancoragem, por meio elaboração dos organizadores prévios. Moreira (2011) diz que, para abordar de outra maneira a estrutura de uma UEPS, pode-se utilizar diagramas que se tornam úteis nas atividades colaborativas propostas nas UEPS. Esses diagramas podem ser um diagrama em V ou um mapa conceitual.

3.4 Metodologias Ativas

Na visão de José Morán, a educação formal não consegue acompanhar as mudanças repentinas que a sociedade tem sofrido, dessa forma uma mudança no currículo e nas metodologias de sala de aula se fazem necessárias para que o aluno possa se sentir atraído pela escola.

Segundo Morán (2015, p. 17), as instituições educacionais que se preocupam com tais mudanças, podem escolher um caminho mais suave, em que "elas mantêm o modelo curricular predominante - disciplinar - mas priorizam o envolvimento maior do aluno, com metodologias ativas".

Nas metodologias ativas o aluno é sujeito ativo do próprio conhecimento, da própria aprendizagem, devendo ter orientação do professor, mas que possa caminhar por conta própria: é o aprender fazendo. Assim, Morán (2015, p. 18) afirma que "as metodologias ativas são pontos de partida para avançar para processos mais avançados de reflexão, de integração cognitiva, de generalização, de reelaboração de novas práticas".

Nas metodologias ativas há uma inversão do modelo tradicional de ensino: o aluno deve caminhar primeiramente sozinho buscando através de leituras, vídeos, atividades, compreender o conteúdo para que depois, em sala de aula, consiga desenvolver os conhecimentos trocando informações com os colegas e sob orientação do professor.

Para que se obtenha sucesso na aprendizagem, Morán (2015, p. 18) cita alguns componentes fundamentais:

a criação de desafios, atividades, jogos que realmente trazem as competências necessárias para cada etapa, que solicitam informações pertinentes, que oferecem recompensas estimulantes, que combinam percursos pessoais com participação significativa em grupos, que se inserem em plataformas adaptativas, que reconhecem cada aluno e ao mesmo tempo aprendem com a interação, tudo isso utilizando as tecnologias adequadas.

Morán (2015, p. 18 e 19) ressalta que quem deve articular o processo de aprendizagem em sala de aula é o professor "com sua capacidade de acompanhar, mediar, de analisar os processos, resultados, lacunas e necessidades, a partir dos percursos realizados pelos alunos individual e grupalmente".

As tecnologias digitais servem de auxiliar, como, por exemplo, para pesquisas, com a finalidade de se poder aprender por conta própria. Assim, os momentos presenciais em sala de aula se tornam úteis para um aprofundamento, ampliação, debate e síntese do conteúdo abordado. A tecnologia surge, portanto, como facilitadora e potencializadora do ensino.

De acordo com Morán (2015), só havia sentido na utilização de métodos tradicionais quando o acesso à informação era precário. Hoje com o acesso à internet e o uso considerável de aparelhos celulares e de computadores facilitam no acesso a informações, fazendo com que o aluno possa aprender a qualquer momento e em qualquer lugar. A tecnologia integra o mundo físico e o mundo digital, formando uma sala de aula aplicada e mesclando os diferentes tipos de ensino – hibridização.

Nas palavras de Morán (p. 17. 2015):

Se queremos que os alunos sejam proativos, precisamos adotar metodologias em que os alunos se envolvam em atividades cada vez mais complexas, em que tenham que tomar decisões e avaliar os resultados, com o apoio de materiais relevantes.

Fazendo-se uma comparação, Ausubel diz que para haver aprendizagem significativa, o material deve ser potencialmente significativo, corroborando com Morán quando trata da importância do material a ser utilizado.

Morán (2015) afirma que o modelo tradicional de educação não pode ser mantido, as mudanças em busca de metodologias ativas deverão ser progressivas com foco no aluno ativo que tenha um envolvimento profundo no ensino e o professor faz papel de orientador, não de transmissor de conteúdos. Através das metodologias ativas pode-se formar um aluno pesquisador, um sujeito crítico que consegue resolver problemas e que consiga aplicar os conhecimentos úteis aprendidos na escola em sua vida diária.

A introdução da Física Quântica no Ensino Médio, como propomos neste trabalho, é seguida através da execução de uma UEPS apoiada por uma sequência didática na qual o protagonismo do aluno deva ser pautado, utilizando como ferramenta didática um experimento de baixo custo sobre Efeito Fotoelétrico com a finalidade de despertar o lado investigativo do aluno e promover uma apropriação do conhecimento de maneira significativa.

4 DA QUANTIZAÇÃO DA ENERGIA AO EFEITO FOTOELÉTRICO

Na antiguidade, através do filósofo grego Demócrito e seu mestre Leucipo, que surgiu a ideia de que a matéria era constituída de pequenas partículas chamadas átomos. Muitos anos se passaram até que Avogadro, em 1811, formulou a hipótese de que todos os gases, a certa temperatura, possuem o mesmo número de moléculas por unidade de volume, o que permitiu explicar quantitativamente várias propriedades da matéria, ficando assim estabelecida que a matéria não é contínua, mas sim quantizada, ou seja, formada por certas quantidades de partículas (TIPLER; LLEWELLYN. 2001).

4.1 Quantização da Carga Elétrica e o Experimento de Millikan

4.1.1 Quantização da carga elétrica

Tipler e Llewellyn (2001), esclarecem que Faraday foi o primeiro físico a estimar a ordem de grandeza das cargas elétricas associadas aos átomos. Em um de seus experimentos, Faraday fez com que uma corrente contínua atravessasse soluções fracamente condutoras e, ao observar o resultado, percebeu que parte dos componentes da solução havia ficado depositada nos eletrodos.

Analisando quantitativamente o fenômeno descrito, Faraday descobriu que a quantidade de eletricidade (F , denominada Faraday) que é igual a 96.500 C aproximadamente, decompõe sempre 1 átomo-grama (massa que contém um número de átomos igual ao número de Avogadro N_A) de um íon monovalente.

$$F = N_A e , \quad (4.1)$$

onde e é a carga elementar (o valor da carga elétrica de um elétron ou de um próton). Essa equação é denominada Lei de Faraday para a eletrólise.

Partindo dessa equação, Faraday percebeu que a carga elétrica, assim como a matéria, não era contínua, mas sim formada por partículas com um valor mínimo de carga (TIPLER; LLEWELLYN. 2001).

4.1.2 Experimento de Millikan

Em 1909, o cientista R. A. Millikan realizou uma série de experimentos tentando demonstrar o valor da carga elementar, utilizando gotas de óleo que eram borrifadas no ar seco entre as placas de um capacitor. Ao atritar as gotas de óleo no bico do borrifador, elas adquiriam através da eletrização por atrito certa carga elétrica. Para evitar o ganho ou perda de algumas unidades carga, mudou-se a polaridade do campo entre as

Figura 1 – Experimento realizado por Millikan para a determinar a carga elementar, cujo valor é de aproximadamente $1,6 \cdot 10^{-19}C$.



Fonte: Tipler; Llewellyn. (2001)

placas, a fim de observar o comportamento das gotas durante um longo intervalo de tempo. Millikan percebeu que a velocidade terminal da gota era proporcional à força que atuava sobre ela, chegando, dessa maneira, à conclusão de que as cargas sempre ocorriam em valores múltiplos de uma unidade fundamental: $1,601 \times 10^{-19}C$. (TIPLER; LLEWELLYN. 2001).

A realização do experimento pode ser explicada da seguinte maneira: sem a presença do campo elétrico a força que atua nas partículas de óleo apontando para baixo é mg e para cima é bv . A equação de movimento da gota se torna, então:

$$mg - bv = m \frac{dv}{dt}, \quad (4.2)$$

onde b é o coeficiente de forma do meio ¹ que é expresso pela Lei de Stokes da seguinte forma:

$$b = 6\pi\eta a, \quad (4.3)$$

sendo η o coeficiente de viscosidade do fluido (ar) e a é o raio da gota.

A velocidade terminal da gota (v_d) que está descendo é dada por:

$$v_d = \frac{mg}{b}. \quad (4.4)$$

Na presença de um campo elétrico de intensidade E é aplicado, o movimento para cima de uma carga q_n é dado por:

$$q_n E - mg - bv = m \frac{dv}{dt}. \quad (4.5)$$

¹ O coeficiente de forma do meio depende de três fatores que são: (i) A forma do corpo, (ii) o meio onde o corpo se move e (iii) as dimensões do corpo.

A velocidade terminal da gota (v_s) que está subindo é dada por:

$$v_s = \frac{q_n E - mg}{b}. \quad (4.6)$$

As velocidades terminais eram atingidas quase que instantaneamente e as gotas se deslocavam verticalmente para cima ou para baixo uma distância L com velocidade constante. Combinando as equações 4.4 e 4.6, teremos:

$$q_n = \frac{mg}{Ev_f} (v_d + v_s) = \frac{mgT_f}{E} \left(\frac{1}{T_d} + \frac{1}{T_s} \right), \quad (4.7)$$

onde $T_d = L/v_d$ é o tempo de queda e $T_s = L/v_s$ é o tempo de subida.

Quando a gota recebe uma carga adicional, a velocidade terminal se torna v'_s e se relaciona com a nova carga q'_n através da seguinte equação:

$$v'_s = \frac{q'_n E - mg}{b}. \quad (4.8)$$

Assim, o aumento da carga é dado por:

$$q'_n - q_n = \frac{mg}{Ev_f} (v'_s - v_s) = \frac{mgT_f}{E} \left(\frac{1}{T'_s} - \frac{1}{T_s} \right). \quad (4.9)$$

As velocidades v_d , v_s e v'_s são determinadas medindo o tempo necessário para que a gota percorra uma distância L entre as placas do capacitor. Fazendo $q_n = ne$ e $q'_n - q_n = n'e$, com n' sendo a variação de n , a equação 4.7 se torna:

$$\frac{1}{n} \left(\frac{1}{T_d} - \frac{1}{T_s} \right) = \frac{Ee}{mgT_d}, \quad (4.10)$$

e a equação 4.9 se torna:

$$\frac{1'}{n} \left(\frac{1}{T'_s} - \frac{1}{T_s} \right) = \frac{Ee}{mgT_d}. \quad (4.11)$$

Para calcular o valor da carga elementar e a partir dos tempos de subida e de descida basta que se conheça a massa ou o raio da gota. ²

4.2 Radiação do Corpo Negro

De acordo com Eisberg e Resnick (1994), radiação térmica é a radiação emitida pelo corpo devido a sua temperatura. Todo corpo emite e absorve radiações do meio que o envolve. O corpo de maior temperatura cede energia para o corpo de menor temperatura até atingirem o equilíbrio térmico, quando as taxas de emissão e absorção

² Millikan repetiu a experiência com diversas substâncias, dentre elas um óleo isolante, a glicerina que é semicondutora e o mercúrio que é condutor, e obteve sempre o mesmo resultado para o valor de e .

se igualam. Segundo Tipler e Llewellyn (2001) a energia cinética dos átomos que constituem um corpo é aumentada ao absorver radiação.

Eisberg e Resnick (1994), afirma que em seu estado condensado (sólido ou líquido) a matéria emite um espectro contínuo de radiação. Tal espectro é dependente da temperatura em que o corpo se encontra. Um aparelho chamado pirômetro óptico é que relaciona a temperatura de um corpo ao espectro de frequência de radiação emitida por ele. Essa frequência depende da composição química desse corpo.

Para Nussenzveig (2010), ao observarmos através de um pequeno orifício o que acontece no interior de um forno em equilíbrio térmico ao deixar escapar um feixe de radiação eletromagnética, podemos determinar seu espectro experimentalmente.

De acordo com Tipler e Llewellyn (2001, p. 83), “um corpo que absorve toda radiação incidente é chamado de corpo negro ideal”. Corpos que emitem espectros térmicos de caráter universal, independente da sua composição, são chamados de corpos negros. Eisberg e Resnick (1994) afirma que esses corpos conseguem absorver toda radiação que incide sobre suas superfícies. Todos os corpos negros à mesma temperatura emitem radiação térmica com o mesmo espectro.

Perez (2016) diz que Kirchhoff, em 1859, havia proposto o conceito de corpo negro como sendo um corpo ideal capaz de absorver toda a radiação incidente sobre ele. Um corpo negro é a idealização de um objeto que absorve toda radiação eletromagnética que incide sobre ele, a reemitindo depois. O espectro de radiação de um corpo negro depende somente da temperatura do corpo.

4.2.1 Lei de Stefan-Boltzmann

A quantidade adequada para caracterizar quantitativamente a emissão de radiação por um corpo em equilíbrio térmico à temperatura T é chamada de radiância espectral ou potência irradiada. Ela fornece a distribuição do espectro de radiação, especificada pela quantidade $R_T(\nu)$ e definida de maneira que $R_T(\nu)d\nu$ é igual a energia emitida por unidade de tempo em radiação de frequências no intervalo de ν a $\nu + d\nu$ por unidade de área de uma superfície a uma temperatura absoluta T (EISBERG; RESNICK. 1994).

Figura 2 mostra que quanto maior a temperatura, mais intensa é a potência irradiada. A área sobre a curva para uma temperatura particular nos fornece a potência total irradiada que é calculada através da integral da radiância espectral $R_T(\nu)$ sobre todas as frequências ν , isto é,

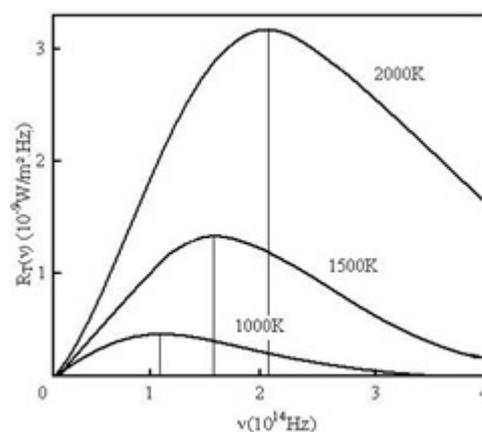
$$R_T = \int_0^{\infty} R_T(\nu)d\nu . \quad (4.12)$$

De acordo com Perez (2016), Josef Stefan foi quem formulou uma lei empírica

relacionando a potência irradiada por um corpo negro em função da sua temperatura. A lei de Stefan diz que a intensidade total de potência irradiada por um corpo negro em função de sua temperatura é dada por:

$$R_T = \sigma T^4 . \quad (4.13)$$

Figura 2 – Gráfico da dependência experimental de R_T e de T com relação à frequência.



Fonte: Eisberg; Resnick. (1994)

Ludwig Boltzmann chegou ao mesmo resultado que Stefan utilizando as leis da termodinâmica clássica (TIPLER; LLEWELLYN, 2001). Assim a equação passou a ser conhecida como lei de Stefan-Boltzmann. E a constante $\sigma = 5,6704 \times 10^{-8} W/m^2 K^4$ é chamada de constante de Stefan-Boltzmann, valor que não foi determinado por Stefan na época (PEREZ, 2016).

O gráfico também mostra que o espectro se desloca para maiores frequências à medida que T aumenta: $\sigma_{MAX} \propto T$, onde σ_{MAX} é a frequência na qual $R_T(\nu)$ tem seu valor máximo para uma dada temperatura. De acordo com Perez "o comprimento de onda máximo irradiado por um corpo negro é inversamente proporcional à sua temperatura". (2016, p. 18). Essa proposição ficou conhecida como Lei de Deslocamento de Wien.

A energia luminosa geralmente é irradiada com uma frequência de pico proporcional à temperatura. Graficamente essa energia se espalha para ambos os lados, possuindo maior força na direção do pico e menor força ao se afastar dele, resultando num espectro que possui um formato de montanha, ao qual chamamos "curva da radiação de corpo negro". (BAKER, 2015).

Para determinar a função distribuição espectral para um corpo negro podemos idealizar um objeto oco, com paredes internas espelhadas contendo um pequeno

furo. Toda radiação térmica que incide no objeto através desse pequeno furo sofre sucessivas reflexões e absorções em seu interior. Se o furo for muito pequeno, uma quantidade desprezível da radiação incidente será refletida para fora do corpo. O furo, portanto, tem a propriedade da superfície de um corpo negro.

Caso a parte oca desse corpo esteja a uma determinada temperatura T , o pequeno furo atuará como emissor de radiação térmica. Essa radiação emitida para fora do corpo deve ter um espectro de corpo negro, pois o furo tem a propriedade da superfície de um corpo negro e a temperatura T é a única definida no sistema. Porém, de acordo com Tipler e Llewellyn (2016, p. 84), "a probabilidade de um raio que entra na cavidade torne a sair pelo furo antes de ser absorvido pelas paredes é extremamente pequena". Assim, quando observamos a radiação de um corpo negro, essa radiação advém somente dele, pois não há radiações externas que possam refletir nele para serem observadas.

De acordo com Eisberg e Resnick (1994), o espectro da radiação dentro da parte oca, chamada de radiação de cavidade, pode ser especificada em termos de uma densidade de energia, $\rho_T(\nu)$, definida como a energia contida em um volume unitário da cavidade a temperatura T no intervalo de frequência de ν a $\nu + d\nu$. O fluxo de energia $R_T(\nu)$ é proporcional à densidade de energia $\rho_T(\nu)$.

$$\rho_T(\nu) \propto R_T(\nu) . \quad (4.14)$$

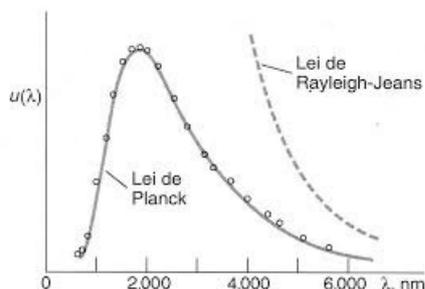
Segundo Eisberg e Resnick (1994, p. 23), "a radiação dentro de uma cavidade cujas paredes estão a uma temperatura T tem o mesmo caráter que a radiação emitida pela superfície de um corpo negro a temperatura T ".

4.2.2 Lei de Rayleigh-Jeans

No final dos anos de 1800 e início dos anos 1900 a emissão de radiação já havia sido estudada por Lord Rayleigh e Sir James Jeans que estavam interessados em modelar essa radiação a partir de dados experimentais existentes. Porém eles utilizaram a Física Clássica. Esse modelo concordava com os dados experimentais apenas em baixas frequências. Segundo Eisberg e Resnick (1994), o cálculo da densidade de energia feito por Rayleigh e Jeans mostrou uma divergência entre a física clássica e os resultados experimentais.

Esse modelo preveria que a temperatura aumentaria sempre que a frequência aumentasse, porém, dados experimentais mostraram que, com o aumento da temperatura, a frequência diminuía. De acordo com Eisberg e Resnick (1994, p. 31), "a densidade de energia vai a zero para frequências muito altas". Esses problemas ficaram conhecidos como "a catástrofe do ultravioleta".

Figura 3 – Correção de Planck representada pela linha sólida com relação à Lei de Rayleigh-Jeans representada pela linha tracejada.



Fonte: Tipler; Llewellyn. (2001)

4.2.3 A quantização da Energia de Planck

Em 1900 o físico alemão Max Planck se deparou o problema dos corpos negros e passou a tentar resolvê-lo. Antes de Planck, os átomos que compunham os corpos negros poderiam ser representados como pequenas molas que oscilavam com determinada frequência (osciladores harmônicos simples). Essa frequência era a frequência da radiação absorvida e depois reemitida pelo átomo na forma de luz. Esses osciladores poderiam oscilar com qualquer energia.

Segundo Perez (2016), no final do ano de 1900, no encontro da Sociedade Alemã de Física, Planck apresentou um estudo a respeito da Lei de Wien para a radiação do corpo negro, propondo que os osciladores contribuiriam com uma energia discretizada.

De acordo com Nussenzveig (2010), Planck postulou que a troca de energia entre a radiação e os “osciladores” deveria ser quantizada, ou seja, só poderia haver emissão ou absorção de energia em múltiplos inteiros de um “quantum de energia”.

$$E = h\nu = \hbar\omega, \quad (4.15)$$

sendo E a energia do fóton, h a constante de Planck³ e ν a frequência da luz incidente.

Ao solucionar o problema de por que o brilho do carvão em brasa é vermelho e não azul, o físico alemão Max Planck deu início a uma revolução que levou ao nascimento da física quântica. Buscando descrever tanto a luz quanto o calor em suas equações, ele segmentou a energia em pequenos pacotes, ou quanta, e durante esse processo explicou por que corpos aquecidos emitem tão pouca luz ultravioleta (Baker, 2013, p. 10).

³ Note que, multiplicando e dividindo $h\nu$ por 2π temos $2\pi\nu = \omega$, que é a frequência angular mostrada. Por outro lado, reescrevemos a constante de Planck $h/2\pi$ na forma $h/2\pi = \hbar$, onde $\hbar = 1,05457168(18) \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} = 6,58211915(56) \cdot 10^{-16} \text{ eV}$. Assim, recai-mos na última igualdade da equação (3.15) onde $E = \hbar\omega$.

Segundo Eisberg e Resnick (1994), Planck contribuiu grandemente para a resolução do problema quando descobriu que poderia tratar a energia como se ela fosse uma variável discreta e não contínua como se acreditava até então.

Planck postulou que os corpos negros eram formados por esses pequenos osciladores que absorviam radiação e oscilavam com determinada energia. Essa energia era a mesma da radiação emitida, mas somente admitiam valores múltiplos de um certo número, resolvendo assim o problema da catástrofe ultravioleta. Esse postulado foi chamado de “quantização da energia”.

De acordo com Piza (2009), Planck supôs que um corpo negro emitia energia sob a forma de radiação eletromagnética com a frequência ν e essa emissão estava associada a porções discretas, as quais chamou de quanta, de intensidade proporcional à frequência ($h\nu$).

O postulado de Planck pode ser tratado como:

Qualquer ente físico com um grau de liberdade cuja “coordenada” é uma função senoidal do tempo (isto é, executa oscilações harmônicas simples) pode possuir apenas energias totais ε que satisfaçam à relação: $\varepsilon = nh\nu$ com $n = 0, 1, 2, 3, \dots$. Onde ν é a frequência da oscilação, e h uma constante universal. (EISBERG; RESNICK, 1994, p.40).

Segundo Tipler e Llewellyn (2001), Planck propôs que a energia das cargas oscilantes (da radiação emitida) era uma variável discreta que admite apenas valores múltiplos inteiros da energia e não contínua como se acreditava até então. Somente em 1905 Einstein usou as ideias de Planck para explicar o efeito fotoelétrico, propondo ainda que a quantização era uma característica fundamental da energia luminosa.

Para Boltzmann, a função de distribuição de energia tem a forma:

$$f(E) = Ae^{-E/kT}, \quad (4.16)$$

sendo A uma constante e $f(E)$ uma fração dos osciladores com energia comprometida entre E e $E + dE$.

Após a ideia de quantização de energia de Planck, a equação (3.16) assume a forma:

$$f_n = Ae^{-E_n/kT} = Ae^{-ne/kT}, \quad (4.17)$$

em que A é a constante determinada pela condição de normalização segundo a

qual a soma de todas as frações f_n deve ser igual a 1.

$$\sum_{n=0}^{\infty} f_n = A \sum_{n=0}^{\infty} e^{-ne/kT} = 1. \quad (4.18)$$

A energia média de um oscilador é dada pelo seguinte somatório:

$$E = \sum_{n=0}^{\infty} E_n f_n = \sum_{n=0}^{\infty} E_n A e^{-E_n/kT}. \quad (4.19)$$

Calculando os somatórios das equações 4.18 e 4.19, chega-se à seguinte expressão:

$$\bar{E} = \frac{\varepsilon}{e^{hc/\lambda kT} - 1} = \frac{hf}{e^{hf/kT} - 1} = \frac{hc/\lambda}{e^{hc/\lambda kT} - 1}. \quad (4.20)$$

Multiplicando a equação 4.20 pelo número de osciladores por unidade de volume no intervalo entre λ e $\lambda + d\lambda$, obtém-se a função de distribuição de densidade de energia no interior da cavidade:

$$u(\lambda) = \frac{8\pi hc \lambda^{-5}}{e^{hc/\lambda kT} - 1}. \quad (4.21)$$

A equação 4.21 é denominada Lei de Planck e está representada na figura 3.

4.3 O Efeito Fotoelétrico

Ao incidirmos radiação sobre uma superfície metálica, poderá haver a emissão de elétrons dessa superfície, dependendo da energia da radiação incidente. Em 1887, Hertz realizou um experimento para produzir e detectar ondas eletromagnéticas e acabou por confirmar, assim, a teoria ondulatória da luz de Maxwell. No mesmo experimento, acabou por observar o efeito fotoelétrico que, mais tarde, ajudaria na descrição da luz como partícula (TIPLER; LLEWELLYN, 2001).

Tal experimento, consistia em dois eletrodos entre os quais, através de uma descarga oscilante, saltava uma faísca a fim de gerar ondas eletromagnéticas que eram detectadas através de outra faísca por entre eletrodos de uma antena ressonante. Hertz acabou observando que a faísca, quando exposta à luz (violeta e ultravioleta), saltava mais facilmente (NUSSENZVEIG, 2010). Como descrito por Nussenzveig (2010, p. 249), "ao comprovar a teoria de Maxwell, Hertz estava descobrindo o efeito fotoelétrico, uma das primeiras evidências experimentais da quantização".

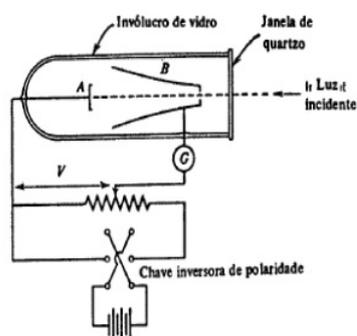
Philipp Lenard, um assistente de Hertz, voltou ao laboratório. Ele reduziu o gerador de centelha a sua forma básica: duas superfícies de metal posicionadas no vácuo dentro de um tubo de vidro. As placas internas estavam separadas, mas conectadas do lado de fora do tubo por um cabo e um amperímetro para formar um circuito elétrico. Lenard apontou luzes de diferentes brilhos e frequências para a primeira placa, enquanto mantinha a segunda no escuro. Quaisquer elétrons expelidos da primeira placa voariam pela lacuna e atingiriam a segunda, completando o circuito e fazendo uma pequena corrente fluir. (BAKER, 2015).

Outros físicos como Robert Millikan testaram raios de diversas cores para tentar visualizar o efeito acontecer, porém perceberam que a luz vermelha não era capaz de arrancar elétrons das placas metálicas, independentemente da intensidade da radiação. Perceberam então que cada metal tinha uma “frequência de corte”, abaixo da qual o fenômeno não se observava. Acima da frequência de corte, quanto maior a frequência da luz, maior a energia com que os elétrons eram arrancados da placa. (BAKER, 2015).

Como descrito por Perez (2016, p. 30), "esse fenômeno [...] foi explicado por Einstein em 1905. Segundo ele, a luz era composta de partículas – os fótons – que carregavam energia respeitando a relação: $E = h\nu$ ".

A explicação para o efeito fotoelétrico se dá, segundo Halliday, et al. (2009, p.180), da seguinte maneira: "quando iluminamos a superfície de um metal com um raio luminoso de comprimento de onda suficientemente pequeno, a luz faz com que elétrons sejam emitidos pelo metal". Na visão de Eisberg e Resnick (1994, p. 51), "a emissão de elétrons de uma superfície, devido à incidência de luz sobre essa superfície, é chamada de efeito fotoelétrico".

Figura 4 – Tubo de raios catódicos: aparelho no qual Hertz percebeu que descargas elétricas entre dois eletrodos ocorrem mais facilmente quando um dos eletrodos recebe luz ultravioleta.



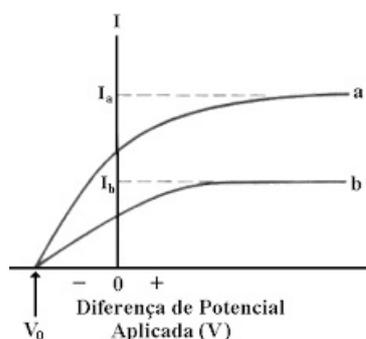
Fonte: Eisberg; Resnick. (1994)

A figura 4 é o esquema de um aparelho utilizado para estudar o efeito fotoelétrico. Dentro do invólucro de vidro é feito o vácuo e uma luz monocromática incide sobre

a janela de quartzo até atingir a placa de metal A arrancando elétrons (chamados de fotoelétrons) da mesma. Caso os elétrons sejam atraídos pelo coletor metálico B , pode-se detectá-los sob a forma de corrente fotoelétrica, medida pelo amperímetro G . Essa atração é devido a uma diferença de potencial V estabelecida entre A e B . (EISBERG; RESNICK, 1994).

O gráfico de corrente fotoelétrica i em função da diferença de potencial V do aparelho explicado acima é representado na figura 5. Nota-se que para um valor elevado de V , a corrente i atinge um valor limite a partir do qual todos os fotoelétrons emitidos por A são coletados por B . Os elétrons são emitidos de A com certa energia cinética, pois a corrente não cai imediatamente a zero e, apesar do campo elétrico se opor ao movimento dos elétrons, alguns chegarão ao coletor B . Caso a diferença de potencial chegar a um valor V_0 chamado potencial de corte a corrente fotoelétrica se torna zero (EISBERG; RESNICK, 1994).

Figura 5 – Gráfico de corrente i em função da voltagem V de dados obtidos com o aparelho da figura 4.



Fonte: Eisberg; Resnick. (1994)

A energia cinética máxima do fotoelétron mais rápido não depende da intensidade da luz incidente e é dada pela diferença de potencial V multiplicada pela carga do elétron e :

$$K_{max} = eV_0 . \quad (4.22)$$

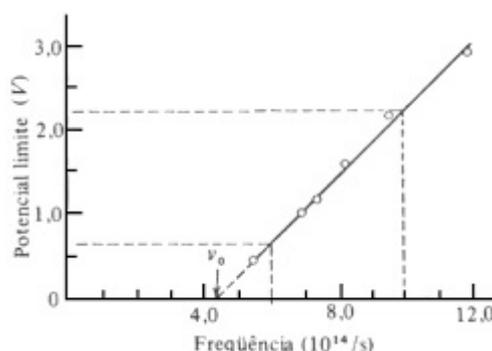
De acordo com Tipler e Llewellyn (2001), os experimentos mostraram que a diferença de potencial V_0 não depende da intensidade da luz incidente, o que teria deixado os cientistas surpresos, pois isso estava em desacordo com a teoria clássica.

A 6 mostra um gráfico feito a partir dos dados obtidos em 1914 por Millikan do potencial V_0 para o sódio em função da frequência da luz incidente.

Analisando o gráfico da figura 6, nota-se que há uma frequência de corte ν_0 chamado de limiar fotoelétrico abaixo do qual não ocorre o efeito fotoelétrico. De acordo

com Eisberg e Resnick (1994), existem 3 aspectos principais do efeito fotoelétrico que a teoria ondulatória clássica da luz não conseguem explicar: 1. a intensidade da luz incidente deveria influenciar na energia cinética dos fotoelétrons; 2. o efeito fotoelétrico deveria ocorrer para qualquer frequência de luz, porém experimentalmente se comprovou que existe uma frequência de corte para cada superfície; 3. Deveria haver um intervalo de tempo mensurável entre o instante em que a luz começa a incidir sobre a superfície e o instante do fotoelétron ser ejetado e durante esse tempo o fotoelétron deveria absorver energia do feixe de luz incidente até que houvesse acumulado energia o bastante para escapar, porém esse intervalo de tempo nunca foi medido.

Figura 6 – Gráfico das medidas de Millikan do potencial limite no sódio em várias frequências.



Fonte: Eisberg; Resnick. (1994)

Segundo Tipler e Llewellyn (2001), Einstein propôs que a quantização da energia que Planck usara na resolução do problema do corpo negro deveria ser uma característica universal da luz. Para Einstein a luz é constituída por quantas isolados de energia $E = h\nu$. Quando um desses quanta (chamados de fótons) chega no cátodo (placa B), toda sua energia é transferida para um único elétron. Seja ϕ (função trabalho) a energia necessária para mover um elétron da superfície, a energia cinética máxima dos elétrons emitidos pelo cátodo é dada por:

$$K_{max} = eV_o = h\nu - \phi . \quad (4.23)$$

A equação 3.23 é chamada de equação do efeito fotoelétrico. A figura 6 mostra seu gráfico. A frequência mínima ν_T para que o efeito fotoelétrico seja observado e o comprimento de onda máximo correspondente λ_T , podem ser obtidos a partir da função trabalho fazendo $V_o = 0$ na equação 3.23:

$$\phi = h\nu_T = \frac{hc}{\lambda_T} . \quad (4.24)$$

Fótons com frequência menor que ν_T e, logo, com comprimento de onda maiores que λ_T não têm energia suficiente para retirar elétrons do metal.

Em 1921, Albert Einstein ganhou o prêmio Nobel devido a teoria do Efeito Fotoelétrico.

4.4 Raios X e Efeito Compton

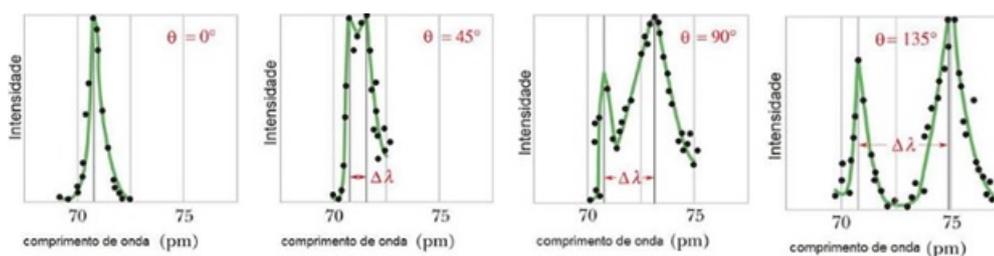
Em 1845, o físico alemão Wilhelm Conrad Roentgen acidentalmente descobriu os raios X enquanto trabalhava com um tubo de raios catódicos, observando que os raios produzidos no ponto em que os elétrons (raios catódicos) atingiam o tubo de vidro poderiam atravessar objetos opacos e excitar uma tela fluorescente ou um filme fotográfico (TIPLER; LLEWELLYN, 2001).

De acordo com Baker (2015, p. 42), "apesar de não haver certeza sobre sua origem quando foram descobertos em 1895 por Wilhelm Conrad Röntgen, logo se constatou que os raios X eram uma forma de radiação eletromagnética de alta energia".

Roentgen, ao investigar o fenômeno com diversos tipos diferentes de materiais, descobriu que quanto maior a densidade do material a ser atravessado por esses raios, menor a transparência desses materiais para os raios X. Após alguns meses da publicação do trabalho de Roentgen sobre os raios X, seu uso começou na medicina. O nome raios X se deve ao fato dessa radiação não serem afetadas pela presença de um campo magnético, e também não se observou os fenômenos da refração e interferência neles (TIPLER; LLEWELLYN, 2001).

Observou-se que os raios X difratados tinham menor poder de penetração do que os raios x incidentes. De acordo com Tipler e Llewellyn (2001), Compton havia pensado na difração como se fosse uma colisão entre um fóton de energia $h\nu_1$ e um elétron. Assim, o elétron deveria absorver parte da energia inicial do fóton. A energia $h\nu_2$ do fóton difratado seria então menor que a energia do fóton incidente.

Figura 7 – Resultados obtidos por Compton para quatro valores do ângulo de espalhamento θ .



Fonte: Halliday et al. (2009)

De acordo com Halliday et al. (2009), em 1923 Arthur Compton realizou um experimento que viria a confirmar a previsão de que os fótons possuem energia e momento, ao incidir em feixe de raios x em um alvo de carbono, medindo a intensidade dos raios x espalhados em várias direções. A figura 7 mostra que, embora o feixe incidente possua um único comprimento de onda, os feixes espalhados possuem vários comprimentos de onda com dois picos de intensidade.

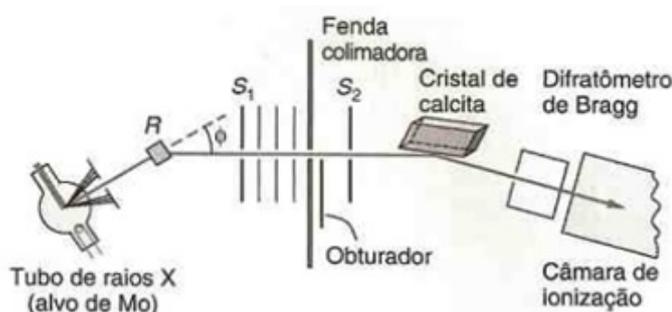
Compton, aplicando a lei de conservação do momento e da energia em sua forma relativística à colisão de um fóton com um elétron, conseguiu calcular a diferença entre os comprimentos de onda do fóton incidente e do fóton difratado ($\lambda_2 - \lambda_1$) em função do ângulo de difração θ .

$$\lambda_2 - \lambda_1 = \frac{h}{mc} (1 - \cos\theta) . \quad (4.25)$$

A equação 4.25 é conhecida como equação de Compton e mostra que a diferença entre os comprimentos de onda não depende do comprimento de onda do fóton incidente. A grandeza h/mc é denominada comprimento de onda Compton do elétron e vale $0,00243nm$.

De acordo com Eisberg e Resnick (1994), Compton realizou um experimento no qual um feixe de raios X de comprimento de onda λ incidiu sobre um alvo de grafite e, medindo-se a intensidade dos raios x espalhados em função do seu comprimento de onda, pôde observar que os raios x espalhados poderiam ter máximos de intensidade em dois comprimentos de onda, mesmo que o feixe incidente possuísse apenas um único comprimento de onda.

Figura 8 – Diagrama esquemático do equipamento usado por Compton.



Fonte: Tipler; Llewellyn. (2001)

A figura 8 mostra o esquema do experimento realizado por Compton. De acordo com Tipler e Llewellyn (2001, p. 94): "os raios X produzidos por uma alvo de molibdênio são difratados por um bloco de grafite R, colimados pelas fendas S_1 e S_2 e analisados em um difratômetro de Bragg". Tal difratômetro é constituído por um cristal de calcita e por uma câmara de ionização.

No modelo clássico, as ondas incidente e espalhada deveriam ter a mesma frequência e o mesmo comprimento de onda, o que não se observou experimentalmente. Para resolver esse problema, Compton postulou que os feixes de raios X deveria ser um conjunto de fótons e não uma onda com frequência determinada. Esses fótons teriam energia $E = h\nu$ e colidiam com os elétrons tal qual a colisão entre bolas de bilhar (EISBERG; RESNICK, 1994).

5 METODOLOGIA

Nesse capítulo será descrito a natureza do trabalho realizado, bem como o tipo de abordagem utilizada, o ponto de vista dos procedimentos técnicos, e a aplicação da metodologia.

5.1 Quanto à Natureza

A metodologia do presente trabalho tem natureza aplicada, envolvendo a elaboração do produto educacional para o ensino de Física Quântica na 3ª série do ensino médio de uma escola da rede pública Federal.

Segundo Prodanov e Freitas (2013, p. 51), tal metodologia “objetiva gerar conhecimentos para aplicação prática dirigidos à solução de problemas específicos. Envolve verdades e interesses locais”. Na concepção de Fleury e Werlang (2017, p. 11 e 12): “é o conjunto de atividades nas quais conhecimentos previamente adquiridos são utilizados para coletar, selecionar e processar fatos e dados, afim de se obter e confirmar resultados”.

Para Zanella (2013, p. 32), esse tipo de pesquisa “tem como finalidade gerar soluções aos problemas humanos, entender como lidar com um problema”. De acordo com Silva (2015, p. 50), a pesquisa aplicada “caracteriza-se por seu interesse prático, isto é, os resultados são aplicados ou utilizados, imediatamente, na solução de problemas que ocorrem na realidade”.

É importante salientar que esse tipo de pesquisa aplicada tem um referencial teórico como base para analisar a realidade a ser estudada. As realidades a serem estudadas podem ser uma ou mais organizações [públicas, privadas, prestadoras de serviço, industriais, não governamentais, fundações, organizações da sociedade civil de interesse público – OCIPS – etc.], uma pessoa ou um grupo de pessoas, um programa ou um projeto que está sendo desenvolvido em uma organização, dentre muitas outras situações que ali ocorrem (ZANELLA, 2013. p. 33).

A visão deste trabalho é a de gerar conhecimentos e obter uma aplicação prática dirigida à introdução da física quântica no ensino médio, mais especificamente sobre o efeito fotoelétrico. Desta maneira, trata-se de uma pesquisa explicativa, com a finalidade de encontrar e elucidar uma nova proposta metodológica para a inserção da Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio, visto que será procurada a explicação do tema proposto observado “por meio do registro, da análise, da classificação e da interpretação dos fenômenos observados” (PRODANOV, FREITAS, 2013, p. 53). Na

visão de Zanella (2013, p. 34), a pesquisa explicativa é “aquela centrada na preocupação de identificar fatores determinantes ou de contribuição no desencadeamento dos fenômenos”.

A pesquisa segue a abordagem qualitativa. De acordo com Gerhardt e Silveira (2009, p. 32), “os pesquisadores que utilizam os métodos qualitativos buscam explicar o porquê das coisas, exprimindo o que convém ser feito”. Zanella (2013, p. 35), diz que “esse tipo de análise tem por base conhecimentos teórico-empíricos que permitem atribuir-lhe cientificidade”. Prodanov e Freitas (2013, p. 70), afirma que “a interpretação dos fenômenos e a atribuição de significados são básicas no processo de pesquisa qualitativa”.

Fonseca (2002, p. 20), afirma que “a pesquisa qualitativa se preocupa com aspectos da realidade que não podem ser quantificados, centrando-se na compreensão e explicação dinâmica das relações sociais”. Para Gil (2008, p. 94), nas “pesquisas definidas como estudos de campo, estudos de caso, pesquisa-ação ou pesquisa participante [...] os procedimentos analíticos são principalmente de natureza qualitativa”.

Silva (2015, p. 52) afirma que o método qualitativo “utiliza métodos indutivos, objetivando a descoberta, a identificação, a descrição detalhada e aprofundada”. Assim, qualitativamente, será buscado neste trabalho a existência de uma aprendizagem significativa nos alunos durante e após a aplicação das oito etapas (que serão explicadas posteriormente) das Unidades de Ensino Potencialmente Significativas.

Este estudo foi realizado em outubro de 2019, em duas turmas da 3ª série do ensino médio (25 alunos por turma), totalizando 50 estudantes do Colégio de Aplicação da Universidade Federal de Roraima (UFRR), sob os cuidados do docente titular da componente curricular de Física nas turmas em que o estudo foi aplicado.

A população a ser estudada são alunos da 3ª série do ensino médio de uma escola da rede pública federal, a escolha dessa população foi feita pelo fato do conteúdo de Física Moderna e Contemporânea ser abordado nas escolas apenas na 3ª série do ensino médio. Foram excluídos assim, do presente estudo os alunos das demais séries do ensino médio e do ensino fundamental.

Quanto ao delineamento da pesquisa, “a maneira pela qual obtemos os dados necessários para a elaboração da pesquisa, torna-se necessário traçar um modelo conceitual e operativo dessa, [...] que pode ser traduzido como delineamento” (PRO-DANOV, FREITAS, 2013, p. 54). Tal delineamento pode ser dividido em dois grandes grupos: as fontes de papel e os dados fornecidos por pessoas.

O presente trabalho fez uso de situações previstas nos dois grupos, sendo norteado por pesquisa bibliográfica, experimental e de levantamento de dados através de pesquisa online com professores da rede pública e privada da cidade de Boa

Vista-RR a fim de saber se os mesmos têm nos seus planejamentos, aulas de Física Moderna e Contemporânea.

De acordo com Fonseca (2002, p. 31), “qualquer trabalho científico inicia-se com uma pesquisa bibliográfica, que permite ao pesquisador conhecer o que já se estudou sobre o assunto”. Para Silva (2015, p. 84), “trata-se do levantamento da bibliografia já publicada sobre o assunto de interesse, em forma de livros, revistas, periódicos, publicações avulsas, veiculados na internet ou por meio da imprensa escrita”.

Na opinião de Gil (2008, p. 70), “o delineamento experimental consiste em determinar um objeto de estudo, selecionar as variáveis que seriam capazes de influenciá-lo, definir as formas de controle e de observação dos efeitos que a variável produz no objeto”. Prodanov e Freitas (2013, p. 54), “na pesquisa bibliográfica, é importante que o pesquisador verifique a veracidade dos dados obtidos, observando as possíveis incoerências ou contradições que as obras possam apresentar”.

Para a realização desse trabalho, diversos autores que tratam do tema abordado foram lidos, tais como: Tipler e Llewellyn; Piza; Perez; Nussenzweig; Halliday, Resnick e Walker; Eisberg e Resnick; Baker; Moreira; Moran; Zanella; dentre outros, buscando-se assim um maior embasamento teórico para tratar dos conteúdos físicos, pedagógicos e metodológicos.

De acordo com Prodanov e Freitas (2013, p. 57), “a pesquisa experimental é mais frequente nas ciências tecnológicas e nas ciências biológicas. Tem como objetivo demonstrar como e por que determinado fato é produzido”.

Gerhardt e Silveira (2009, p. 36), o desenvolvimento de uma pesquisa experimental pode ser “em laboratório (onde o meio ambiente criado é artificial) ou no campo (onde são criadas as condições de manipulação dos sujeitos nas próprias organizações, comunidades ou grupos)”.

Na pesquisa experimental, o pesquisador procura refazer as condições de um fato a ser estudado, para observá-lo sob controle. Para tal, ele se utiliza de local apropriado, aparelhos e instrumentos de precisão, a fim de demonstrar o modo ou as causas pelas quais um fato é produzido, proporcionando, assim, o estudo de suas causas e seus efeitos (PRODANOV, FREITAS, 2013, p. 57).

Para Silva (2015, p. 52), a pesquisa experimental “consiste em determinar um objeto de estudo, selecionar as variáveis e definir as formas de controle e de observação dos efeitos”. Na opinião de Gil (2008, p. 51), tal pesquisa “consiste em determinar um objeto de estudo, selecionar as variáveis que seriam capazes de influenciá-lo, definir as formas de controle e de observação dos efeitos que a variável produz no objeto”.

Para Fonseca (2002, p. 38), na pesquisa experimental é necessário “determinar um objeto de estudo, selecionar as variáveis que seriam capazes de influenciá-lo, definir

as formas de controle e de observação dos efeitos que a variável produz no objeto”.

Neste trabalho foram realizados dois experimentos acerca do tema “efeito fotoelétrico”. Um montado pelo professor e outro pelos próprios alunos. Um experimento teve a finalidade de visualizar uma aplicação prática do efeito fotoelétrico através de um sensor LDR, fios de ligação, resistor, bateria de 9V e um LED. O outro fez uso de LED's, fios de ligação, resistores, uma placa *protoboard*, um potenciômetro e um multímetro com a finalidade de se calcular a constante de Planck.

Na opinião de Gerhardt e Silveira (2009, p. 38), “entre as vantagens dos levantamentos, temos o conhecimento direto da realidade, economia e rapidez, e obtenção de dados agrupados em tabelas que possibilitam uma riqueza na análise estatística”. Para Gil (2008, p. 74), “as pesquisas deste tipo se caracterizam pela interrogação direta das pessoas cujo comportamento se deseja conhecer”.

Segundo Prodanov e Freitas (2013, p. 57), “esse tipo de pesquisa ocorre quando envolve a interrogação direta das pessoas cujo comportamento desejamos conhecer através de algum tipo de questionário”. Fonseca (2002, p. 33), afirma que “o levantamento pode ser de dois tipos: levantamento de uma amostra ou levantamento de uma população. [...] A coleta de dados realiza-se em ambos os casos através de questionários ou entrevistas”.

Para Fleury e Werlang (2017, p. 4), uma abordagem metodológica recomendável para a execução de projetos de pesquisa aplicada são “pesquisas de opinião ou surveys que podem ser exploratórios, quando se deseja aprofundar o conhecimento acerca do fenômeno e ganhar insights a seu respeito”. Na visão de Silva (2015, p. 56), “para a entrevista, um conjunto de perguntas é elaborado, de forma organizada e sistematizada, tendo como finalidade principal alcançar determinadas informações”.

Com esse intuito, foi realizado um questionário online com professores da rede pública e privada de Boa Vista-RR, acerca de conteúdos de Física Moderna e Contemporânea possivelmente trabalhados em sala de aula. Esse questionário foi baseado no trabalho de Busatto et al. (2018) intitulado “O ensino de física moderna e contemporânea na educação básica: conteúdos trabalhados pelos docentes”, e teve como objetivo identificar um possível panorama de como o conteúdo de Física Moderna e Contemporânea é trabalhado na cidade de Boa Vista – RR. O resultado sobre esse estudo pode ser visto no Apêndice A.

5.2 O Produto Educacional

Elaborou-se como produto educacional uma sequência didática, que está exposta no Apêndice B, visando a implementação do ensino de Física Moderna, em

especial ao processo de quantização da energia e o efeito fotoelétrico, através de abordagens metodológicas ativas buscando dar significância aos conteúdos abordados para os discentes do ensino básico. Para isto, utilizou-se a ideia de Unidade de Ensino Potencialmente Significativa proposta por Moreira para a construção de uma sequência didática voltada para a formação de um aluno crítico e pesquisador com relação ao ambiente que o cerca.

5.2.1 Considerações Éticas

Só foi possível serem realizadas as intervenções na escola após a prévia autorização da instituição e do docente regente da componente curricular de Física e a prévia autorização dos pais dos estudantes menores de idade que aceitaram responder o questionário.

A pesquisa teve benefícios para os participantes, visto que as metodologias ativas se tornam estratégias mais precisas, adequadas à realização do trabalho pretendido: levar o estudante a aprender. Os benefícios para o meio acadêmico e a sociedade foram: transformar os alunos em sujeitos ativos do próprio conhecimento; aprimorar as aulas de Física com o uso de experimentos de baixo custo formando um aluno pesquisador.

5.2.2 Procedimentos metodológicos e aplicação do Produto Educacional

Foi utilizada uma metodologia diferente das convencionais aulas de Física que fazem uso de aulas expositivas e resolução de exercícios. Buscou-se uma maior interação entre aluno e professor, procurando um melhor entendimento das leis físicas que regem o aparato experimental e o conteúdo em si.

Na opinião de Moran (2015), o modelo atual de escola que com a função de ensinar e avaliar a todos da mesma maneira, exigindo resultados previsíveis, acaba por ignorar o fato de que o aluno adquire conhecimentos tanto através de competências cognitivas quanto pessoais e sociais. Esses conhecimentos não são adquiridos da forma convencional, pois exigem um aluno proativo, colaborativo e que a educação seja personalizada e com visão empreendedora.

Nossa ideia, ao aplicar o presente trabalho na escola, foi de proporcionar aos alunos uma aula diferenciada, com desafios que a cada passo ficavam mais complexos, na busca de colaborar com a formação de um aluno pesquisador. Segundo Moran (2015), a criação desses desafios são de fundamental importância para o sucesso da aprendizagem.

No primeiro encontro com os alunos explicou-se que estaríamos utilizando

uma metodologia diferenciada chamada de "metodologia ativa", e que eles deveriam participar da aula com perguntas, ajudando os colegas nas dúvidas que surgissem, e que o professor seria um mediador das discussões.

Com a finalidade de colaborar para a introdução da Mecânica Quântica na 3ª série do ensino médio das escolas de Boa Vista-RR, foi elaborada uma sequência didática utilizando a Unidade de Ensino Potencialmente Significativas (UEPS) de Moreira, feito em oito passos que serão tratados no Apêndice B, utilizando aulas expositivas e experimentais nas quais colocarão o aluno como agente pesquisador e construtor direto do conhecimento, com o intuito de explicar o efeito fotoelétrico.

O planejamento de uma aula teve objetivos claros, e a metodologia serviu como suporte para que esses objetivos fossem atingidos. As metodologias ativas se tornaram assim estratégias mais precisas, adequadas à realização do trabalho pretendido: o de levar o estudante a aprender. O planejamento das Unidades de Ensino Potencialmente Significativas foi feito baseado no intuito de tornar o aluno ativo na busca do conhecimento.

5.2.2.1 Etapas de desenvolvimento da UEPS

Para a realização da UEPS foram necessárias oito aulas que serão distribuídas da seguinte maneira:

Primeiro passo: foi realizada uma atividade sem a finalidade de avaliar os alunos, apenas com o intuito de observar seus conhecimentos prévios. Após uma breve explicação do conteúdo a ser abordado, foram feitos questionamentos acerca do que eles sabem a respeito do tema proposto, registrando as respostas no quadro, a fim de comentá-las em seguida. Os alunos realizaram a confecção de um experimento de baixo custo e fácil montagem, utilizando uma lanterna, um LED, fios e uma placa solar de calculadora, para entender uma das aplicações do efeito fotoelétrico. Após isso, os alunos assistiram dois vídeos, sendo um sobre a catástrofe ultravioleta e outro sobre o Nobel de Einstein, cujos endereços eletrônicos serão citados mais adiante. Como tarefa para casa foi pedido aos alunos que individualmente construíssem mapas conceituais sobre a aula, para serem entregues na próxima aula.

Segundo passo: foram criadas situações que levaram cada aluno a externalizar aquilo que sabe sobre o tópico, com a finalidade de notar a presença de subsunçores. As seguintes perguntas foram feitas à turma de maneira individual para que respondessem no caderno:

a) Como funciona a porta do shopping que abre sozinha quando você chega perto?

- b) Por que as luzes dos postes acendem sozinhas em determinada hora do dia?
- c) Como funcionam as placas de energia solar colocadas no telhado e em algumas calculadoras?
- d) O que você já leu, ouviu, ou viu sobre o Efeito Fotoelétrico?
- e) Em qual ramo da Física se estuda o Efeito Fotoelétrico?
- f) Onde o Efeito Fotoelétrico pode ser aplicado?

Após o término da atividade, as questões foram discutidas com a turma. O professor, mediador da discussão, explanou as respostas corretas a fim de que os alunos comesçassem a compreender o conteúdo tratado.

Após a discussão, os alunos realizaram individualmente a leitura do texto “Efeito Fotoelétrico: O estabelecimento da Dualidade Onda-Partícula para a luz”, que foi entregue pelo professor.

Terceiro passo: aprofundamento do conhecimento sobre quantização da energia. É realizada uma aula expositiva, com o intuito de organizar as ideias prévias expostas pelos alunos anteriormente, com slides e vídeos que trazem o contexto histórico e o desenvolvimento científico que explicam o efeito fotoelétrico. O professor, ao longo da aula, incita a turma a participar da mesma com comentários acerca dos conteúdos propostos.

Quarto passo: avaliação individual. Deve ser realizado um experimento voltado para a quantização da energia com a finalidade de se calcular a constante de Planck. O experimento é composto por uma placa *proto-board*, fios de ligação, LED's de diferentes cores, um potenciômetro, um resistor ôhmico, um voltímetro, uma bateria de 9V (como descrito no Apêndice C). O experimento constitui-se em medir a tensão elétrica entre os terminais do LED e calcular a constante de Planck em eletrovolts. Os alunos anotaram a tensão elétrica entre os terminais do LED numa tabela, bem como o resultado do cálculo da energia e da constante de Planck. Neste ponto é entregue aos alunos uma folha de papel milimetrado para que os mesmos construam um gráfico de energia em função da frequência para cada cor de LED. Observa-se que a constante de Planck é dada pela tangente do gráfico após o ajuste pelo método dos mínimos quadrados.

Quinto passo: apresentação de uma nova situação. A aula é iniciada com uma discussão sobre o experimento da aula anterior. Após, é exibido um vídeo de um experimento sobre efeito fotoelétrico, sem o áudio, para que a turma tentasse explicar o que estava acontecendo no experimento. Após a discussão, o vídeo deve ser passado novamente com o áudio a fim de que eles possam tentar correlacionar com o experimento proposta na aula anterior. Após isso, o professor deve entrar com mais uma aula expositiva e dialógica tratando do efeito fotoelétrico. Ao final da aula é

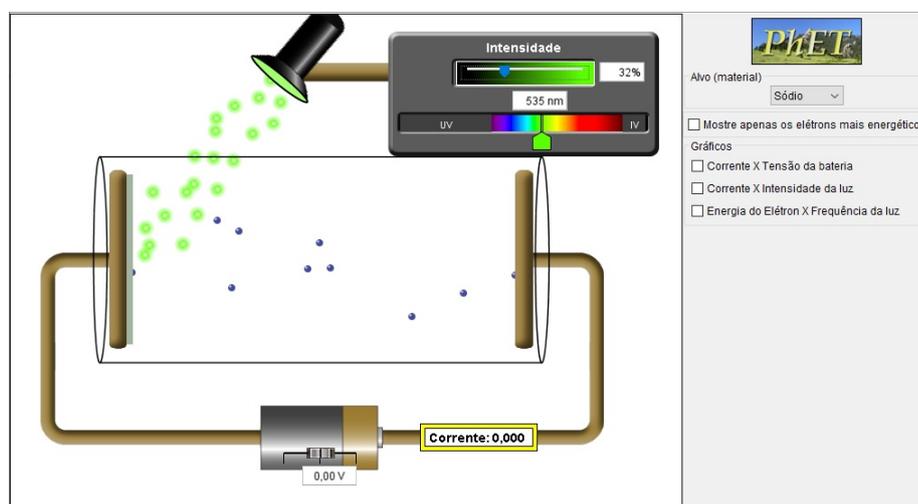
feita uma atividade no modelo de questionário com perguntas e respostas no estilo de verdadeiro (V) ou falso (F) que servirá como avaliação qualitativa. Além disso, após a intervenção da aula expositiva e da aplicação da atividade, propõe-se aos alunos que construam, individualmente, um mapa conceitual sobre o efeito fotoelétrico como atividade para casa.

Sexto passo: comparação dos mapas conceituais. Em sala o professor propõe a comparação dos mapas conceituais feitos na primeira aula e os feitos na última aula, como atividade para casa. Desta forma, pode se observar a construção de um conhecimento mais elaborado a partir de uma discussão dos erros e acertos dos mapas conceituais, quando comparados.

Sétimo passo: Uso da simulação PhET, para explicar o efeito fotoelétrico, como ferramenta para aplicação de atividade com os alunos (avaliação).

Foi pedido aos alunos que encontrassem o máximo comprimento de onda no qual os elétrons ficam na iminência de serem arrancados. O dados foram anotados numa tabela. Sabendo-se o valor do comprimento de onda, os alunos calcularam a frequência de corte e registraram numa outra tabela. Com o valor da frequência de corte os alunos calcularam a função trabalho, registrando os dados em outra tabela.

Figura 9 – Simulador PhET incidindo radiação na cor verde (comprimento de onda de 535 nm) e intensidade de 32% numa placa de sódio.

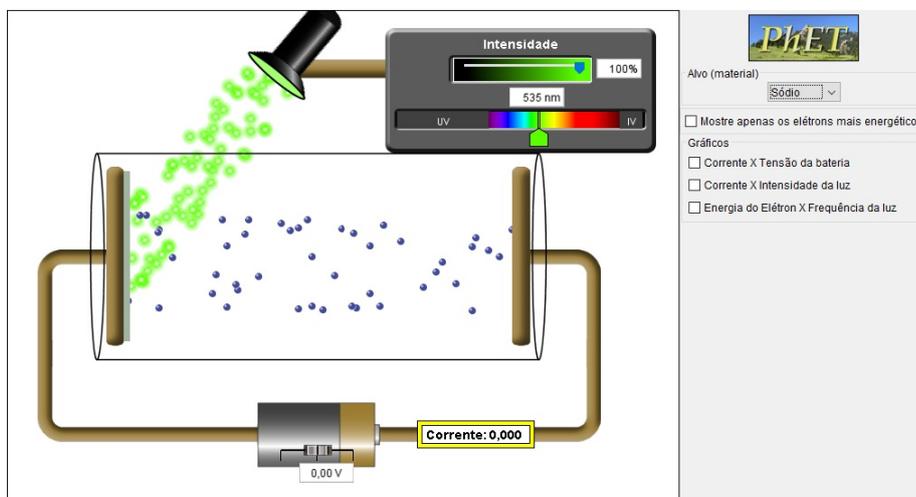


Fonte: próprio autor.

A Figura 9 mostra o comprimento de onda necessário para que o efeito fotoelétrico possa ser visualizado no material sódio, com a intensidade de 32%.

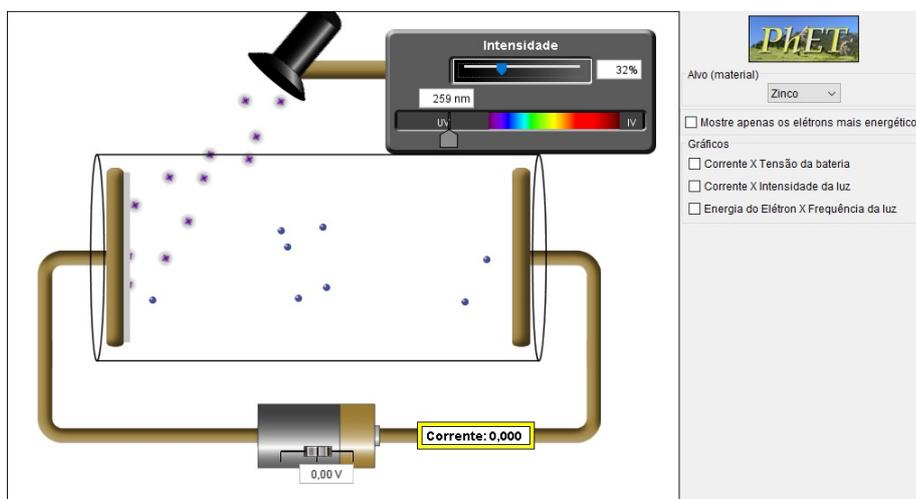
A Figura 10 mostra o comprimento de onda necessário para que o efeito fotoelétrico possa ser visualizado no material sódio, porém agora com a intensidade de 100%. Nota-se uma maior quantidade de fotoelétrons arrancados da placa.

Figura 10 – Simulador PhET incidindo radiação na cor verde (comprimento de onda de 535 nm) e intensidade de 100% numa placa de sódio.



Fonte: próprio autor.

Figura 11 – Simulador PhET incidindo radiação ultravioleta (comprimento de onda de 259 nm) e intensidade de 32% numa placa de zinco.



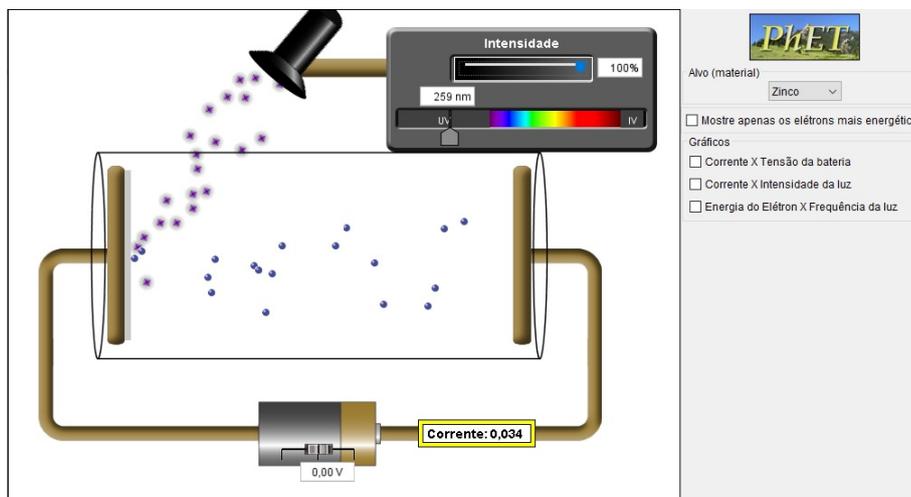
Fonte: próprio autor.

A Figura 11 mostra o comprimento de onda necessário para que o efeito fotoelétrico possa ser visualizado no material zinco, com a intensidade de 32%.

A Figura 12 mostra o comprimento de onda necessário para que o efeito fotoelétrico possa ser visualizado no material zinco, porém agora com a intensidade de 100%. Nota-se uma maior quantidade de fotoelétrons arrancados da placa.

Os registros foram feitos a fim de se obterem respostas para os seguintes questionamentos:

Figura 12 – Simulador PhET incidindo radiação ultravioleta (comprimento de onda de 259 nm) e intensidade de 100% numa placa de zinco.



Fonte: próprio autor.

- Para qualquer comprimento de onda se observam elétrons sendo arrancados do material? Justifique sua resposta.

- O que acontece quando alteramos o comprimento de onda?

- Caso elétrons estejam sendo arrancados, o que acontece se aumentarmos a intensidade luminosa?

- O que acontece quando aumentamos a tensão elétrica (V)?

- O que acontece quando utilizamos uma tensão elétrica negativa (-V)?

Os alunos tiveram que modificar na simulação o comprimento de onda para que encontrassem o comprimento no qual não há mais ejeção de elétrons, e calcularam assim a frequência da radiação, utilizando-a posteriormente para calcular a função trabalho.

Oitavo passo: avaliação das UEPS em sala de aula. Foi feita uma análise qualitativa das respostas da prova individual. Durante a aula o professor discutiu com os alunos sobre o efeito fotoelétrico e suas aplicações, observando a participação de cada um durante a aula.

O professor fez uma análise qualitativa da aplicação da UEPS, observando alguma evidência de aprendizagem significativa, levando-se em conta a participação de cada aluno nos tópicos desenvolvidos em sala de aula e nas tarefas realizadas em casa.

Para um controle qualitativo da proposta metodológica, dentro desta pesquisa, foi entregue aos alunos da 3º série do ensino médio dois formulários a serem respondidos,

um após o primeiro encontro e o segundo formulário a ser respondido após o último encontro. Tal formulário tem por objetivo identificar, através da visão do aluno, quais os possíveis pontos fortes e pontos fracos desta nova proposta metodológica. E também, servir de base para futuras alterações e adequações, por parte do professor, para que a continuação do processo de construção metodológica se perpetue, buscando o aperfeiçoamento do mesmo. Estes formulários não foram identificados, apresentando o caráter não pessoal e estão disponíveis no Apêndice D.

6 DISCUSSÃO QUALITATIVA DOS RESULTADOS

No presente capítulo serão abordados os resultados obtidos com a aplicação do produto educacional. Os conteúdos abordados na sequência didática foram organizados seguindo o planejamento de aula da instituição na qual o produto educacional foi aplicado.

O produto educacional foi aplicado no Colégio de Aplicação da Universidade Federal de Roraima em duas turmas de terceira série do ensino médio, cada turma continha 25 alunos. Nessa instituição as aulas de Física acontecem uma vez por semana, sendo dois tempos de aula por turma.

Como o trabalho foi baseado nas metodologias ativas, durante as aulas buscou-se a colaboração e a participação dos alunos. Segundo Morán (2015), através de metodologias ativas pode-se alcançar no aluno processos mais avançados de reflexão, de integração cognitiva, de generalização dos conteúdos.

Alguns questionários foram elaborados e as discussões acerca deles tiveram caráter qualitativo. A participação dos alunos durante o processo teve caráter qualitativo a fim de se notar a presença de aprendizagem significativa.

As aulas seguiram as propostas das Unidades de Ensino Potencialmente Significativas de Moreira, segundo o qual, nas primeiras fases das UEPS haverá a organização do conhecimento a ser estudado, identificando-se os subsunçores - elementos disponíveis na estrutura cognitiva dos alunos -, elaborando-se organizadores prévios.

Partimos do pressuposto que muito dos alunos, ao serem abordados sobre a quantização de energia e efeito fotoelétrico, não teriam conhecimento desse fenômeno e nem conseguissem relacionar palavras-chave correlacionadas.

Os resultados obtidos após a aplicação de cada aula serão discutidos a seguir:

6.1 Primeira aplicação

Na primeira aplicação explicou-se aos alunos que essa sequência didática com a qual trabalharíamos fazia parte da dissertação do Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física do qual faço parte, sob orientação do Professor Doutor Mikael Souto Maior de Sousa.

Após explanarmos que o foco principal dessa sequência de aulas seria o efeito fotoelétrico e que na metodologia a ser utilizada em sala de aula o aluno deveria ser sujeito ativo na busca do seu próprio aprendizado, foi pedido que os alunos falassem

palavras-chave que tivessem ligação com o efeito fotoelétrico para que fossem anotadas no quadro, pretendendo se observar seus conhecimentos prévios (subsunçores). Pedimos ainda para que os colegas respeitassem a participação dos outros, mesmo quando um deles falasse alguma palavra que não tinha relação com o assunto.

O que se viu foi uma turma participativa, que aceitou a nossa proposta de metodologias ativas. Os alunos citaram várias palavras tais como: energia, fóton, radiação, luz, elétron. Após alguns minutos discutimos cada palavra relacionando-as com o efeito fotoelétrico.

Para um melhor entendimento das aplicações do conteúdo abordado, foi perguntado à turma como funciona um sensor LDR ¹. Um aluno disse que colocou no portão eletrônico da sua casa para abrir o portão com a luz alta do carro. Foi explicado então o princípio de funcionamento do LDR e um experimento contendo um desses sensores foi passado de mão em mão entre os alunos para que eles observassem uma aplicação do efeito fotoelétrico.

Quando colocavam um dedo sobre o LDR, impedindo que a luz chegasse no sensor, os alunos não enxergavam nada dentro da caixa. Após retirarem o dedo do LDR fazendo com que a luz incidisse sobre ele, o LED acendia e eles poderiam ver a foto de Albert Einstein no interior da caixa.

Dando continuidade na aula, passamos um vídeo sobre a catástrofe ultravioleta e pedimos para que os alunos notassem palavras chave do vídeo a fim de que se discutissem posteriormente, conforme observado na Figura 13.

Figura 13 – Alunos assistindo ao vídeo sobre a catástrofe ultravioleta.



Fonte: próprio autor.

Algumas das palavras que os alunos anotaram foram: raio gama, ultravioleta, energia, quantização, conforme a Figura 14. Uma aluna perguntou *"como os fogos*

¹ Conforme experimento descrito no Apêndice B.

de artifício brilham? Eu li em algum lugar que isso tem a ver com a física quântica... seria isso mesmo que a gente está estudando?". Utilizamos essa pergunta como uma problematização para instigar a curiosidade dos alunos. Tal pergunta foi retomada na aula seguinte na qual eles leram o texto e a resposta foi construída junto com os alunos.

Discutimos sobre o motivo da exibição daquele vídeo e qual a relação entre ele e o efeito fotoelétrico: uma constante da Física chamada constante de Planck. Fizemos comentários acerca de cada uma das palavras anotadas e, após a discussão, foi mostrado outro vídeo, agora sobre o Prêmio Nobel de Einstein.

Figura 14 – Discussão sobre as palavras anotadas no quadro.



Fonte: próprio autor.

Logo após a exibição do vídeo discutimos sobre onde o efeito fotoelétrico pode estar presente no nosso dia a dia. Também houve a explicação de palavras anotadas pelos alunos a fim de que se fortalecessem os subsunçores existentes na estrutura cognitiva dos alunos, bem como se criassem novos subsunçores.

Um dos momentos importantes de ressaltar foi quando um aluno disse que não estava entendendo muito bem o conteúdo e perguntou se poderia estudar por conta própria em casa e através de vídeo-aulas ou apenas com as aulas na escola. Foi dito a ele que nos encontros que se sucederem ele deveria ser sujeito ativo na busca do conhecimento, ou seja, ele não só poderia como deveria estudar em casa para que, na escola, a aprendizagem se desse de maneira mais eficaz.

Para finalizar a aula, os alunos responderam um questionário sobre os conceitos abordados em sala de aula. Um dos questionários está representado na Figura 15.

Após análise dos questionários, observou-se que muitos alunos já tinham algum embasamento sobre os temas propostos em sala de aula e responderam quase todas as perguntas corretamente. Algumas perguntas foram deixada em branco, provavelmente pelo fato de os alunos não conseguirem responder a tempo antes do término da

Figura 15 – Questionário de verificação de aprendizagem aplicado ao final do primeiro encontro.





QUESTIONÁRIO

a) O que você já leu, ouviu, ou viu sobre a quantização da energia e o efeito fotoelétrico?

Efeito que provoca a emissão de elétrons quando a luz bate em material metálico.

b) Onde o Efeito Fotoelétrico pode ser aplicado?

Na presença dos LDR's e nos LEDs

c) Em qual ramo da Física se estuda o Efeito Fotoelétrico?

Na física moderna e na física quântica

d) Como funciona a porta do shopping que abre sozinha quando você chega perto?

Por sensor de movimento ou de presença.

e) Por que as luzes dos postes acendem sozinhas em determinada hora do dia?

Por causa dos LEDs, pois eles só funcionam quando a luz está baixa e também a intensidade da corrente, a temperatura e a resistência do LDR.

f) Como funcionam as placas de energia solar colocadas no telhado e em algumas calculadoras?

Pelo efeito fotovoltaico

Fonte: próprio autor.

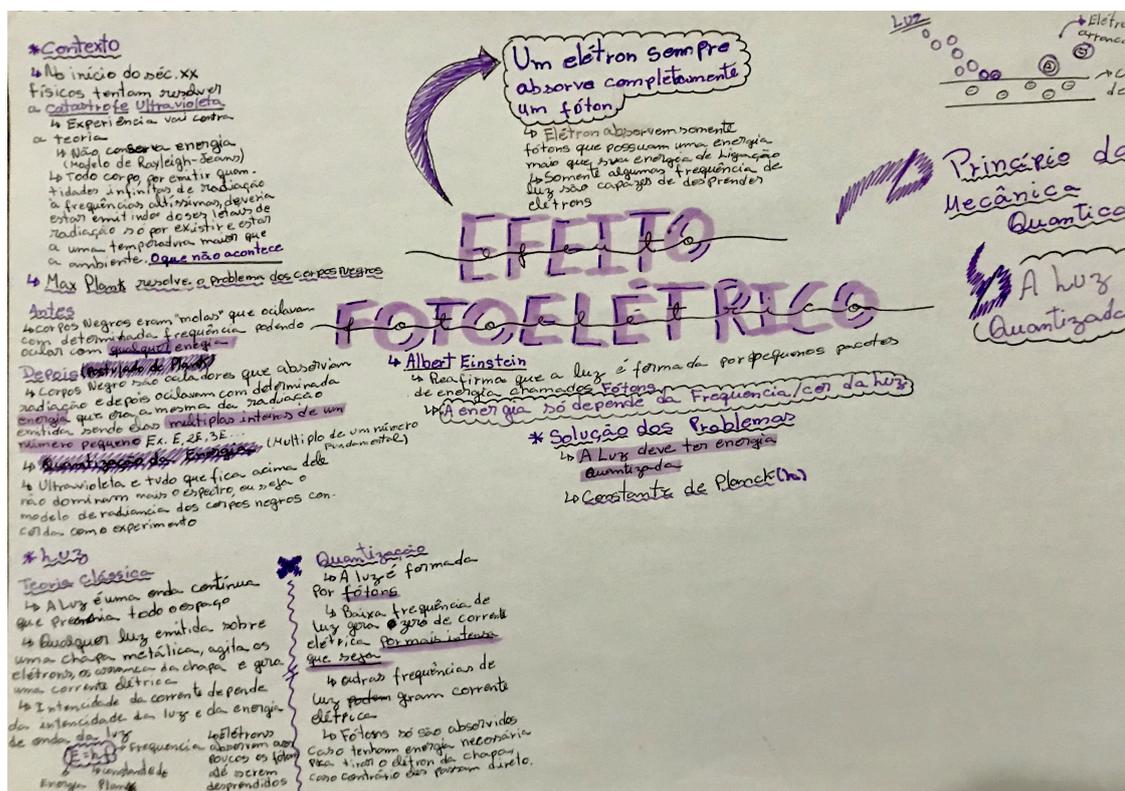
aula. Como tarefa para casa foi pedido que os alunos elaborassem um mapa conceitual acerca dos assuntos tratados em sala de aula.

6.2 Segunda aplicação

As questões propostas na aula anterior foram discutidas em sala com o objetivo de fazê-los compreender o conteúdo tratado e sanar dúvidas e/ou conceitos inadequados que pudessem atrapalhar a construção do conhecimento. Notou-se que muitos alunos não participaram da discussão, talvez por insegurança ou falta de conhecimento dos assuntos tratados. Quase todos aqueles que participaram já nesse segundo encontro foram os alunos que sentiram maior aptidão ao tema proposto, demonstrando evolução no conhecimento durante todo o processo.

Houve em seguida uma explanação sobre os mapas conceituais desenvolvidos em casa. Alguns mapas foram escolhidos e mostrados para a turma a fim de que eles pudessem ler os conceitos contidos nos mesmos. Nas Figuras 16 e 17 estão representados alguns dos mapas elaborados.

Figura 16 – Mapa conceitual elaborado por um aluno.



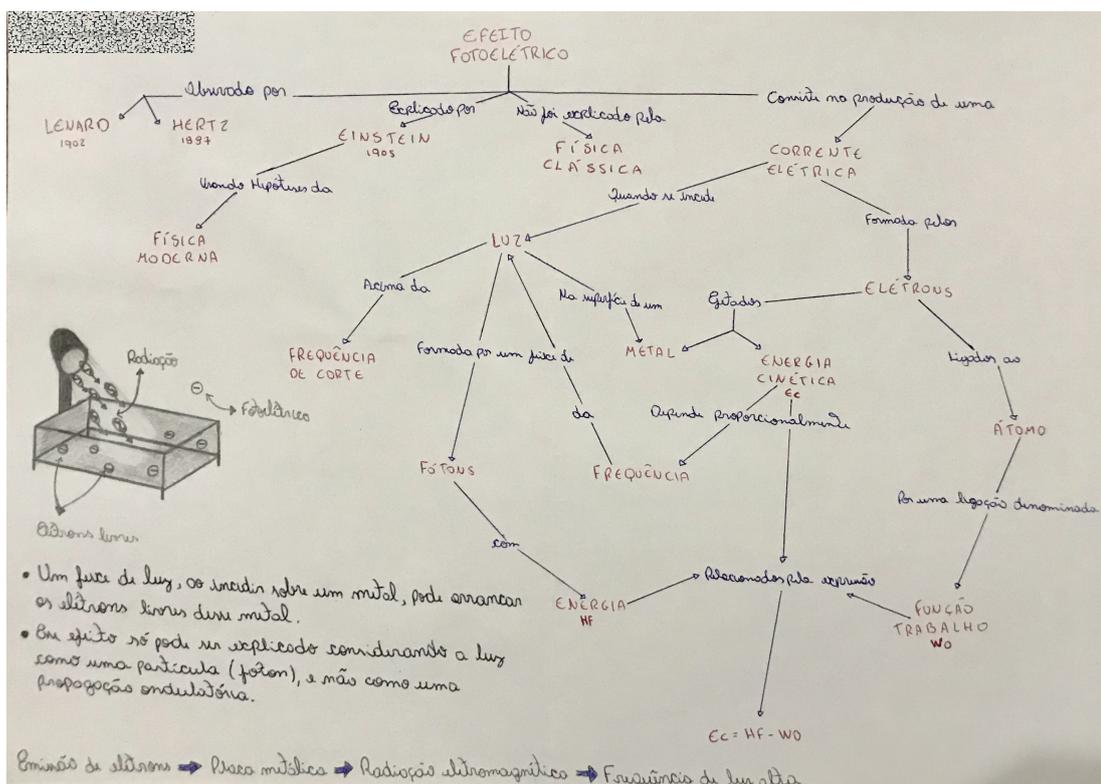
Fonte: próprio autor.

O intuito da confecção dos mapas conceituais foi fazer com que os alunos pudessem estudar em casa, através de pesquisas na internet ou em livros didáticos, a fim de que a metodologia ativa fosse praticada por eles.

Após a explanação, os alunos realizaram individualmente a leitura do texto “Dualidade Onda Partícula da luz”, e destacaram no texto os tópicos que consideraram mais importantes. Após a leitura, se formaram grupos de três a quatro alunos e houve uma discussão sobre o texto.

Nesse momento nós retomamos a pergunta sobre os fogos de artifício: “qual a relação entre a física quântica e os fogos de artifício?”. Os alunos perceberam que havia uma relação entre as aulas de Física Moderna e Contemporâneas e as aulas de química já vistas anteriormente, criando assim uma reconciliação integradora entre as disciplinas. Foi comentado que, de acordo com o modelo atômico de Bohr no qual há uma distribuição dos elétrons em camadas, os elétrons poderiam saltar de uma camada para outra emitindo luz (fótons).

Figura 17 – Mapa conceitual elaborado por um aluno.



Fonte: próprio autor.

Pediu-se que a discussão se externasse com a turma até que todos os grupos houvessem participado. Em alguns momentos o professor precisou intermediar algumas questões a fim de aprofundar o conhecimento sobre o tema.

6.3 Terceira aplicação

Foi apresentada uma aula expositiva, com slides e vídeos que tratam do contexto histórico e do desenvolvimento científico que explicam a quantização da energia.

Após cada slide, foi pedido aos alunos que compartilhassem com a turma o que sabiam do conteúdo proposto, e a maioria dos alunos teve uma participação bastante proveitosa.

Com a finalidade de aprofundamento do conhecimento, os alunos foram levados para o Laboratório de Ciências e montaram um experimento voltado para a quantização da energia para se calcular a constante de Planck.

Tal experimento consiste em medir a tensão elétrica entre os terminais de um LED e calcular a constante de Planck. Os passos adotados foram: com a ajuda de um voltímetro, os alunos mediram a tensão elétrica entre os terminais de um LED;

calcularam a energia, para, em seguida, calcularem a constante de Planck.

O procedimento foi repetido com LED's de diferentes cores. Os resultados obtidos, bem como os cálculos realizados, foram anotados em uma tabela conforme as Figuras 18 e 19. Alguns alunos sentiram dificuldades nos cálculos e tiveram auxílio tanto dos colegas quanto do professor para realizar certas medidas.

Figura 18 – Roteiro experimental para se calcular a constante de Planck.



Os alunos deverão montar um experimento voltado para a quantização da energia com a finalidade de se calcular a constante de Planck.

O experimento é composto por:

- Uma placa protoboard.
- Fios de ligação.
- LED's de diferentes cores.
- Um potenciômetro.
- Um voltímetro.
- Uma bateria de 9V.

O experimento consiste em medir a tensão elétrica entre os terminais do LED e calcular a constante de Planck.

Primeiramente, com a ajuda de um voltímetro, o aluno deverá medir a tensão elétrica entre os terminais de um LED, anotando em seguida na tabela abaixo.

Utilizando o valor da tensão, calcular a energia, através da equação: $E = Ue$, anotando em seguida o resultado na tabela.

Observação: U = tensão elétrica; e = carga elétrica elementar ($e = 1,6022 \times 10^{-19} C$).

Enfim, o aluno deverá calcular a constante de Planck através da equação: $E = hf$, anotando em seguida o resultado obtido na tabela.

Observação: E = energia; h = constante de Planck; f = frequência (depende de cada cor).

COR DO LED	TENSÃO ELÉTRICA	ENERGIA $E = Ue$	FREQUÊNCIA	CONSTANTE DE PLANCK h
Azul	2,44 V	$3,95 \cdot 10^{-19}$	6×10^{14}	$6,5 \cdot 10^{-34}$
Verde	2,45 V	$3,92 \cdot 10^{-19}$	6×10^{14}	$6,5 \cdot 10^{-34}$
Amarelo	1,66 V	$2,65 \cdot 10^{-19}$	5×10^{14}	$5,3 \cdot 10^{-34}$
Vermelho	1,62 V	$2,59 \cdot 10^{-19}$	4×10^{14}	$6,4 \cdot 10^{-34}$

O professor deverá entregar aos alunos uma folha de papel milimetrado e pedir para que eles construam um gráfico de energia em função da frequência para cada cor de LED.

Será observado que a constante de Planck será dada pela tangente do gráfico após o ajuste pelo método dos mínimos quadrados.

1

Fonte: próprio autor.

As Figuras 20 e 21 retratam os alunos no Laboratório de Ciências realizando o experimento. Pôde-se observar que os alunos, por si só, sem interferência do professor, separaram os grupos mantendo sempre um ou mais alunos que se destacaram nos

Figura 19 – Roteiro experimental para se calcular a constante de Planck.

FREQUENCIA

Azul:
 $c = \lambda \cdot f$
 $3 \times 10^8 = 450 \cdot 10^{-9} \cdot f$
 $f = \frac{3 \times 10^8}{450 \times 10^{-9}} = 0,006 \times 10^{17}$
 $\boxed{6 \times 10^{14}}$

Verde: $c = \lambda \cdot f$
 $3 \times 10^8 = 495 \cdot 10^{-9} \cdot f$
 $f = \frac{3 \times 10^8}{495 \times 10^{-9}} = 0,006 \times 10^{17}$
 $\boxed{6 \times 10^{14}}$

Amarelo: $c = \lambda \cdot f$
 $3 \times 10^8 = 590 \cdot 10^{-9} \cdot f$
 $f = \frac{3 \times 10^8}{590 \cdot 10^{-9}} = 0,005 \times 10^{17}$
 $\boxed{5 \times 10^{14}}$

Vermelho: $c = \lambda \cdot f$
 $3 \times 10^8 = 625,7 \cdot 10^{-9} \cdot f$
 $f = \frac{3 \times 10^8}{625,7 \cdot 10^{-9}} = 0,004 \times 10^{17}$
 $\boxed{4 \times 10^{14}}$

Energia:

Azul: $2,44 \cdot 1,6022 = 3,95 \times 10^{-19}$
 Verde: $2,45 \cdot 1,6022 = 3,92 \times 10^{-19}$
 Amarelo: $166 \cdot 1,6022 = 2,65 \times 10^{-19}$
 Vermelho: $162 \cdot 1,6022 = 2,59 \times 10^{-19}$

Constante de Planck (h)

Azul: $3,95 \times 10^{-19} = h \cdot 6 \times 10^{14}$
 $h = \frac{3,95 \times 10^{-19}}{6 \times 10^{14}} = 6,5 \cdot 10^{-32}$

Verde: $h = \frac{3,92 \times 10^{-19}}{6 \times 10^{14}} = 6,5 \times 10^{-32}$

Amarelo: $\frac{2,65 \times 10^{-19}}{5 \times 10^{14}} = 5,3 \cdot 10^{-32}$

Vermelho: $\frac{2,59 \times 10^{-19}}{4 \times 10^{14}} = 6,4 \cdot 10^{-32}$

$h = \frac{247}{4} = 61,75 \cdot 10^{-34}$

$\sigma = \frac{6,626 \times 10^{-34} - 6,175 \cdot 10^{-34}}{6,626 \times 10^{-34}}$
 $= \frac{0,451}{6,626}$
 $\sigma = 0,069$

Fonte: próprio autor.

nossos encontros. Eles entenderam que a metodologia só daria certo se eles ajudassem uns aos outros a aprender. Durante toda a execução do experimento se via um ou mais alunos ensinando os outros do seu grupo e, de vez em quando, colaborando com os colegas de outro grupo.

Pôde-se observar uma pequena quantidade de alunos que não demonstrou desenvoltura na realização da atividade prática, não conseguindo montar o experimento e nem realizar as medidas através do multímetro. Porém, esse problema foi sanado através da ajuda dos colegas e do professor, quando via a necessidade. Alguns alunos

Figura 20 – Alunos realizando atividade experimental para se calcular a constante de Planck.



Fonte: próprio autor.

Figura 21 – Alunos realizando atividade experimental para se calcular a constante de Planck.



Fonte: próprio autor.

tinham maior aptidão na realização dos cálculos, enquanto outros demonstraram maior aptidão na montagem experimental.

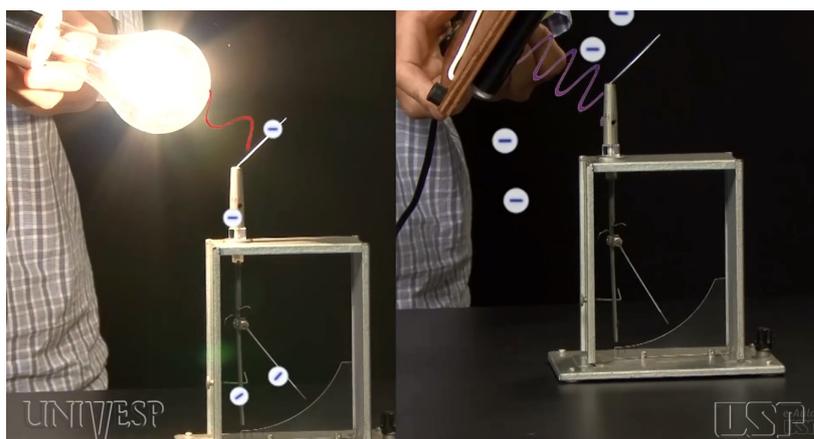
É válido ressaltar que, através da observação da participação dos alunos na busca do conhecimento, se notaram indícios de uma aprendizagem significativa.

6.4 Quarta aplicação

A aula foi iniciada com uma discussão sobre o experimento da aula anterior. Alguns alunos questionaram o porquê do cálculo experimental não estar totalmente de acordo com o valor da constante de Planck contido no livro. Ressaltou-se que todo experimento é passível de erros e que o experimento, quanto mais fosse realizado corretamente, maior seria a aproximação do resultado numérico. Explicou-se que os erros sistemáticos, causados por fontes identificáveis, podem ter sido cometidos, como, por exemplo, o aluno acendeu muito o LED quando na verdade ele deveria estar muito fracamente aceso.

Dando sequência à aula, exibiu-se um vídeo de um experimento sobre efeito fotoelétrico, sendo a primeira exibição desse vídeo feita sem o áudio, para que a turma tentasse explicar o que estava acontecendo durante a realização do experimento exibido, conforme a Figura 22.

Figura 22 – Vídeo de um experimento sobre o efeito fotoelétrico.



Fonte: <https://www.youtube.com/watch?v=VVka6Mp5vyA>.

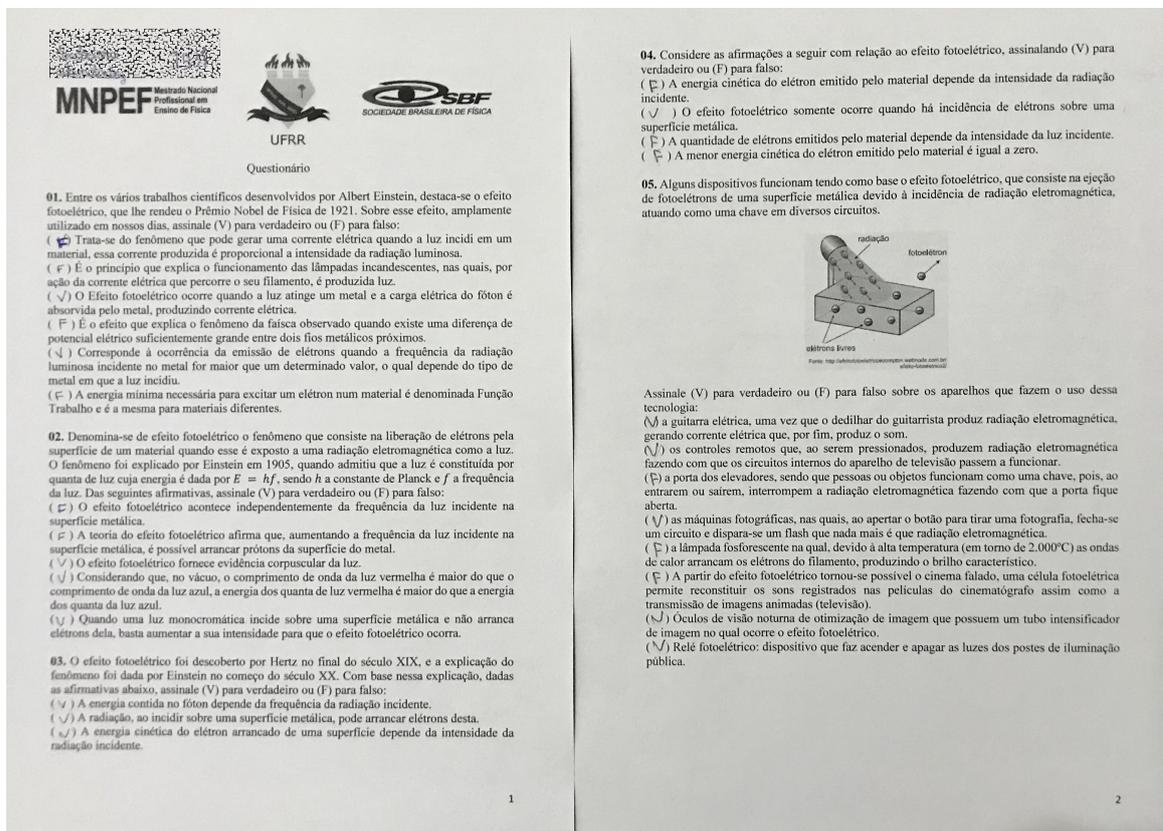
Os alunos comentaram que se tratava de um experimento com processos de eletrização: atrito, contato e indução. Disseram também terem percebido que um tipo de lâmpada descarregava o eletroscópio, enquanto outro tipo de lâmpada não conseguia descarregar. Uma aluna comentou que a lâmpada violeta deveria ter maior energia e, por isso, conseguiria arrancar os elétrons do eletroscópio.

O vídeo foi passado novamente, porém dessa vez com o áudio a fim de que eles pudessem correlacionar esse experimento com o experimento proposto na aula anterior.

Após esta etapa, iniciou-se uma aula expositiva para sistematização e aprofundamento do tema efeito fotoelétrico. Ao final da aula foi realizada uma atividade no

modelo de questionário com perguntas e respostas no estilo de verdadeiro (V) ou falso (F) que serviu como avaliação qualitativa, conforme a Figura 23.

Figura 23 – Questionário passado aos alunos como avaliação qualitativa.



Fonte: próprio autor.

Durante a realização do questionário alguns alunos sentiram dificuldade em responder, logo foram auxiliados por colegas que estavam mais seguros das respostas. Essa interação faz parte do processo sendo um dos principais pontos da metodologia ativa: aprender ensinando.

6.5 Quinta aplicação

Nessa aula realizou-se um experimento no qual se utilizou a simulação PhET para explicar o efeito fotoelétrico. Foi pedido aos alunos que calculassem a função trabalho de determinados materiais ao realizarem a simulação. O procedimento seguiu algumas etapas.

Os alunos precisaram encontrar na simulação o comprimento de onda máximo necessário para que os elétrons ficassem na iminência de serem arrancados, sempre anotando os resultados nas tabelas contidas no roteiro entregue no início da aula.

Com o valor do comprimento de onda, calculou a frequência de corte, sendo o valor da velocidade da luz no vácuo colocado no quadro a fim de auxiliá-los na realização dos cálculos a partir dos dados obtidos pela simulação. Sabendo-se o valor da frequência de corte, se calculou a função trabalho. O procedimento foi repetido para cada material contido no simulador.

Após a realização da simulação, os alunos responderam um questionário acerca da mesma. O resultado de um dos alunos é retratado na Figura 24.

Figura 24 – Tabelas e questionário realizado pelos alunos no último encontro.

MNPEF Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física
UFRR
SBF SOCIEDADE BRASILEIRA DE FÍSICA

Clique em "opções" e selecione "mostre os fótons". Aumente a "intensidade" até que se observe os elétrons sendo arrancados no material. O objetivo desse experimento é o cálculo da função trabalho de determinados materiais. O procedimento seguirá as seguintes etapas:

- Encontre no simulador o comprimento de onda máximo (frequência mínima) necessário para que os elétrons fiquem na iminência de serem arrancados ($E_c = 0$). Anote em seguida os valores na tabela abaixo:

MATERIAL	COMPRIMENTO DE ONDA (λ) 10^{-9} m
Sódio (Na)	539 nm
Zinco (Zn)	287 nm
Cobre (Cu)	262 nm
Platina (Pt)	196 nm
Cálcio (Ca)	425 nm
Magnésio (Mg)	334 nm

$E = h \cdot f$

- Com o valor do comprimento de onda, calcule a frequência de corte através da equação $c = \lambda \cdot f_0$, observando que $c =$ velocidade da luz no vácuo (3×10^8 m/s). Anote em seguida os valores na tabela abaixo:

MATERIAL	FREQUÊNCIA DE CORTE (f_0) Hz
Sódio (Na)	$5,5 \cdot 10^{14}$ Hz
Zinco (Zn)	$1,0 \cdot 10^{14}$ Hz
Cobre (Cu)	$1,1 \cdot 10^{14}$ Hz
Platina (Pt)	$1,5 \cdot 10^{15}$ Hz
Cálcio (Ca)	$7,05 \cdot 10^{14}$ Hz
Magnésio (Mg)	$8,9 \cdot 10^{14}$ Hz

$f = \frac{c}{\lambda}$

- Com o valor da frequência de corte (f_0), calcule a função trabalho (ϕ) através da equação $\phi = h \cdot f_0$, observando que h é a constante de Planck ($h = 4,14 \cdot 10^{-15}$ eV.s), anotando em seguida os valores na tabela abaixo:

MATERIAL	FUNÇÃO TRABALHO (ϕ) eV
Sódio (Na)	$2,27 \cdot 10^{-2}$ eV
Zinco (Zn)	$4,14 \cdot 10^{-2}$ eV
Cobre (Cu)	$4,5 \cdot 10^{-2}$ eV
Platina (Pt)	$6,21$ eV
Cálcio (Ca)	$2,9 \cdot 10^{-2}$ eV
Magnésio (Mg)	$3,6 \cdot 10^{-2}$ eV

Responda agora o seguinte questionário:

- Para qualquer comprimento de onda se observam elétrons sendo arrancados do material? Justifique sua resposta.
Não, porque cada material tem sua especificidade de, onde cada um vai ter a sua frequência mínima.
- O que acontece quando alteramos o comprimento de onda?
A frequência varia de acordo com a comprimento de onda (inversamente proporcional).
- Caso elétrons estejam sendo arrancados, o que acontece se aumentarmos a intensidade luminosa?
Eleva a quantidade dos elétrons.
- O que acontece quando aumentamos a tensão elétrica (V)?
A velocidade dos elétrons aumenta.
- O que acontece quando utilizamos uma tensão elétrica negativa (-V)?
Muda o sentido do movimento dos elétrons.

Fonte: próprio autor.

No decorrer da aula se observou a existência de poucos alunos recorrendo à ajuda do colega. Em sua grande maioria, os alunos realizaram todo o roteiro sozinhos. Esse fato deve-se, talvez, à facilidade com que os alunos lidam com o computador, mostrando-se assim que essa ferramenta pode ser de grande importância na realização de atividades experimentais virtuais como forma de auxiliar a busca por uma aprendizagem significativa.

Após o último encontro, pediu-se aos alunos que respondessem um formulário de avaliação das aulas e que essas respostas fossem enviadas por e-mail para o professor. As Figuras 25 e 26 mostram algumas das respostas obtidas.

Figura 25 – Formulário respondido online pelos alunos após o último encontro.

1. O que você achou dessa nova metodologia?
 Continuo sem concluir nada
 Ruim
 Satisfatório
 Ótimo/Excelente

2. Na sua visão, quais foram os pontos fortes dessa proposta?
O pontos forte dessa proposta é o fato de fugir do modelo tradicional de aula, o qual instiga o aluno a querer aprender! Pois no momento em que se faz perguntas aos alunos sobre o tema antes de dar o conteúdo, ele vai avaliar a garagem que ele já possui. Outro ponto forte é o fato de não ficarmos nos pretendo ao livro mas assistimos vídeos, realizamos experimentos e observamos na prática o real sentido do que estávamos estudando.

3. Na sua visão, quais foram os pontos fracos dessa proposta?
Não percebi

4. As aulas utilizando essa nova proposta metodológica atenderam as suas expectativas?
Poderia citar alguma expectativa atendida?
Atenderam, principalmente o fato de visualizamos que tudo aquilo a qual estudamos tem uma aplicação real. Como por exemplo os experimentos com led

5. Você poderia identificar alguma diferença entre essa aula e as aulas anteriores à aplicação dessa nova metodologia? Não Sim

6. Se sim, quais seriam elas?

Aulas tradicionais são cansativas, já as aulas com essa nova metodologia são interativas.

Fonte: próprio autor.

Figura 26 – Formulário respondido online pelos alunos após o último encontro.

1. O que você achou dessa nova metodologia?
 Continuo sem concluir nada
 Ruim
 Satisfatório
 Ótimo/Excelente

2. Na sua visão, quais foram os pontos fortes dessa proposta?
A participação dos alunos de forma direta nas aulas.

3. Na sua visão, quais foram os pontos fracos dessa proposta?
Usar vídeos de terceiros para explicar o assunto

4. As aulas utilizando essa nova proposta metodológica atenderam as suas expectativas?
Poderia citar alguma expectativa atendida?
Sim, a interação dos alunos com o professor.

5. Você poderia identificar alguma diferença entre essa aula e as aulas anteriores à aplicação dessa nova metodologia? Não Sim

6. Se sim, quais seriam elas?

A didática e a postura estabelecida pelo professor.

Fonte: próprio autor.

7 CONCLUSÕES

Após pesquisa online realizada com professores da rede pública e privada do Estado de Roraima, surgiu a ideia de escrever sobre o tema da Quantização de Energia e o Efeito Fotoelétrico, a fim de introduzir tais conteúdos na grade curricular das escolas de Boa Vista-RR, visto que não há a presença desses assuntos na matriz curricular estadual.

Criou-se como produto educacional uma sequência didática apoiada na proposta das Unidades de Ensino Potencialmente Significativas (UEPS) de Moreira em conjunto com as Metodologias Ativas de Morán, no intuito de promover a aprendizagem significativa e não mecânica nos alunos. Tal sequência didática tem por objetivo introduzir o conteúdo da Quantização de Energia e o Efeito Fotoelétrico nas escolas públicas e particulares de Boa Vista-RR.

A utilização de tal metodologia possibilitou ao professor fazer avaliações qualitativas durante cada encontro, propondo um aprofundamento nos conteúdos de maneira progressiva e integradora. Pôde-se ainda atender de maneira individual durante a aula aqueles estudantes que demonstraram maior dificuldade na compreensão dos temas propostos.

Buscou-se na literatura uma forma de facilitar o entendimento do assunto tanto por parte do professor, que nunca deu aula desse conteúdo, quanto do aluno que estaria vendo pela primeira vez os conceitos da Física Moderna e Contemporânea, escolhendo-se assim uma linguagem acessível e menos matematizada.

No planejamento das aulas decidiu-se por utilizar uma abordagem do conteúdo através de variadas formas, tais como vídeos, experimentos e um simulador computacional. Também procurou-se adotar uma metodologia diferenciada que fosse de fácil aplicação e que pudesse trazer verdadeiramente uma aprendizagem significativa aos alunos, relacionando sempre que possível a teoria explanada com a prática na vida cotidiana do estudante.

De acordo com o planejamento para a aplicação do produto educacional, precisaríamos de oito aulas, ou seja, quatro encontros, já que cada encontro era de duas aulas seguidas na semana. Porém, devido a fatos ocorridos na escola, tivemos tempos de aula reduzidos e alguns dias com apenas uma aula, sendo assim necessário adaptar as atividades a serem realizadas em cada encontro. Observamos também que apenas oito aulas foram insuficientes para que o produto fosse bem aplicado, utilizamos então mais duas aulas, totalizando 5 encontros.

Para que este trabalho obtivesse êxito, fez-se necessário que o professor to-

masse a postura de mediador, instigando os alunos quase na totalidade do tempo de aula a participarem do processo.

Explicou-se aos alunos que para haver aprendizagem significativa o material utilizado na aula seria potencialmente significativo, ou seja, teria lógica e seria atrativo, mas que eles deveriam participar das aulas, estar dispostos a aprender e, nos seus momentos fora da sala de aula, precisariam buscar mais sobre os conteúdos tratados.

Nem todos os estudantes conseguiram compreender bem os temas propostos nas aulas e alguns deles demonstraram, através de questionamentos, certa limitação na compreensão dos assuntos. Percebeu-se nesse sentido que os próprios colegas se dispuseram a ajudá-los respondendo seus questionamentos. Coube ao professor apenas mediar as discussões. Porém, percebeu-se na maioria dos alunos uma evolução no conhecimento acerca do assunto tratado, comprovada através da participação dos mesmos durante a realização das aulas, bem como da análise dos questionários realizados durante o processo.

Ressalta-se que durante a realização dos experimentos, tanto em sala de aula quanto no laboratório de ciências, os alunos se sentiram bastante atraídos a participarem. Observou-se, por exemplo, a participação de alguns alunos que antes ficavam calados e, na aula prática, tomaram a frente do grupo para a confecção do experimento.

O modelo de aula tradicional já não consegue suprir as necessidades dos alunos que, com a ajuda da tecnologia, têm acesso a muita informação numa velocidade enorme. Cabe ao professor mediar o uso dessas tecnologias e utilizá-las a favor da educação. Nas escolas que possuem laboratório de informática, a realização de atividades práticas de simulação podem contribuir com o professor na evolução intelectual dos estudantes.

A simulação computacional utilizada no último encontro foi um dos momentos mais importantes no qual pudemos observar a presença de aprendizagem significativa. A segurança que os assuntos foram tratados e as explicações bem exploradas nos fizeram perceber que essa metodologia pode ser uma forte aliada na busca por uma educação na qual o aluno deixe de ser apenas receptor do conhecimento e passe a ser um sujeito ativo na construção da sua própria aprendizagem.

Após análise dos formulários respondidos pelos alunos no final da aplicação do produto educacional, percebeu-se uma ótima aceitação dessa nova metodologia. O fato do aluno participar da aula, respondendo questionamentos durante todo o tempo foi um dos motivos mais comentados pelos alunos.

Observou-se nos participantes a presença de aprendizagem significativa, visto que alguns assuntos tratados durante os encontros foram bem explanados pelos

alunos tanto nos questionários passados quanto nas explicações aos colegas durante a realização das atividades.

Considerando-se as características individuais de cada aluno e o aproveitamento observado, pode-se afirmar que os resultados da aplicação do produto educacional foram satisfatórios.

REFERÊNCIAS

- AUSUBEL, D. P. *Aquisição e retenção de conhecimentos: uma perspectiva cognitiva*. [S.l.: s.n.], 2003.
- AUSUBEL, D. P.; NOVAK, J. D.; HANESIAN, H. *Psicologia Educacional*. [S.l.: s.n.], 1980.
- BAKER, J. *50 ideias de física quântica que você precisa conhecer*. [S.l.: s.n.], 2015.
- BORGES, A. T. Novos rumos para o laboratório escolar de ciências. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física, Florianópolis*, v. 19, n. 3, p. 291-313., 2002. Acesso em 26 dez. 2019. Disponível em: <<https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/6607/6099>>.
- BRASIL. Pcn's ensino médio: orientações educacionais complementares aos parâmetros curriculares nacionais. ciências da natureza, matemática e suas tecnologias. *Ministério da Educação - Secretaria de Educação Média e Tecnológica*, 2000.
- BRASIL. Orientações educacionais complementares aos parâmetros curriculares nacionais (pcn+). ciências da natureza e matemática e suas tecnologias. *Ministério da Educação - Secretaria de Educação Média e Tecnológica*, 2002.
- BRASIL. Base nacional comum curricular (bncc). educação é a base. *Ministério da Educação - Secretaria de Educação Média e Tecnológica*, 2017.
- BUSATTO, C. Z. et al. O ensino de física moderna e contemporânea na educação básica: conteúdos trabalhados pelos docentes. *Revista CIATEC-UPF*, 10(1), 104-115., 2018. Acesso em 28 set. 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.5335/ciatec.v10i1.8388>>.
- CRESESB. *Energia Solar - Princípios e aplicações*. Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito / CEPEL (Centro de Pesquisa de energia elétrica). 2018. Acessado em 04 set. 2019. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br>>.
- EISBERG, R.; RESNICK, R. *Física Quântica: Átomos, Moléculas, Sólidos, Partículas*. [S.l.: s.n.], 1994.
- FLEURY, M. T. L.; WERLANG, S. Pesquisa aplicada – reflexões sobre conceitos e abordagens metodológicas. *Fundação Getúlio Vargas*, 2017. Acesso em 09 set. 2019. Disponível em: <https://bibliotecadigital.fgv.br/dspace/bitstream/handle/10438/18700/A_pesquisa_aplicada_conceito_e_abordagens_metodol%C3%B3gicas.pdf>.
- FONSECA, J. J. S. *Metodologia da pesquisa científica*. [S.l.: s.n.], 2002.
- GASPAR, A.; MONTEIRO, I. C. d. C. Atividades experimentais de demonstrações em sala de aula: Uma análise segundo o referencial da teoria de vygotsky. *Investigações em Ensino de Ciências – V10(2)*, pp. 227-254, 2005. Acesso em 26 dez. 2019. Disponível em: <<file:///C:/Users/55959/Downloads/518-1042-1-SM.pdf>>.
- GERHARDT, T. E.; SILVEIRA, D. T. o. *Métodos de Pesquisa*. [S.l.: s.n.], 2009.
- GIL, A. C. *Métodos e técnicas de pesquisa social*. [S.l.: s.n.], 2008.

- GOMES, A. P. et al. Ensino de ciências: dialogando com david ausubel. *Revista Ciências e Ideias*, v. 1, n. 1, p. 23-31, outubro/março., 2009–2010. Acesso em 11 ago. 2019. Disponível em: <<https://revistascientificas.ifrj.edu.br/revista/index.php/reci/article/viewFile/28/69>>.
- GRASSELLI, E. C.; GARDELLI, D. O ensino da física pela experimentação no ensino médio: da teoria à prática. *OS DESAFIOS DA ESCOLA PÚBLICA PARANAENSE NA PERSPECTIVA DO PROFESSOR PDE*, 2014. Acesso em 26 dez. 2019. Disponível em: <http://www.diaadiaeducacao.pr.gov.br/portals/cadernospde/pdebusca/producoes_pde/2014/2014_uem_fis_artigo_erasmo_carlos_grasselli.pdf>.
- HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. *Fundamentos de física*. [S.l.: s.n.], 2009.
- KLAUSEN, L. d. S. Aprendizagem significativa: um desafio. *EDUCERE – Congresso Nacional de Educação*, 2017. Acesso em 11 ago. 2019. Disponível em: <http://educere.bruc.com.br/arquivo/pdf2017/25702_12706.pdf>.
- MORAN, J. Mudando a educação com metodologias ativas. *Coleção Mídias Contemporâneas. Convergências Midiáticas, Educação e Cidadania: aproximações jovens.*, 2015. Acesso em 19 set. 2019. Disponível em: <http://www2.eca.usp.br/moran/wpcontent/uploads/2013/12/mudando_moran.pdf>.
- MOREIRA, M. A. Unidades de ensino potencialmente significativas - ueps. *Aprendizagem Significativa em Revista*, v. 1, n. 2, p. 43–63, 2011. Acesso em 13 ago. 2019. Disponível em: <http://www.if.ufrgs.br/asr/artigos/Artigo_ID16/v1_n3_a2011.pdf>.
- MOREIRA, M. A. O que é afinal aprendizagem significativa? *Revista cultural La Laguna Espanha*, 2012. Acesso em 11 ago. 2019. Disponível em: <<http://moreira.if.ufrgs.br/oqueefinal.pdf>>.
- MOZENA, E. R. *Investigando enunciados sobre a interdisciplinaridade no contexto das mudanças curriculares para o ensino médio no Brasil e no Rio Grande do Sul*. Tese (Doutorado) — Instituto de Física, UFRGS, 2014.
- MOZENA, E. R.; OSTERMANN, F. Editorial: Sobre a base nacional comum curricular (bncc) e o ensino de física. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física, Florianópolis*, v. 33, n. 2, p. 327-332, 2016. Acesso em 11 jul. 2019. Disponível em: <<https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/2175-7941.2016v33n2p327/32314>>.
- NETO, J. A. d. S. P. Teoria da aprendizagem significativa de david ausubel: perguntas e respostas. *Periódico do Programa de Pós-Graduação em Educação da UCDB*, 2013. Acesso em 12 ago. 2019. Disponível em: <<http://www.serie-estudos.ucdb.br/index.php/serie-estudos/article/view/296>>.
- NUSSENZVEIG, H. M. *Curso de Física Básica 4: Ótica, Relatividade, Física Quântica*. [S.l.: s.n.], 2010.
- PELLIZZARI, A. et al. Teoria da aprendizagem significativa segundo ausubel. *Rev. PEC, Curitiba*, v. 2, n. 1, p. 37-42, 2001–2002. Acesso em 11 ago. 2019. Disponível em: <<https://goo.gl/geA25C>>.
- PEREZ, S. *Mecânica Quântica: Um curso para professores da Educação Básica*. [S.l.: s.n.], 2016.

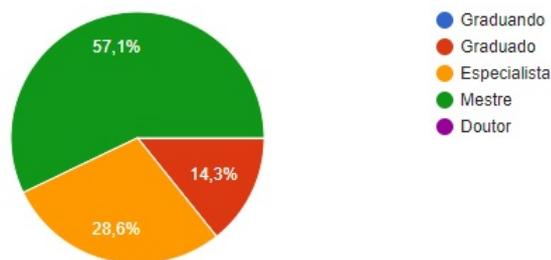
- PIZA, A. F. R. d. T. *Mecânica Quântica*. [S.l.: s.n.], 2009.
- PRODANOV, C. C.; FREITAS, E. C. d. *Metodologia do trabalho científico: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico*. [S.l.: s.n.], 2013.
- SAAD, F. D. *Demonstrações em ciências: explorando fenômenos da pressão do ar e dos líquidos através de experimentos simples*. [S.l.: s.n.], 2005.
- SANTOS, A. C.; NASCIMENTO, S. D. d.; SOUZA, D. d. N. Ensino de física moderna perspectivas e desafios sob o olhar de alguns professores de física do ensino médio. *Scientia Plena, São Cristóvão*, v.12, 2016. Acesso em 18 set. 2019.
- SCHROEDER, E. Conceitos espontâneos e conceitos científicos: o processo da construção conceitual em vygotsky. *ATOS DE PESQUISA EM EDUCAÇÃO – PPGE/ME FURB, ISSN 1809– 0354 v. 2, nº 2, p. 293-318*, 2007. Acesso em 18 set. 2019. Disponível em: <<http://proxy.furb.br/ojs/index.php/atosdepesquisa/article/view/569/517>>.
- SILVA, A. M. d. *Metodologia da Pesquisa*. [S.l.: s.n.], 2015.
- SILVA, S. d. C. R. d.; SCHIRLO, A. C. Teoria da aprendizagem significativa de ausubel: Reflexões para o ensino de física ante a nova realidade social. *Imagens da Educação*, v. 4, nº 1, p. 36-42, 2014.
- SOUZA, G. F.; PINHEIRO, N. A. M. Unidades de ensino potencialmente significativas (ueps): identificando tendências e possibilidades de pesquisa / potentially meaningful teaching units (pmtu): identifying trends and research possibilities. *Dynamis (FURB. online)*, v. 25, p. 113-128, 2019. Acesso em 11 ago. 2019. Disponível em: <<https://proxy.furb.br/ojs/index.php/dynamis/article/view/7627/4182>>.
- TERRAZZAN, E. A. A inserção da física moderna e contemporânea no ensino de física na escola de 2º grau. *Caderno Catarinense de Ensino de Física, Florianópolis*, v. 9, n. 3, p. 209-214, 1992. Acesso em 11 jul. 2019.
- TIPLER, P. A.; LLEWELLYN, R. A. *Física Moderna*. [S.l.: s.n.], 2001.
- VALADARES, E. d. C.; MOREIRA, A. M. Ensinando física moderna no segundo grau: Efeito fotoelétrico, laser e emissão de corpo negro. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física, Florianópolis*, v. 15, n. 2, p. 121-135., 1998. Acesso em 11 jul. 2019. Disponível em: <<https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/6896/7584>>.
- VYGOTSKY, L. *A construção do pensamento e da linguagem*. [S.l.: s.n.], 2001.
- VYGOTSKY, L. S. *Pensamento e Linguagem*. [S.l.: s.n.], 1987.
- ZANELLA, L. C. H. *Metodologia da Pesquisa* [S.l.: s.n.], 2013.

A QUESTIONÁRIO DE SONDAGEM DOS PROFESSORES DE FÍSICA

Neste apêndice nós mostramos os dados obtidos através de um questionário realizado na plataforma Google Forms onde obtivemos, sem perda de generalidade, uma visão geral de como é tratada a Física Moderna e Contemporânea na cidade de Boa Vista. Ao todo foram entrevistados 7 escolas em Boa Vista sendo quatro escolas particulares e três escolas públicas.

A.1 Nível máximo de escolaridade

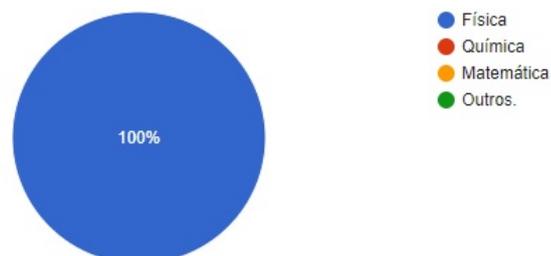
Figura 27 – Nesse gráfico mostramos o nível de formação dos professores que participaram da pesquisa.



Fonte: próprio autor.

A.2 Graduação na área específica

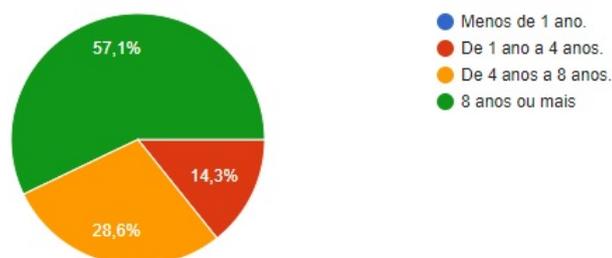
Figura 28 – Nesse gráfico mostramos a formação específica dos professores que participaram da pesquisa. Vemos que em sua totalidade todos são graduados em Física.



Fonte: próprio autor.

A.3 Experiência em sala de aula

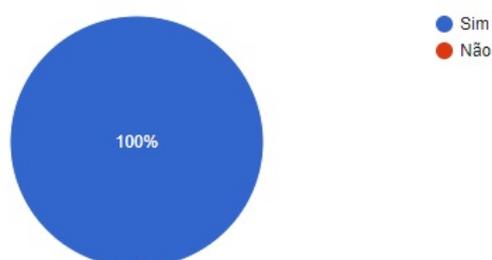
Figura 29 – Nesse gráfico mostramos o tempo de exercício na função de docente em Física. Em sua maioria, os professores que participaram dessa pesquisa tem mais de oito anos na profissão.



Fonte: próprio autor.

A.4 Física Moderna e Contemporânea na formação docente

Figura 30 – Nesse gráfico observa-se que todos os professores envolvidos afirmam ter conhecimento sobre a disciplina de Física Moderna durante seu período de graduação.



Fonte: próprio autor.

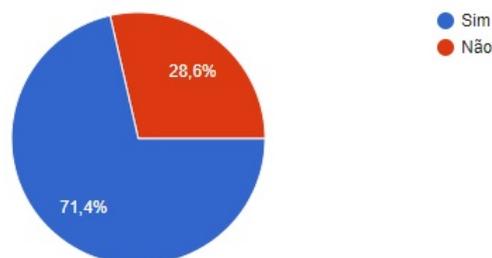
A.5 Importância da Física Moderna e Contemporânea no Ensino Básico

A.6 Física Moderna e Contemporânea lecionada no Ensino Médio

A.7 Considerações sobre o questionário

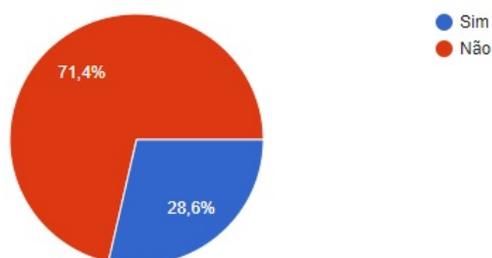
Percebeu-se que, apesar dos professores terem conhecimento do conteúdo de FMC e acharem importante tratar desses conceitos no ensino básico, os mesmos em sua maioria não abordam esse conteúdo no ensino médio. Às vezes por não se sentirem confortáveis quanto ao domínio desse ramo devido a uma má formação

Figura 31 – Nesse gráfico observa-se que 71,4% dos professores envolvidos afirmam que os alunos são capazes de compreender a importância desse ramo da Física, enquanto que 28,6% afirmam que os alunos não são capazes de compreender.



Fonte: próprio autor.

Figura 32 – Nesse gráfico observa-se que 71,4% dos professores envolvidos não lecionam FMC no ensino básico e que apenas 28,6% afirmam que lecionam esse ramo da Física.



Fonte: próprio autor.

durante sua graduação. Outro fato também muito relevante se dá pela grade curricular do Estado de Roraima que retirou este tema, como pode ser visto no arquivo de domínio público disponível em <<https://docs.google.com/viewer?a=v&pid=sites&srcid=ZGVmYXVsdGRvbWFpbmxyYWZlZWxncmVnb3xneDo1MjhlNzJjNmUxMGY1ZTdh>>.

Se considerarmos os avanços tecnológicos atuais, essa posição de retirada da Física Moderna e Contemporânea do currículo do Estado vai de encontro ao acesso e ao desenvolvimento do conhecimento por parte dos alunos. Vale lembrar também que não cabe só ao professor a escolha de quais conteúdos serão ministrados, pois na rede pública o mesmo é norteado pela proposta curricular estadual, enquanto que na rede privada o professor tem como objetivo, além da formação do aluno, resultados positivos no vestibular, o que faz com que o ensino na rede privada perca um pouco do foco do que realmente é a educação.

B PRODUTO EDUCACIONAL

B.1 APRESENTAÇÃO

A Física Moderna e Contemporânea (FMC) está presente no nosso cotidiano e foi graças aos seus estudos que diversos avanços tecnológicos foram possíveis. Hoje temos aparelhos como smartphones, notebooks, GPS, portas que se abrem e fecham sozinhas, lâmpadas de postes que se acendem ao entardecer etc., devido aos progressos alcançados pela Física.

A motivação da criação deste produto educacional foi pelo fato de que os estudantes se sentem curiosos em saber como as coisas funcionam e, por vezes, recorrem ao professor de Física para que ele esclareça suas dúvidas, mas nem sempre o professor está apto a explicar o funcionamento dos equipamentos eletrônicos.

O presente produto educacional tem como objetivo geral elaborar uma sequência didático-pedagógica partindo da utilização de um experimento de baixo custo e fácil realização sobre efeito fotoelétrico buscando a implementação do ensino da física quântica no ensino básico. Os objetivos específicos são: propor metodologias ativas nas aulas de Física; utilizar a metodologia da unidade de ensino potencialmente significativa (UEPS) como recurso facilitador para a ocorrência da aprendizagem significativa; realizar experimentos de baixo custo a fim de inter-relacionar teoria e prática; elaborar maneiras para a construção de um aluno pesquisador desde a educação básica.

A utilização das metodologias ativas surgiu como fator determinante do processo, visto que as aulas expositivas ditas tradicionais já não prendem tanto a atenção do aluno. Quando os alunos participam da aula como sujeitos ativos do próprio conhecimento, a aula se torna mais atrativa e interessante.

Esse produto foi aplicado em 8 horas/aula distribuídas em 4 encontros (2 horas/aula por semana). Na sequência apresentaremos detalhadamente o planejamento e as atividades a serem realizadas nas aulas.

B.2 O PLANO DE AULA

Para que o professor obtenha êxito ao utilizar este produto educacional, o mesmo deverá ler este manual e analisar a aplicabilidade da sequência didática nas suas aulas. Para a realização da Unidade de Ensino Potencialmente Significativa (UEPS) foram necessárias a utilização de 8 (oito) horas/aulas e os métodos avaliativos estão descritos

no decorrer deste manual.

Aula 1: o primeiro passo é definir o tópico a ser abordado. As atividades propostas nessa aula serão realizadas sem a finalidade de avaliar os alunos. O intuito dessa aula é observar seus conhecimentos prévios (subsunçores).

O professor deverá explicar aos alunos que o tema a ser abordado será “o efeito fotoelétrico” e, após uma breve explicação do conteúdo a ser abordado, fará questionamentos acerca do que eles sabem a respeito do tema proposto, registrando as respostas no quadro, a fim de comentá-las em seguida.

Tempo gasto nesse processo: 10 minutos.

O professor deverá confeccionar um experimento de baixo custo e fácil montagem, com a finalidade de mostrar uma das aplicações do efeito fotoelétrico e levantar questionamento dos alunos.

Tal experimento consiste em um sensor LDR (Light-Dependent Resistor) ligado a um resistor ôhmico, a um LED e a uma bateria de 9V através de fios conectores.

Para fins didáticos, o experimento foi montado numa caixa dentro da qual há uma foto de Albert Einstein e na qual se fez um furo por onde os alunos devem observar a imagem que aparecerá dentro da caixa quando houver iluminação. O LED fica dentro da caixa e o LDR fica para fora, conforme a imagem a seguir.

Figura 33 – Experimento sobre o efeito fotoelétrico realizado com a finalidade de investigar os subsunçores dos alunos.



Fonte: próprio autor.

Ao se colocar um dedo sobre o LDR observando o orifício, o LED não acende, pois a falta de iluminação faz com que o LDR tenha uma resistência grande. Ao retirar o dedo, a luz ambiente ilumina o LDR e sua resistência diminui, facilitando a passagem da corrente elétrica e, assim, o LED acenderá e dentro da caixa aparecerá a foto de Albert Einstein. Quanto maior a incidência de luz no LDR, mais intenso será o brilho do LED.

Tempo gasto nesse processo: 15 minutos.

Como se trata de um conteúdo talvez nunca visto, propomos após a realização do experimento a exibição de dois vídeos para que os estudantes possam conhecer um pouco sobre o assunto. Os vídeos são sobre a catástrofe ultravioleta e sobre o Nobel de Einstein. O professor deverá pedir para que os alunos anotem as palavras que acharem mais importantes nos vídeos.

O professor exibirá o vídeo "A Catástrofe Ultravioleta" de 7 minutos disponível em <https://www.youtube.com/watch?v=LKoqBFot_H4> e, após a apresentação do vídeo, discutirá com os alunos as palavras-chaves que eles anotaram.

Tempo gasto nesse processo: 10 minutos.

O professor exibirá o vídeo "O Efeito Fotoelétrico Explicado" de 8min e 2s disponível em <<https://www.youtube.com/watch?v=USGENeYkBd4>> e, após a apresentação do vídeo, discutirá com os alunos as palavras-chaves que eles anotaram.

Tempo gasto nesse processo: 10 minutos.

Como tarefa para casa o professor deverá pedir aos alunos que individualmente construam mapas conceituais sobre a aula, para serem entregues na próxima aula. Esses mapas conceituais servirão para outro passo que será explanado mais adiante.

Aula 2: o segundo passo é criar situações que levem o aluno a externalizar aquilo que sabe sobre o tópico, ou seja, notar a presença de subsunçores.

O professor fará as seguintes perguntas à turma para que respondam no caderno de individualmente:

- O que você já leu, ouviu, ou viu sobre a quantização da energia e o efeito fotoelétrico?
- Onde o Efeito Fotoelétrico pode ser aplicado?
- Em qual ramo da Física se estuda o Efeito Fotoelétrico?
- Como funciona a porta do shopping que abre sozinha quando você chega perto?
- Por que as luzes dos postes acendem sozinhas em determinada hora do dia?
- Como funcionam as placas de energia solar colocadas no telhado e em algumas calculadoras?

Após o término da atividade, as questões deverão ser discutidas com a turma e entregues ao professor no final da aula. O objetivo dessa aula é fazer com que os alunos comessem a compreender o conteúdo tratado.

Tempo gasto nesse processo: 20 minutos.

Aula 3: o terceiro tópico é aprofundamento do conhecimento – Etapa 1: Quantização da energia.

Após a discussão, os alunos deverão realizar individualmente a leitura do texto “Dualidade Onda Partícula da luz” que será entregue pelo professor. Texto disponível em <<https://docente.ifrn.edu.br/caiovasconcelos/downloads/ensino-medio/livro-de-fisica-seed-pr>> da página 207 à página 215 (5 páginas). Após a leitura serão formados grupos de três a quatro alunos para que haja uma discussão sobre o texto.

Tempo gasto nesse processo: 20 minutos.

O professor apresentará uma aula expositiva, com slides e vídeos que tratam do contexto histórico e do desenvolvimento científico que explicam a quantização da energia.

O professor, ao longo da aula, deverá incitar a turma a participar da mesma com comentários acerca dos conteúdos propostos.

Tempo gasto nesse processo: 20 minutos.

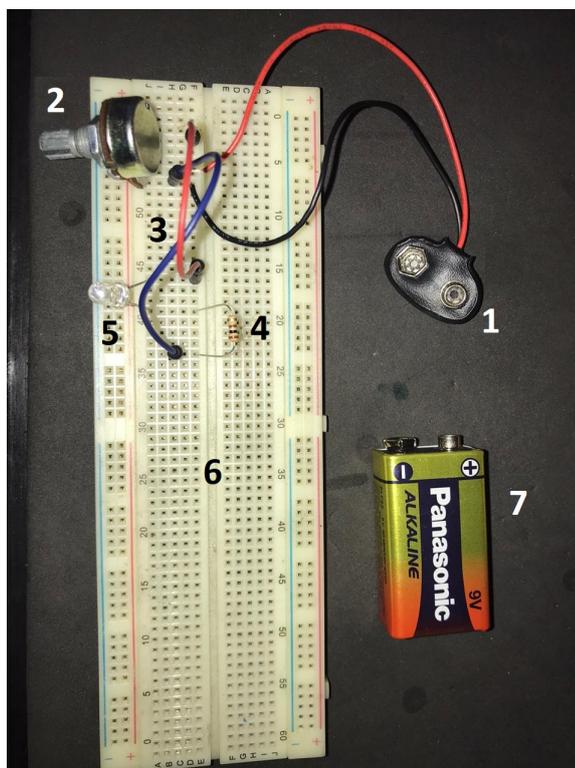
Aula 4: o quarto tópico será uma avaliação individual.

Os alunos deverão montar um experimento voltado para a quantização da energia com a finalidade de se calcular a constante de Planck.

O experimento é composto por:

1. Conector de bateria de 9V.
2. Um potenciômetro.
3. Fios de ligação.
4. Um resistor ôhmico.
5. LED's de diferentes cores.
6. Uma placa *protoboard*.
7. Uma bateria de 9V.

Figura 34 – Experimento sobre quantização de energia com o intuito de medir a constante de Planck.



Fonte: próprio autor.

Observação: o professor poderá modificar o experimento simplificando sua complexidade para se adequar a realidade social do aluno e da escola; a tensão nos terminais do LED será medida com a ajuda de um multímetro.

O experimento consiste em medir a tensão elétrica entre os terminais do LED e calcular a constante de Planck.

Primeiramente, com a ajuda de um voltímetro, o aluno deverá medir a tensão elétrica entre os terminais de um LED, anotando em seguida na tabela abaixo. Utilizando o valor da tensão, calcular a energia, através da equação: $E = Ue$, anotando em seguida o resultado na tabela.

Observação: U = tensão elétrica; e = carga elétrica elementar ($e = 1,6022 \cdot 10^{-19}C$).

Enfim, o aluno deverá calcular a constante de Planck através da equação: $E = hf$, anotando em seguida o resultado obtido na tabela.

Observação: E = energia; h = constante de Planck; f = frequência (depende de cada cor).

COR DO LED	TENSÃO ELÉTRICA	ENERGIA $E = Ue$	FREQUÊNCIA	CONSTANTE DE PLANCK h
Azul				
Verde				
Amarelo				
Vermelho				

O professor deverá entregar aos alunos uma folha de papel milimetrado e pedir para que eles construam um gráfico de energia em função da frequência para cada cor de LED.

Será observado que a constante de Planck será dada pela tangente do gráfico após o ajuste pelo método dos mínimos quadrados.

Tempo gasto nesse processo: 50 minutos.

Aula 5: o quinto tópico será a apresentação de uma nova situação – Etapa 2: O efeito fotoelétrico. A aula deverá ser iniciada com uma discussão sobre o experimento da aula anterior.

Após, deverá ser exibido um vídeo de um experimento sobre efeito fotoelétrico, “Tema 01 - Luz | Experimentos - Efeito fotoelétrico” de 2min 54s disponível em <<https://www.youtube.com/watch?v=VVka6Mp5vyA&t=78s>>, sem o áudio, para que a turma tente explicar o que acontece no experimento.

Após a discussão, o vídeo deve ser passado novamente com o áudio a fim de que eles possam tentar correlacionar com o experimento proposta na aula anterior. E após esta etapa, o professor retorna com uma aula expositiva para sistematização e aprofundamento do tema efeito fotoelétrico.

Tempo gasto nesse processo: 30 minutos.

Ao final da aula deverá ser realizada uma atividade no modelo de questionário com perguntas e respostas no estilo de verdadeiro (V) ou falso (F) que servirá como avaliação qualitativa e quantitativa. Não haverá nessa aula a discussão das respostas.

- Questionário:

1. Entre os vários trabalhos científicos desenvolvidos por Albert Einstein, destaca-se o efeito fotoelétrico, que lhe rendeu o Prêmio Nobel de Física de 1921. Sobre esse efeito, amplamente utilizado em nossos dias, assinale (V) para verdadeiro ou (F) para falso:

() Trata-se do fenômeno que pode gerar uma corrente elétrica quando a luz incide em um material, essa corrente produzida é proporcional a intensidade da radiação luminosa.

() É o princípio que explica o funcionamento das lâmpadas incandescentes, nas quais, por ação da corrente elétrica que percorre o seu filamento, é produzida luz.

() O Efeito fotoelétrico ocorre quando a luz atinge um metal e a carga elétrica do fóton é absorvida pelo metal, produzindo corrente elétrica.

() É o efeito que explica o fenômeno da faísca observado quando existe uma diferença de potencial elétrico suficientemente grande entre dois fios metálicos próximos.

() Corresponde à ocorrência da emissão de elétrons quando a frequência da radiação luminosa incidente no metal for maior que um determinado valor, o qual depende do tipo de metal em que a luz incidiu.

() A energia mínima necessária para excitar um elétron num material é denominada Função Trabalho e é a mesma para materiais diferentes.

GABARITO: F F F F V F

2. Denomina-se de efeito fotoelétrico o fenômeno que consiste na liberação de elétrons pela superfície de um material quando esse é exposto a uma radiação eletromagnética como a luz. O fenômeno foi explicado por Einstein em 1905, quando admitiu que a luz é constituída por quanta de luz cuja energia é dada por $E = hf$, sendo h a constante de Planck e f a frequência da luz. Das seguintes afirmativas, assinale (V) para verdadeiro ou (F) para falso:

() O efeito fotoelétrico acontece independentemente da frequência da luz incidente na superfície metálica.

() A teoria do efeito fotoelétrico afirma que, aumentando a frequência da luz incidente na superfície metálica, é possível arrancar prótons da superfície do metal.

() O efeito fotoelétrico fornece evidência corpuscular da luz.

() Considerando que, no vácuo, o comprimento de onda da luz vermelha é maior do que o comprimento de onda da luz azul, a energia dos quanta de luz vermelha é maior do que a energia dos quanta da luz azul.

() Quando uma luz monocromática incide sobre uma superfície metálica e não arranca elétrons dela, basta aumentar a sua intensidade para que o efeito fotoelétrico ocorra.

GABARITO: F F V F F

3. O efeito fotoelétrico foi descoberto por Hertz no final do século XIX, e a explicação do fenômeno foi dada por Einstein no começo do século XX. Com base nessa explicação, dadas as afirmativas abaixo, assinale (V) para verdadeiro ou (F) para falso:

- A energia contida no fóton depende da frequência da radiação incidente.
- A radiação, ao incidir sobre uma superfície metálica, pode arrancar elétrons desta.
- A energia cinética do elétron arrancado de uma superfície depende da intensidade da radiação incidente.

GABARITO: V V F

4. Considere as afirmações a seguir com relação ao efeito fotoelétrico, assinando (V) para verdadeiro ou (F) para falso:

- A energia cinética do elétron emitido pelo material depende da intensidade da radiação incidente.
- O efeito fotoelétrico somente ocorre quando há incidência de elétrons sobre uma superfície metálica.
- A quantidade de elétrons emitidos pelo material depende da intensidade da luz incidente.
- A menor energia cinética do elétron emitido pelo material é igual a zero.

GABARITO: F F V V

5. Alguns dispositivos funcionam tendo como base o efeito fotoelétrico, que consiste na ejeção de fotoelétrons de uma superfície metálica devido à incidência de radiação eletromagnética, atuando como uma chave em diversos circuitos. Assinale (V) para verdadeiro ou (F) para falso sobre os aparelhos que fazem o uso dessa tecnologia:

- a guitarra elétrica, uma vez que o dedilhar do guitarrista produz radiação eletromagnética, gerando corrente elétrica que, por fim, produz o som.
- os controles remotos que, ao serem pressionados, produzem radiação eletromagnética fazendo com que os circuitos internos do aparelho de televisão passem a funcionar.
- a porta dos elevadores, sendo que pessoas ou objetos funcionam como uma chave, pois, ao entrarem ou saírem, interrompem a radiação eletromagnética fazendo com que a porta fique aberta.
- as máquinas fotográficas, nas quais, ao apertar o botão para tirar uma fotografia, fecha-se um circuito e dispara-se um flash que nada mais é que radiação eletromagnética.
- a lâmpada fosforescente na qual, devido à alta temperatura (em torno de 2000°C) as ondas de calor arrancam os elétrons do filamento, produzindo o brilho característico.

() A partir do efeito fotoelétrico tornou-se possível o cinema falado, uma célula fotoelétrica permite reconstituir os sons registrados nas películas do cinematógrafo assim como a transmissão de imagens animadas (televisão).

() Óculos de visão noturna de otimização de imagem que possuem um tubo intensificador de imagem no qual ocorre o efeito fotoelétrico.

() Relé fotoelétrico: dispositivo que faz acender e apagar as luzes dos postes de iluminação pública.

GABARITO: F F V F F V V V

Tempo gasto nesse processo: 30 minutos.

Aula 6: o sexto tópico será a comparação dos mapas conceituais

Em sala o professor deverá propor a comparação dos mapas conceituais feitos na primeira aula e os feitos na última aula, como atividade para casa. Desta forma, pode-se observar a construção de um conhecimento mais elaborado a partir de uma discussão dos erros e acertos dos mapas conceituais, quando comparados.

Tempo gasto nesse processo: 40 minutos.

Aula 7: a sétima etapa será feita um experimento avaliativo: utilização da simulação PhET para explicar o efeito fotoelétrico como ferramenta para aplicação de atividade com os alunos (avaliação individual).

Fonte: próprio autor.

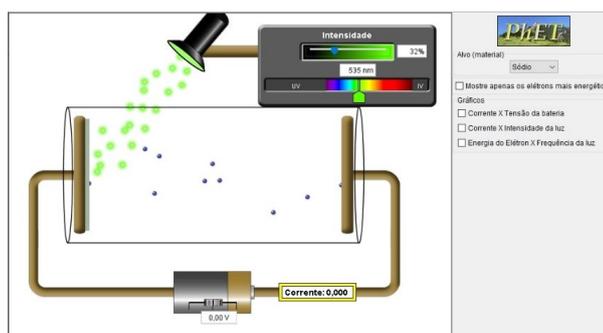
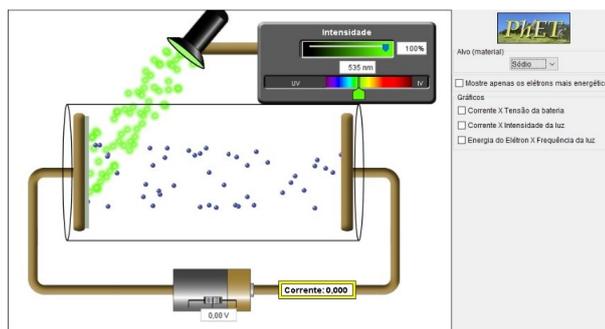


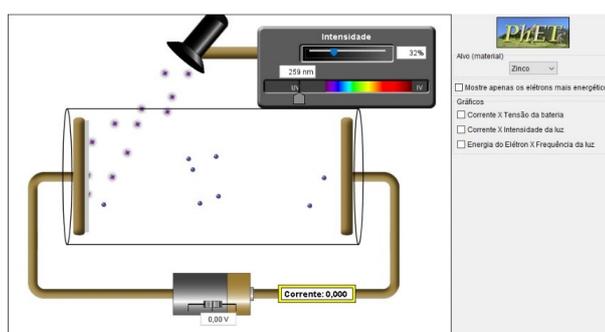
Figura 35 – Simulador PhET incidindo radiação na cor verde (comprimento de onda de $535nm$) e intensidade de 32% numa placa de sódio.

Figura 36 – Simulador PhET incidindo radiação na cor verde (comprimento de onda de $535nm$) e intensidade de 100% numa placa de sódio.



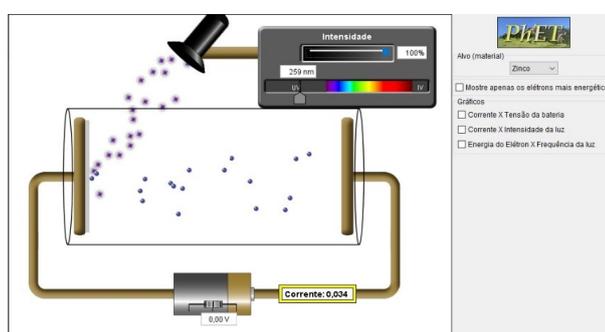
Fonte: próprio autor.

Figura 37 – Simulador PhET incidindo radiação ultravioleta (comprimento de onda de $259nm$) e intensidade de 32% numa placa de zinco.



Fonte: próprio autor.

Figura 38 – Simulador PhET incidindo radiação ultravioleta (comprimento de onda de $259nm$) e intensidade de 100% numa placa de zinco.



Fonte: próprio autor.

O professor deverá antes da aula prática no laboratório de informática da escola instalar a simulação PhET sobre efeito fotoelétrico disponível em <https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/legacy/photoelectric>. É uma ferramenta gratuita e de apenas 3,1 MB.

O aluno deverá clicar em “opções” e selecionar “mostre os fótons” e aumentar a “intensidade” até que se observe os elétrons sendo arrancados no material.

Deverá ser pedido aos alunos que calculem a função trabalho de determinados materiais ao realizarem a simulação.

O procedimento seguirá as seguintes etapas:

- O aluno deverá encontrar na simulação o comprimento de onda máximo necessário para que os elétrons fiquem na iminência de serem arrancados ($E_c = 0$), anotando em seguida os valores na tabela abaixo:

Figura 39 – Tabela para adicionar o comprimento de onda máximo necessário para que os elétrons fiquem na iminência de serem arrancados.

MATERIAL	COMPRIMENTO DE ONDA (λ) 10^{-9} m
Sódio (Na)	
Zinco (Zn)	
Cobre (Cu)	
Platina (Pt)	
Cálcio (Ca)	
Magnésio (Mg)	

Fonte: próprio autor.

- Com o valor do comprimento de onda, o aluno deverá calcular a frequência de corte através da equação $c = \lambda f_0$, observando que $c =$ velocidade da luz no vácuo ($3 \cdot 10^8 m/s$), anotando em seguida os valores na tabela abaixo:

Figura 40 – Tabela para adicionar a frequência de corte.

MATERIAL	FREQUÊNCIA DE CORTE (f_0) Hz
Sódio (Na)	
Zinco (Zn)	
Cobre (Cu)	
Platina (Pt)	
Cálcio (Ca)	
Magnésio (Mg)	

Fonte: próprio autor.

- Com o valor da frequência de corte (f_0), deverá calcular a função trabalho (ϕ) através da equação $\phi = hf_0$ observando que h é a constante de Planck ($h = 4,14 \cdot 10^{-15} eV.s$), anotando em seguida os valores na tabela abaixo:

A avaliação nessa parte do estudo será realizada de maneira quantitativa.

Figura 41 – Tabela para adicionar a função trabalho (ϕ).

MATERIAL	FUNÇÃO TRABALHO (ϕ) eV
Sódio (Na)	
Zinco (Zn)	
Cobre (Cu)	
Platina (Pt)	
Cálcio (Ca)	
Magnésio (Mg)	

Fonte: próprio autor.

Tempo gasto nesse processo: 40 minutos.

Com a finalidade de se avaliar qualitativamente os alunos, os seguintes questionamentos deverão ser respondidos por eles:

- Para qualquer comprimento de onda se observam elétrons sendo arrancados do material? Justifique sua resposta.

Resposta esperada: Não, cada material tem um comprimento de onda máximo o qual há a ejeção de elétrons do material.

- O que acontece quando alteramos o comprimento de onda?

Resposta esperada: ao aumentarmos o comprimento de onda não há ejeção de elétrons, somente com comprimentos de onda menores se observa o fenômeno acontecendo.

- Caso elétrons estejam sendo arrancados, o que acontece se aumentarmos a intensidade luminosa?

Resposta esperada: a quantidade de elétrons arrancados aumenta.

- O que acontece quando aumentamos a tensão elétrica (V)?

Resposta esperada: a energia cinética dos elétrons aumenta.

- O que acontece quando utilizamos uma tensão elétrica negativa (-V)?

Resposta esperada: os elétrons são arrancados, mas retornam ao material.

Tempo gasto nesse processo: 10 minutos.

Aula 8: avaliação das UEPS em sala de aula.

O professor deverá fazer uma análise qualitativa e quantitativa das respostas das avaliações.

Durante a aula o professor deverá discutir com os alunos sobre o efeito fotoelétrico e suas aplicações, observando a participação de cada um durante a aula.

Será uma aula de revisão geral do conteúdo a fim de observar a presença de aprendizagem significativa nos alunos. Para isso, deve ser levado em conta a participação de cada aluno nos tópicos desenvolvidos em sala de aula e nas tarefas realizadas em casa.

B.3 PROPOSTA PARA AULA EXPOSITIVA

Essa parte do produto educacional tem a finalidade de servir como base para o professor ao utilizar o presente trabalho. Trata-se de um guia-aula abordando o desenvolvimento histórico e científico abordando o problema da quantização da carga elétrica e da energia culminando na explicação dada por Albert Einstein ao efeito fotoelétrico.

B.3.1 Quantização da Carga Elétrica e o Experimento de Millikan

Foi na antiguidade, através do filósofo grego Demócrito e seu mestre Leucipo, que surgiu a ideia de que a matéria era constituída de pequenas partículas chamadas átomos. Muitos anos se passaram até que Avogadro, em 1811, formulou a hipótese de que todos os gases a certa temperatura possuem o mesmo número de moléculas por unidade de volume, o que permitiu explicar quantitativamente várias propriedades da matéria, ficando assim estabelecida que a matéria não é contínua, mas sim quantizada, ou seja, formada por certas quantidades de partículas (TIPLER; LLEWELLYN. 2001).

B.3.1.1 Quantização da carga elétrica

Faraday foi o primeiro físico a estimar a ordem de grandeza das cargas elétricas associadas aos átomos. Em um de seus experimentos, Faraday fez com que uma corrente contínua atravessasse soluções fracamente condutoras e, ao observar o resultado, percebeu que parte dos componentes da solução havia ficado depositada nos eletrodos (TIPLER; LLEWELLYN. 2001).

Analisando quantitativamente o fenômeno descrito, Faraday descobriu que a quantidade de eletricidade (F , denominada Faraday) que é igual a 96.500 C aproximadamente, decompõe sempre 1 átomo-grama (massa que contém um número de átomos igual ao número de Avogadro N_A) de um íon monovalente.

$$F = N_A e \quad (\text{B.1})$$

Onde e é a carga elementar (o valor da carga elétrica de um elétron ou de um próton).

Essa equação é denominada Lei de Faraday para a eletrólise.

Partindo dessa equação, Faraday percebeu que a carga elétrica, assim como a matéria, não era contínua, mas sim formada por partículas com um valor mínimo de carga (TIPLER; LLEWELLYN. 2001).

B.3.1.2 O Experimento de Millikan

Em 1909, o cientista R. A. Millikan realizou uma série de experimentos tentando demonstrar o valor da carga elementar e utilizando gotas de óleo que eram borrifadas no ar seco entre as placas de um capacitor. Ao atritar as gotas de óleo no bico do borrifador, elas adquiriam através da eletrização por atrito certa carga elétrica.

Para evitar o ganho ou perda de algumas unidades carga, mudou-se a polaridade do campo entre as placas, a fim de observar o comportamento das gotas durante um longo intervalo de tempo.

Millikan percebeu que a velocidade terminal da gota era proporcional à força que atuava sobre ela, chegando dessa maneira à conclusão de que as cargas sempre ocorriam em valores múltiplos de uma unidade fundamental: $1,601 \cdot 10^{-19}C$ (TIPLER; LLEWELLYN. 2001).

Millikan repetiu a experiência com diversas substâncias, dentre elas um óleo isolante, a glicerina que é semicondutora e o mercúrio que é condutor, e obteve sempre o mesmo resultado para o valor de e .

B.3.2 Radiação do Corpo Negro

De acordo com Eisberg e Resnick (1994), radiação térmica é a radiação emitida pelo corpo devido a sua temperatura. Todo corpo emite e absorve radiações do meio que o envolve. O corpo de maior temperatura cede energia para o corpo de menor temperatura até atingirem o equilíbrio térmico, quando as taxas de emissão e absorção se igualam.

Segundo Tipler e Llewellyn (2001) a energia cinética dos átomos que constituem um corpo é aumentada ao absorver radiação. Eisberg e Resnick (1994), afirma que em seu estado condensado (sólido ou líquido) a matéria emite um espectro contínuo de radiação. Tal espectro é dependente da temperatura em que o corpo se encontra.

Um aparelho chamado pirômetro óptico é que relaciona a temperatura de um corpo ao espectro de frequência de radiação emitida por ele. Essa frequência depende da composição química desse corpo.

Para Nussenzveig (2010) ao observarmos através de um pequeno orifício o que acontece no interior de um forno em equilíbrio térmico ao deixar escapar um feixe de radiação eletromagnética, podemos determinar seu espectro experimentalmente.

De acordo com Tipler e Llewellyn (2001, p. 83), “um corpo que absorve toda radiação incidente é chamado de corpo negro ideal”. Corpos que emitem espectros térmicos de caráter universal, independente da sua composição, são chamados de

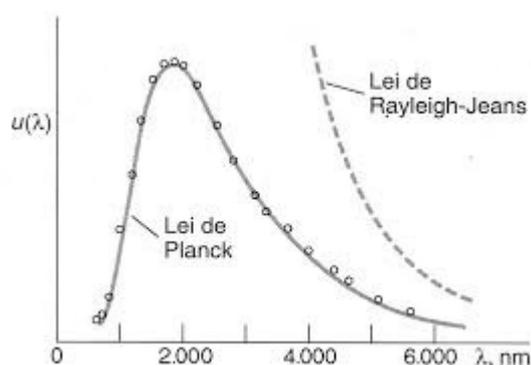
corpos negros. Eisberg e Resnick (1994) afirma que esses corpos conseguem absorver toda radiação que incide sobre suas superfícies. Todos os corpos negros à mesma temperatura emitem radiação térmica com o mesmo espectro.

Perez (2016) diz que Kirchhoff, em 1859, havia proposto o conceito de corpo negro como sendo um corpo ideal capaz de absorver toda a radiação incidente sobre ele. Um corpo negro é a idealização de um objeto que absorve toda radiação eletromagnética que incide sobre ele, a reemitindo depois. O espectro de radiação de um corpo negro depende somente da temperatura do corpo.

No final dos anos de 1800 e início dos anos 1900 a emissão de radiação já havia sido estudada por Lord Rayleigh e Sir James Jeans que estavam interessados em modelar essa radiação a partir de dados experimentais existentes, porém utilizando a Física Clássica. Esse modelo concordava com os dados experimentais apenas em baixas frequências. Segundo Eisberg e Resnick (1994), o cálculo da densidade de energia feito por Rayleigh e Jeans mostrou uma divergência entre a física clássica e os resultados experimentais.

Esse modelo preveria que a temperatura aumentaria sempre que a frequência aumentasse, porém, dados experimentais mostraram que, com o aumento da temperatura, a frequência diminuía. De acordo com Eisberg e Resnick (1994, p. 31), “a densidade de energia vai a zero para frequências muito altas”. Esses problemas ficaram conhecidos como “a catástrofe do ultravioleta”.

Figura 42 – Correção de Planck representada pela linha sólida com relação à Lei de Rayleigh-Jeans representada pela linha tracejada.



Fonte: Tipler; Llewellyn. (2001)

B.3.2.1 A quantização da Energia de Planck

Em 1900 o físico alemão Max Planck se deparou o problema dos corpos negros e passou a tentar resolvê-lo. Antes de Planck, os átomos que compunham os corpos

negros poderiam ser representados como pequenas molas que oscilavam com determinada frequência (osciladores harmônicos simples). Essa frequência era a frequência da radiação absorvida e depois reemitida pelo átomo na forma de luz. Esses osciladores poderiam oscilar com qualquer energia.

Segundo Perez (2016), no final do ano de 1900, no encontro da Sociedade Alemã de Física, Planck apresentou um estudo a respeito da Lei de Wien para a radiação do corpo negro, propondo que os osciladores contribuiriam com uma energia discretizada.

De acordo com Nussenzveig (2010), Planck postulou que a troca de energia entre a radiação e os “osciladores” deveria ser quantizada, ou seja, só poderia haver emissão ou absorção de energia em múltiplos inteiros de um “quantum de energia”.

$$E = h\nu , \quad (\text{B.2})$$

sendo E a energia do fóton, h a constante de Planck e ν a frequência da luz incidente.

Ao solucionar o problema de por que o brilho do carvão em brasa é vermelho e não azul, o físico alemão Max Planck deu início a uma revolução que levou ao nascimento da física quântica. Buscando descrever tanto a luz quanto o calor em suas equações, ele segmentou a energia em pequenos pacotes, ou quanta, e durante esse processo explicou por que corpos aquecidos emitem tão pouca luz ultravioleta (Baker, 2013, p. 10).

Segundo Eisberg e Resnick (1994), Planck contribuiu grandemente para a resolução do problema quando descobriu que poderia tratar a energia como se ela fosse uma variável discreta e não contínua como se acreditava até então.

Planck postulou que os corpos negros eram formados por esses pequenos osciladores que absorviam radiação e oscilavam com determinada energia. Essa energia era a mesma da radiação emitida, mas somente admitiam valores múltiplos de um certo número, resolvendo assim o problema da catástrofe ultravioleta. Esse postulado foi chamado de “quantização da energia”.

De acordo com Piza (2009), Planck supôs que um corpo negro emitia energia sob a forma de radiação eletromagnética com a frequência ν e essa emissão estava associada a porções discretas, as quais chamou de quanta, de intensidade proporcional à frequência (ν).

Segundo Tipler e Llewellyn (2001), Planck propôs que a energia das cargas oscilantes (da radiação emitida) era uma variável discreta que admite apenas valores múltiplos inteiros da energia e não contínua como se acreditava até então.

Somente em 1905 Einstein usou as ideias de Planck para explicar o efeito fotoelétrico, propondo ainda que a quantização era uma característica fundamental da energia luminosa.

B.3.3 O Efeito Fotoelétrico

Ao incidirmos radiação sobre uma superfície metálica, poderá haver a emissão de elétrons dessa superfície, dependendo da energia da radiação incidente. Em 1887 Hertz realizou um experimento para produzir e detectar ondas eletromagnéticas e acabou por confirmar assim a teoria ondulatória da luz de Maxwell. No mesmo experimento, acabou por observar o efeito fotoelétrico que, mais tarde, ajudaria na descrição da luz como partícula. (TIPLER; LLEWELLYN, 2001).

Tal experimento consistia em dois eletrodos entre os quais, através de uma descarga oscilante, saltava uma faísca a fim de gerar ondas eletromagnéticas que eram detectadas através de outra faísca por entre eletrodos de uma antena ressonante. Hertz acabou observando que a faísca, quando exposta à luz (violeta e ultravioleta), saltava mais facilmente. (NUSSENZVEIG, 2010). Como descrito por Nussenzveig (2010, p. 249), "ao comprovar a teoria de Maxwell, Hertz estava descobrindo o efeito fotoelétrico, uma das primeiras evidências experimentais da quantização".

Philipp Lenard, um assistente de Hertz, voltou ao laboratório. Ele reduziu o gerador de centelha a sua forma básica: duas superfícies de metal posicionadas no vácuo dentro de um tubo de vidro. As placas internas estavam separadas, mas conectadas do lado de fora do tubo por um cabo e um amperímetro para formar um circuito elétrico. Lenard apontou luzes de diferentes brilhos e frequências para a primeira placa, enquanto mantinha a segunda no escuro. Quaisquer elétrons expelidos da primeira placa voariam pela lacuna e atingiriam a segunda, completando o circuito e fazendo uma pequena corrente fluir. (BAKER, 2015).

Outros físicos como Robert Millikan testaram raios de diversas cores para tentar visualizar o efeito acontecer, porém perceberam que a luz vermelha não era capaz de arrancar elétrons das placas metálicas, independentemente da intensidade da radiação. Perceberam então que cada metal tinha uma "frequência de corte", abaixo da qual o fenômeno não se observava. Acima da frequência de corte, quanto maior a frequência da luz, maior a energia com que os elétrons eram arrancados da placa. (BAKER, 2015).

Como descrito por Perez (2016, p. 30), "esse fenômeno [...] foi explicado por Einstein em 1905. Segundo ele, a luz era composta de partículas – os fótons – que carregavam energia respeitando a relação: $E = h\nu$ ".

A explicação para o efeito fotoelétrico se dá, segundo Halliday, et al. (2009, p.180), da seguinte maneira: "quando iluminamos a superfície de um metal com um

raio luminoso de comprimento de onda suficientemente pequeno, a luz faz com que elétrons sejam emitidos pelo metal". Na visão de Eisberg e Resnick (1994, p. 51), "a emissão de elétrons de uma superfície, devido à incidência de luz sobre essa superfície, é chamada de efeito fotoelétrico".

A energia cinética máxima do fotoelétrons mais rápido não depende da intensidade da luz incidente e é dada pela diferença de potencial V multiplicada pela carga do elétron e :

$$E_{cmax} = eV_0 \quad (\text{B.3})$$

De acordo com Tipler e Llewellyn (2001), os experimentos mostraram que a diferença de potencial V_0 não depende da intensidade da luz incidente, o que teria deixado os cientistas surpresos, pois isso estava em desacordo com a teoria clássica.

De acordo com Eisberg e Resnick (1994), existem 3 aspectos principais do efeito fotoelétrico que a teoria ondulatória clássica da luz não conseguem explicar:

1. a intensidade da luz incidente deveria influenciar na energia cinética dos fotoelétrons;

2. o efeito fotoelétrico deveria ocorrer para qualquer frequência de luz, porém experimentalmente se comprovou que existe uma frequência de corte para cada superfície;

3. Deveria haver um intervalo de tempo mensurável entre o instante em que a luz começa a incidir sobre a superfície e o instante do fotoelétron ser ejetado e durante esse tempo o fotoelétron deveria absorver energia do feixe de luz incidente até que houvesse acumulado energia o bastante para escapar, porém esse intervalo de tempo nunca foi medido.

Segundo Tipler e Llewellyn (2001), Einstein propôs que a quantização da energia que Planck usara na resolução do problema do corpo negro deveria ser uma característica universal da luz.

Para Einstein a luz é constituída por quantas isolados de energia $E = h\nu$. Quando um desses quanta (chamados de fótons) chega no cátodo, toda sua energia é transferida para um único elétron.

Seja ϕ (função trabalho) a energia necessária para mover um elétron da superfície, a energia cinética máxima dos elétrons emitidos pelo cátodo é dada por:

$$E_{cmax} = eV_0 = h\nu - \phi \quad (\text{B.4})$$

A equação é chamada de equação do efeito fotoelétrico.

Em 1921, Albert Einstein ganhou o prêmio Nobel devido a teoria do Efeito Fotoelétrico.

C MANUAL DE MONTAGEM DOS EXPERIMENTOS

C.1 Experimento com LDR

O LDR, em Inglês: Light-Dependent Resistor, é um resistor dependente de luz. A resistência oferecida pelo foto-resistor varia de acordo com a intensidade da luz que sobre ele incide.

Aumentando-se a intensidade luminosa sobre o sensor LDR a resistência elétrica diminuirá, logo, maior será a intensidade de corrente elétrica; diminuindo-se a intensidade luminosa sobre o sensor LDR, resistência elétrica irá aumentar, logo, menor será a intensidade de corrente elétrica.

Para a montagem do experimento serão necessários:

1. Conector de bateria de 9V.
2. Um LED.
3. Um resistor ôhmico.
4. Um LDR.
5. Uma bateria de 9V.

Fonte: próprio autor.

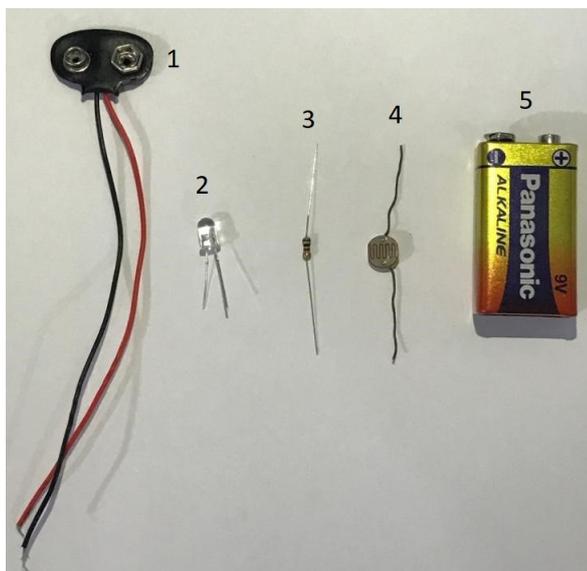


Figura 43 – Experimento sobre o efeito fotoelétrico realizado com a finalidade de investigar os subsunçores dos alunos.

Para a montagem do experimento, deve-se seguir os seguintes passos:

- Conecte o fio vermelho (que será conectado ao polo positivo da bateria de 9V) a uma das extremidades do resistor ôhmico;
- Conecte a outra extremidade do resistor ôhmico ao polo positivo do LED (perna maior).
- Conecte o polo negativo do LED (perna menor) a uma das extremidades do LDR.
- Conecte a outra extremidade do LDR ao fio preto (que será conectado ao polo negativo da bateria de 9V).

A imagem a seguir mostra os componentes conectados.

No LDR acontece o efeito fotoelétrico interno: processo no qual há a transformação de energia luminosa em energia elétrica. Esse dispositivo é utilizado em fotômetros (para avaliar a intensidade da iluminação a partir da corrente elétrica), em pilhas solares que são utilizadas em foguetes espaciais e em alguns tipos de calculadoras portáteis. Na sua composição há materiais semicondutores.

Os fótons que incidem nesses materiais quebram as ligações covalentes, aumentando assim o número de elétrons livres no material, alterando sua resistência e, conseqüentemente, a intensidade de corrente elétrica do circuito.

O experimento foi montado numa caixa dentro da qual há uma foto de Albert Einstein.

Fonte: próprio autor.



Figura 44 – Experimento sobre o efeito fotoelétrico realizado com a finalidade de investigar os subsunçores dos alunos.

Na parte dianteira da caixa se fez um furo por onde os alunos devem observar a imagem que aparecerá dentro da caixa quando houver iluminação (fotografia de Albert Einstein com a língua para fora).

O LED fica dentro da caixa e o LDR fica para fora, conforme a imagem a seguir.

Fonte: próprio autor.



Figura 45 – Experimento montado.

Ao se colocar um dedo sobre o LDR observando o orifício, o LED não acende, pois a falta de iluminação faz com que o LDR tenha uma resistência grande. Ao retirar o dedo, a luz ambiente ilumina o LDR e sua resistência diminui, facilitando a passagem da corrente elétrica e, assim, o LED acenderá e dentro da caixa aparecerá a foto de

Albert Einstein. Quanto maior a incidência de luz no LDR, mais intenso será o brilho do LED.

C.2 Experimento para medir a constante de Planck

O experimento é composto por:

1. Conector de bateria de 9V.
2. Um potenciômetro.
3. Fios de ligação.
4. Um resistor ôhmico.
5. LED's de diferentes cores.
6. Uma placa *protoboard*.
7. Uma bateria de 9V.

Em uma placa de teste (*protoboard*) conectamos o potenciômetro. Sua extremidade da direita (olhando o potenciômetro de frente) é conectada em série (na mesma linha da *protoboard*) ao terminal negativo da bateria (fio preto). O pino central do potenciômetro é ligado em série com o terminal positivo (fio vermelho) da bateria.

Conecta-se o LED na *protoboard*. O terminal positivo do LED (Anodo, ou perna maior) é conectado em série com a extremidade esquerda (ainda não utilizada) do potenciômetro (olhando o mesmo de frente).

O terminal negativo do LED (catodo ou perna menor) é conectado em série com uma das pernas de um resistor (que depende da cor do LED utilizado). A outra perna do resistor é ligada em série, através de um fio azul, com o terminal negativo da bateria (e extremidade direita do potenciômetro visto de frente).

A montagem ficará como se segue:

Fonte: próprio autor.

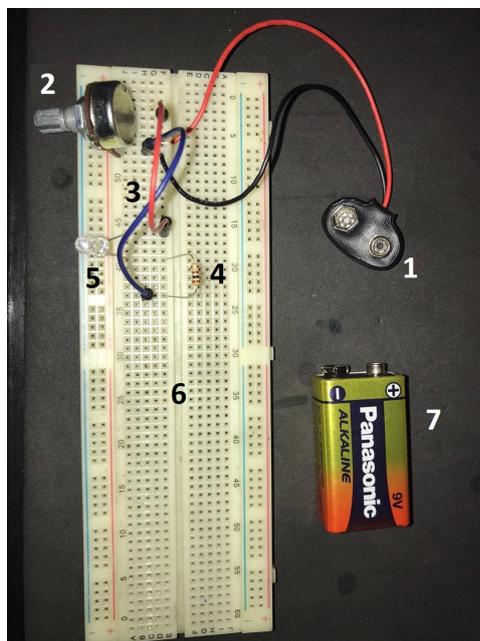


Figura 46 – Experimento para o cálculo da constante de Planck.

D FORMULÁRIO DE AVALIAÇÃO DOS EDUCANDOS

D.1 Formulário de avaliação dos educandos - 1ª aplicação

1. O que você achou do primeiro encontro com essa nova metodologia?
() Ainda não posso concluir nada () Ruim
() Satisfatório () Ótimo/Excelente
2. Na sua visão, qual poderia ser considerado um ponto forte dessa proposta?
3. Na sua visão, qual poderia ser considerado um ponto fraco dessa proposta?
4. Qual a sua expectativa com relação as próximas aulas?
5. Você poderia identificar alguma diferença entre essa aula e as aulas anteriores à aplicação dessa nova metodologia?
() Não () Sim
6. Se sim, quais seriam elas?

D.2 Formulário de avaliação dos educandos - 2ª aplicação

1. O que você achou dessa nova metodologia?
() Continuo sem concluir nada () Ruim
() Satisfatório () Ótimo/Excelente
2. Na sua visão, quais foram os pontos fortes dessa proposta?
3. Na sua visão, quais foram os pontos fracos dessa proposta?
4. As aulas utilizando essa nova proposta metodológica atenderam as suas expectativas? Poderia citar alguma expectativa atendida?
5. Você poderia identificar alguma diferença entre essa aula e as aulas anteriores à aplicação dessa nova metodologia?
() Não () Sim
6. Se sim, quais seriam elas?