



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

Instituto de Física

Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física

Mestrado Profissional em Ensino de Física

**UMA ABORDAGEM EXPERIMENTAL PARA O ENSINO DE DUALIDADE
ONDA-PARTÍCULA NO ENSINO MÉDIO**

João Gabriel Milare Manzolillo

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, Instituto de Física, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Orientadora:

Lúcia Helena Coutinho

Rio de Janeiro
Novembro de 2024

UMA ABORDAGEM EXPERIMENTAL PARA O ENSINO DE DUALIDADE
ONDA-PARTÍCULA NO ENSINO MÉDIO.

João Gabriel Milare Manzolillo

Orientadora:
Lúcia Helena Coutinho

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, Instituto de Física, da Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Aprovada por:

Dra. Lúcia Helena Coutinh, UFRJ, interna (Presidente)

Dr. Antônio Carlos Fontes dos Santos, UFRJ, interno

Dra. Camilla Ferreira de Sá Codeço, UFRJ, externa

Rio de Janeiro
Novembro de 2024

FICHA CATALOGRÁFICA

CIP - Catalogação na Publicação

M296a Manzolillo, João Gabriel
 Uma abordagem experimental para o ensino de
 dualidade onda-partícula no Ensino Médio / João
 Gabriel Manzolillo. -- Rio de Janeiro, 2024.
 141 f.

 Orientadora: Lúcia Helena Coutinho.
 Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do
 Rio de Janeiro, Instituto de Física, Programa de Pós
 Graduação em Ensino de Física, 2024.

 1. Ensino de física. 2. Física moderna . 3.
 Dualidade onda-partícula. 4. Experimentação. 5.
 Ensino de física moderna. I. Coutinho, Lúcia Helena,
 orient. II. Título.

Elaborado pelo Sistema de Geração Automática da UFRJ com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a), sob a responsabilidade de Miguel Romeu Amorim Neto - CRB-7/6283.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

De maneira especial, agradeço pela orientação, paciência, inspiração e dedicação da minha orientadora Lúcia Helena Coutinho. Pelos cuidados, pela educação e pela inspiração dos meus pais Milana Ribeiro Milare e Marcio Bruno Hingst Manzolillo. Pelo carinho, amor, e apoio da minha noiva Laura Monteiro Gomes. E pelo companheirismo e parceria dos meus irmãos José Guilherme Milare Manzolillo e Pedro Lucas Milare Manzolillo.

Dedico a escrita desta dissertação aos meus familiares e amigos que me deram apoio ao longo dessa jornada. Aos colegas do MPEF que comigo trilharam este caminho e aos professores que me conduziram no mesmo.

RESUMO

UMA ABORDAGEM EXPERIMENTAL PARA O ENSINO DE DUALIDADE ONDA-PARTÍCULA NO ENSINO MÉDIO.

João Gabriel Milare Manzollilo

Orientadora:
Lúcia Helena Coutinho

Resumo da Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, Instituto de Física, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Desenvolve-se neste trabalho uma proposta de introdução à física moderna no Ensino Médio a partir de uma sequência experimental e a discussão de seus resultados. O objetivo é que, a partir da análise de experimentos que estudam a natureza da luz e debates em sala conduzidos pelo professor, o aluno possa identificar uma discrepância entre a teoria física clássica, por ele até então estudada, e os resultados obtidos experimentalmente. A condução do professor segue, então, orientando a turma ao entendimento da necessidade de um novo conceito físico, o da dualidade onda-partícula.

A sequência didática se desenvolve com o objetivo de ser acessível aos diversos contextos educacionais brasileiros. Sendo, portanto, fenomenológica, sem depender de uma matematização e nem de teorias anteriores de alto grau de dificuldade. Também necessitando de materiais de baixo custo e fácil acesso para realização de seus experimentos.

Palavras chave: Ensino de física, Física moderna, Dualidade onda-partícula, Experimentação, Ensino de física moderna

Rio de Janeiro
Novembro de 2024

ABSTRACT

AN EXPERIMENTAL APPROACH FOR TEACHING WAVE-PARTICLE DUALITY IN HIGH SCHOOL.

João Gabriel Milare Manzolillo

Supervisor:
Lúcia Helena Coutinho

Abstract of master's thesis submitted to Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, Instituto de Física, Universidade Federal do Rio de Janeiro, in partial fulfillment of the requirements for the degree Mestre em Ensino de Física.

This work develops a proposal for introducing modern physics in high school, based on an experimental sequence and discussion of its results. The objective is that, based on the analysis of experiments that study light's nature and classroom debates led by the teacher, the students can identify a discrepancy between the classical physics theory they have studied so far and the results obtained experimentally. The teacher then continues to guide the class towards understanding the need for a new physics concept, the wave-particle duality.

The didactic sequence is developed with the objective of being accessible to the various Brazilian educational contexts. Therefore, it is phenomenological, without depending on mathematization or previous theories of high difficulty. It also requires low-cost and easily accessible materials to carry out its experiments.

Keywords: Physics teaching, Modern physics, Wave-particle duality, Experimentation, Modern physics teaching

Rio de Janeiro
November 2024

Sumário

Capítulo 1	Introdução	10
Capítulo 2	Referencial teórico científico	18
2.1	Dualidade onda-partícula	18
2.1.1	A luz clássica	19
2.1.2	Quantização de energia - Max Planck	20
2.1.3	Quantização de luz - Albert Einstein	24
2.2	O funcionamento do LED	30
2.3	O Efeito fotovoltaico	32
Capítulo 3	Referencial teórico pedagógico	34
3.1	Ensino de física Moderna	34
3.2	Física experimental no Ensino Médio	39
3.3	Ensino de dualidade onda-partícula	42
3.4	Ensino do efeito fotoelétrico	45
Capítulo 4	Metodologia	50
4.1	- Montagem experimental	50
4.2	- Plano de aula	56
Capítulo 5	Resultados	58
5.1	Aplicações no turno escolar	58
5.1.1	Pré-experimento	59
5.1.2	1ª sequência experimental	62
5.1.3	2ª sequência experimental	66
5.1.4	3ª sequência experimental	70
5.2	Aplicação no contraturno escolar	75
5.1.1	Pré-experimento	76
5.1.2	1ª sequência experimental	76
5.1.3	2ª sequência experimental	78
Capítulo 6	Considerações finais	87
	Referências Bibliográficas	91
	Apêndice A Material instrucional do professor	97

Lista de figuras

Figura 2.1: Catástrofe do ultravioleta, retirada de uma questão do Vestibular da FUVEST (SP) de 2022	21
Figura 2.2: Representação gráfica simplificada do efeito fotoelétrico.	25
Figura 2.3: Representação esquemática do efeito fotoelétrico	28
Figura 2.4: A corrente de saturação corresponde ao número de elétrons ejetados pela placa iluminada a cada segundo.	29
Figura 2.5: Bandas de Valência, proibida e de condução de: Isolantes, condutores e semicondutores.	30
Figura 2.6: Funcionamento LED	32
Figura 4.1: Foto da esquerda: O laser verde sobre um anteparo, foto da direita: suas características	50
Figura 4.2: a) Laser vermelho de alta potência. b) Laser vermelho de baixa potência. c) Ambos os lasers vermelhos em comparação. d) Características do laser vermelho de alta potência (comprimento de onda 650 ± 10 nm)	51
Figura 4.3: Luz branca utilizada a partir de uma lanterna	52
Figura 4.4: Base de papelão para o fio de cabelo.	52
Figura 4.5: a) Aparato experimental com o multímetro conectado ao LED verde. b) Testagem do LED verde usando a bateria. c) Testagem do LED vermelho usando a bateria.	53

Figura 4.6: Foto da esquerda: Medição da distância entre 2 máximos consecutivos para a luz verde. Foto da direita: Medição da distância entre 2 máximos consecutivos para a luz vermelha.	53
Figura 4.7: a) emissão de luz branca no LED verde; b) emissão de luz verde no LED verde; c) emissão de luz vermelha de baixa potência no LED verde; d) emissão de luz vermelha de alta potência no LED verde..	55
Figura 4.8: a) emissão de luz branca no LED vermelho; b) emissão de luz verde no LED vermelho; c) emissão de luz vermelha de baixa potência no LED vermelho; d) emissão de luz vermelha de alta potência no LED vermelho..	56
Figura 5.1: Gráfico com os resultados da segunda pergunta do pré- experimento	58
Figura 5.2: Gráfico com as respostas da terceira pergunta do pré- experimento.	60
Figura 5.3: Resultados das perguntas 1 e 2 da primeira análise de dados analisadas juntas.	63
Figura 5.4: Respostas da terceira pergunta da primeira análise de dados	64
Figura 5.5: Resultados da quarta pergunta da primeira análise de dados	65
Figura 5.6: Respostas da primeira pergunta da segunda análise de dados.	67
Figura 5.7: Respostas da segunda pergunta da segunda análise de dados.	68
Figura 5.8: Respostas da terceira pergunta da segunda análise de dados.	69
Figura 5.9: Respostas somadas das duas primeiras perguntas da terceira análise de dados.	72
Figura 5.10: Gráfico de respostas gerais das perguntas 3 e 4 da terceira análise de dados.	73

Figura 5.11: Gráfico de respostas das perguntas 3 e 4 da terceira análise de dados em que o aluno considerou que a luz não pode ser definida como uma onda clássica ou como uma partícula clássica. 74

Capítulo 1

Introdução

Em uma pesquisa denominada “Percepção Pública da Ciência”, o professor pesquisador da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Carlos Vogt, levantou dados quanto à percepção do público sobre ciência e sua divulgação. De maneira especial, ao perguntar a estudantes quanto às disciplinas das ciências da natureza tais como física, química e biologia, mais de 78% dos entrevistados consideraram-nas como “muito chatas” no cenário escolar. (Vogt, 2003)

Em contrapartida, em pesquisa mais recente, surge um resultado aparentemente contraditório com o anterior. Onde mais de 70% da população brasileira considera a ciência como um estudo interessante, como afirma Mônica Cunha em sua tese de doutorado. “O grande objetivo dessa pesquisa foi promover uma reflexão nacional sobre a imagem da ciência e da tecnologia junto à população urbana brasileira para subsidiar e direcionar ações do Ministério da Ciência e Tecnologia e do CNPq na área de divulgação da ciência. Dessa pesquisa se constata que cerca de 71% da população brasileira se interessa, de alguma forma, pela ciência.” (Cunha, 2009).

Não obstante, em pesquisa de Luisa Massarani e Ildeu Moreira sobre a opinião dos jovens quanto à ciência e tecnologia no Brasil, o resultado positivo se repete. “Os resultados sugerem que jovens apresentam grande interesse em ciência e tecnologia (67%) ou em assuntos relacionados.” (Massarani e Moreira, 2021, pág 1, tradução livre) E ainda em contrapartida também se destaca um resultado negativo para a ciência no mesmo artigo. Onde mais de 90% dos jovens brasileiros pesquisados consideram ser difícil ou muito difícil seguir uma carreira científica. “Por outro lado, 93% da juventude sente que é difícil ou muito difícil seguir uma carreira como científica. (Massarani e Moreira, 2021, pág 7, tradução livre)”.

Tal contradição nos demonstra que apesar da população brasileira, e de maneira especial os jovens brasileiros, se interessarem pelas ciências da natureza como áreas do conhecimento, os estudantes brasileiros não compartilham do mesmo interesse quando estudam essas mesmas áreas no colégio e a maioria destes estudantes não vê a carreira científica como uma opção viável. Essa discrepância pode ser influenciada pela diferenciação entre a ciência apresentada para a população pelos meios de comunicação, redes sociais e até mesmo as séries e filmes assistidos em relação à ciência estudada na escola. Em especial no caso da física é comum a utilização de termos físicos de forma a produzir um conteúdo de lazer não científico, mas

voltado a um imaginário científico, tais como os filmes de ficção científica. Sucessos de bilheteria dos cinemas como Star Wars (1977), RoboCop (1987) e De Volta ao Futuro (1985) utilizam constantemente termos científicos como velocidade da luz, relatividade, radiação e energia nuclear para justificar acontecimentos fantasiosos, como saltos no tempo e teletransporte. A popularização das drásticas mudanças da ciência a partir do século XX e a significativa evolução tecnológica nos últimos anos, de maneira especial nas áreas de telecomunicações, influenciam o alunato a conceber uma visão de física já anterior ao seu contato com a mesma na escola.

Costa e Santos (Costa, 2005), confirmam esse interesse ao testar aulas de física moderna com alunos do Ensino Médio e nos primeiros anos da universidade. Reafirmando o interesse dos alunos neste conteúdo: “Os estudantes do Ensino Médio são muito entusiasmados com o conteúdo (física moderna) e facilmente se envolvem nas atividades. (Costa e Santos, pág 378, 1995)

Todavia, infelizmente conteúdos de física moderna não correspondem ao programa de física da maioria dos colégios brasileiros. Onde muitas vezes os alunos estudam somente conteúdos do século XVIII ou anterior, sem praticamente qualquer ligação com as tecnologias de seu cotidiano, e ainda com um imaginário de uma física fechada, linear, finalizada e constante, afastando-os assim da realidade científica. Os estudos da física a partir do século XX estão fora dos colégios, como afirma Moreira (2017): “o ensino da Física estimula a aprendizagem mecânica de conteúdos desatualizados. Estamos no século XXI, mas a Física ensinada não passa do século XIX” (Moreira, pág 2, 2017). Sendo o próprio Exame Nacional do Ensino Médio (ENEM) uma reafirmação desse fato a partir de sua matriz de referência onde a física moderna e contemporânea não se encontra presente (Brasil, 2024).

Apesar desta ausência, a Base Nacional Comum Curricular (Brasil, 2017) afirma ser tarefa das ciências da natureza no Ensino Médio auxiliar os alunos em seus conhecimentos quanto às tecnologias por eles utilizadas. Ensinando aos alunos como é o funcionamento das tecnologias atuais, seus efeitos e ainda perspectivas futuras de desenvolvimento tecnológico, mesmo mantendo um padrão de ensino de física pautado nos séculos XVII e XVIII.

Por fim, e em conformidade com a própria natureza da área no Ensino Médio, a BNCC propõe que os estudantes aprofundem e ampliem suas reflexões a respeito das tecnologias, tanto no que concerne aos seus meios de produção e seu papel na sociedade atual como também em relação às perspectivas futuras de desenvolvimento tecnológico. Desse modo, propõe continuidade ao tratamento dado no Ensino Fundamental, etapa na qual as

tecnologias foram abordadas sob uma perspectiva de aplicação de conhecimentos e análise de seus efeitos sobre a saúde e a qualidade de vida das pessoas. (Brasil, 2017, pág 538)

O funcionamento, efeitos e evolução das tecnologias contemporâneas depende do entendimento da ciência moderna e contemporânea, que se ausenta dos currículos de física, como questiona Brockington: “Como suprir estas necessidades atuais do cidadão com um currículo de Física embasado em conhecimentos dos séculos XVII, XVIII e XIX? Em outras palavras, como garantir uma verdadeira formação para a cidadania no mundo atual se os conhecimentos físicos mais modernos e contemporâneos encontram-se afastado da Educação Básica?” (Brockington, 2005, pág 10)

A tentativa de implementação da física moderna no ensino regular não é recente, entretanto, sendo sua pesquisa contínua nas últimas décadas e resultado em significativos avanços, como afirma Pietrocola (2018). “As investigações que abordam a temática da inserção da Física Moderna e Contemporânea (FMC) no Ensino Médio vem avançando nas últimas décadas. Hoje, é uma linha de pesquisa consolidada na área de Ensino de Ciências (Pietrocola, pág 2, 2018).

Estas tentativas, todavia, esbarram em obstáculos recorrentes, como a própria ausência destes conteúdos na prova de ingresso para a maioria das universidades públicas do país, o ENEM. Entre outros obstáculos para a implementação da física moderna e contemporânea no Ensino Médio, temos a complexidade matemática de algumas teorias modernas (Pietrocola, 2018) e a discrepância entre as interpretações da teoria moderna quântica e as teorias clássicas estudadas em toda vida escolar dos alunos até o momento. Pontes (2019), ressalta os perigos de um tratamento superficial da mecânica quântica podendo conduzir o aluno a interpretações ainda voltadas à física clássica: “O tópico das interpretações da mecânica quântica, quando tratado de maneira superficial, geralmente leva-os (alunos) a construírem suas próprias interpretações dos fenômenos em questão, que tendem a ser muito voltadas para o viés da física clássica.” (Pontes, pág 29, 2019).

É, então, proposta a utilização de experimentações que levem a discussões e criações de hipóteses, permitindo os alunos a demonstrarem suas interpretações para que o professor identifique facilmente os erros conceituais e interpretações ligadas à física clássica, e corrija-os prontamente.

Não obstante, esta utilização pode auxiliar no entendimento de como surge a física, de onde vem sua validação, e de fato como funciona a carreira científica, como explicam Gil e Solbes:

“O ensino de ciências está mostrando aos pupilos e alunos uma imagem simplista e incorreta da ciência. Essa é marcada pelo empirismo, mas com a ausência de aspectos dos mais relevantes tais como a formação de hipóteses ou o design de experimentos.” (Gil e Solbes, 1993, pág 1).

A utilização de experimentos que exemplificam a realidade científica em sala de aula também é uma pauta fundamental em discussão, sendo inclusive incentivada a partir da BNCC, compondo as habilidades e competências que devem ser desenvolvidas nos adolescentes nos estudos de ciências da natureza no Ensino Médio. Tal desenvolvimento encontra-se na habilidade EM13CNT301: “Construir questões, elaborar hipóteses, previsões e estimativas, empregar instrumentos de medição e representar e interpretar modelos explicativos, dados e/ou resultados experimentais para construir, avaliar e justificar conclusões no enfrentamento de situações-problema sob uma perspectiva científica” (Brasil, 2018, pág 545), que de fato é sugerida ao terceiro ano do Ensino Médio.

Voltando-se ao problema da complexidade matemática, é pensada então em uma proposta experimental que leve o aluno à criação de hipóteses (Gil e Solbes, 1993), tenha discussão para observação do professor das interpretações realizadas (Pontes, 2019) e que seja matematicamente acessível (Pietrocola, 2018).

Não obstante, propõe-se também uma atividade experimental de baixo custo e materiais acessíveis. Considerando a notória falta de recurso financeiro das escolas, especialmente públicas, do país, além da ausência de laboratórios de ciências em 56% das escolas brasileiras, de acordo com o Censo Escolar de 2018. (Brasil, 2022)

A proposta deste estudo é apresentar uma sequência didática de ensino de física moderna para alunos tanto do segundo quanto do terceiro anos do Ensino Médio, que utilize uma experimentação com espaço para criação de hipóteses e desenvolvimento de conhecimento científico. Destaca-se também a procura de um experimento que promova uma ruptura em relação a um conhecimento já previamente estabelecido, demonstrando assim como ocorre a evolução de um pensamento científico e a produção de novas teorias. Além de uma atividade que leve a discussão dos alunos de suas hipóteses e interpretações para possibilidade do professor intervir nas mesmas em meio ao processo. E, por fim, que seja acessível tanto matematicamente quanto economicamente, com materiais de fácil acesso e sem necessidade de um ambiente com grandes especificações, podendo ser realizado na própria sala de aula.

O objetivo é que o aluno, além de adquirir novos conhecimentos científicos, compreenda a interação da física com seu cotidiano, entenda como surgem as revoluções científicas e

ressignifique sua própria ideia de ciência. Identificando a presença de modelos científicos e bases experimentais para as teorias.

O principal foco da atividade será então um estudo da natureza da luz a partir de três sequências experimentais. A primeira sendo inspirada no experimento de dupla fenda de Huygens, ocorrendo também a difração e depois interferência da luz, levando os alunos a interpretação clássica da luz como onda. Todavia, utilizando como material somente fontes de luz laser, uma régua e um fio de cabelo.

A segunda e a terceira sequências são ambas aplicações do efeito fotovoltaico. Onde uma fonte de luz laser é emitida sobre um LED desligado e conectado a um voltímetro, essa emissão de radiação luminosa poderá gerar ou não uma voltagem reconhecida pelo voltímetro dependendo da frequência de corte do LED e a frequência da fonte luminosa. A segunda sequência é realizada com um LED verde e uma fonte verde de forma explicar o efeito fotovoltaico acima da frequência limite e a terceira sequência é voltada a repetição deste experimento com diversas fontes e diversos LEDs diferentes, mostrando a existência de uma frequência limite e a relação moderna da frequência da luz com sua energia. A partir deste resultado é possível determinar um limite a teoria óptica clássica, visto sua insuficiência para prever certos resultados e então é proposta a física moderna de forma a conciliar a teoria com os resultados experimentais obtidos.

Além dos experimentos em si, a atividade propõe uma série de momentos de discussão e participação dos alunos na geração de hipóteses pré experimento e interpretação dos resultados pós experimento. Ao começar, no entanto, ocorre uma recapitulação dos conceitos de onda e de partículas onde participam os alunos e o professor sem menção ainda das atividades experimentais. Esta recapitulação serve para esta distinção e os fenômenos próprios das ondas e das partículas estarem claros para os alunos ao longo da atividade, pois estes serão essenciais para o seu bom desenvolvimento.

A partir da compreensão e diferenciação de tais conceitos por meio de definições e exemplos procura-se encaixar a luz em um desses dois grandes grupos. Um primeiro experimento então é explicado pelo professor, onde uma fonte luminosa é emitida contra uma superfície lisa, tal como uma parede, e depois é colocado um fio de cabelo como obstáculo no caminho da radiação luminosa. É perguntado então para os alunos suas expectativas e hipóteses em relação a o que acontecerá com o experimento com a presença do fio de cabelo como obstáculo. Também é questionada qual a diferença caso varie a cor da fonte de luz.

Após as respostas, é realizado o experimento com o fio de cabelo e uma fonte de luz verde e depois com uma fonte de luz vermelha. Nestes, ocorrerá a difração separando o feixe único da

luz e depois ocorrerá uma interferência entre estas luzes difratadas levando a percepção clara de pontos de máximo e mínimo em sequência. Com o surgimento destes fenômenos, fica claro, pela física clássica, a noção da luz como uma onda. Reafirmando inclusive a teoria estudada por eles no passado. Os alunos, então discutem este resultado a partir da mediação do professor e depois anotam suas interpretações.

É então explicada a segunda etapa, onde se emitirá a luz verde sobre um LED verde conectado ao voltímetro. Novamente os alunos anotam suas hipóteses, observam o experimento, discutem e anotam seus resultados. Neste caso, ocorrerá um efeito fotovoltaico onde a luz incidente do diodo irá energizar os elétrons em sua camada de valência, levando assim a uma diferença de potencial destacada pelo voltímetro. Ao final do experimento, os alunos além de anotarem seus resultados também respondem suas hipóteses caso ocorram alterações no LED ou na fonte luminosa, como ocorrerá a seguir.

Na terceira etapa, então, diferentes versões deste mesmo experimento variando a fonte de luz e a cor do LED utilizado levam a resultados diferentes dos esperados a partir da teoria até então aceita. Onde intensidades e frequências da fonte são alteradas, mostrando que para valores de frequência abaixo da frequência limite do material do LED não ocorre nenhuma variação de voltagem.

Tal resultado destoa da física clássica, onde uma onda tem sua energia diretamente influenciada pela sua amplitude e não por sua frequência. No entanto, a luz também não pode ser definida a partir deste momento como uma partícula clássica corpuscular visto o resultado da primeira sequência experimental, onde ocorre uma interferência e uma difração, fenômenos puramente ondulatórios classicamente.

Os alunos discutem este resultado a partir da mediação do professor que em algum momento irá conduzir o debate para lecionar sobre a dualidade onda-partícula. A partir destes resultados, é necessária a formulação de uma nova teoria, onde a luz não seja uma partícula para não discordar com o observado na primeira sequência experimental, mas também que a luz não seja uma onda para não discordar com o observado na terceira sequência experimental. Sendo introduzida assim a física moderna.

Uma das interessantes abordagens de destaque que podem ser utilizadas nesta aplicação é a assimilação de utilidades práticas do efeito fotovoltaico, como os painéis fotovoltaicos. Estes painéis popularmente conhecidos como painéis solares, funcionam a partir do efeito fotovoltaico, entretanto, utilizando a luz policromática do sol e não a luz monocromática do laser.

Destaca-se, no entanto, que a invalidez da teoria ondulatória clássica nesta atividade, no entanto, não a torna obsoleta para toda outra análise científica. Mas auxilia na concretização de seus limites, sendo essa uma característica comum entre os diversos modelos científicos. Em seu artigo denominado *Historiografia e Natureza da Ciência na sala de aula*, Forato, Pietrocola e Martins alertam sobre os perigos de se conhecer sobre os conteúdos científicos apenas sem compreender sobre seus pressupostos e limites de validade levando assim a uma visão deturpada da ciência onde existiria um crescimento naturalmente linear em que uma teoria era completamente descartada dando lugar em todas as instâncias a outra completamente nova. (Forato, 2011). Essa reformulação tanto do crescimento histórico científico quanto do próprio conceito de ciência não costuma ser abordada no Ensino Médio, o que pode levar a problemas de interpretação de acontecimentos na vida adulta, como o indivíduo tentar utilizar conceitos de física clássica em situações imaginárias relacionadas a objetos em altas velocidades (próximos da velocidade da luz) ou tentar utilizar conceitos da física quântica em corpos macroscópicos. Não obstante, tal má interpretação pode levar também ao indivíduo apresentar dificuldades de interpretar inovações tecnológicas e científicas que surgirem após sua formação escolar, como pede a BNCC, impedindo-o muitas vezes de identificar uma relação de coexistência entre as novas teorias científicas e a utilização de teorias antigas em determinadas situações onde essas ainda são válidas, ou ao menos, ótimas aproximações.

Também é destacável a importância deste experimento estar sendo aplicado nos anos finais do Ensino Médio, não somente pois sua compreensão depende de uma significativa base prévia em relação à física clássica mas também para o aluno ter uma maturidade científica e um desenvolvimento cognitivo suficientes de forma que o mesmo consiga entender os conceitos relacionados às teorias e aos modelos científicos. Como diz Silva em seu artigo sobre a epistemologia do modelo científico, os experimentos nos auxiliam a compreender as possíveis utilizações e as situações limítrofes dos modelos e teorias na ciência, auxiliando assim o indivíduo em seu entendimento do que é cientificamente certo ou errado e quais teorias são mais interessantes para o entendimento e a discussão de cada situação.”Os modelos são construções da observação, da intuição e da razão que, quando submetidos à experiência, podem apresentar tanto suas qualidades quanto seus limites. Seu papel está na tentativa de apreensão da realidade.” (Silva e Catelli, pág 5, 2019)

Esta abordagem experimental e qualitativa é interessante para, em meio ao ensino regular, introduzir a física moderna a partir da dualidade onda-partícula. Podendo ser uma novidade para alguns professores pois para outras áreas da física é possível que outras abordagens possam se tornar mais interessantes. Essa relação entre a abordagem didática e o conteúdo

programático deve ser comum para o professor, Costa em seu artigo “como introduzir tópicos da física moderna no currículo do Ensino Médio” destaca a importância de estudar-se diversas estratégias didáticas e relacionar cada uma com o conteúdo que mais a ela se assemelha. “Uma das mais importantes condições para o sucesso da ressonância entre professor e aluno é a mudança conceitual do professor em relação ao conteúdo científico e a didática, metodologia e as estratégias de ensino, relacionadas a ele.” (Costa e Santos, pág 373, 1995, tradução livre).

Pietrocola e Siqueira (2012) nomeiam essa falta de diversificação em metodologias do ensino como Tradição do Ensino de Física (Siqueira, 2012; Pietrocola, 2017) e trazem como um dos obstáculos a serem enfrentados para a inserção da física moderna no Ensino Médio.

O objetivo desta menção não é que o professor abra mão da sua forma de dar aula e sua metodologia. Mas utilize em determinados conteúdos estratégias a eles propícios a partir de suas dificuldades próprias. Sendo esta pesquisa uma das possíveis metodologias didáticas para a introdução da física moderna no Ensino Médio, trabalhando-a a partir das principais dificuldades apresentadas pelos alunos no entendimento da mesma. Que deve ser utilizada pelo professor da melhor maneira possível de acordo com os contextos de sua turma e os objetivos didáticos de sua aula.

Capítulo 2

Referencial teórico científico

Para o bom desenvolvimento deste estudo, é fundamental um aprofundamento teórico em conceitos que nele se aplicam. Entre os conteúdos físicos abordados temos 3 grandes grupos: o estudo do efeito fotovoltaico, da dualidade onda-partícula (de forma especial no caso da luz) e o estudo dos semicondutores, com destaque para os dispositivos LEDs.

2. 1 Dualidade onda-partícula

Entre os grandes avanços físicos do século XX tem-se as descobertas de estranhos comportamentos dos corpos em pequenas escalas de tamanho e em altas velocidades. Essas são denominadas respectivamente de física quântica e relatividade, neste texto estuda-se a primeira: a física quântica.

Ao estudar o comportamento da luz em certas situações específicas, ou das partículas subatômicas (prótons, nêutrons e elétrons), percebe-se um comportamento não usual na física clássica. A luz em certas situações apresenta características similares a objetos corpóreos, enquanto tais partículas subatômicas, até então corpusculares, apresentam resultados experimentais compatíveis aos de fenômenos ondulatórios em certos casos. Esse estranho comportamento se estendeu para todos os corpos e ondas nessa mesma dimensão subatômica, desconfigurando o nosso ideal clássico, atualizando os limites das nossas definições quanto à natureza dos objetos. Esses perdem então sua classificação como ondas ou partículas por tais comportamentos serem próprios de cada experimento realizado. Tal estranheza foi batizada de dualidade onda-partícula, sendo esse termo não uma nova categorização da natureza das partículas físicas, mas um nome para essa incerteza e inconsistência que todo corpo em pequenas escalas apresenta.

O caso específico da luz é didaticamente interessante por ser um fenômeno físico constantemente estudado no Ensino Médio a partir de uma óptica clássica, sendo um dos mais característicos fenômenos no estudo das ondas. Além disso, existe também um importante fator histórico a ser considerado, onde a natureza da luz como onda ou partícula se manteve em debate na comunidade científica por mais de um século, sendo um clássico exemplo da construção do conhecimento científico. A visualização dessa dualidade também é mais fácil na luz quando comparada com outras partículas, necessitando menos de caros e complexos maquinários nem de entendimentos físico-matemáticos rebuscados para além do Ensino Médio.

2.1.1 A luz clássica

Antes de estudarmos a desconstrução do ideal de luz como somente uma onda clássica é necessário o bom entendimento dessa caracterização e como ela ocorreu. No fim do século XVII e início do XVIII surge uma importante discussão quanto às possibilidades da luz ser uma onda ou uma partícula, tendo grandes nomes da física apoiando cada um dos lados. De maneira especial Isaac Newton em seu livro *Óptica* (Newton, 1704) defende a hipótese da luz ser um fenômeno corpuscular, que como tal era composto de pequenas partículas esféricas que se chocavam elasticamente entre si. Huygens (Huygens, 1690), por outro lado, acreditava na hipótese da luz ser ondulatória tal como o som, por conta de sua refração ao mudar de meio e da natureza do contato entre diferentes feixes de luz. Quando dois diferentes sons entram em contato, percebemos uma interferência entre eles, enquanto objetos corpusculares em contato apresentam um choque e, possivelmente, um espalhamento. No caso específico da luz, como analisava Huygens, dois feixes de luz diferentes entrando em contato não se chocam, mas apresentam uma interferência. O experimento que deu um fim à magnitude desse debate, no entanto, data somente do século XIX, onde Thomas Young (Young, 1802) comprova, a partir de experimentos de dupla-fenda, a interferência e difração da luz (classicamente, ambos associados exclusivamente às ondas). Com isso, a grande maioria da comunidade científica aderiu à hipótese do fenômeno óptico ser ondulatório.

Mesmo com Young, um problema da teoria ondulatória da luz era o seu meio. Até então, acreditava-se que todas as ondas se propagavam em algum meio material. E não se tinha certeza quanto ao meio de propagação da luz, uma das hipóteses mais promissoras, no entanto, era a existência de um éter. Este seria um meio elástico onipresente no espaço e na Terra, invisível e imperceptível, onde se propagavam a luz e todas as ondas eletromagnéticas.

Chegando ao início do século XX, tendo a luz como uma onda de forma definitiva para quase toda comunidade científica, essa tinha como características os fenômenos ondulatórios, com a difração, interferência e polarização, sendo todos esses comprovados experimentalmente. Como característica ondulatória apresentava também um contínuo de intensidade, sem existir uma quantidade mínima de energia a ela associada, além de se expandir igualmente para todas as direções possíveis, podendo uma mesma onda de luz atingir diversos pontos distantes um do outro ao mesmo tempo.

Outra caracterização específica da onda clássica é sua energia estar ligada à amplitude/intensidade. Enquanto sua frequência e comprimento de onda definem características perceptivas como a cor, no caso da luz, ou o tom, no caso do som. A relação entre energia e

amplitude é muito intuitiva quando analisam-se casos simples do cotidiano, um som de alto volume, uma luz muito intensa, uma onda do mar muito grande, todos esses casos de altas amplitudes são associados a muita energia, independente do tom do som ou da cor da luz.

No entanto, mesmo com um significativo apoio à teoria ondulatória, essa nunca foi definida como unanimidade completa na comunidade científica. Existindo inclusive alguns experimentos específicos com resultados estranhamente destoantes, demonstrando já em meio ao século XIX um possível limite para essa hipótese, ou ao menos uma ausência ainda de complementos para a mesma. A partir do estudo desses específicos casos e contextos ainda não explicados, que nos primeiros anos do século XX surgem novos debates quanto à natureza da luz, que levam ao nascimento de não somente uma nova teoria óptica, mas um novo ramo da física, que aplica-se a toda matéria em escalas subatômicas.

2.1.2 Quantização de energia - Max Planck

Em 1895 Max Planck começa a estudar a radiação térmica, em especial analisando o caso dos corpos opacos que deram origem, em 1900, à ideia de quantização de energia. Quando é emitida radiação diretamente sobre um corpo opaco este absorve parte dela e reflete outra quantidade, sendo associável à cor do corpo essa relação entre absorção e reflexão. Observa-se mais reflexões em corpos claros, enquanto corpos escuros absorvem uma maior quantidade de radiação, com isso batiza-se um corpo que absorve toda a radiação que nele incidida de corpo escuro ideal ou corpo negro.

No início do século XX, os físicos John William Strutt (Lord Rayleigh) e Sir James Jeans propuseram, a partir da física até então vigente, um método para calcular a radiação emitida por um corpo negro. Seu objetivo era, considerando a luz como um fenômeno puramente ondulatório, encontrar os valores de energia na propagação da onda de luz emitida por esse corpo negro, diferenciando-os a partir de sua temperatura e o comprimento da luz emitida. Os resultados de valores de energia eram contínuos, o que se justificaria pela teoria ondulatória como estes sendo os modos da onda de luz. Somando então em uma série os modos da onda de luz encontrava-se intensidade de radiação emitida pelo corpo negro (B) a partir do comprimento de onda da luz por ele emitida (λ) em uma determinada temperatura em que o corpo negro se encontrava (T), resultando na equação:

$$B_{\lambda}(T) = \frac{2ckT}{\lambda^4}$$

(Equação 2.1)

Essa expressão ficou conhecida como lei de Rayleigh-Jeans, e apesar de fazer muito sentido matemático, considerando a física até o momento, não condizia em todos os pontos com a realidade experimental. Para baixas frequências de onda os resultados eram muito próximos dos obtidos experimentalmente, todavia, quando aumenta-se a frequência, como não altera-se o meio, o comprimento de onda é reduzido. Com isso, para frequências consideradas altas como no caso do ultravioleta, temos o comprimento de onda muito pequeno e consequentemente pelo formato da fórmula a intensidade da radiação deveria atingir altíssimos valores, chegando ao limite de tender ao infinito para comprimentos de onda que tendem a zero.

Não somente esse resultado destoava dos obtidos experimentalmente, como fisicamente ele não faz sentido, visto que corpos negros com comprimentos de onda muito baixos deveriam emitir quantidades exorbitantes de radiação. Para além, experimentalmente percebe-se que em certo momento a emissão de radiação começa inclusive a reduzir para frequências muito altas chegando a tender a zero para o limite de $\lambda \rightarrow 0$. Essa diferença entre o resultado experimental e teórico foi tamanha que ficou conhecida como catástrofe do ultravioleta. Aqui segue graficamente um exemplo deste resultado para uma temperatura em específico:

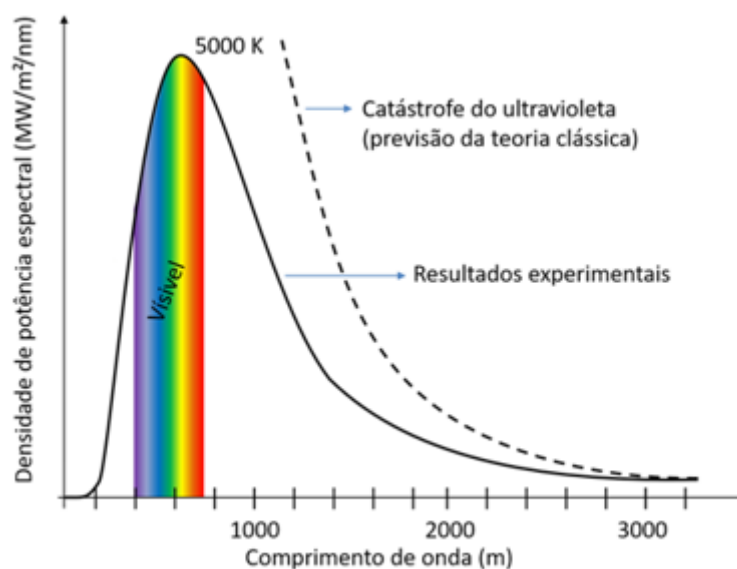


Figura 2.1: Catástrofe do ultravioleta, retirada de uma questão do Vestibular da FUVEST (SP) de 2022 (Disponível no sítio: <https://vestibulares.estrategia.com/public/questoes>)

Ressalta-se que para grandes comprimentos de onda, acima do infravermelho, esses resultados não foram completamente destoantes, podendo ainda serem utilizados em certos

limites de temperatura e frequência. A grande questão é que de fato quanto menor fosse o comprimento de onda, mais modos (ondas estacionárias) estariam presentes, e como estes seriam os pontos de máxima energia, classicamente quanto menor o comprimento de onda maior deveria ser a energia. E até um certo momento percebe-se pelos resultados experimentais que essa afirmação é válida. No entanto, a partir de um determinado comprimento mínimo essa proporção se inverte e a energia começa a reduzir conforme se diminui o comprimento de onda (ou aumenta-se sua frequência).

Entre os diversos físicos que estudaram tal resultado e tentaram compreender o erro físico por trás dele está Max Planck. Planck supôs uma drástica mudança quanto ao próprio conceito físico de energia, teorizando que a absorção e liberação da energia ocorre de maneira quantizada. Isto é, em pequenos “pacotes” com uma quantidade mínima de energia em cada. Sendo então a energia não contínua mas discreta, com quantidades inteiras desse pacote mínimo. Esse valor mínimo de energia que podia ser emitida, liberada ou absorvida foi então batizado por ele de quantum.

Tal adaptação explica a catástrofe do ultravioleta, pois nela a quantidade de emissão radioativa depende diretamente da frequência mas também da quantidade de quanta. Portanto, ondas de frequência muito elevada teriam poucos quanta, ou seja, poucos pacotes de energia apesar de serem de altas frequências.

Essa explicação também ajusta o limite onde o comprimento de onda tende a zero, pois mesmo tendo altíssima frequência a emissão radioativa não poderia tender a infinito, visto que sua energia não pode ser continuamente aumentada até um valor infinito pois depende também de uma quantidade natural e finita de quanta.

A partir dessa explicação, Planck surge com uma expressão que define o início da física quântica:

$$E = nh\nu, n = 1, 2, 3, \dots$$

(Equação 2.2)

onde a energia absorvida ou emitida (E) dependerá da frequência de oscilação (ν) mas também será um múltiplo natural de uma constante h , que foi então batizada de constante de Planck.

Com essa explicação, Planck revoluciona o conceito de energia até então concebido, e abre espaço para a discretização de outros componentes elementares físicos, além de resolver o problema da catástrofe do ultravioleta. O estudo de partículas físicas não contínuas foi então

chamado de física quântica, e a partir dela surgiu a correção necessária para a lei de Rayleigh-Jeans, utilizando discretização da luz:

$$B_{\lambda}(T) = \frac{2c^2}{\lambda^5} \frac{h}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}$$

(Equação 2.3)

Percebe-se nesta correção a presença da constante de Planck h , que caracteriza as equações da física quântica onde a energia é discreta e não contínua.

Destaca-se que a descoberta dos quanta, apesar de revolucionária, não afetou grande parte dos estudos físicos em imediato momento. Pois como a constante de Planck é muito pequena (da ordem de 10^{-34} J.s), nos estudos de corpos macroscópicos tal discretização tem uma aproximação muito segura para um contínuo, tal como entendido na física clássica, sendo tal quantização significativa somente em limites próximos da ordem da constante de Planck.

A física quântica acaba, portanto, sendo pontual em suas aplicações teóricas para estudos em limites espaciais muito específicos. No entanto, a conceituação do quantum por Planck permitiu que posteriormente outros vários conceitos fossem discretizados, e surgissem assim a partir de aplicações dessa nova teoria física novas tecnologias e conceitos extremamente úteis e fundamentais para o desenvolvimento de nossa sociedade até o ponto que a conhecemos na contemporaneidade.

2.1.3 Quantização de luz - Albert Einstein

Ainda no século XIX alguns experimentos foram realizados com resultados não esperados a partir das definições dadas para a luz na física clássica. Em especial, Becquerel realiza em 1839 um experimento onde um material metálico emite elétrons quando exposto a certas frequências de luz (Becquerel, 1839). Tal experimento apresentava divergências com a física clássica, especialmente pela relação entre frequência da luz propagada e possibilidade de emissão dos elétrons. Mas por conta da dificuldade de reprodução e análise de tal experimento, seu estudo não foi prolongado neste primeiro momento.

Em 1887, Heinrich Hertz repete esse experimento da incidência de luz em determinadas frequências sobre uma superfície metálica, enquanto realizava diversos estudos procurando confirmar a existência de ondas eletromagnéticas e a teoria clássica de Maxwell sobre a propagação da luz (Maxwell, 1864). Com isso, o efeito ganha nome de Efeito Hertz, mas continua com algumas particularidades divergentes com o compreendido na época.

Com o advento do século XX, surge uma hipótese inovadora mas muito contraditória (à época) para explicar o efeito Hertz. Albert Einstein em seu ano miraculoso (1905), em um trabalho intitulado “Sobre um ponto de vista heurístico a respeito da produção e transformação da luz”, propõe que esse efeito teria sentido caso considerássemos uma luz não ondulatória, mas corpuscular (Einstein, 1905). Após esse trabalho de Einstein o efeito ficou conhecido como “efeito fotoelétrico”, mas vale ressaltar que essa nomenclatura não foi definida por ele, sendo por ele tal efeito sempre referido como raios catódicos gerados por ultravioleta.

A existência dessa relação entre luz e corpos (elétrons) por si só não se opõe à física clássica, no entanto a forma como ela ocorre sim. Para melhor compreender tais divergências, todavia, é válido analisar de forma mais profunda o experimento em si. Tal como na Figura 2.2, o efeito consiste na irradiação de luz em um material metálico. Por conta das ligações metálicas existentes nessa superfície, os elétrons têm características similares às de elétrons livres, e a luz incidida na superfície metálica pode, dependendo de sua energia, aticar tais elétrons a ponto deles se desprenderem do metal e seguirem em movimento externo. Já considerando a discretização da luz, pode-se afirmar que cada elétron absorve exatamente um fóton que o atica, gerando este movimento.

O feixe de luz incide em uma placa de metal que chamamos de emissora, onde os elétrons estão similares aos elétrons livres. Quando estes são aticados e desprendidos do metal, seu movimento é conduzido por um campo elétrico criado a partir da diferença de potencial entre os extremos do aparato, a partir de uma fonte externa. Essa diferença de potencial, quando positiva, acelera as cargas emitidas em direção a uma placa coletora. A placa coletora tem a função de identificar a quantidade de elétrons que chegam por segundo a ela.

Destaca-se a possibilidade de alteração dessa diferença de potencial externa, levando a variações no campo e, conseqüentemente, na aceleração dos elétrons quando emitidos pela placa emissora. Essa variação auxilia na medição de diferentes resultados facilitando no cálculo da energia cinética dos elétrons neste experimento. Podendo muitas vezes ser inclusive negativa, os desacelerando.

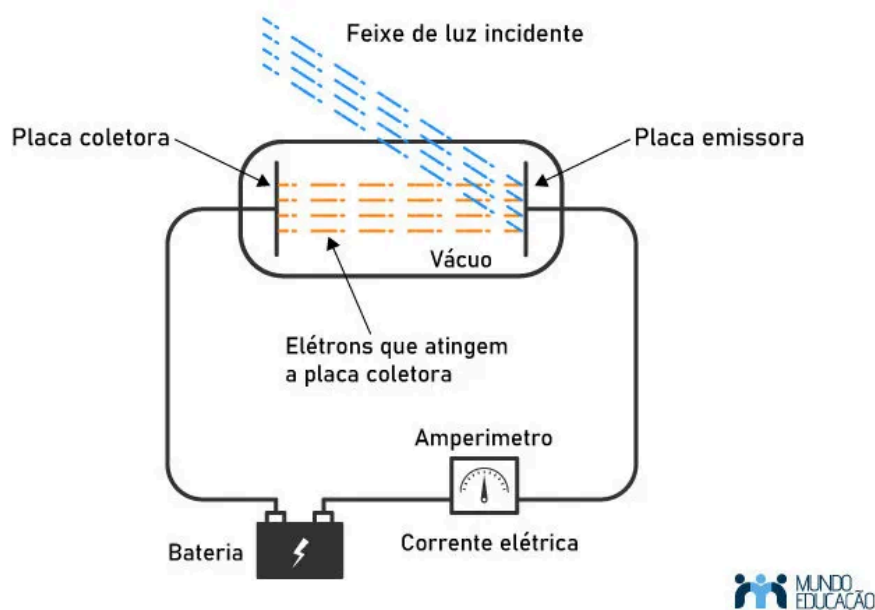


Figura 2.2: Representação gráfica simplificada do efeito fotoelétrico. (Mundo educação: <https://mundoeducacao.uol.com.br/fisica/o-efeito-fotoeletrico.htm>)

Não somente pelo efeito em si, mas a partir das características dos resultados obtidos, percebe-se a peculiaridade do efeito fotoelétrico que levou à sua discussão mais profunda. Pela física clássica, quanto maior a amplitude de onda incidente de luz mais energia seria recebida pela placa coletora, independente da frequência da mesma. E portanto, o resultado esperado para o experimento era uma relação de proporcionalidade entre a amplitude da onda e corrente elétrica coletada, independente do comprimento de onda ou frequência dessa luz incidida.

No experimento real, todavia, a mudança da frequência de luz incidente varia significativamente a corrente, existindo inclusive limites de frequências mínimas a partir das quais ocorre a emissão do elétron. Ou seja, para frequências inferiores a tais limites, a corrente surgente é nula (este limite varia de acordo com o material metálico utilizado). O aumento da intensidade da luz segue alterando o resultado final, mas somente em frequências acima da frequência limite.

Outra questão definitiva é que não existe acúmulo de energia pelos elétrons, como se esperaria classicamente. Para uma luz que não tenha energia suficiente para ejetar diretamente o elétron, deveria existir um intervalo de tempo mensurável em que após ele o efeito ocorreria. O esperado era que o elétron fosse absorvendo energia incidente até tê-la suficientemente a ponto de escapar da superfície, todavia, caso o elétron não fosse instantaneamente ejetado, ele não seria, independente do tempo de incidência da luz, ou seja, não existia o acúmulo de energia como esperado.

Einstein então no texto “Sobre um ponto de vista heurístico a respeito da produção e transformação da luz” analisa, entre experimentos diversos com características peculiares da luz, este até então conhecido como efeito Hertz. Para justificar tais acontecimentos, no entanto, ele propõe uma nova análise da natureza da luz, alegando que esta nestes casos especiais não se comportaria como uma onda, como até então. Destaca-se no mesmo texto que isso não quer dizer que Albert Einstein invalida os experimentos antigos, tais como os de Maxwell e do próprio Hertz, que interpretam a luz como uma onda. No entanto, o artigo procura uma forma de, nestes casos especiais, justificar os resultados experimentais obtidos, e a mais viável para tal é uma interpretação não ondulatória da luz.

Nesta reinterpretação, o fenômeno óptico seria definido a partir de uma quantidade mínima de energia indivisível, sendo essa batizada posteriormente de fóton. Por consequência dessa indivisibilidade dos pacotes, os fenômenos ópticos passam a ser discretos e não contínuos, de maneira similar aos objetos corpusculares que também têm partículas indivisíveis que os tornam discretos. Apesar da não percepção instantânea, essa quantidade mínima da luz reafirma os estudos de Planck anteriores, quanto à quantização da energia. Semelhança essa que Einstein não percebe em 1905, mas afirma existir em 1906, em seu artigo “Sobre a teoria de produção e absorção de luz”. Esses fótons seriam quanta de luz, com energia própria dependendo de sua frequência.

A dependência da frequência na energia do fóton justifica diretamente os resultados obtidos quanto à relação entre a cor do feixe de luz incidente e a energia dos elétrons coletados, no efeito fotoelétrico. A frequência limite seria aquela com mínima energia suficiente para retirar elétrons da superfície metálica, e abaixo dela nenhum elétron seria ejetado.

Neste novo modelo de luz a intensidade definiria a quantidade de fótons incididos, e portanto teria seu papel na quantidade de elétrons ejetados. Utilizando os conceitos de interação corpuscular compreende-se uma relação de um para um entre fótons e elétrons. Onde um elétron absorve somente a energia referente a um fóton, por tal relação não existe acúmulo de energia, pois os elétrons livres não acumulam fótons até terem energia suficiente para se desprenderem da superfície.

Então, neste novo modelo para a natureza da luz, os fótons incidentes com energias específicas, dependentes da frequência de luz, são absorvidos pelos elétrons na superfície metálica. E, a partir dessa absorção, podem aumentar sua energia suficientemente a ponto de serem ejetados da superfície. Assim, fora dela sofrerão a diferença de potencial entre as placas e seguirão em direção à placa coletora. A quantidade de elétrons que absorvem energia

dependerá da quantidade de fótons incidentes, que dependerá diretamente da intensidade da luz.

Vale ressaltar que, caso a diferença de potencial seja invertida, a corrente coletada não cai automaticamente a zero, pois apesar de agora a voltagem impulsionar os elétrons no sentido contrário à placa coletora, dependendo de sua energia cinética inicial, originada pelo fóton, o elétron pode ainda se dirigir até ela. Todavia, para toda luz existe um limite da energia cinética do elétron ejetado e, conseqüentemente, um limite para até qual diferença de potencial negativa os elétrons conseguem alcançar a placa coletora.

Matematicamente, existe uma relação entre a energia do fóton e sua frequência, chamada de Relação de Planck-Einstein. Tal nome é consequência da energia depender também da constante de Planck, sendo a relação:

$$E = h \cdot \nu$$

(Equação 2.4)

onde E é a energia do fóton, h a constante de Planck e ν a frequência da luz. Percebe-se uma similaridade clara desta relação de Planck-Einstein com a equação 2.2, onde Planck define que a energia dos corpos é discretizada em ordens de grandeza muito abaixo do mundo macroscópico. Sendo a diferença somente que aquela depende da quantidade de partículas quânticas energizadas e esta é própria para somente um fóton (o caso da equação 2.2 onde $n = 1$).

Essa relação, no entanto, não define isoladamente a energia que o elétron terá ao ser ejetado da superfície metálica, pois tal energia dependerá também do trabalho associado a tal elétron para retirá-lo da superfície, sendo esse trabalho variável entre diferentes elétrons que estão em diferentes camadas de valência. Definimos, portanto, que a energia cinética do elétron nesse experimento após ejetado será:

$$K = h \cdot \nu - W_0$$

(Equação 2.5)

onde K é a energia cinética associada ao elétron e W_0 o trabalho necessário para desprendê-lo da superfície. Quando o elétron está o menos preso possível e, conseqüentemente, dependente de um menor valor de trabalho para ser ejetado, dizemos que o trabalho a ele associado é W_0 e portanto sua energia cinética, após absorver o fóton, será;

$$K = h \cdot \nu - W_0$$

(Equação 2.6)

Caso $h\nu$, no entanto, não seja maior que W_0 e, portanto, a energia cinética matematicamente seja negativa, o elétron não é retirado da superfície. A frequência limite então, é graficamente definida pelo gráfico da Figura 2.3, onde percebe-se que para os pontos onde a energia cinética matematicamente surge negativa o mesmo não é definido pois não há emissão :

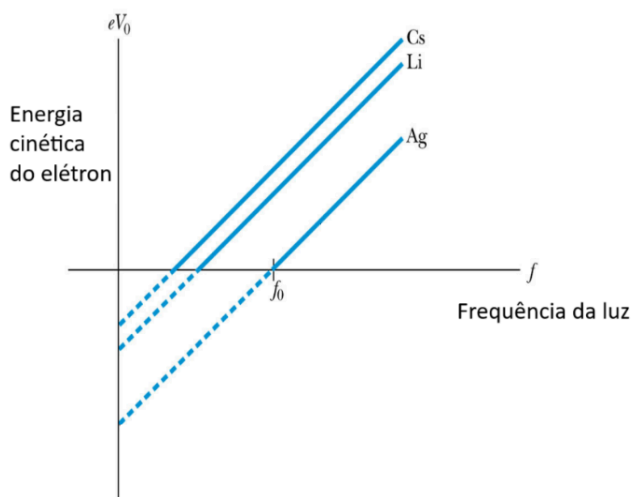


Figura 2.3: “Representação esquemática do efeito fotoelétrico” (Adaptado de: https://www.if.ufrgs.br/~marcia/Efeito_fotoel_Compton.pdf)

No gráfico da Figura 2.3, onde o eixo das abscissas é definido pela frequência da luz incidente e o eixo das ordenadas pela energia cinética de cada elétron emitido, percebe-se uma relação de proporcionalidade linear, onde quanto maior a frequência, maior a energia cinética. Todavia, nota-se que estes valores dependem de uma frequência limite própria de cada material utilizado. O Césio, o Lítio e a Prata têm gráficos similares, mas deslocados horizontalmente por conta dessa frequência limite. Diferentes materiais apresentam diferentes trabalhos e, consequentemente, diferentes frequências limite ou de corte. Da mesma forma, temos uma representação gráfica para a variação de diferença de potencial e a corrente elétrica resultante, demonstrada na figura 2.4.

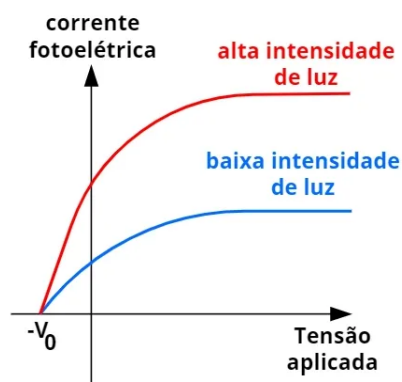


Figura 2.4: "A corrente de saturação corresponde ao número de elétrons ejetados pela placa iluminada a cada segundo." (Disponível no site Brasil escola: <https://brasilecola.uol.com.br/fisica/o-efeito-fotoeletrico.html>)

No gráfico de tensão externa aplicada (abscissa) por corrente fotoelétrica produzida (ordenada), destaca-se a região onde a voltagem é negativa e ainda assim existe corrente elétrica pela significativa absorção de energia pelos elétrons que se sobressai em relação à tendência de movimento para longe da placa receptora. Percebe-se também como os resultados são discrepantes entre a luz de alta intensidade e a luz de baixa intensidade, por conta da variação do número de fótons e, consequentemente, da quantidade de elétrons que serão energizados e produzirão tal corrente

2.2 O funcionamento do LED

Os LEDs (Light Emission Devices), sendo traduzidos para o português como dispositivos emissores de luz, dependem para o seu funcionamento de aplicações físicas não triviais. Por conta de sua utilização neste projeto, se faz interessante estudar também como normalmente funciona o LED, além de compreendermos como e por que os utilizaremos em nossa aplicação neste experimento.

Como estudada na seção 2.1, a energia se faz presente em pacotes bem definidos, sendo quantizada e portanto tendo valores possíveis de se encontrar e “saltos” para novos valores. Voltando-se então para o movimento de elétrons especificamente em sólidos, esse depende de tais energias possíveis bem definidas, apresentando também saltos e sendo então dividido em bandas de energia dependentes do material analisado. As bandas (ou gaps) podem ser permitidas ou não, sendo essas permitidas categoricamente divididas em bandas de valência e bandas de condução, novamente dependentes do material estudado e especificamente para os

sólidos. As bandas de valência são aquelas que estão completamente preenchidas e as de condução são aquelas parcialmente preenchidas ou não preenchidas, mas cabíveis de serem.

Essas bandas ocupadas e seus níveis energéticos definem diversas propriedades dos materiais. De maneira especial, o preenchimento da banda de valência pode afetar a liberdade de movimentação dos elétrons dentro de um determinado material, o que afetará na passagem ou não de corrente. Tal movimentação é batizada de condução elétrica e divide os materiais em três distintas categorias: os condutores, isolantes e semicondutores. Os condutores são aqueles que têm a camada de condução semi preenchida, por consequência, permitem aos elétrons uma fácil movimentação energética atingindo assim facilmente altos níveis de energia, além de terem um gap pequeno entre camadas de valência e de condução, permitindo assim um fácil movimento eletrônico. Os isolantes, por outro lado, tem as camadas de condução vazias enquanto as camadas de valência se encontram cheias, dificultando assim a transição de nível energético e a movimentação dos elétrons por dentro desses materiais, sendo caracterizados também por gaps muito grandes que dificultam ainda mais a transição de nível energético dos elétrons. Por fim, os semicondutores têm uma dinâmica muito próxima dos isolantes mas com gaps de energia menores, como consequência, apesar de não terem as bandas de condução ocupadas tal como os condutores, estes saltos necessários são bem reduzidos permitindo assim o movimento elétrico e, conseqüentemente, o surgimento de corrente quando estão sob a ação de um campo elétrico externo. A Figura 2.5 ilustra estes três tipos de materiais citados:



Figura 2.5: “Bandas de Valência, proibida e de condução de: Isolantes, condutores e semicondutores”(Adaptado de mundoeducacao.uol.com.br/fisica/semicondutores.htm)

A condução nos semicondutores pode variar em um mesmo material, dependendo da temperatura e da quantidade de impurezas, sendo essas átomos de diferentes elementos

adicionados no material. Sua condutividade aumenta progressivamente com o aumento de temperatura e também pode se alterar positiva ou negativamente a partir da inserção de impurezas, neste segundo caso o semicondutor é nomeado de semicondutor dopado.

Quando insere-se um elemento com mais elétrons que o original que forma o semicondutor, falamos que existe um semicondutor tipo n , pois este fica mais negativo. Por outro lado, ao adicionar um elemento com menos elétrons, o semicondutor acaba ficando mais positivo e consequentemente é chamado de semicondutor tipo p . Na prática, um semicondutor do tipo n terá mais elétrons na camada de valência que estarão livres para se moverem quando afetados por um campo elétrico externo. Por outro lado, semicondutores do tipo p terão a camada de valência não completamente preenchida, com buracos (ou lacunas) decorrentes da ausência de elétrons. Quando um corpo tem em certa região semicondutores n e em outra semicondutores p dizemos que este é uma junção $p-n$.

Nessa junção $p-n$ acabam ocorrendo interações entre essas duas regiões características deste tipo de condutor. Como a região n tem mais cargas negativas que o semicondutor normal, e a região p mais cargas positivas, ou mais buracos de cargas negativas, a união dessas duas regiões leva a um movimento natural de elétrons da região n à região p . Esse movimento elétrico ocorre naturalmente nesse encontro, até o momento de equilíbrio entre a quantidade de buracos e elétrons em ambas as regiões.

Entre os semicondutores conhecidos que temos, um dos principais é o diodo. Os diodos são junções $p-n$ com eletrodos nos extremos, por conta destes eletrodos o movimento elétrico acaba sendo unidirecional e, enquanto os diodos não tiverem uma diferença de potencial inserida no sistema, o mesmo se mantém de forma similar a um isolante. No entanto, quando conecta-se um diodo a uma fonte de tensão, essa impulsiona uma corrente interna com passagem de elétrons de n para p e de lacunas de p para n . Essa transição libera energia em forma de radiação, sendo o comprimento de onda desta radiação específico para cada material, dependendo da altura do gap. Em certos diodos, a radiação liberada pode estar na frequência da luz visível. Tais diodos que liberam radiação na forma de luz visível quando conectados a uma tensão são chamados de LEDs. A função destes comumente é então de iluminar em uma certa frequência específica da luz. O funcionamento do LED dentro de um circuito está demonstrado na figura 2.6:

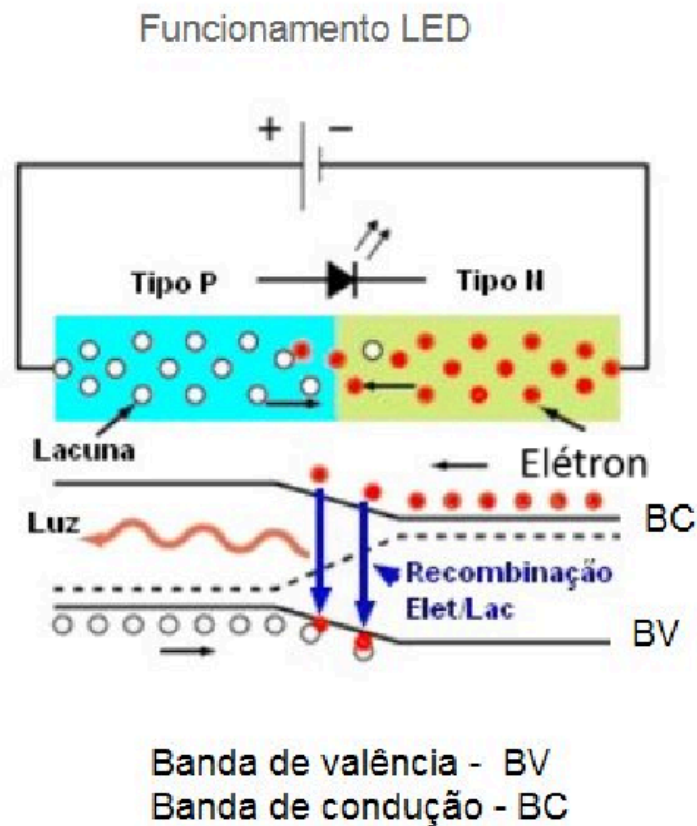


Figura 2.6: “Funcionamento LED” (Adaptado de www.electronica-pt.com/LED#google_vignette)

A figura 2.6 se divide em duas partes, acima é mostrado o circuito com as regiões *p* e *n* e o movimento dos elétrons de uma região para a outra. Abaixo, quando o elétron passa da banda de condução para a banda de valência é mostrada a emissão de luz que caracteriza o LED.

2.3 O Efeito fotovoltaico

Nesta aplicação, no entanto, os LEDs serão utilizados com outro propósito, que não o seu usual, levando a um efeito similar ao fotoelétrico que leva a resultados e discussões tão valiosas quanto: o efeito fotovoltaico.

Utilizando radiações luminosas de uma frequência específica ilumina-se o LED, que não estará ligado a uma tensão, mas estará conectado a um voltímetro que medirá a diferença de potencial entre os seus extremos. Originalmente, como o LED está desligado e, portanto, se comportando como um isolante, a diferença de potencial medida será zero.

Entretanto, quando a radiação luminosa for recebida pelo mesmo, os fótons irão ser absorvidos pelos elétrons semi-livres que estão em sua banda de valência, promovendo-os para um nível de energia mais alto, semelhante ao efeito fotoelétrico. O diferencial é que, ao invés

dos elétrons serem retirados da superfície metálica e conduzidos para uma placa coletora a partir de uma diferença de potencial externa, neste caso o fóton absorvido fará com que um par elétron-buraco da junção pn seja separado, com o elétron sendo promovido para a banda de condução do material tipo n, e o buraco para a banda de valência do material tipo p. Gerando assim uma diferença de potencial elétrico entre as extremidades do LED.

Entre os terminais do diodo, portanto, caso houvesse um circuito fechado, poderia ser medida uma corrente elétrica. Entretanto, como este circuito não existe, poderá ser feita a leitura da diferença de potencial mencionada, sendo essa leitura análoga a medição de corrente feita pela placa coletora no efeito fotoelétrico. Assim como no efeito fotoelétrico, caso a energia recebida não seja a suficiente para a mudança de nível dos elétrons semi-livres na camada de valência, a diferença de potencial não existirá e portanto os resultados desta experiência também dependem da frequência da radiação luminosa emitida. Consequentemente, a discretização da luz também é necessária para justificar estes resultados, pois também existirá uma frequência de corte onde abaixo dela não existirá diferença de potencial e acima sim. As características restantes seguem similares ao estudado anteriormente quanto ao fotoelétrico, a intensidade da luz continuará caracterizando a quantidade de fótons emitidos, enquanto a frequência irá caracterizar sua energia. Uma fonte de luz de maior intensidade irá, portanto, levar a uma maior diferença de potencial, desde que esteja acima da frequência limite, visto que serão mais elétrons absorvendo fótons e consequentemente aumentando seu nível energético promovendo-os para a camada de condução.

Apesar deste efeito ser similar ao fotoelétrico, e levar à mesma discussão quanto à natureza da luz, sua reprodução é significativamente mais fácil. Pois o efeito fotoelétrico tem um aparato sofisticado, onde é necessária a produção de um vácuo para não ocorrer o espalhamento dos elétrons a partir das moléculas de ar e estes poderem ser coletados. Enquanto o aparato para reprodução de um efeito fotovoltaico é mais acessível, como mostrado na seção 5 deste estudo.

Ressalta-se que esse processo é análogo ao que ocorre em células fotovoltaicas em usinas de geração de energia elétrica a partir da radiação solar. A “energia solar”, como popularmente conhecida, consiste na captação de corrente elétrica surgente a partir de um movimento elétrico interno em um diodo, onde os elétrons absorvem energia por conta da radiação solar. Vale destacar, no entanto, que essa radiação é policromática, enquanto a que utilizaremos é monocromática e, portanto, na geração de energia elétrica a partir de células fotovoltaicas não ocorre essa discussão quanto a frequência luz incidente de maneira tão clara.

Capítulo 3

Referencial teórico pedagógico

Ao aplicar tal experimentação no ensino formal é importante entender, para além da física utilizada, quais dificuldades pedagógicas serão enfrentadas por se tratar de um ensino de física moderna para adolescentes, e quais as habilidades que serão desenvolvidas a partir deste estudo. Também auxilia em uma boa construção educacional compreender as peculiaridades de uma construção de conhecimento a partir de experimentações e não obstante compreender também as possíveis dificuldades enfrentadas em aulas experimentais.

3.1 Ensino de física Moderna

A introdução à física moderna no Ensino Médio pode em muito ser benéfica para influenciar positivamente a visão do aluno quanto a física, a ciência e a própria realidade natural que vivemos. No entanto, tal transformação vem com um custo da exigência de uma dinâmica pedagógica nova e do confronto de novas e específicas dificuldades que surgem agregadas a esta física.

A pesquisa quanto a implementação da física moderna no currículo escolar é constante e tem levado a significativos frutos. De maneira especial, a partir dela são constatadas as dificuldades e problemas enfrentados na aplicação em sala de aula de tal conteúdo. Entre tais, a de maior destaque tem sido a falta de formação especializada dos professores, como afirma Maurício Pietrocola:

“As investigações que abordam a temática da inserção da Física Moderna e Contemporânea (FMC) no ensino médio vem avançando nas últimas décadas. Hoje, é uma linha de pesquisa consolidada na área de Ensino de Ciências (...) Contudo, ainda é preciso avançar em outros aspectos, tais como: avaliação da implementação de sequências didáticas em ambientes reais de sala de aula e a formação de professores (...) Diante dos diversos aspectos relacionados à inserção da FMC na escola, a formação de professores é, senão o mais importante, um dos aspectos essenciais para qualquer mudança na educação.” (Pietrocola, pág 2, 2018).

Ao deparar-se com a ideia de utilizar a física moderna para transformar a imagem do aluno quanto à ciência, é necessário primeiro compreender que imagem é essa do corpo discente dos

colégios em relação à ciência. Gil Perez e Jordi Solbes, em seu artigo sobre a introdução da física moderna no Ensino Médio, afirmam que a ciência tradicionalmente desenvolvida nos colégios afasta o aluno da realidade científica. O ensino tradicional propõe de fato uma ciência empírica, mas sendo o experimento uma validação da teoria e não demonstrando como o desenvolvimento científico depende da construção de hipóteses. “O ensino de ciências está dando aos alunos uma visão incorreta e simplista da imagem da ciência. Essa é marcada pelo empirismo, mas com a ausência de relevantes aspectos como a formação de hipóteses e a construção experimental.” (Perez e Solbes, pág 1, 1993, Tradução livre)

Uma nova teoria surge a partir da contradição, e não da confirmação, entre o conhecimento científico até o momento e os resultados experimentais. E utilizando em sala de aula os experimentos somente para ratificar os saberes científicos previamente expostos, desenvolve-se no jovem aluno uma ideia irreal da ciência não depender de tal contradição e se desenvolver linearmente a partir do que faz mais sentido, sem rupturas ou discussões. Como afirma Forato em sua pesquisa quanto a historiografia da ciência (Forato, 2011)

A física moderna, então, pode ser uma importante aliada do professor na tarefa de introduzir ao aluno uma visão real de ciência, desde que desenvolvida da forma correta. Expondo aos alunos como surgem novas teorias e novos conceitos na ciência a partir da contradição de teorias até então aceitas e contradições com resultados experimentais. A partir dessa ruptura entre o esperado e o visto no experimento, estudam-se novas possibilidades e teorias até uma ser válida tanto para este experimento em específico quanto para todos os outros que a teoria antiga bem abrangia. E então, utiliza-se desta nova teoria até surgir um novo experimento que possivelmente a invalide, repetindo o processo. Assim, introduz-se o estudo da física moderna utilizando-a também para auxiliar os alunos na compreensão de como as teorias surgem na ciência, e como ocorre a evolução do pensamento científico como um todo.

Vale ressaltar que tal desenvolvimento é benéfico inclusive para o bom entendimento da física clássica. Visto que para bem compreender uma teoria ou um modelo científico é importante conhecer seus limites e até onde vai sua validade. “Essa situação é séria pois pode produzir um entendimento incorreto não somente da física moderna, mas também da física clássica, tanto por não deixar claro seus limites de validação quanto por não explicitar as diferenças entre esses 2 paradigmas.” (Perez e Solbes, pág 3, 1993, Tradução livre)

Todavia, como novamente explicam Perez e Solbes, não é comum utilizar-se a física moderna com tal serventia nos colégios atualmente. De maneira contrária, a física moderna costuma inclusive ser desenvolvida a partir da física clássica naturalmente, como se não existisse nenhuma contradição entre estas. Levando a uma má interpretação dos alunos quanto

a o que é a física moderna, quanto aos limites da física clássica e até mesmo quanto à própria construção da ciência. Tal falha conceitual pode muitas vezes ser inclusive um dos motivos para os alunos apresentarem tanta dificuldade neste estudo e considerarem seu entendimento tão desafiador. “A física moderna normalmente é introduzida em currículos do Ensino Médio sem referenciar as dificuldades da física clássica, sobrepondo uma teoria a outra e muitas vezes até misturando as duas. Isso pode levar a sérios problemas no entendimento dos alunos sobre essa teoria.” (Perez e Solbes, pág 2, 1993, Tradução livre)

Essa construção da física moderna como um crescimento natural da física clássica é comumente utilizada por diversos professores, levando a uma interpretação errônea dos alunos sobre o que é a física moderna. Em pesquisa feita na Espanha, por exemplo, com professores do Ensino Médio, descobriu-se que pouco mais de 10% dos professores consideram necessário introduzir a física moderna a partir dos problemas da física clássica que levaram à sua descoberta.

“Nós também administramos um questionário para 63 professores atuantes no Ensino Médio, perguntando para eles qual critério é utilizado e quais formas são escolhidas para introduzir a física moderna em sala. Somente 12% deles respondeu que considerava necessária a introdução a partir dos problemas relacionados à física clássica ou a partir das diferenças entre os paradigmas da física clássica e da moderna. (Ou qualquer outra apresentação que não envolvesse meramente a introdução cumulativa de conceitos da física clássica para a moderna)” (Perez e Solbes, pág 3, 1993, Tradução livre).

Se faz necessário então, compreender o porquê de comumente desenvolver-se a física moderna de tal forma no Ensino Médio sem explicitar a mudança de paradigmas quando muda-se da física clássica para ela. Nesse aspecto, Maurício Pietrocola sugere a análise da formação dos professores e de maneira especial os métodos didáticos tradicionalmente utilizados no Ensino Médio. Em seu estudo, coloca como claro obstáculo para a boa aplicação da física moderna a manutenção dos métodos comuns de dar aula e se desenvolver o conteúdo científico em sala. “Percebemos que o professor teve boa parte de sua formação imerso nesse tipo de metodologia (Metodologia tradicional de ensino) e por isso, ele acredita que é a forma “normal” de se ensinar e ainda, como aprendeu assim, seus alunos também poderão aprender.” (Pietrocola, pág 4, 2018)

Corriqueiramente o aprendizado da física no Ensino Médio é desenvolvido de forma linear, levando os alunos a uma construção da ciência crescente sem crises ou rupturas. Essa

construção destoante da realidade facilita a princípio para os professores em sua tarefa de ensino, por conduzir a uma aparente evolução lógica e assertiva. Todavia, leva a negativas consequências por guiar os alunos a uma deformada construção do pensamento científico que, no caso da separação entre física clássica e física moderna, leva a problemas no entendimento dos conceitos e dos limites de ambas as teorias.

“Um exemplo de anacronismo é a reconstrução linear de episódios da HC (história da ciência). Embora defendida por alguns pensadores como útil para ensinar conceitos científicos e “necessária” para evitar conflitos com o paradigma vigente, constitui outro equívoco do ponto de vista da historiografia atual (ALLCHIN, 2004; BRUSH, 1974; 1979; KUHN, 1997; MARTINS, 2001; WHITAKER, 1979). Tais narrativas trazem uma seleção apenas dos fatores que contribuem para uma reconstrução ordenada das etapas da criação de teorias e conceitos científicos aceitos pela ciência contemporânea. As ideias e os acontecimentos do passado são organizados como se o desenvolvimento da ciência seguisse etapas encadeadas logicamente, cujo resultado final seria fatalmente encontrado. Geralmente, esse tipo de anacronismo faz parecer que existe uma receita infalível para produzir a ciência: basta que um gênio excepcional siga consistentemente as etapas de um método científico universal exato, certo e único. Essas distorções costumam aparecer nas grandes sínteses, ou seja, narrativas históricas que tentam descrever um período muito longo da história.” (Forato, Pietrocola e Martins, pág 12, 2011)

Outra dificuldade constantemente enfrentada na introdução da física moderna no ensino regular é a necessidade de pré-requisitos. Tendo pré-requisitos da teoria física quanto a matemática envolvida com os estudos da física moderna. Pietrocola afirma: “Professores resistem a inserir tópicos de Física Moderna e Contemporânea devido a necessidade de trabalhar vários conceitos antes de abordarem os conceitos modernos e contemporâneos (Pietrocola, pág 3, 2018).” Enquanto Oliveira (2007) em seu estudo quanto a visão dos professores sobre a física moderna no Ensino Médio afirma: De uma forma geral os professores sinalizaram a matematização do tópico (física moderna) como um problema e, portanto, trabalhariam apenas a parte conceitual. (Oliveira, Vianna e Gerbassi, pág 6, 2007)

Baseando-se em tais resultados, esta pesquisa procura introduzir a física moderna utilizando-se de pré-requisitos comuns nos currículos brasileiros, sendo o principal o estudo das

ondas e dos fenômenos ondulatórios. Conteúdo presente no ENEM em todas as suas últimas 10 edições (INEP, 2024) e portanto estudado com ênfase nos colégios brasileiros. E volta-se para uma análise fenomenológica e não matemática da dualidade onda-partícula, contornando as dificuldades que podem interferir e impedir o entendimento do aluno do conteúdo passado.

Por fim, é interessante realizar-se uma mudança não somente no conteúdo ensinado, mas também no formato e na estrutura tradicional da aula. A aula tradicional centrada no professor não permite ao aluno um desenvolvimento crítico quanto ao conteúdo, onde o próprio estudante conseguiria perceber de maneira mais clara suas dúvidas e dificuldades no entendimento e na aplicação dos novos conceitos introduzidos. “Esse método demanda, em particular, que se substitua a orientação do ensino aprendizagem tradicional, que tem sua ênfase no simples processo de transmissão/recepção de conhecimento, para um novo desenvolvimento que envolva o aprendizado em atividades e exposições de situações e problemas reais que podem ser (re)construídos pelos alunos.” (Perez e Solbes, pág 4, 1993, Tradução livre).

Pietrocola também se preocupa com o fato do ensino ter enfoque comumente no professor. Afirmando que, apesar de compreender o motivo desta rigidez para impedir problemas comportamentais em relação aos alunos, esta centralização no professor sem abertura para experimentação e pensamento crítico dos alunos pode em muito ser maléfica ao processo de ensino aprendizagem. “Esse obstáculo se manifesta na forma de: aula centrada no professor, uma vez que é difícil para esse profissional não ter o “comando” da turma, tendo uma aula expositiva e escasso uso de atividades, já que as aulas com abordagem conteudistas quase não utilizam atividades, ficam centradas somente nas exposições de conteúdo pelo professor, não utilizando, por exemplo, recursos como experimentos, textos e novas tecnologias.” (Pietrocola, pág 5, 2018).

Por fim, complementa-se este estudo quanto à física moderna e suas dificuldades de aplicação no ensino regular propondo uma metodologia ativa. Onde os alunos possam, a partir dos limites da física clássica que se encontram presentes em certos experimentos, construir um conhecimento com a mediação do professor que os faça identificar a necessidade de uma mudança de paradigma da física. Levando assim não a uma exposição à física moderna mas uma construção da mesma que tanto os facilite na compreensão dos conceitos novos quanto auxilie na compreensão dos limites da teoria clássica até então estudada. “Deve-se, então, ser relativamente fácil obter uma melhora significativa no aprendizado dos alunos, utilizando materiais designados para a construção de modelos de aprendizado científico em uma mudança tanto de perspectiva quanto de conceito e metodologia. Com essa orientação nova, que usa tanto as estruturas conceituais originais dos alunos quanto sua metodologia usual, é possível

dar a eles uma visão mais funda e rica de ciência além de levar a possíveis mudanças conceituais que saem do senso comum de física e vão para os paradigmas da física clássica e deles para os paradigmas da física moderna.” (Perez e Solbes, pág 5, 1993, Tradução livre).

3.2 Física experimental no Ensino Médio

A utilização de experimentos em aulas de ciências da natureza pode em muito ser benéfica ao processo de ensino aprendizagem. No entanto, existem diversas formas de realizar tal aplicação e cada uma pode levar a diferentes resultados, que podem interessar de diferentes maneiras para o professor. Apesar da implementação de experimentos em aulas de física ser antiga, é recente a discussão de como aplicar e quais os resultados dessa aplicação. “Experimentos são esperados por estudantes e alunos de serem parte das aulas de física. Ansiosamente antecipado pelos jovens, e às vezes temido pelos mais velhos, experimentos são parte essencial da educação em física por mais de um século. Enquanto sua inclusão ainda não sofreu oposição significativa, a ideia de como deveriam ser feitas mudou dramaticamente ao longo dos anos.” (Havlíček, pág 144, 2015, Tradução Livre).

A forma como se conduzem os experimentos de física em sala de aula pode alterar drasticamente entre um professor e outro e, consequentemente, pode levar a significativas alterações nos resultados esperados. Rosane Alison e Álvaro Leite classificam a experimentação em 4 categorias em seu artigo sobre as possibilidades e dificuldades de experimentação no Ensino de Física, separando-as não somente pela natureza da aula mas também por suas expectativas. São elas: motivacional, funcional, institucional e epistemológica.

- . Categoria motivacional, a pretensão é que o experimento seja atrativo, que conquiste a atenção, promovendo, assim, o interesse. Contempla as atividades relacionadas ao cotidiano e tecnologia, que visem despertar a curiosidade. O foco está diretamente no estudante.
- . Categoria funcional: a característica principal está voltada ao tempo e materiais. Escolhe-se experimentos fáceis, simples de manusear em um tempo reduzido.
- . Categoria instrucional: abrange o processo de ensino e aprendizagem. A prioridade são experimentos que evidenciam a teoria de forma clara, que estimule o desenvolvimento e a aprendizagem de uma maneira rápida e duradoura dos conceitos.

. Categoria epistemológica: caracteriza a construção do conhecimento. Relaciona a observação e a atividade prática, facilitando a compreensão. (Alison e Leite, pág 9, 2016)

É evidente que um experimento pode trabalhar questões de outras categorias mesmo se enquadrando em uma em específico. Tal categorização auxilia os professores no processo de identificação de qual o foco do experimento, a característica fundamental a ser trabalhada nele. E a partir disso, construir a sequência didática de maneira que se foque no resultado esperado, apesar de poder se procurar tangenciar outros resultados. Nada impede que um experimento instrucional seja atrativo também ou auxilie nas habilidades de manuseamento dos alunos, mas o foco do experimento para se categorizar de tal forma deve ser o estudo da teoria física envolvida.

No caso desta sequência experimental a que esta dissertação se refere, sua natureza se categoriza como epistemológica, por não ter um foco em ludicidade, nem em habilidades de manejo ou nem em ratificação de uma teoria física, mas ter sua ênfase em construir um conhecimento científico novo. Evidentemente, é possível que os alunos apresentem interesse e o considerem atrativo, assim como em determinadas situações pode ser aplicado de forma que os alunos o aproveitem para evoluir em habilidades laboratoriais. No entanto, sua categoria se mantém como epistemológica.

Outra importante categorização que deve ser desenvolvida quanto a aulas laboratoriais é em relação ao grau de liberdade dos alunos e a participação deles nas escolhas e manuseamentos do experimento. Tal diferenciação é tão destacável que autores como Havlíček decidem por diferenciá-las como uma sendo atividade laboratorial e outra trabalho prático. (Havlíček, 2015)

A atividade que somente é considerada laboratorial é aquela que o professor desenvolve o experimento e os alunos o acompanham por meio de um roteiro, mas não desenvolvem pensamento crítico nem geram hipóteses e tão pouco manuseiam o material. A esse tipo de aula são realizadas diversas críticas, sendo inclusive questionadas sua funcionalidade e eficácia. Abrahams (2009), em seu trabalho estudando a efetividade do trabalho prático em escolas do segundo segmento dos Estados Unidos nas aulas de ciência, percebe que atividades laboratoriais onde o aluno não manuseia e não desenvolve hipóteses, não apresentam superioridade estatística em relação ao aprendizado dos alunos quando comparadas com aulas expositivas. Sendo, inclusive, não mais considerada como necessariamente mais atrativa e interessante que a aula tradicional expositiva, comumente sendo preferida pelos alunos somente por não necessitar tanto da escrita e do esforço para copiar do aluno, quanto a aula no quadro.

Por outro lado, para diversos autores, tal como Millar (2010), a atividade prática é considerada somente aquela atividade que o aluno conduz, além de observar. É possível que o aluno manipule ou simplesmente, a partir dos resultados do experimento, gere hipóteses. De toda forma, nesses casos, a partir da definição aqui escolhida, o aluno deve ter um papel ativo no experimento de forma a poder considerá-lo como uma atividade prática. “Neste capítulo, atividade prática será usada para significar qualquer atividade de ensino aprendizagem de ciências em que alunos, trabalhando individualmente ou em pequenos grupos, observarão e/ou manipularão objetos e materiais que estão estudando.”(Millar, pág 109, tradução livre, 2010)

Neste estudo em especial, se aplicará um experimento laboratorial como atividade prática, onde os alunos não irão manusear o material devido ao custo de obtenção de grandes quantidades do mesmo, considerando o tamanho médio das turmas brasileiras de física, além do tempo hábil para aplicação do experimento tornar impraticável que o mesmo seja reproduzido por todos os alunos em uma turma de ensino regular. Porém, ainda assim conseguirão analisar os resultados e terão liberdade para construírem e reconstruírem hipóteses, a partir dos resultados por eles mesmos analisados.

O valor lúdico da experimentação é o que leva os alunos, muitas vezes, a se interessarem pela aula experimental. No entanto, o laboratório deve desenvolver algum objetivo específico com os alunos, além de somente ter um valor recreativo. Dividindo em 3 grupos em relação a tais habilidades, a partir de Havlíček temos: o laboratório conceitual, o laboratório de investigação ou pesquisa e o laboratório de instrumentação. Cada um depende de uma abordagem e construção distintas:

“Os laboratórios podem ser separados por seus objetivos em três grupos distintos e cada grupo deve ser planejado com esse objetivo específico em mente. Esses três grupos e os objetivos relevantes são:

- Laboratórios conceituais — ensinando conceitos ou superando equívocos (como funciona a natureza);
- Laboratórios de investigação ou pesquisa — exercitando as habilidades intelectuais necessárias para gerar e validar o conhecimento (como fazer pesquisa);
- Laboratórios de instrumentos — aprendendo habilidades manipulativas (por exemplo, como operar um microscópio).” (Havlíček, pág 147, 2015, Tradução Livre)

Como neste experimento objetiva-se auxiliar o aluno na compreensão da natureza da ciência para além da somente compreensão conceitual, define-se tal laboratório como de investigação ou pesquisa. A proposta é que o aluno, a partir de sua investigação própria e indagação quanto aos resultados do experimento, desenvolva com mais facilidade uma separação entre a natureza clássica da luz e a natureza moderna da luz. Assim levando a uma indagação sobre sua nova natureza que será sanada nas aulas, além de construir uma ideia quanto à realidade sobre o trabalho de um cientista em analisar dados e levantar hipóteses que justifiquem divergências entre teorias e resultados experimentais.

O experimento realizado neste estudo quanto ao desenvolvimento laboratorial de teoria da dualidade onda-partícula a partir da análise de uma prática do efeito fotoelétrico, pode ser considerado então, ao mesmo tempo, uma atividade prática e um laboratório de investigação que apresenta uma objetivação epistemológica. De forma a utilizar-se da experimentação a conduzir os alunos para um conhecimento mais concreto da realidade científica, além de auxiliar os mesmos no entendimento das distinções entre física clássica e moderna, reconhecendo que tal diferença surge de dados experimentalmente observados.

3.3 Ensino de dualidade onda-partícula

Além das questões discutidas na seção 3.1 quanto à introdução de física moderna no Ensino Médio, suas dificuldades e interesses em seu desenvolvimento, existem particularidades para a introdução especificamente da dualidade onda partícula. Tanto em relação a interesses em estudá-la (e de maneira especial interesses em utilizá-la para introduzir a mecânica quântica), quanto em relação a dificuldades próprias de seu desenvolvimento, de maneira especial no Ensino Médio.

Quando procura-se introduzir a mecânica quântica no Ensino Médio, volta-se para um conteúdo que epistemologicamente mostre as diferenças e incompatibilidades entre a física clássica e a moderna. Como afirma Pontes: “Uma das funções da escola é dar acesso aos estudantes à nossa atual compreensão de mundo. Tendo a física quântica alterado essa visão de maneira decisiva, é exatamente a apresentação de aspectos epistemológicos que se torna relevante aqui.” (Pontes, 2019, pág 10) Portanto, é pensada nesta atividade a utilização da dualidade onda-partícula para essa introdução.

O estudo da dualidade também é útil para a introdução de quântica no Ensino Médio pela possibilidade de seu desenvolvimento ser conceitual, sem necessariamente uma matematização complexa, como explica Luiza Vilarta Rodriguez (2018) em sua dissertação de mestrado, onde

analisa o ensino de dualidade onda-partícula em escolas holandesas de segundo grau: “O caráter introdutório da dualidade onda-partícula permite a exploração de estratégias de ensino que promovem a mudança conceitual inicial do pensamento clássico para o pensamento quântico e auxiliam na compreensão adicional de outros fenômenos quânticos. Isto pode ser alcançado, por exemplo, usando abordagens não matemáticas do fenômeno, aprendizagem ativa, ênfase na interpretação e modelos mentais, conflito cognitivo e consciência meta conceitual.” (Rodriguez, página 8, 2018)

Apesar de seu caráter facilitador para introdução da física quântica, a dualidade depende de um difícil entendimento. Sendo tal comum dificuldade inclusive destacada pelo próprio Werner Heisenberg em sua publicação “Os princípios físicos da teoria quântica”, de 1930. Onde nossas pré-concepções clássicas atrapalham por tentar encaixar, mesmo que momentaneamente, os corpos em um dos grandes grupos que até então classificavam toda matéria: as ondas e as partículas, “chamar de partículas, ou chamar de ondas - são ambos incompletos e têm apenas a validade de analogias que são acuradas apenas em casos limites. ... Luz e matéria são entidades únicas, e a aparente limitação da dualidade surge inclusive em nossa própria linguagem” (Heisenberg, pág 10, 1930, tradução livre).

O nível de compreensão dos alunos sobre dualidade onda partícula foi classificado por Krijtenburg-Lewerissa (2017) em seu trabalho “Insights sobre o ensino de Mecânica Quântica no Ensino Médio e nos primeiros anos de graduação” onde os alunos poderiam estar em quatro diferentes estágios da descrição da dualidade: o clássico, o misto, o quase quântico e o quântico.

No estágio de descrição clássica, o aluno procura descrever as entidades quânticas como ondas ou partículas. Na descrição mista, os alunos reconhecem a coexistência de comportamentos de ondas e partículas em certos corpos, mas ainda descrevem objetos quânticos em termos clássicos. Na descrição quase quântica os alunos compreendem que as entidades apresentam comportamentos de onda e partícula mas descrevem os fenômenos de maneira determinística. Por fim, na descrição quântica os alunos têm plena noção dos comportamentos das entidades quânticas e conseguem tanto bem descrevê-las em termos quânticos, quanto bem diferenciar suas características fundamentais das características fundamentais de entidades clássicas.

Para então levar um aluno de uma descrição clássica para uma descrição quântica da dualidade é necessário que se realize uma mudança conceitual. De acordo com Luiza Rodriguez (Rodriguez, 2018), a mudança conceitual é um processo gradual e complexo que em alguns casos, quando não existe inconsistência entre o conhecimento do indivíduo e o novo

aprendizado, pode ser composto de uma simples adição de informações sobre tal conteúdo. No entanto, se não existe concordância entre o conhecimento antigo do aluno e o novo que deseja-se introduzir (como é o caso da introdução da física moderna em relação à física clássica já conhecida) se faz necessária uma completa revisão e reconstrução dos pressupostos, conceitos e certezas deste conteúdo. Neste caso, de maneira especial, é ainda mais complexa a mudança conceitual, pois o aluno, apesar de não poder incorporar as novas informações conflitantes com a estrutura da antiga teoria, não pode substituir por completo a antiga teoria e abraçar em todas as situações a nova. Visto que a física quântica é própria de um estudo microscópico, sendo a física clássica ainda mais interessante de se utilizar em certos limites especialmente macroscópicos. A mudança conceitual, neste caso, não é uma simples substituição de conteúdo e nem tão pouco uma adição de novas informações, mas uma completa reestruturação da própria natureza física do conteúdo, onde agora existem dois modelos científicos incompatíveis entre si e, ainda assim, igualmente válidos cada um dentro de seus limites e situações específicas.

Se faz necessária, portanto, uma cisão clara para os estudantes entre a física clássica e a física moderna. Pois, mesmo facilitando o processo do professor de explicação do novo conteúdo, as analogias e falsas aproximações entre tais modelos da física intensificam as dificuldades apresentadas pelos alunos para diferenciá-los, conduzindo-os inclusive a descrições errôneas da dualidade e de conceitos quânticos em geral. Vale ressaltar que tal tópico continua em discussão nos meios de professores de física, existindo alguns ao redor do globo que inclusive defendem a utilização de tais analogias. Como mostra Rodriguez em seu estudo com professores de Ensino Médio holandeses.

A abordagem didática atual (e proposta) para a dualidade onda-partícula nas escolas secundárias holandesas trata o fenômeno onda e partícula da luz separadamente, usando analogias com a física clássica, e define sua coexistência como o fenômeno da dualidade, que é seguido pela explicação das propriedades ondulatórias de outros objetos, como os elétrons. A utilização desta abordagem didática é comum nos níveis secundário e de graduação (Lautesse et al., 2015) e também tem sido sugerida por outros pesquisadores (por exemplo, Weis & Wynands, 2003; Ayene et al., 2011). No entanto, a revisão da literatura neste estudo mostrou que o uso de tal abordagem é controverso: por um lado, os pesquisadores argumentam que as analogias com a física clássica devem ser evitadas, pois atrasam o contato dos alunos com os fenômenos quânticos (Ireson, 1999; Greca & Freire, 2003;

Lautesse e outros, 2015); por outro lado, os investigadores afirmam que tais analogias facilitam a interpretação, reduzem a abstracção e aumentam a motivação. (Rodriguez, pág. 66, 2018, tradução livre)

Por conta dos desafios acima citados em distanciar a física clássica e a moderna evidenciados pelos níveis de descrição de Krijtenburg-Lewerissa e até mesmo pela fala de Heisenberg em relação à própria nomenclatura da dualidade onda partícula, este experimento procurará estruturar uma introdução da dualidade e da física quântica em geral por si só, sem utilizar analogias com a física clássica. Estruturando-a como um novo modelo que será utilizado em ocasiões dentro de seus limites inerentes à própria teoria. Para tal, utiliza-se a experimentação de forma a desenvolver a dualidade não por analogias à física clássica, mas por resultados experimentais visíveis pelos alunos, que comprovam a incapacidade da física clássica em explicar certas situações. Onde nesses específicos casos bem definidos dentro de um estudo de entidades microscópicas se faz necessário o desenvolvimento de um modelo físico completamente novo e particular.

Enfim, ressalta-se também que na mesma pesquisa de Rodriguez com professores de Ensino Médio, quando questionados quanto às possíveis melhorias que poderiam auxiliá-los no ensino de dualidade onda-partícula, entre as respostas estão as sugestões de mais exemplos e experimentos que relatem e comprovem tal teoria. “Outro objetivo da entrevista foi saber quais melhorias educacionais poderiam ajudar os participantes a ensinar sobre a dualidade onda-partícula. As respostas incluem as seguintes sugestões: mais exemplos da vida real que aplicam a dualidade onda-partícula; mais explicações e estudos interdisciplinares; mais simulações, e mais experimentos práticos.” (Rodriguez, pág. 45, 2018, tradução livre)

3.4 Ensino do efeito fotoelétrico

Ao trabalhar-se a dualidade onda partícula tanto nos anos finais do Ensino Médio quanto nos primeiros anos de uma graduação, é comum a utilização do exemplo do efeito fotoelétrico. Em diversas literaturas, inclusive quanto ao ensino de efeito fotoelétrico, ressaltam tal valor pedagógico para a introdução da física quântica, como é o caso de Wieman (2008) e Klassen (2009). “Compreender o efeito fotoelétrico é um passo crucial para entender a natureza corpuscular da luz, uma das fundações da mecânica quântica. O efeito fotoelétrico é uma poderosa ferramenta para ajudar alunos em seu entendimento sobre o modelo de luz baseado no fóton.” (Wieman pág 2, 2008, tradução livre) e “O efeito fotoelétrico é constantemente

utilizado em livros didáticos para confirmar a existência dos quanta de luz ou fótons, sendo essa uma das suas principais importâncias didáticas.” (Klassen, pág 2, 2009, tradução livre)

Por esse papel fundamental na física quântica, o efeito fotoelétrico é amplamente estudado ao redor do globo em cursos de física e nos últimos anos do Ensino Médio. No entanto, é comum em disciplinas de física em graduações este conteúdo ser visto rapidamente, e ser considerado pelos professores universitários como um experimento simples e de fácil compreensão. Em estudo realizado com professores universitários de cursos de Física dos Estados Unidos, Wieman confirma essa afirmação.

“Apesar da maioria dos professores universitários acreditarem que o efeito fotoelétrico é extremamente importante, eles não procuram passar muito tempo nele. Um terço dos entrevistados respondeu que descrever o efeito era uma tarefa simples. Aparenta existir uma percepção espalhada de que este tópico é direto e pode ser aprendido pelos estudantes com relativamente pouco esforço (...) 80% dos professores acreditam que após suas aulas seus alunos atingiram seus objetivos quanto ao entendimento do efeito” (Wieman, pág 3, 2008, tradução livre).

Os resultados esperados pelos professores universitários não condizem com o apresentado na realidade. Em pesquisas posteriores junto a alunos de graduação em Física, percebeu-se que a simplicidade do efeito fotoelétrico e o domínio dos alunos são ambos superestimados por seus professores. Steinberg (1996) percebe que após instruções padrões muitos estudantes não compreendem ainda as implicações e resultados do efeito, e não conseguem explicá-lo. Wieman também, em seus estudos, afirma que os alunos apresentam dificuldade com os aspectos experimentais e com as implicações do efeito sobre a natureza da luz, além de não compreenderem bem os resultados. “Pesquisas mostram que os alunos têm sérias dificuldades em compreender até mesmo os aspectos mais básicos do efeito fotoelétrico, como a configuração experimental, os resultados experimentais e suas implicações sobre a natureza da luz.” (Wieman, pág 3, 2008)

É necessário compreender os erros conceituais realizados pelos alunos para entender de onde vem tamanha dificuldade na compreensão do efeito fotoelétrico, para então superá-los. Comparando as pesquisas de Klassen e Wieman, três pontos são citados por ambos como comuns equívocos entre os alunos de Física: a incapacidade de diferenciar fluxo de fótons e energia dos fótons; a consideração de que fóton é uma partícula carregada; a consideração de que a ocorrência do efeito fotoelétrico por si só é uma incoerência com a física até então e não os resultados por ele obtido que destoam dos esperados pela teoria clássica.

Além disso, Klassen também destaca os equívocos relacionados aos mitos históricos do efeito fotoelétrico, sendo eles a ideia que Einstein usou o efeito fotoelétrico para confirmar a teoria de Planck; o pensamento de que o artigo de 1905 de Einstein primordialmente foi sobre o efeito fotoelétrico, e a consideração de que a explicação de Einstein para o efeito fotoelétrico foi amplamente aceita pela comunidade científica, visto que não existia uma explicação clássica para o mesmo. Também destacam-se equívocos comuns entre os alunos observados por Wieman quanto à previsão de um gráfico I-V para o experimento e a consideração de que a equação $V = RI$ se aplica para o experimento fotoelétrico; além de Klassen também identificar uma grande dificuldade dos alunos no entendimento da função trabalho quando aplica-se a equação de Einstein ($eV = h\nu - \phi$). Estes últimos problemas não serão incômodos em nossa prática, visto que utilizaremos o efeito fotovoltaico que escapa dos mesmos.

Ressalta-se a importância de discussão quanto a tais pontos com alunos tanto do bacharelado quanto da licenciatura de Física que, como mostrado acima, apresentam graves equívocos conceituais nestas áreas. No entanto, para o estudo do efeito de maneira introdutória à física quântica no Ensino Médio torna-se interessante uma discussão mais elementar, não tão ampla matematicamente mas que se aprofunde no conceito de fóton e nas divergências entre os resultados do efeito fotoelétrico e a física clássica. Escapando assim de discussões como a função trabalho e facilitando-as usando termos mais gerais: “Qualquer tratamento elementar do efeito fotoelétrico não deveria, portanto, levantar a questão da função trabalho, mas, simplesmente, falar em termos gerais sobre a energia necessária para remover um elétron do metal.” (Klassen, pág. 4, 2009, tradução livre).

Outro cuidado destacado é o conceito de fóton. A concepção do fóton como uma partícula de luz pode levar a uma consideração errônea dos alunos de um retorno à teoria corpuscular de Newton. É importante mostrar a existência do fóton mas não se alongar quanto a definição de seu movimento, focando nos resultados da interação entre a luz e a matéria e os resultados apresentados pelo detector. “A imagem comum de fótons como partículas da luz conduz o aluno a um erro, pois implica em uma localização e movimento da partícula entre o emissor e o detector da luz, mesmo que esse movimento não seja definido. Deve ser evidenciado, no lugar, a interação de natureza quântica entre a luz e a matéria. (Klassen, pág 5, 2009, tradução livre)

É necessário destacar a importância dos estudos por parte do professor quando este se empenha em apresentar o efeito fotoelétrico ou o efeito fotovoltaico em turmas da educação regular. Como estudado acima, diversos alunos das graduações em física tem defasagens drásticas quanto a esses efeitos e para transportá-los para o Ensino Médio, mesmo que de forma simplificada, é indispensável que o professor pesquise e estude de forma a corrigir tais déficits.

Mesmo que o professor não desenvolva em sala do Ensino Médio a história do efeito fotoelétrico, a função trabalho e nem um estudo mais profundo quanto à própria definição do fóton e as características de partículas quânticas, é indispensável que ele tenha tais conceitos em mente. Pois a má formação pode levar o professor, em sala, a realizar erros conceituais ao explicar os fundamentos do efeito ou pode conduzir os alunos a pensamentos errôneos sobre sua história.

Pedagogicamente, o papel do efeito fotovoltaico nessa aplicação é de conduzir os alunos a um ideal de dualidade onda partícula e auxiliá-los na compreensão da natureza da ciência. No entanto, é necessário o destaque de que não é o próprio efeito fotovoltaico nem o efeito fotoelétrico que se opõe ao conceito clássico de luz, mas os resultados que eles apresentam. Para ocorrer tal desenvolvimento com clareza propõe-se a discussão do efeito, antes de sua aplicação para diferentes fontes de luz.

O professor introduzirá o efeito fotovoltaico utilizando somente uma fonte de luz, de frequência acima da frequência limite, para os alunos primeiro compreenderem em termos de energia e elétrons, o que ele é. Em seguida, o professor conduzirá uma discussão teórica quanto a o que ocorreria caso trocasse a frequência da luz (relacionando sempre a energia de uma onda com seu conceito clássico). Após essa discussão e a previsão dos alunos, estes finalmente irão observar a emissão de diferentes fontes com distintas frequências de luz, sendo entre essas a luz vermelha, que é abaixo da frequência limite do LED utilizado, levando a uma quebra na previsão a partir da física clássica. Essa condução específica propõe-se a auxiliar os alunos no entendimento de que o efeito fotovoltaico em si não se opõe à física clássica, mas seus resultados que destoam das previsões clássicas.

É destacável também a flexibilidade da proposta experimental de acordo com a realidade da turma e do professor, podendo ser aprofundada ou simplificada de acordo com a interpretação do docente de sua turma e seu interesse pedagógico. O objetivo desta proposta não é necessariamente que os alunos desenvolvam isoladamente hipóteses quanto a uma natureza dual da luz sem uma pré introdução à mesma, mas que, a partir da condução do professor, eles consigam compreender que existem falhas no modelo clássico que utilizamos e compreendam que para certas situações temos que adotar outro modelo científico. Assim, pode-se desenvolver para além do raciocínio físico também uma discussão epistemológica sobre o que é ciência, como desenvolvem-se modelos científicos e quais as características de cada teoria científica que definem quando esta pode ou não ser utilizada. Compreender que uma teoria científica pode ser utilizada para previsões válidas em determinadas situações dentro de limites

específicos, e não em outros contextos fora desses limites, é essencial para a compreensão epistemológica do aluno do que é o fazer científico.

Capítulo 4

Metodologia:

Este capítulo irá discutir a montagem do experimento, dos roteiros e do plano de aula para a aplicação. Ressalta-se sempre a possibilidade de alteração destes aspectos de acordo com as peculiaridades e ocasionalidades de cada turma e dos objetivos pedagógicos específicos de cada professor. A partir desta discussão metodológica procura-se facilitar a construção de experimentos iguais ou similares, em especial indicando problemas que podem vir a aparecer e práticas para enfrentá-los.

4.1 - Montagem experimental

Para a montagem experimental foram necessários materiais específicos que auxiliassem na discussão da natureza da luz além das próprias fontes luminosas. Quanto às fontes de luz como o laser que utilizaremos. O ideal é a utilização de uma fonte de laser verde com cerca de 550 nm, dois lasers vermelhos de diferentes potências mas ambas com comprimentos de onda de cerca de 650 nm e uma fonte de luz branca.

A fonte de luz verde tem como potência mínima necessária um valor que seja suficiente para a percepção da diferença de potencial pelo voltímetro utilizado no efeito fotovoltaico. Neste experimento, em que usa-se um multímetro comum, desde que o laser verde tenha pelo menos 1 mW de potência, é possível realizar-se o experimento sem complicações.

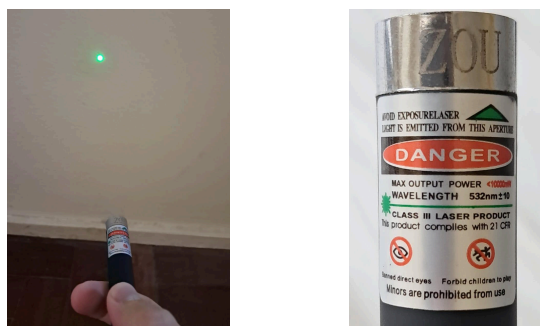


Figura 4.1: Foto da esquerda: O laser verde sobre um anteparo, foto da direita: suas características (comprimento de onda de 532 ± 10 nm)

Os lasers vermelhos são necessários para estudar tanto a diferença entre frequências distintas dentro de cada experimento, quanto para apontar a distinção causada por uma

variação de intensidade no efeito fotovoltaico. Podem ser usados um laser de 1 mW de potência e outro de 5 mW, por exemplo, o importante é que as potências sejam tanto visualmente quanto quantitativamente diferenciáveis no experimento.

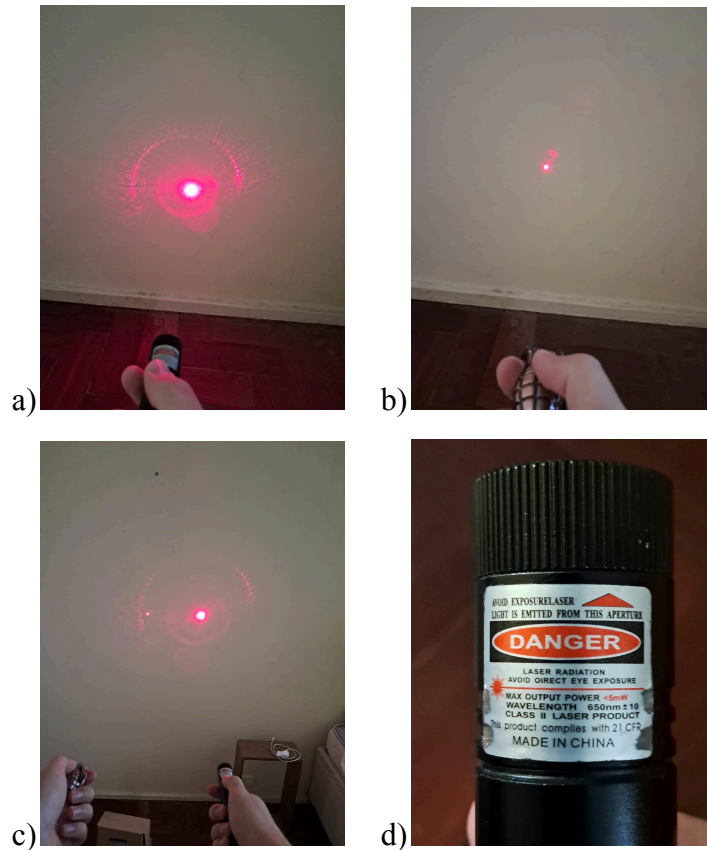


Figura 4.2: a) Laser vermelho de alta potência. b) Laser vermelho de baixa potência. c) Ambos os lasers vermelhos em comparação. d) Características do laser vermelho de alta potência (comprimento de onda 650 ± 10 nm).

A fonte de luz branca, em contrapartida, não necessita de uma intensidade específica, sendo ela especialmente para auxiliar os alunos a diferenciarem as possíveis situações que possam vir a acontecer no efeito fotovoltaico. Desde que haja, novamente, uma intensidade mínima perceptível quantitativamente no experimento e visualmente pelos alunos.

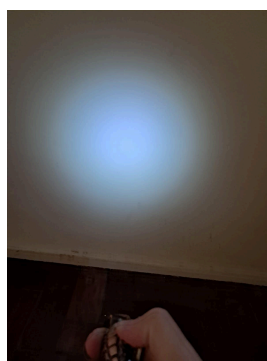


Figura 4.3: Luz branca utilizada a partir de uma lanterna.

Além da fonte de luz, se faz necessária a utilização, para o primeiro processo experimental, de um fio de cabelo, uma régua e uma base para apoio do fio. A base de apoio para o fio pode facilmente ser obtida por material reutilizável. Em ambas as aplicações foram utilizadas uma caixa de papelão cortada. Para apoiar o fio de cabelo foi realizado um corte retangular na tampa de uma caixa de papelão pequena, prendendo neste corte o fio e apoiando as abas da tampa nas laterais da caixa para esta ficar em pé como mostrado na figura 4.4.



Figura 4.4: Base de papelão para o fio de cabelo

Quanto aos outros componentes, os LEDs não precisam ter alguma intensidade específica, mas é importante checar se são LEDs da própria cor ou são produzidos pela combinação de outras cores que a frequência pode influenciar no resultado do experimento. O voltímetro não precisa de uma precisão muito elevada, podendo ser utilizado um simples multímetro digital portátil como o da imagem 4.5.a, desde que tenha a precisão mínima de pelo menos 1V. A bateria, por fim, pode ser de somente 3 V, para ligar facilmente o LED e demonstrar para os alunos as cores que serão utilizadas no experimento.

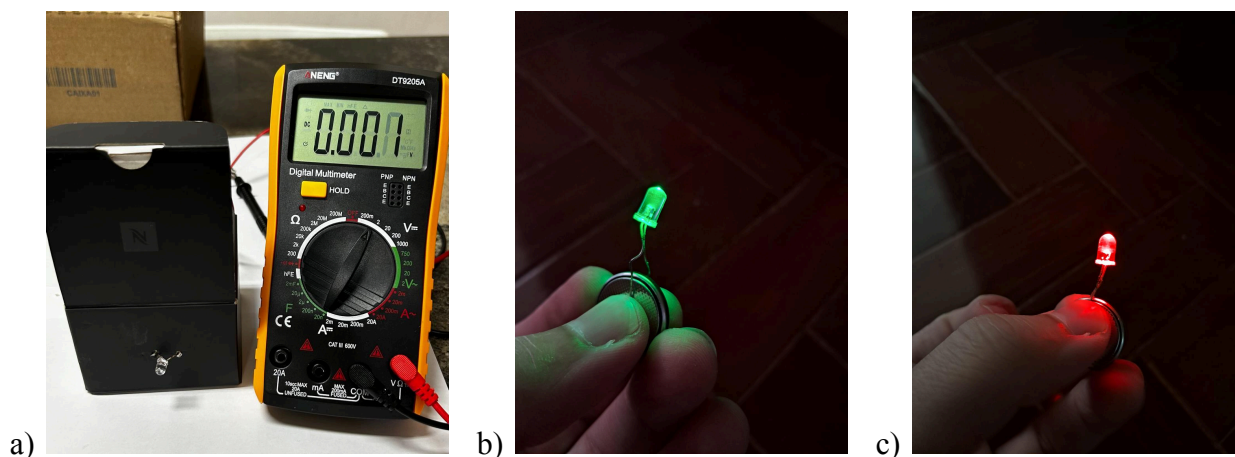


Figura 4.5: a) Aparato experimental com o multímetro conectado ao LED verde. b) Testagem do LED verde usando a bateria. c) Testagem do LED vermelho usando a bateria.

Para a montagem, entre os principais cuidados necessários está a precaução com a medição das distâncias entre os máximos subsequentes do laser verde e os máximos subsequentes do laser vermelho. Tal distinção não é possível a olho nú, sendo portanto necessária a régua como mostra a figura 4.4. Todavia, para os valores indicarem corretamente a variação de comprimento de onda, é necessário que todos os outros fatores sejam constantes, em especial, as distâncias entre o fio de cabelo e a parede. Para isso, é necessário que a base para o fio seja fixa, como a caixa de papelão.

Nas aplicações realizadas em específico as distâncias entre os máximos consecutivos com o laser verde e o laser vermelho, respectivamente, foram de 6 mm e 8 mm. No entanto, estes valores não necessariamente se repetirão em outras aplicações pois além de dependerem do comprimento de onda do laser utilizado dependem da distância entre a parede e o fio de cabelo e do diâmetro do fio.

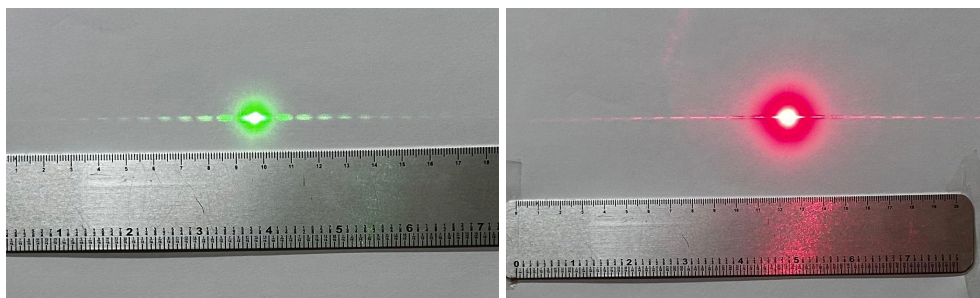


Figura 4.6: Foto da esquerda: Medição da distância entre 2 máximos consecutivos para a luz verde. Foto da direita: Medição da distância entre 2 máximos consecutivos para a luz vermelha.

Ainda no primeiro segmento, é importante preocupar-se com a iluminação da sala. Visto que uma sala de claridade muito elevada impossibilita a percepção clara do padrão de interferência na parede, e por outro lado, um ambiente completamente escuro dificulta a medição das distâncias entre os máximos medidas pela régua. Também sugere-se manter uma mesma distância entre o laser e o fio de cabelo para ambas as aplicações com a fonte verde e a fonte vermelha. Apesar dessa distância não alterar o resultado, uma variação de um caso para outro pode conduzir os alunos a pensamentos errados associando-a à variação de comprimento das franjas observada.

Para a realização experimental do segundo segmento, o efeito fotovoltaico, é importante demonstrar antes aos alunos a cor de cada LED utilizado. Os cabos com ponta de garra são necessários para conectar o LED ao voltímetro e auxiliar na sua fixação perpendicular à face da caixa onde estão presos.

Um cuidado também necessário é em não realizar um contato entre as fontes luminosas e o LED quando realizar o experimento, de forma a não conduzir o aluno ao pensamento de uma passagem de energia da fonte para o LED por contato. No entanto, é também necessário que esta distância não seja muito grande de forma a virar imperceptível no voltímetro o efeito fotovoltaico.

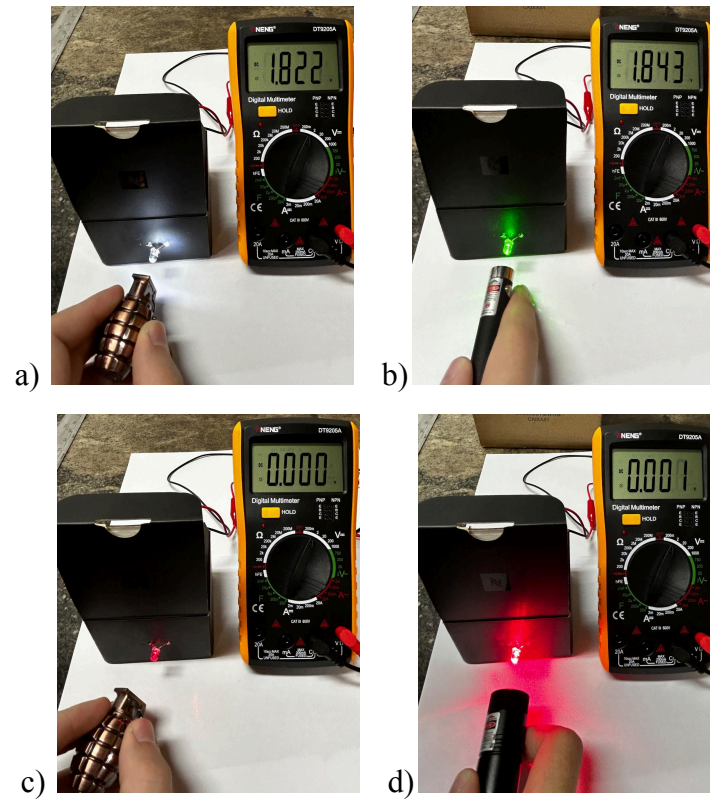


Figura 4.7: a) emissão de luz branca no LED verde; b) emissão de luz verde no LED verde; c) emissão de luz vermelha de baixa potência no LED verde; d) emissão de luz vermelha de alta potência no LED verde.

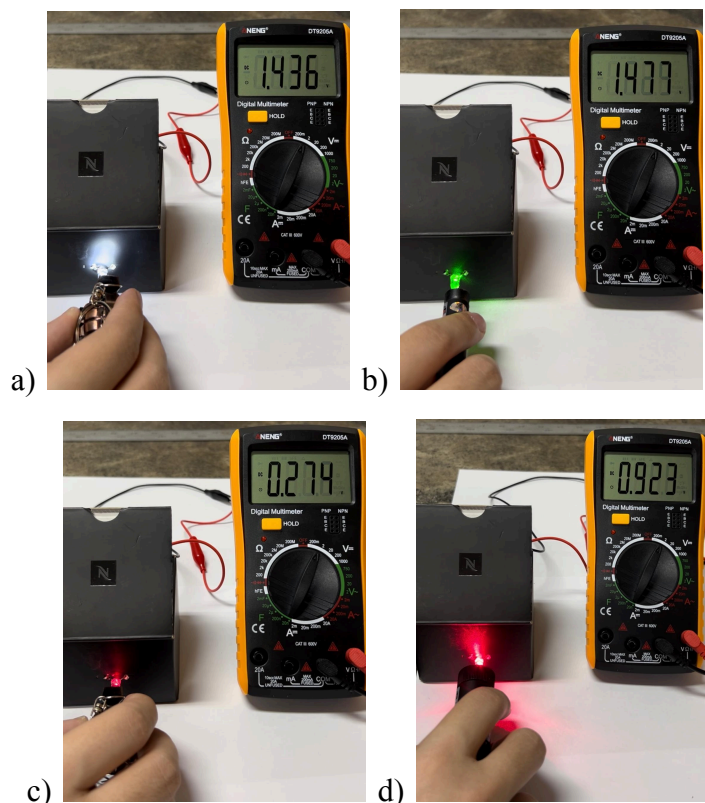


Figura 4.8: a) emissão de luz branca no LED vermelho; b) emissão de luz verde no LED vermelho; c) emissão de luz vermelha de baixa potência no LED vermelho; d) emissão de luz vermelha de alta potência no LED vermelho.

4.2 - Plano de aula

Para a preparação de um plano de aula que potencialize ao máximo esta atividade é necessária a tomada de certos cuidados e precauções. Como uma base mínima no conteúdo de física dos alunos, um espaço de sala compatível e um tempo significativo de aula de forma a possibilitar discussões e análises dos alunos. Destacando que o experimento tem como premissa a fácil divulgação em escolas brasileiras públicas ou particulares, logo, nenhum desses cuidados torna tal aplicação inviável em ambientes escolares com poucos recursos ou carentes materialmente.

A princípio a montagem do plano de aula segue como exposto no anexo deste estudo. Todavia, destaca-se a necessidade de pelo menos dois tempos de 50 minutos para a boa realização deste experimento, podendo estes serem seguidos ou divididos em duas aulas subsequentes. Visto que são aplicações experimentais que levam tempo além de serem necessárias discussões com os alunos anteriores, posteriores e ao longo da explicação.

Os alunos também devem ter pelo menos o conteúdo base de ondulatória concluído ou perto de conclusão para bem compreenderem os fenômenos ondulatórios estudados nos

experimentos. Além de necessitar de um entendimento das características fundamentais da onda como amplitude e comprimento de onda. Os conteúdos de eletricidade e circuitos elétricos podem também ser úteis para o entendimento do efeito fotovoltaico, especialmente para o entendimento do papel do voltímetro e o significado da voltagem obtida.

Outro pré-requisito para a boa preparação deste experimento é o espaço físico da sala, visto que, para uma boa observação dos fenômenos ondulatórios da luz, é necessário que a sala não esteja completamente clara. Em alguns ambientes pode ser complicada a tarefa de escurecer a sala por conta da luz solar, especialmente em aulas diurnas, no entanto, na maioria dos colégios brasileiros existem artifícios que facilitam essa redução da incidência da luz solar. Destaca-se também que não é necessária uma escuridão completa, sendo somente importante uma redução suficiente para a boa observação das franjas de luz na parede.

Outro fator físico é a importância de uma parede minimamente lisa e de um objeto de apoio preferencialmente deslocável para uma boa aplicação. Ambos são úteis também na visualização do padrão de interferência na parede.

Além de tais cuidados técnicos, ao montar sua aula, o professor deve, a partir do seu conhecimento sobre a turma, realizar as devidas adaptações conforme seu entendimento. Iniciar a aula com uma recapitulação dos fenômenos ondulatórios pode ser interessante caso a matéria tenha sido estudada há muito tempo, ou seja, uma turma com significativa dificuldade neste conteúdo.

Variações pequenas, como ser uma atividade com valor na nota trimestral dos alunos ou não, podem também ocorrer de acordo com a situação específica de cada professor. Todavia, a estrutura pedagógica e o procedimento físico são propostos para fácil reprodução sem grandes mudanças ou adaptações necessárias em boa parte das salas de aula brasileiras do segundo ou terceiro anos do Ensino Médio, a não ser que tais mudanças sejam especificamente quistas pelo professor que conduz a atividade.

Capítulo 5

Resultados

O plano de aula foi realizado com 3 grupos de alunos. Dois deles em um colégio estadual em Jacarepaguá, na Zona Oeste do Rio de Janeiro, com turmas do segundo ano do Ensino Médio com 21 e 28 alunos cada, estando praticamente todos entre as idades de 16 e 17 anos. As duas classes são do turno da tarde e ambas realizaram o experimento na própria aula de física, na semana logo após seu conteúdo programático sobre ondulatória. A terceira aplicação ocorreu em um clube de ciências do Colégio de Aplicação da UFRJ (CAP-UFRJ) com 15 alunos do terceiro ano do Ensino Médio com idades de sua maioria entre 17 e 18 anos, e estando no contraturno escolar, sendo a atividade, portanto, independente da programação curricular no momento.

5.1 Aplicações no turno escolar

Com a permissão do professor de física deste colégio, o plano de aula foi realizado tal como planejado em ambas as turmas, no período de 2 tempos de aula (uma hora e quarenta minutos) em sala, seguindo o material dos alunos produzido nesta pesquisa, que se encontra no apêndice A. O roteiro foi utilizado ao longo das aulas e os alunos o responderam em etapas, ao longo do percurso da atividade. Destaca-se que essa atividade fez parte da nota trimestral dos alunos como pontuação extra, incentivando-os, assim, a responderem todas as perguntas (medida essa sugerida pelo professor da turma).

Uma peculiaridade deste colégio é a taxa de presença dos alunos, sendo infelizmente um valor pouco acima dos 50%, levando a problemas de continuidade dos conteúdos. As turmas têm em sua totalidade por volta de 40 alunos, sendo comum as aulas terem presentes entre 20 e 30, que variam inclusive drasticamente ao longo do trimestre.

Por conta dessa infeliz ocasionalidade, o conteúdo anterior à aplicação, de fenômenos ondulatórios, não era compreendido por parte significativa dos alunos em sala, precisando ser lembrado no início do plano. Após essa rápida revisão, iniciou-se o projeto de maneira igual em ambas as turmas. Devido a semelhança destas turmas e dos resultados, as respostas dos quarenta e nove alunos serão analisadas em conjunto.

5.1.1 Pré-experimento

Originalmente, em ambas as turmas, foi realizada a discussão sobre ondas e partículas, questionando aos alunos o que é uma onda, o que é uma partícula e características próprias de cada uma. Após esse primeiro momento, o experimento do feixe de luz sobre o fio de cabelo é explicado para os alunos, perguntando para eles quais resultados eles esperam. As perguntas pré-experimento foram:

1- O que você espera ver na parede sem o fio de cabelo no meio?

2- E com ele, como deve ficar?

3- Existe alguma diferença entre a luz verde e a luz vermelha neste experimento?

Na segunda pergunta quanto a expectativa dos alunos em relação ao experimento com o fio na frente, dos 49 alunos: 19 responderam que o fio não mudaria em nada o experimento, 6 responderam que surgiria uma sombra, 5 responderam que algo iria acontecer mas que não sabiam dizer o que e 14 responderam que ia ocorrer alguma interferência do fio ou que este ia cortar a luz. Os últimos 5 alunos chegaram a respostas que não auxiliam por si só no nosso estudo estatístico por não se repetirem.

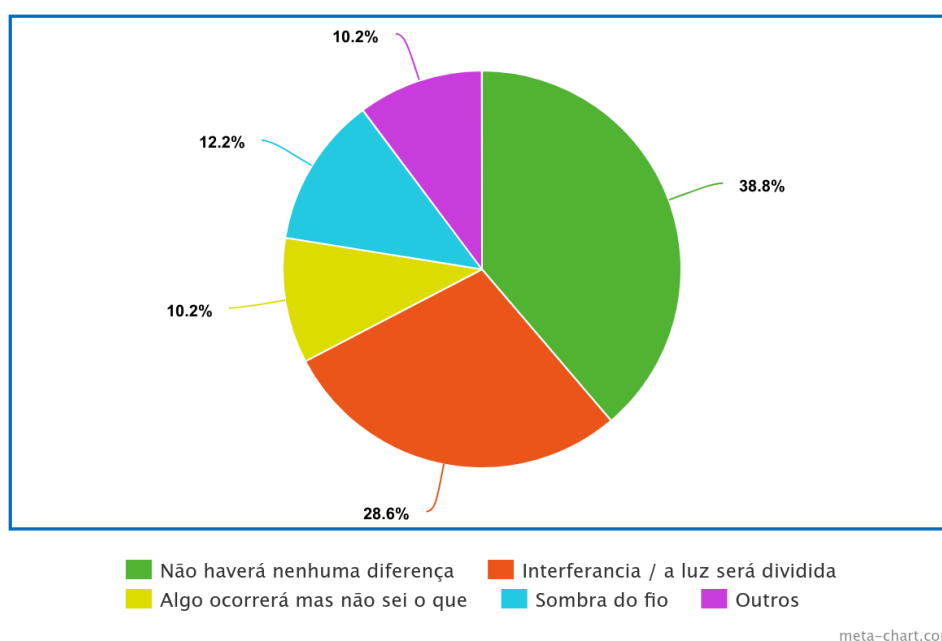


Figura 5.1: Gráfico com os resultados da segunda pergunta do pré-experimento

A partir destas respostas, é observável que os 28,6% dos alunos surgiram com respostas similares ao esperado pelos conceitos de física clássica. Enquanto outros 62,2% pautaram suas expectativas em outros conhecimentos como suas práticas habituais e 10,2% preferiram não tentar prever o resultado. Investigando mais a fundo esses 14 alunos com respostas fisicamente interessante, encontra-se os seguintes padrões:

Três alunos responderam afirmando que ocorreria o fenômeno de interferência. Todavia, entre esses, um afirmou ocorrer uma interferência da luz com o fio de cabelo, e os outros dois afirmaram existir uma interferência, sem deixar claro que seria entre os raios de luz após serem divididos:

Aluno A: “Interfere em uma parte da luz.”

Aluno B: “Uma pequena interferência da luz na parede.”

Aluno C: “A luz vai passar com uma pequena interferência com o fio.”

Dois alunos afirmaram também que a luz seria dividida pelo fio, fazendo uma analogia ao fenômeno da difração. No entanto, nenhum usou este termo.

Aluno D: “Deve ficar se propagando e dividindo.”

Aluno E: “A luz deve ficar dividida pelo fio de cabelo no meio, impedindo parte de chegar a parede.”

Por fim, um aluno afirmou existir possibilidade tanto de ocorrer uma interferência com o fio, quanto de ocorrer uma difração, sem usar esse termo, mas afirmando também que a luz seria dividida pelo fio:

Aluno F: “Ou do mesmo jeito, ou mais fraco por causa da interferência do fio ou vai se dividir.”

As afirmações quanto a interferência remetem a termos utilizados anteriormente pelo professor em sala, no entanto, demonstram uma má concepção do conceito físico. Os alunos compreenderam que interferência é um fenômeno da luz, mas não exatamente como ocorre essa interferência. Por outro lado, as afirmações que o fio de cabelo iria dividir a luz levam a uma interpretação distinta, onde existe já um conhecimento do conceito físico, sem ainda o

domínio do termo correto utilizado. Os alunos compreenderam o fenômeno que ocorrerá, mas, em sua maioria, não definem ainda esse fenômeno como difração.

Paralelamente, a terceira pergunta procurava investigar o que os alunos associam às cores e quais suas expectativas em como essa variação poderia afetar o experimento. Entre as respostas, 22 alunos afirmaram não haver diferença, 13 alunos afirmaram existir uma diferença mas não procuraram explicar qual e 14 alunos construíram uma hipótese do que poderia mudar. É interessante instigar estas criações de hipóteses pois auxiliam o professor a identificar e avaliar os conhecimentos físicos dos alunos até o momento.

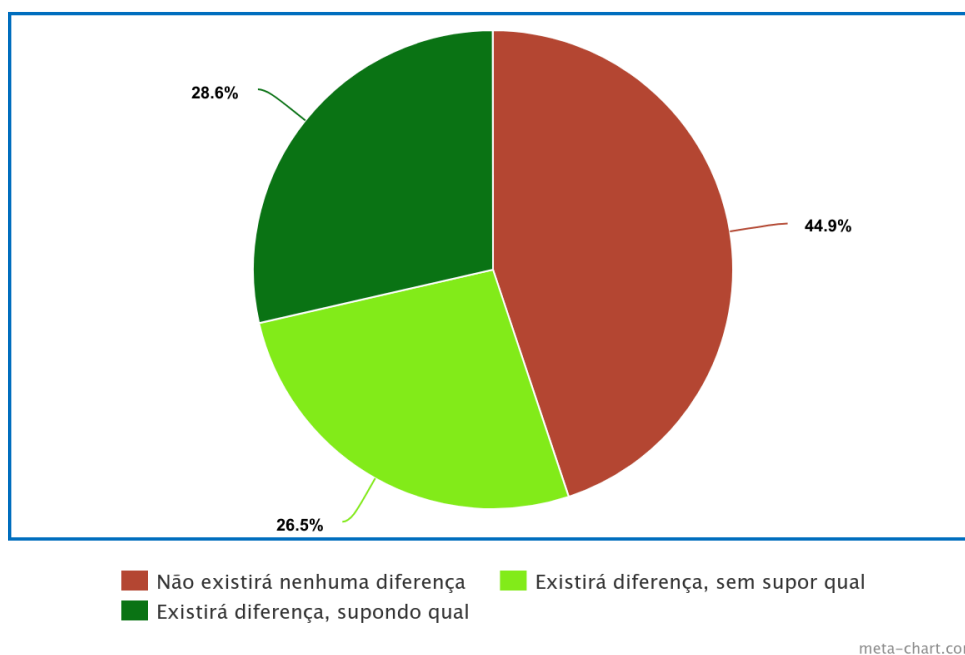


Figura 5.2: Gráfico com as respostas da terceira pergunta do pré-experimento

Dentro desses 14 alunos que geraram hipóteses, 8 propuseram que as cores diferentes levariam a comportamentos diferentes, tal como uma luz se “espalhar” quando entrar em contato com o fio e a outra não. Outros 5 propuseram que o resultado seria o mesmo, mas que a luz vermelha seria mais intensa ou mais forte que a verde. Resposta esta que pode ter sido influenciada pelo ponteiro laser vermelho apresentado para eles no início da atividade ser maior e mais robusto que o ponteiro laser verde apresentado. Por fim, um aluno respondeu que a frequência dos dois é diferente, uma afirmação totalmente correta a partir da física clássica.

5.1.2 1ª sequência experimental

Foi realizado o experimento de interferência tanto com a fonte de luz vermelha quanto com a fonte de luz verde. Com ambas foi possível perceber o padrão de interferência causado pela difração da luz ao passar pelo fio de cabelo. Todavia, foi notada uma dificuldade dos alunos em enxergarem bem o experimento pelo tamanho da sala. Os alunos foram convidados para vir à frente e verem mais de perto, no entanto, nem todos aceitaram esse convite.

Após realizar os procedimentos experimentais, o professor explicou para os alunos tais resultados e os fenômenos ondulatórios que aconteceram, e depois pediu que os alunos completassem o roteiro com sua análise dos resultados obtidos. Parte significativa dos alunos ficou impressionada com o resultado, pois não esperavam a aparição de franjas espaçadas regularmente e em uma única linha horizontal.

Ainda assim, é notório a partir das respostas que alguns alunos não compreenderam bem o experimento, ou se confundiram em alguns conceitos. Entretanto, a maioria dos estudantes de ambas as turmas responderam corretamente às perguntas, que foram:

- 1- Os resultados foram próximos do que você esperava?
- 2- O fio de cabelo interferiu no experimento?
- 3- A partir do que foi observado neste experimento, você diria que a luz se comporta como uma onda ou como uma partícula?
- 4- Houve alguma alteração com a mudança da cor do laser? Se sim, qual característica da luz levou a isto? O que definiria a “cor” da luz?

Quanto à primeira questão, 28 alunos responderam que não esperavam os resultados obtidos, enquanto os outros 21 afirmaram terem acertado sua previsão. A segunda questão, quanto a interferência do fio de cabelo, foi mais discrepante em relação aos resultados, com somente 2 alunos respondendo que o fio não interferiu no experimento e todos os outros 47 afirmando que sim como esperado. Estes 2 alunos que afirmaram não ver nenhuma alteração no experimento com o fio de cabelo afirmaram também na primeira pergunta que acertaram a previsão do que ocorreria, como mostra o gráfico 5.3

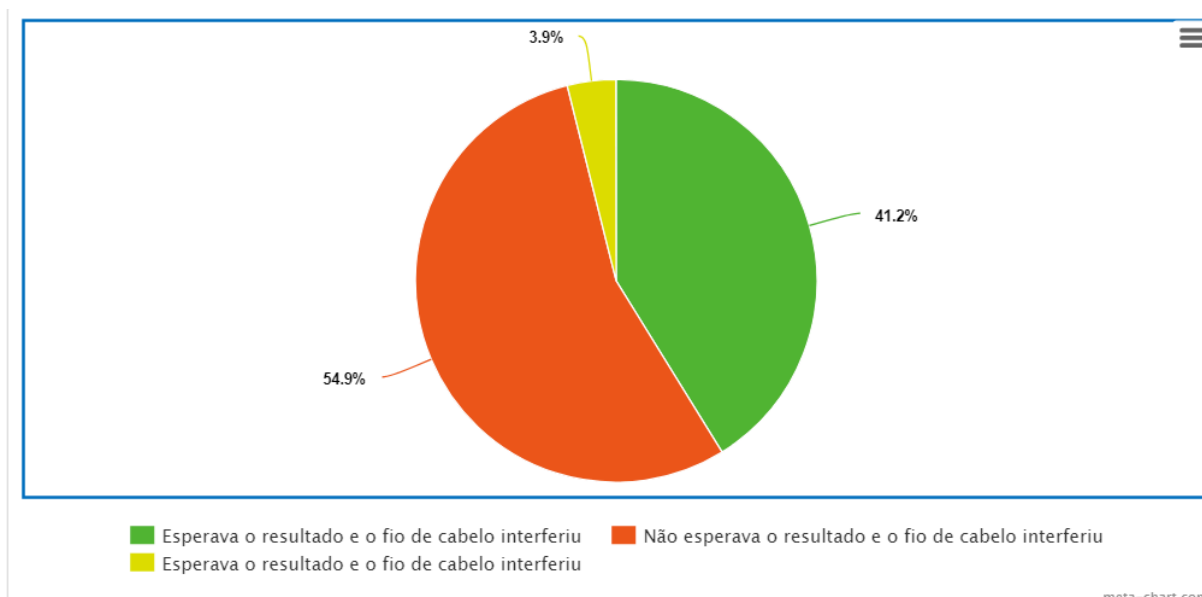


Figura 5.3: Resultados da primeira e segunda pergunta da primeira análise de dados

A expectativa era de fato que a maioria dos alunos percebesse a interferência do fio de cabelo e reconhecesse uma distinção entre sua hipótese individual pré-experimento e o resultado. Entre estes alunos, três produziram respostas destacáveis à pergunta quanto à interferência do fio de cabelo por estas levarem a boas discussões quanto ao seu entendimento.

Aluno A: “A luz bateu no fio e a onda dele se espalhou pela horizontal tanto pela esquerda quanto pela direita.”

Aluno B: “Pode se dizer que sim, porque ele deixou uma linha de pontinhos aparente na horizontal no meio da luz.”

Aluno C: “Sim, interferiu porque a luz se espalhou quando entrou em contato com o fio.”

As respostas demonstram uma análise empírica feita pelos alunos. Esta análise aparentemente independe do conhecimento prévio deles quanto aos fenômenos ondulatórios pelo fato destes não terem sido citados em suas falas. No entanto, é possível que este experimento auxilie os alunos a posteriormente aprenderem mais quanto aos fenômenos ondulatórios. Visto que, a visualização do experimento e a análise empírica podem facilitar tanto no reconhecimento quanto na compreensão do fenômeno ocorrido.

A pergunta número três levou a quarenta respostas esperadas, afirmando que, a partir do experimento, consideravam que a luz se comporta como onda e, em contrapartida, nove

respostas inesperadas que afirmaram considerar a luz como partícula, a partir deste experimento, como mostra o gráfico 5.4. Estes nove resultados inesperados podem vir tanto de um mal entendimento da atividade, quanto de um mal entendimento do conteúdo. Entretanto, ainda é possível que parte desses nove resultados venham de uma desatenção do aluno ao longo da atividade, visto que a nota foi dada aos alunos por concluírem-na e não necessariamente por acertarem as respostas. Esta proposta de pontuação diretamente caso haja resposta se deu para incentivar e não coibir respostas subjetivas e considerações individuais do aluno, contudo, este formato vem com o ônus do aluno muitas vezes não responder o roteiro com a seriedade necessária.

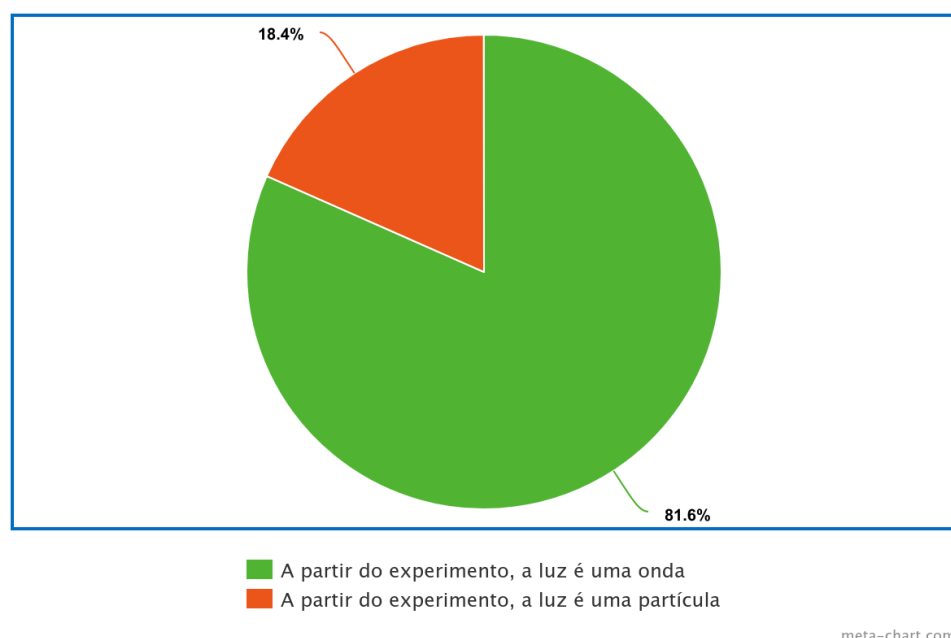


Figura 5.4: Respostas da terceira pergunta da primeira análise de dados

Quanto à última pergunta, a distinção entre os resultados desse experimento com fontes de cores diferentes foi uma das grandes dificuldades destas aplicações em especial. A distância dos alunos em relação ao experimento em si foi um dos fatores definitivos para essa dificuldade. Não obstante, as diferenças entre os tamanhos e espaçamentos das franjas em cada situação não foram suficientemente significativas para os alunos notarem a olho nú, especialmente no caso destas aplicações onde muitos alunos não quiseram ir para a frente ver o experimento mais de perto. Como consequência, 27 estudantes afirmaram não perceber diferença entre os resultados com cada cor, e entre os outros 22, 6 alunos afirmaram que a distinção entre o vermelho e o verde era que o laser vermelho era mais forte ou mais potente.

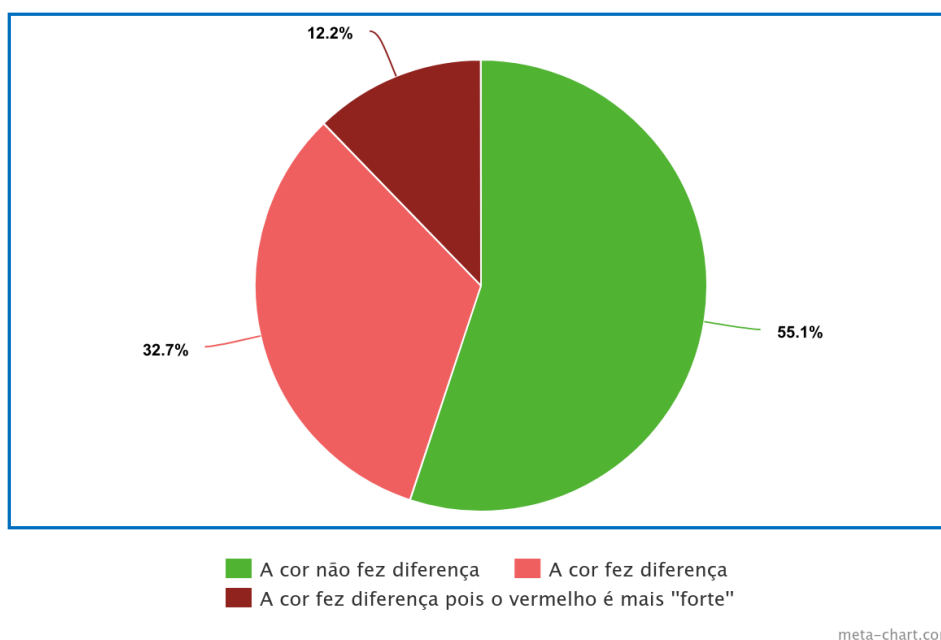


Figura 5.5: Resultados da quarta pergunta da primeira análise de dados

A partir destes resultados, tornou-se perceptível a necessidade de adaptações na proposta didática. Em especial, de um modo de se destacar com clareza as diferenças de comprimento dos padrões encontrados a partir de cada fonte de luz de frequência própria. Ao longo da metodologia e da construção final do roteiro estas adaptações foram realizadas. Todavia, estas aplicações que analisamos não puderam avaliar os resultados da medição com a régua das diferenças entre as distâncias de máximos subsequentes da fonte de luz verde e de máximos subsequentes da fonte de luz vermelha. No entanto, esta aplicação justifica a necessidade de tal medição por apresentar os problemas da sua ausência.

Entre as respostas mais interessantes que destacamos tem-se:

Aluno D: “Sim, a difração foi mais intensa no verde.”

Aluno E: “A luz vermelha tem uma frequência forte, por sua vez a verde tem uma frequência mais fraca.”

Aluno F: “A interferência das duas pareceu diferente, mas não tenho certeza”

Análises imediatas a partir destes resultados podem ser feitas em relação à confusão dos alunos quanto aos termos físicos. A diferença de frequência entre as luzes e, conseqüentemente, de comprimento de onda, foi percebida por parte dos alunos como o aluno

D que, no entanto, não conseguiram afirmar utilizando conceitos da física clássica o resultado que observavam. É notória a tentativa de explicar com conceitos e palavras fisicamente apropriadas, todavia, a utilização de termos como frequência mais forte ou fraca e intensidade de difração, mostram a falta de base dos alunos nos fenômenos e conceitos ondulatórios apesar das aplicações ocorrerem na aula seguinte a este conteúdo programático no cronograma escolar.

5.1.3 2ª sequência experimental

Após essa etapa da confirmação da luz como onda, a turma é conduzida para uma segunda etapa a partir de uma introdução histórica. O professor trata de um fenômeno moderno da física descrito por Albert Einstein: o efeito fotoelétrico. Destaca-se que o experimento a ser realizado, apesar de muito próximo, não é exatamente o efeito fotoelétrico mas o efeito fotovoltaico, onde não há ejeção de elétrons do material, mas um movimento dos elétrons entre bandas dentro de um próprio material. Por ambos terem uma transferência de energia de um fóton para um elétron e levarem a consequências similares quanto ao desenvolvimento da física moderna, é possível utilizar-se de um para estudar as consequências dos dois. Todavia, é destacável a necessidade de não apresentar este experimento aos alunos como o próprio efeito fotoelétrico, mas um similar a este.

Depois de uma curta introdução histórica, o professor apresenta aos alunos o LED, ligando-o e mostrando sua cor (no caso o verde). Depois, apresenta o voltímetro e explica sua utilidade, destacando sempre a possibilidade de alunos já estarem familiarizados com o mesmo, por auxiliarem os responsáveis em tarefas da casa. Nesta escola, em ambas as aplicações existiram alunos em sala que já haviam utilizado o voltímetro, e se interessaram em também compartilhar como e para que se utilizava um. Neste momento, o professor chama os alunos para perto e, sobre um LED desligado dentro de uma caixa escura e conectado a um voltímetro, o professor emite uma luz acima da frequência limite do LED. Com isso, surge uma tensão medida pelo voltímetro, que atíça a curiosidade e surpresa dos alunos. O professor explica, rapidamente, o processo por trás deste resultado, utilizando sempre o conceito de transmissão de energia. Neste momento, também é interessante mencionar para que utilizamos tal aplicação, comentando sobre os painéis solares e, de forma simplificada, seu funcionamento. Após as explicações, os comentários dos alunos e as dúvidas, os alunos voltam a suas carteiras para responder a terceira parte do questionário sobre o que foi observado por eles:

1- A emissão de luz em cima do LED desligado mudou o valor da tensão aferida pelo multímetro?

2- Se mudarmos a intensidade da luz que incide sobre o LED, o que você acha que ocorrerá de diferente no experimento?

3- Se mudarmos o comprimento de onda (cor) da luz emitida, o que você acha que ocorrerá de diferente no experimento?

As duas primeiras perguntas levaram a respostas muito próximas de todos os alunos. A primeira foi respondida pela simples análise do acontecimento e a segunda teve uma resposta praticamente única, onde sugeriram que a intensidade da luz leva a uma diferença no resultado do experimento. Isto não muda, no entanto, o valor pedagógico delas, visto que a primeira pergunta ratifica o efeito inesperado de surgimento de tensão a partir de uma fonte luminosa, e a segunda pergunta leva à confirmação de uma expectativa que será parcialmente quebrada no momento seguinte, onde frequências abaixo da frequência limite não levarão ao surgimento de uma tensão, independente da intensidade. Dos 49 alunos, somente 3 responderam não ter variação na tensão lida pelo voltímetro e os outros 46 afirmaram ter variação.

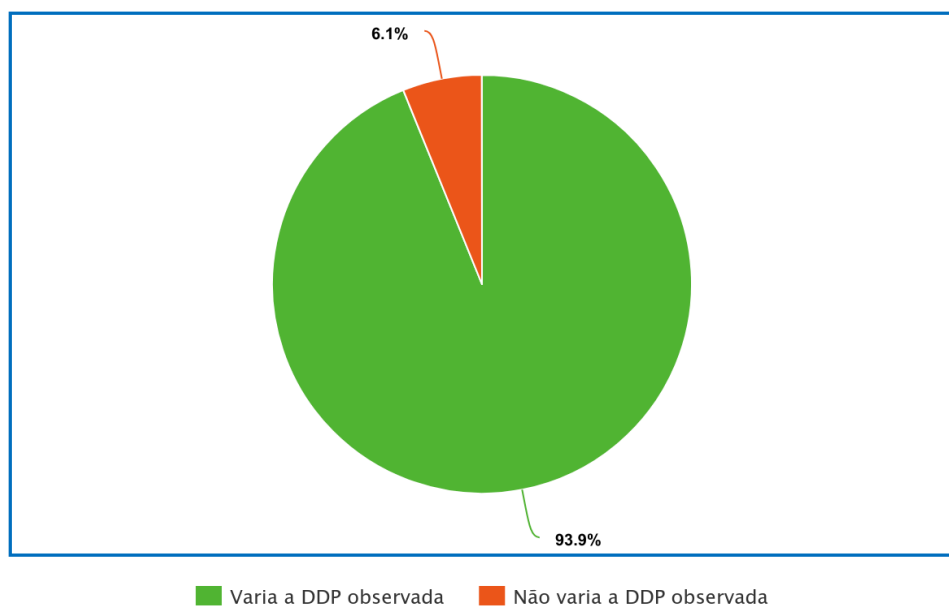


Figura 5.6: Respostas da primeira pergunta da segunda análise de dados.

Quanto à segunda pergunta, todos responderam que existirá mudança no leitor do multímetro a partir da variação de intensidade da fonte de luz. 9 responderam somente que

será diferente, e os outros 40 afirmaram com suas palavras que a intensidade da luz e a tensão aferida são diretamente proporcionais. Entre esses 40, 15 utilizaram o termo energia elétrica para explicar o que iria variar, 14 afirmaram que seria a voltagem, DDP ou tensão, 5 não usaram termos físicos e responderam que o valor no visor vai ser mais alto ou mais baixo, 4 responderam que a intensidade do multímetro irá mudar e 2 afirmaram que a potência elétrica ia ser diferente.

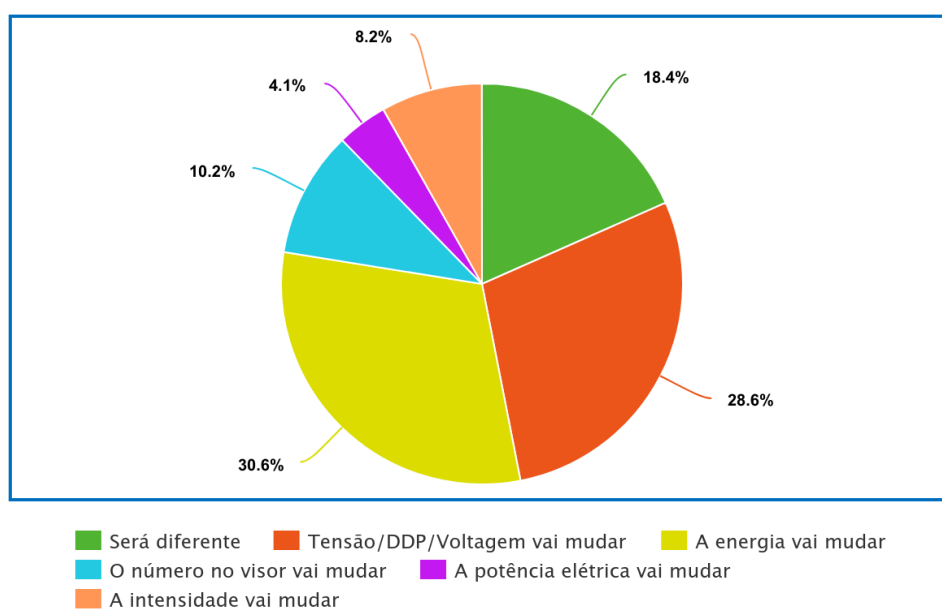


Figura 5.7: Respostas da segunda pergunta da segunda análise de dados.

A terceira pergunta levou a respostas mais conflituosas, 20 alunos responderam que consideram que a mudança da cor da fonte não diferencia em nada no resultado do experimento, 3 alunos responderam não saber se haverá alguma diferença e os outros 26 alunos responderam que haverá diferença no resultado obtido no voltímetro. Desses 26, 10 responderam que com a nova fonte a tensão aumentará, 15 responderam somente que será diferente e 1 respondeu que a nova fonte irá diminuir a tensão. Destaca-se que, apesar de não estar explícito na pergunta, os alunos responderam considerando a troca de fonte para o laser vermelho utilizado no experimento de difração.

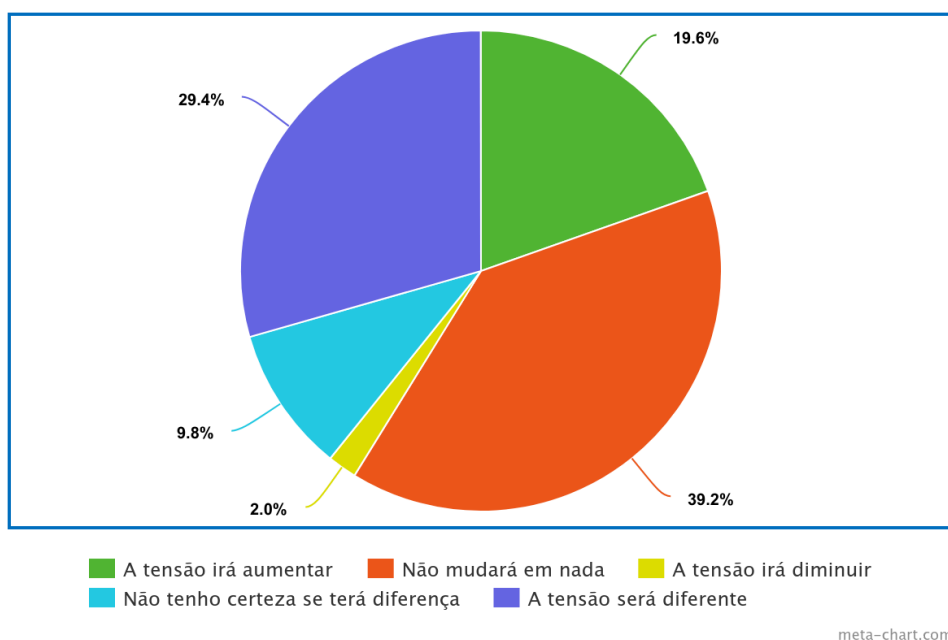


Figura 5.8: Respostas da terceira pergunta da segunda análise de dados.

Os 20 alunos que afirmaram não ter alteração no resultado a partir da cor corresponderam ao pensamento clássico, como esperado pelo professor. Entre estas respostas temos como exemplo:

Aluno A: “Acho que não ocorre nada, só se mudarmos a intensidade da luz e não a cor.”

A expectativa, ao montar o experimento, era de grande parte dos alunos analisarem a partir da óptica clássica. Entretanto, diversos alunos tiveram diferentes respostas, baseadas não no seu aprendizado necessariamente em sala, mas em seus conhecimentos e aprendizados de fora da escola. Enquanto os 10 alunos que responderam somente que existirá alteração não aprofundaram suficientemente as respostas para adquirirmos informações quanto a de onde vem este pensamento, entre os 16 que afirmam que a luz vermelha levará a uma maior tensão parte significativa justificou estas respostas. E foi possível perceber-se um padrão entre estas justificativas, onde consideram o vermelho uma cor mais quente, mais viva e portanto mais energética. Como exemplo, temos:

Aluno B: “Acho que a cor modifica na energia emitida, pois existem cores naturalmente mais intensas que outras.”

Aluno C: “Depende da força (potência) da luz, mas acho que também depende da cor, caso seja uma cor mais quente, por exemplo: vermelho, pode ser que a potência da energia aumente.”

Aluno D: “Sim, dependendo da tonalidade mais forte da luz.”

Estes resultados possivelmente partem das vivências dos alunos conduzidas por um senso não científico, onde costuma-se socialmente associar o vermelho a uma cor mais forte e mais viva e o verde a uma cor mais fraca e, conseqüentemente, com menos energia. Outras respostas esperando que o laser vermelho levará a mais tensão no multímetro podem estar associadas ao fato do ponteiro laser vermelho especificamente utilizado neste experimento ser maior que o ponteiro verde.

5.1.4 3ª sequência experimental

O momento que justifica esta atividade é então quando realizam-se outras versões do efeito fotovoltaico que levam a uma quebra em relação à expectativa de resultado dos alunos. Alterando a fonte para frequências abaixo da frequência limite do LED, tanto com feixes de alta ou baixa intensidade, e alterando a própria frequência limite, ou seja o LED, surgem resultados inesperados a partir dos conceitos da física clássica.

São emitidos então o laser vermelho de baixa e de alta intensidade, em sequência, sobre o LED verde e para a surpresa dos alunos, nenhum deles leva a uma medida de tensão no multímetro. Os alunos discutem entre si este resultado, chegando em ambas as turmas na decisão dos próprios alunos de pedirem para tentar outros LEDs e outras fontes de luz. É emitida então a fonte de luz branca (lanterna) diretamente sobre o LED verde, levando a um valor significativo de voltagem, e depois é repetido o processo com as quatro fontes (verde, vermelho de alta intensidade, vermelho de baixa intensidade e lanterna) sobre o LED vermelho. Vários alunos debateram enquanto observavam os resultados e fizeram perguntas tentando justificar essas quebras de expectativa.

O primeiro pensamento de alguns alunos em sala foi considerar que somente fontes da mesma cor que o LED levaram ao surgimento de uma tensão. Entretanto, este pensamento foi quebrado ao observarem que a fonte de luz verde gerava tensão quando emitida no LED vermelho. Alguns também procuraram algum erro de montagem do experimento para justificar este resultado, mas depois de não encontrarem, começaram a questionar como estes resultados interferiam em seus respectivos conhecimentos quanto à luz.

Após as discussões, o professor explicou aos alunos que, de fato, estes resultados não condizem com a física clássica e com a teoria ondulatória da luz, sugerindo aos alunos que procurassem estudar este experimento a partir de um outro modelo, agora corpuscular, onde a luz fosse composta de partículas mínimas, batizadas de fótons, que tivessem energias distintas associadas à cor de cada fonte luminosa, enquanto a intensidade da fonte corresponderia à quantidade dessas partículas mínimas. Este pensamento, apesar de totalmente novo e diferente para os alunos, valida os resultados obtidos no terceiro processo experimental, todavia, entra em conflito com os resultados obtidos no primeiro processo, visto que pequenas partículas, após divididas, não formariam um padrão de franjas como ocorreu. Então, volta-se aos alunos a primeira pergunta após a discussão, de qual a natureza da luz.

Com esse incentivo do professor os alunos discutem, levantam hipóteses e argumentam em sala de maneira muito positiva. No entanto, não chegam a um resultado em comum, concordando somente que existe uma dificuldade na afirmação de uma natureza da luz. O professor então intervém, mostrando que o problema está no modelo clássico utilizado para estudar esta atividade experimental, onde os objetos de estudo são divididos em ondas e corpos. E introduz então a ideia de um mesmo fenômeno ter não uma natureza fixa, mas comportamentos distintos, dependentes da situação experimental externa e ele. A essa estranha mudança de comportamento da luz em diferentes contextos dá-se o nome de dualidade onda-partícula. Os alunos tiram dúvidas, então, quanto a esse resultado, confirmam seus entendimentos e partem por fim para responderem a última etapa da atividade.

As perguntas respondidas pelos alunos nesta última etapa foram:

- 1- Os resultados foram próximos do que você esperava?
- 2- A intensidade da luz interferiu no valor da voltagem? E o comprimento de onda (cor)?
- 3- O que podemos dizer sobre a natureza da luz a partir desse experimento?
- 4- Compare os resultados obtidos neste experimento com os obtidos no experimento passado. O que eles juntos dizem sobre a natureza da luz?

As duas primeiras perguntas são significativas para o desenvolvimento do raciocínio do aluno a partir do experimento. A primeira serve para o aluno questionar suas expectativas para o experimento e compará-las com os resultados práticos, levando-o a perceber a contradição entre a teoria estudada até o momento e o resultado observado. A segunda, por outro lado, é uma pura análise do observável, onde o aluno pode escrever o que percebeu e comparar mais

facilmente com o escrito anteriormente sobre suas expectativas, destacando assim esta possível distância entre o observável e o esperado pelo conhecimento até então do estudante.

Dos 49 alunos, 9 responderam esperar já os resultados obtidos na primeira pergunta e estes 9 também responderam que tanto a intensidade quanto o comprimento de onda alteraram o resultado. Entre os outros 40 que não esperavam o resultado obtido, 7 afirmaram que a intensidade não altera o valor da tensão, 2 responderam que nem a intensidade nem a cor alteram a tensão e 31 responderam que tanto a intensidade quanto o comprimento de onda interferem no resultado aferido pelo multímetro.

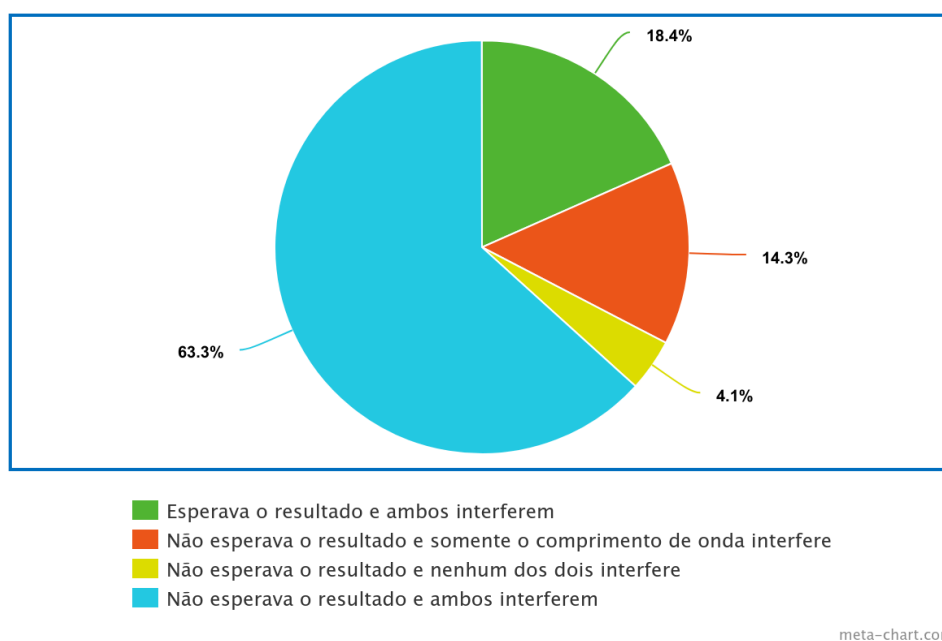


Figura 5.9: Respostas somadas das duas primeiras perguntas da terceira análise de dados.

As duas últimas perguntas, em contrapartida, têm relação com o entendimento do aluno, respectivamente em relação ao resultado deste experimento em específico e em relação ao resultado de todo o conjunto desta prática. A partir das respostas foi possível identificar o que os alunos compreenderam sobre os modelos científicos clássico e moderno, e sobre a natureza da luz a partir desta sequência.

Destaca-se, no entanto, uma dificuldade percebida entre os alunos em diferenciar as duas últimas perguntas visto a semelhança entre as respostas obtidas. Para facilitar a diferenciação entre o conhecimento obtido pelo experimento individualmente, do conhecimento construído a partir da análise dos resultados de um conjunto de experimentos, incluindo este último, para futuras aplicações estas perguntas foram afastadas, como se apresenta na metodologia e no

roteiro. Todavia, para o estudo das respostas dessa aplicação em particular, por conta dessa proximidade se faz interessante analisá-las em pares de respostas.

Entre as 49 respostas obtidas, 38 responderam não ser possível definir a luz como uma onda ou partícula clássica. Enquanto 3 tiveram respostas afirmando que a luz ainda assim era uma onda e 8 tiveram respostas avulsas que não auxiliam por si só em nosso estudo estatístico, como apresenta o gráfico da Figura 4.10. Entre essas 38 respostas utilizáveis, 23 alunos responderam corretamente que a luz não pode ser definida como onda nem como partícula, 3 deles complementando que existe uma dualidade onda-partícula. Os outros 15 seguiram caminhos próximos mas com erros conceituais no meio da afirmação.

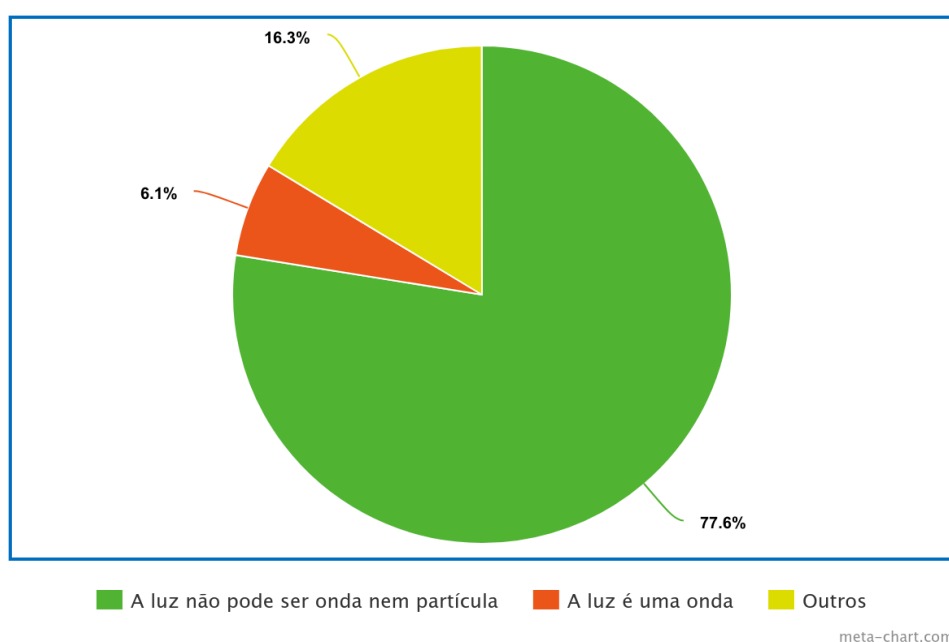
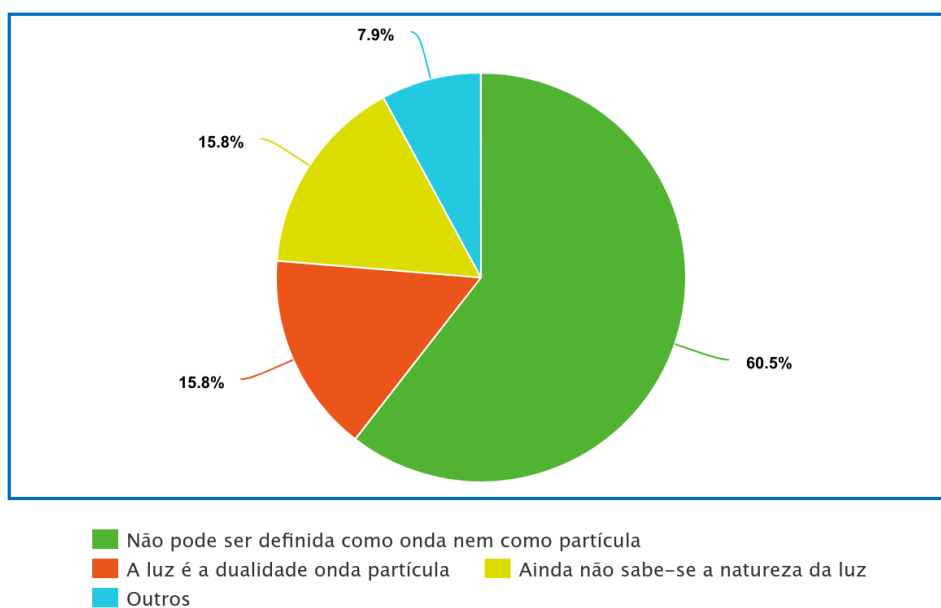


Figura 5.10: Gráfico de respostas gerais das perguntas 3 e 4 da terceira análise de dados.

Entre esses 15, 6 responderam a natureza da luz ser a dualidade onda-partícula, uma confusão comum em alunos introduzidos à física moderna. Outros 6 responderam como se a natureza e o comportamento da luz ainda fossem um mistério a ser desvendado, que ainda seria futuramente descoberto se a luz é uma onda, uma partícula ou alguma terceira classificação de objetos físicos. Por fim, 3 alunos tiveram afirmações particulares criando conceitos inspirados na ideia da luz não ter um comportamento constante como espera-se na física clássica, um aluno em especial a definiu como “meio termo” entre onda e partícula, por exemplo.



meta-chart.com

Figura 5.11: Gráfico de respostas das perguntas 3 e 4 da terceira análise de dados em que o aluno considerou que a luz não pode ser definida como uma onda clássica ou como uma partícula clássica

Entre os 49 alunos, 23 responderam corretamente quanto à natureza da luz (aproximadamente 47%). No entanto, 15 responderam a partir de uma base correta com a necessidade somente de algumas adaptações ainda ao longo do desenvolvimento. Entre os resultados destacáveis dos 23 alunos temos como exemplos de respostas que demonstram o entendimento dos alunos diante desta atividade:

Aluno A:

3) “A luz não pode ser uma partícula, mas também não pode ser uma onda. Nós temos uma dualidade onda partícula.”

4) “Como a luz não pode ser onda e nem partícula falamos que existe uma dualidade onda partícula”

Aluno B:

3) “Que a luz não é uma onda e nem uma partícula.”

4) “Que as teorias anteriores estavam erradas.”

Aluno C:

3) “Que a luz não pode ser chamada de onda mas também não de partícula.”

4) “A luz não pode ser chamada de onda e nem de partícula mas pode transmitir energia.”

Aluno D:

3) “Existe uma dualidade onda partícula.”

4) “Antes a luz era considerada uma onda, mas depois viram que a energia da luz depende da sua cor e que isso não era de onda.”

As respostas são repetitivas assim como as outras 19, mas demonstram além da afirmação correta um entendimento dos alunos da física moderna a partir da atividade passada. Os alunos A e D demonstram um entendimento da dualidade onda partícula ser um nome dado ao fenômeno inesperado que ocorre e não a nova classificação da natureza da luz. Paralelamente, o aluno C além de responder quanto a natureza da luz identifica características dela descobertas a partir do experimento. Em contrapartida o aluno B identifica um avanço histórico da física, afirmando que as teorias antigas clássicas continham erros, esta identificação pode vir como auxílio para o aluno compreender as novas teorias a partir das diferenciações que levaram à sua construção. Por fim, o aluno D destaca o motivo da inconsistência de uma teoria ondulatória da luz a partir do seu entendimento dos resultados obtidos.

Os resultados destas duas aplicações demonstraram um parecer extremamente positivo quanto à possibilidade de introdução da física moderna no Ensino Médio regular a partir destas práticas experimentais. Apesar de algumas alterações nesta proposta didática e em seu roteiro serem posteriores e consequentes a estas aplicações e seus resultados, foi notória a evolução dos alunos e o compreendimento do conteúdo a partir desta proposta base.

Não somente dentro do ensino regular, no entanto, é cabível de realizar esta proposta didática. Sendo possível, igualmente válida e com resultados também positivos sua aplicação em contextos não formais de ensino como clubes de ciências fora do turno programático escolar.

5.2 Aplicação no contraturno escolar

Esta aplicação contou com uma série de peculiaridades que levam à necessidade de uma análise individual. Em especial por não ter sido em uma aula formal de física, apesar de estarmos no ambiente escolar. Ocorreram adaptações no roteiro programado originalmente, buscando torná-lo mais característico de um clube de ciências e otimizando a utilização de seu espaço não formal de ensino-aprendizagem.

5.2.1 Clube de Ciências

Uma das grandes particularidades desta aplicação foi sua realização em um clube de ciências do Colégio de Aplicação e não em uma turma de ensino formal. O Clube, fundado no início dos anos 2000 por um dos professores de física do colégio, tem a proposta de incentivar alunos que se interessam por ciências a reproduzirem e analisarem experimentos diversos trazidos pelo professor coordenador, por antigos participantes e pelos próprios alunos em alguns casos. Esses adolescentes são, no início do terceiro ano, convidados a participar do Clube onde eles terão encontros semanais até o final do ano letivo. A decisão de quais alunos receberão tais convites é baseada na percepção do professor coordenador, que ministra aulas no segundo ano do Ensino Médio, a partir da demonstração de interesse dos alunos.

Os encontros ocorrem toda sexta feira à tarde dentro da escola no laboratório de física. Duram todo o turno da tarde e normalmente os encontros são divididos em etapas, sendo cada uma com uma atividade diferente, mas existindo um tema em comum da semana. Outra peculiaridade deste grupo é a separação dos alunos em três equipes, que os acompanham ao longo de todo ano de forma a intensificar o sentimento de pertencimento dos alunos, além de conduzir grande parte das atividades a um teor competitivo entre as equipes. As atividades, portanto, costumam gerar pontos para as equipes, o que leva a uma colocação no fim do ano onde são somados esses pontos e é definida assim uma equipe campeã. A atividade em particular que realizamos, foi portanto adaptada para seguir esse padrão de pontuação e *gamificação*.

Outra peculiaridade é a comum aparição de integrantes de anos anteriores do clube, que atuam nas atividades com papel de monitoria e mentoria aos alunos deste ano, além de auxiliarem ao professor.

5.2.2 Adaptações

As adaptações realizadas para potencializar o espaço não formal de ensino do clube de ciências, se pautaram nas peculiaridades observadas neste clube. Ratificando o caráter volátil e adaptável do experimento, procura-se sempre que este seja moldado e transformado a partir das características individuais de cada classe, dos contextos sociais dos alunos e das necessidades e ambições de cada professor.

Utilizando tanto a divisão já existente no clube em equipes, quanto a sua propriedade de ensino ativo e investigativo, a partir do roteiro pré-construído para essa atividade, propôs-se um desafio experimental conduzido em pequenos grupos. Aproveitou-se a divisão de equipes

para construir já esses pequenos grupos e a presença dos ex-alunos para servir como mentores de cada grupo que os auxiliavam a montar seus aparatos.

O progresso da atividade iniciou-se de forma similar com as outras aplicações, sendo o primeiro momento de conversa com os alunos quanto às oposições entre matéria corpuscular e ondas. A partir das respostas dos alunos e da mediação do professor, foi-se montando uma tabela no quadro com características de ondas e características de partículas, além de exemplos de cada um.

Após citarem nas características de ondas a amplitude, a frequência e o comprimento de onda, surgiu uma incitação quanto a fenômenos ondulatórios, o que permitiu ao professor conduzir a discussão para essa diferenciação não somente quanto à natureza isolada dos corpos e das ondas, mas quanto a suas interações com o meio. Entre as diferenciações apontadas pelos alunos quanto à forma de interação dos corpos e das ondas, encontram-se a colisão entre matéria corpuscular e a interferência das ondas, além do destaque aos fenômenos como refração, reflexão e especialmente difração.

Com as falas dos alunos definindo a difração e a interferência, além de reconhecê-las como fenômenos estritamente ondulatórios, possibilitou-se a passagem para a segunda etapa, agora sim particular do modelo de clube de ciências. Nesta segunda etapa os alunos, após responderem em prontidão que a luz é uma onda, foram desafiados a provar tal afirmação a partir de um experimento. Foram divididos em suas três equipes e cada uma recebeu somente um apontador laser, as luzes da sala foram desligadas e foi estipulado o tempo limite de uma hora e meia para realização dessa atividade.

Os monitores, que tinham conhecimento prévio dos resultados esperados e da maneira mais direta de se chegar a ela, foram instruídos a acompanhar os alunos sem guiarem o processo investigativo. Caso chegasse próximo ao fim do tempo e os alunos ainda não estivessem perto de nenhum resultado, foi proposto aos monitores que incentivassem os alunos de forma discreta, chegando a um caso máximo, se necessário, de indicarem a utilização do fio de cabelo. Esta precaução foi planejada pela limitação temporal existente para a realização do projeto como um todo, no entanto, não foi posta em prática, visto que os alunos conseguiram construir o experimento em menos de uma hora.

Após este primeiro experimento aberto e investigativo, analisou-se os resultados com a turma como um todo, as consequências do mesmo e seguiu-se a atividade com os outros experimentos e discussões, tal como nas outras aplicações.

De maneira complementar, outra peculiaridade foi a não utilização do “Roteiro dos alunos”. Visto que o clube de ciências tinha menos alunos e um maior tempo total, a atividade

foi planejada para uma construção livre, conduzida de maneira verbal pelos próprios alunos, apesar de mediada pelo professor. Para não restringir os alunos a respostas objetivas e não conduzir suas linhas de pensamento, não foi utilizado o roteiro construído, mas proposto um formulário pós experimento, que lhes foi enviado no mesmo dia após a atividade, de maneira online pelo Google Forms. Foram obtidas as respostas de 8 alunos dos 15 presentes, que compartilharam suas experiências e seus entendimentos, sendo 6 respostas realizadas no mesmo dia e duas no dia seguinte.

O formulário pós experimento questionou de forma mais curta aos alunos quanto ao entendimento deles do conteúdo discutido, o entendimento quanto aos experimentos realizados e a opinião dos mesmos em relação à utilização desta atividade em sala. As perguntas foram:

- 1- Você considera que esses experimentos lhe ajudaram a entender o que é dualidade onda-partícula?
- 2- Os resultados do segundo experimento (Efeito fotoelétrico) foram parecidos com o que você esperava? E o que você esperava?
- 3- O primeiro experimento lhe ajudou a compreender a natureza ondulatória clássica da luz? Se puder explica um pouco (tanto se a resposta for sim quanto se for não)
- 4- O que você entendeu como dualidade onda-partícula?
- 5- Tem alguma sugestão para como evoluir nesse projeto e melhorar essa proposta?

A redução da quantidade de perguntas intenciona a facilitação dos alunos em responder, para intensificar a quantidade de resultados obtidos. Visto que, de maneira distinta às outras aplicações, a resposta a esse formulário não valia ponto na nota trimestral e não foi realizada dentro do ambiente de sala de aula.

5.2.3 Análise dos resultados

Pela natureza informal e quantidade reduzida de alunos em um clube de ciências em relação a uma sala de aula tradicional, notou-se uma positiva interação dos alunos em toda a atividade. Não obstante, a seleção de alunos que se interessam por ciências e aceitaram participar do clube e comparecer semanalmente é também um importante fator neste positivo resultado de participação dos alunos. Inicialmente, ao diferenciar-se partículas de ondas, os participantes procuraram sempre trazer novas características, exemplos e até mesmo

questionamentos, como por exemplo uma aluna que indagou se a carga elétrica seria uma exclusividade de partículas materiais.

Neste momento, e em outros onde surgiram hipóteses que encaminharam para uma vertente distinta da esperada, o professor que ministrava o experimento deixou se desenvolver por um breve período as discussões entre os alunos, para depois responder e reencaminhar a discussão ao caminho por ele esperado.

Ainda durante a distinção entre onda e partícula, foram levantados exemplos interessantes, como a própria luz. Um dos alunos trouxe-a como exemplo de onda, e outro indagou se de fato era a luz uma onda, já adiantando acidentalmente a discussão desta atividade. Esse aluno não conseguiu conduzir e explicar tal questionamento, mas o justificou por lembrar de assistir personagens de uma série de televisão comentando sobre essa natureza dual da luz. Esta utilização de um conceito da física moderna em um contexto cultural de lazer ocorreu em uma série estrangeira sobre físicos e engenheiros, chamada *The Big Bang Theory*, onde os personagens em determinados episódios comentam corriqueiramente sobre suas atividades profissionais e conseqüentemente quanto a conceitos físicos avançados, sem os explicarem ou os desenvolverem pedagogicamente.

É interessante neste primeiro momento perceber como, de fato, a física moderna é uma área de interesse para alguns alunos, e está sim presente em seriados, filmes e redes sociais. Apesar da ausência de um desenvolvimento didático das teorias e conceitos nestas aparições, é necessário notar sua existência nesses ambientes externos ao colégio e considerar como isso afeta a percepção dos alunos ao ser introduzido a eles formalmente no colégio, posteriormente a esse contato midiático.

No caso em específico dessa aplicação, é interessante notar como essa pré introdução de um aluno a determinado conceito, sem o desenvolvimento necessário para uma boa compreensão do mesmo, levou-o a já esperar uma quebra de expectativa ao final do experimento. Inclusive levando-o futuramente, quando os alunos foram desafiados a provar a natureza ondulatória da luz, a questionar se isto era possível, visto que a luz não era de fato uma onda a partir da óptica moderna.

Seguindo, portanto, para este segundo momento, após debater-se as diferenças entre as partículas e as ondas, foram emprestados lasers monocromáticos aos grupos de alunos, que os utilizaram para tentar comprovar a natureza ondulatória da luz. Como comentado acima, um aluno excepcionalmente acreditava não existir forma de comprovar tal natureza ondulatória, por ter sido introduzido anteriormente à existência da dualidade onda-partícula. No entanto, para além desse caso isolado, os alunos em grupos desenvolveram diversos experimentos

procurando algum resultado que justificasse a natureza ondulatória da luz. Ou seja, experimentos que resultassem em algum fenômeno que não poderia acontecer caso a luz fosse composta de partículas corpusculares e não por uma onda contínua.

Outra peculiaridade que influenciou os resultados dessa turma, em específico neste experimento, foi o fato das equipes serem nomeadas em homenagem às constantes físicas: Velocidade da Luz, Carga do Elétron e Constante de Planck. Como consequência, os alunos, por interesse próprio, ao serem divididos nas equipes procuraram conhecer mais sobre a sua constante, a sua história e a importância física da mesma. Por este motivo, alunos da equipe Velocidade da Luz procuraram usar de alguma forma essa noção de uma velocidade máxima para comprovar a natureza ondulatória dos fenômenos ópticos, enquanto alunos da Constante de Planck comentaram reconhecer o conceito de fóton e dualidade onda-partícula quando este foi introduzido no final do último experimento.

Seguindo para o experimento aberto investigativo, inicialmente os alunos em sua maioria procuraram justificar a natureza da luz pela refração, apontando seu laser contra um copo de água tanto horizontalmente quanto verticalmente. No entanto, apesar de terem conseguido visualizar um padrão de refração claro, nenhum aluno foi capaz de justificar o motivo desse padrão garantir uma natureza ondulatória para a luz. Outra interessante proposta foi a tentativa de comprovar a ausência de massa da luz, além de uma ausência de potencial de realizar trabalho e movimentar objetos. Todavia, ao questionar quanto à existência de ondas mecânicas que movimentam objetos (apesar de não transportarem matéria) nenhum aluno foi capaz de justificar a natureza óptica clássica.

Começou então um grupo a colocar o laser contra uma régua transparente para dividir a luz e realizar uma difração. Paralelamente, um outro grupo procurou usar apagador e giz para criar poeira e tentar analisar o resultado de uma emissão de luz contra a poeira, acreditando ser algo que poderia ajudá-los nesta tarefa. O terceiro, enquanto isso, procurava justificar pela ausência de massa ou pela independência de dois raios luminosos distintos. No entanto, quando questionados o porquê desse experimento garantir que a luz não é composta de pequenas partículas, nenhum grupo até o momento havia conseguido responder com um argumento fisicamente coerente e válido para tal explicação.

Os experimentos constantemente evoluíram em complexidade enquanto os raciocínios dos alunos seguiam o mesmo caminho. É destacável o caráter pedagógico de experimentos livres e investigativos onde em meio à própria investigação, os alunos evoluem em identificar o que estão procurando e como procurar. Originalmente surgiram ideias de experimentos que foram postas em prática para depois estudar os resultados deste experimento e avaliar se este

resultado leva a uma comprovação da luz como onda. Depois de algumas tentativas falhas, os alunos perceberam que seria mais eficiente pensar no que eles procuravam, ou seja, em qual característica da luz levaria a uma comprovação de sua natureza ondulatória. E a partir disso pensar em experimentos que comprovem tal característica.

Neste momento, ocorreu uma procura quase que mútua entre os três grupos em apresentar fenômenos característicos ondulatórios. Com pouco mais de trinta minutos dessa atividade, uma aluna então lembrou de um experimento que presenciou em sua iniciação científica no próprio Colégio de Aplicação. Procurando separar o feixe de luz, utilizou diversos materiais mas nenhum fino o suficiente, até lembrar deste experimento onde ela usava o fio de cabelo. Seu resultado foi rapidamente um sucesso, visto que retirando um fio de cabelo e apontando o feixe de luz contra o fio, próximo a uma parede lisa, surgia na parede uma sequência de franjas característica da interferência entre duas ondas. Não existiria motivo para pequenas partículas se separarem em uma sequência tão padronizada em máximos e mínimos, caso o feixe de luz fosse formado por elas, e assim a equipe dessa aluna ganhou o desafio e justificou a conceituação clássica da luz como onda.

Destaca-se, no entanto, que apesar da iniciação científica dessa aluna agilizar o resultado, outros grupos já seguiam também para um caminho próximo. Um desses dois grupos restantes inclusive já havia planejado também separar o feixe de luz em uma difração, e no momento da descoberta do grupo vencedor, este segundo estava à procura de um material suficientemente fino para o fazê-lo.

Após este experimento descoberto pelos alunos, o professor encerrou a atividade convidando todos a observar o resultado do grupo vencedor, enquanto os próprios alunos explicavam sua linha de raciocínio e a física por trás deste resultado, com a mediação do professor. Destaca-se que, como esperado, ocorreu a utilização de alguns termos e conceitos fisicamente fora de seu valor real, que foram de prontidão corrigidos pelo professor, que também auxiliou no desenvolvimento da explicação dos alunos a partir de perguntas tais como “E por que vocês fizeram isso?” ; “E depois o que ocorreu?”; “E se fossem partículas, como isso teria acontecido?”. Em seguida, o professor ratificou a explicação e abriu para possíveis dúvidas.

Com o formulário online posterior à atividade, destacaram-se algumas respostas dos alunos quanto a esse primeiro experimento. Para relembrar, os alunos foram questionados se o experimento lhes ajudou a compreender a natureza ondulatória clássica da luz, e entre as respostas mais interessantes para analisar, estão:

Aluno A: “Sim, pois deu pra ver a partir do experimento com fio de cabelo como a luz se comporta como onda e depois como partícula.”

Aluno B: “Ajudou, mas ainda não entendi muito bem. Acho que o problema é que é uma questão bem complexa mesmo, mas entendi melhor de qualquer forma.”

Aluno C: “Sim, mas eu senti falta de mais experiências em que a luz se comporta como uma onda.”

A partir destas respostas, ressalta-se uma significativa diferença entre os resultados deste experimento no clube de ciências em relação às aplicações em colégio. Como no colégio as respostas foram produzidas na hora do experimento, eram estas independentes do resultado futuro de um experimento sobre dualidade da luz. Enquanto nesta atividade do clube de ciências, respondida posteriormente, existiram algumas respostas que se basearam na diferenciação entre um experimento e outro. Outro interessante fator de análise é o comentário do aluno C, que sugeriu mais experimentos para comprovar uma natureza ondulatória da luz, enquanto o mesmo aluno considerou suficiente um único experimento para justificar o comportamento da luz similar ao de um objeto corpuscular clássico.

Compreender que existem teorias contraditórias entre si que são ambas válidas em certo contexto e dentro de determinados limites não é simples, especialmente para um aluno de Ensino Médio. E contrariar algo sempre estudado como certo e definitivo, tal como a natureza da luz, também não é uma tarefa simples, ainda mais continuando a utilizar este conceito dentro de determinados limites clássicos. As respostas dos alunos convergem para esse pensamento, especialmente do aluno B, que afirma ainda sentir uma certa confusão quanto aos experimentos e a natureza da luz, mesmo afirmando ter lhe facilitado.

Após o experimento de comprovar a natureza ondulatória da luz, o professor passou para uma segunda etapa, onde ele introduziu os alunos ao surgimento de uma diferença de potencial a partir de uma emissão de feixe de luz. Apresentando o efeito fotovoltaico para depois analisá-lo em diferentes casos e estudar as peculiaridades de seus resultados.

Inicialmente, foi utilizado um laser verde que iluminava um LED verde (com o auxílio de uma bateria foi demonstrada a cor dos LEDs aos alunos) conectado a um multímetro. Após estudar os resultados deste experimento e a física por trás dele, conversou-se com os estudantes sobre o que cada um acreditava que iria ocorrer caso fossem trocados a fonte de

luz e a cor do LED. O objetivo dessa separação foi conduzir os alunos a, conhecendo um novo fenômeno físico, criar hipóteses sobre ele e colocá-las à prova.

Com o laser e o LED da mesma cor os alunos se impressionaram com o surgimento de uma diferença de potencial e com a possibilidade de geração de energia a partir da luz. Comparou-se tal experimento com os painéis de energia solar, atizando ainda mais a curiosidade dos alunos. Essas turmas de terceiro ano, no momento da aplicação, estudavam no ensino formal os circuitos elétricos, então não tiveram dúvidas sobre o que é um multímetro ou em relacionarem tensão e energia elétrica, mas ainda assim surgiram dúvidas quanto ao porquê de aparecer esta energia.

O professor seguiu então para o quadro, onde expôs a física dos LEDs de forma simplificada, mostrando os gaps de energia e como funciona originalmente a emissão de luz do LED quando conectado em uma fonte externa, de forma que os alunos, interpretando os dados analisados, construíram em diálogo um modelo físico com previsões de acontecimentos em casos similares. Quando perguntados o que ocorreria com fontes de luz de diferentes cores e intensidades além de diferente LEDs utilizados, os alunos debateram e chegaram juntos à conclusão de que a cor tanto do LED quanto da fonte de luz não alteram o resultado final, mas que a intensidade da fonte de luz deve acarretar em distintos resultados. O esperado é que quanto maior a intensidade da fonte, maior a tensão analisada.

Após essa expectativa dos estudantes, foram realizadas diferentes versões do experimento, com LEDs de outra cor e fontes de outras cores e intensidades. A grande surpresa dos alunos foi a quebra de expectativa quando analisou-se a fonte vermelha de alta intensidade sobre o LED verde, onde a tensão observada foi nula. Com esse resultado, os próprios estudantes procuraram explorar o experimento. Pediram para utilizar a luz verde no LED vermelho e a luz branca em ambos para estudar estes resultados.

Para a maioria dos alunos era esperado que, como a emissão de luz vermelha sobre o LED verde não gerou tensão, a emissão de luz verde sobre o LED vermelho também não gerasse. Então, questionou-se a turma a consequência desses resultados. Foram questionados qual a distinção física entre a luz vermelha, a luz verde e a luz branca de uma lanterna, e ainda o que poderia se afirmar de inesperado a partir desse experimento quanto à cor e intensidade da luz.

Um momento extremamente significativo foi este em que os alunos procuraram justificar o que estava ocorrendo, sem quebrar o modelo científico que eles haviam construído. A procura foi em achar onde o experimento estava errado e não onde a teoria estava errada, se todos os cabos estavam bem conectados, se os LEDs não foram confundidos ou algo do gênero. Mostrou-se então a dificuldade de se afirmar uma inconsistência em um modelo científico e

de se aceitar um resultado experimental não esperado ou não condizente com o modelo científico utilizado.

Apesar de muita procura, não percebendo nenhum erro prático na construção do experimento, os alunos começaram a aceitar o seu resultado e criar suposições físicas para justificá-lo. O professor nesse momento interveio e auxiliou nessa procura, introduzindo o conceito de fóton. Construindo um novo modelo junto aos alunos, baseado na partícula clássica, o professor foi capaz de justificar esse resultado inesperado do efeito fotoelétrico. No entanto, este novo modelo passava a se contradizer com o resultado do primeiro experimento, voltando assim à pergunta inicial sobre a natureza da luz.

Neste momento, a turma já propunha uma resposta não objetiva como a luz é onda ou a luz é partícula, e sim um resultado mais complexo onde a natureza da luz dependeria da situação. Mesmo ainda não conseguindo afirmar as variáveis as quais a luz dependeria para definir sua natureza, foi um enorme resultado que já se chocava com o modelo clássico. O professor então corrigiu e explicou que a luz, na óptica moderna, não poderia ser definida por estes conceitos clássicos de onda e partícula, mas tinha um comportamento com situações onde apresentava características classicamente atribuídas a ondas e situações onde apresentava características classicamente atribuídas a partículas. Definindo assim a dualidade onda-partícula como fenômeno e não como uma nova natureza da onda como esperava-se por parte dos alunos ao longo dessa discussão final.

Com estes resultados, os alunos debateram um pouco mais e foram liberados. Passou-se então para a discussão posterior sobre os resultados a partir do formulário virtual. A pergunta “Os resultados do segundo experimento (efeito fotoelétrico) foram parecidos com o que você esperava? E o que você esperava?”, levou a respostas tais como:

Aluno A: “Sim, imaginava que em algum momento provaria que também pode ser uma partícula.”

Aluno B: “Eu já conhecia sobre, mas nunca imaginei o resultado na prática.”

Aluno C: “Não, esperava que todos fossem gerar energia.”

Aluno D: “Não, mesmo sabendo como funcionam painéis solares, nunca imaginei essa associação.”

O aluno B responde de maneira interessante por já conhecer o efeito fotoelétrico, mas não esperar a sua quebra com o modelo clássico. Enquanto o aluno A, apesar de não responder quanto ao efeito fotoelétrico em si, afirma já esperar uma distinção da natureza clássica da luz

ondulatória. Todavia, por sua resposta percebe-se que o conceito de dualidade ainda não está 100% fixo em sua percepção, visto que ele afirma a luz ser também uma partícula além de uma onda, e não uma terceira natureza não clássica.

Os alunos C e D responderam ter surpresa com o resultado. Em especial, o aluno D destacou a aplicação prática estudada em sala dos painéis solares. Esta resposta demonstra a importância de voltar-se a situações práticas em meio aos estudos teóricos, por ser a aplicação prática um facilitador do entendimento, e ainda uma área de interesse dos alunos e com papel de destaque em suas recordações da aula. O aluno C, por outro lado, é objetivo em afirmar que existia uma expectativa em todas as fontes de luz gerarem energia, que foi quebrada no meio do experimento. Esta resposta é, apesar de simples, a exata quebra de expectativa que o experimento almejava causar nos alunos.

A pergunta seguinte, quanto ao entendimento era: “O que você entendeu como dualidade onda-partícula”, levou a interessantes respostas, como:

Aluno A: “Que a luz não é onda e nem partícula.”

Aluno B: “Entendi que fosse um nome dado pelos cientistas à desconhecida e bizarra consistência e natureza da luz.”

Aluno C: “Entendi como a variação do comportamento da luz (ou outras coisas) entre onda e partícula de acordo com situações diferentes e a falta de uma delimitação exata para o que é um e o que é outro.

Aluno D: “Entendi que a luz se comporta como ambas, como foi mostrado nos experimentos, mas também se comporta de maneira única.”

Tais respostas demonstram a validade da aplicação, visto que o conceito complexo de dualidade onda-partícula foi, em diferentes níveis, compreendido pelo alunato a partir da aplicação. Ressalta-se a resposta do aluno C, que destaca a existência deste comportamento em outros fenômenos além do luminoso, mesmo esse não sendo o foco do experimento. E ainda do aluno D que, em contrapartida, definiu esse comportamento como característico e único da luz, o que apesar de não ser uma afirmação correta, é válida dentro de seu entendimento, visto que todos os experimentos foram pautados no estudo da luz. Como

uma continuação deste trabalho, tais conceitos modernos poderiam ser estendidos a nêutrons e elétrons, por exemplo, para corrigir este pensamento do aluno D.

Por fim, destaca-se a definição do aluno B para dualidade onda-partícula como uma natureza bizarra e desconhecida da luz. É interessante analisar esta resposta pelo fato da natureza da luz não ser desconhecida, apesar de não existir um nome claro como partícula ou onda, consistente como na física clássica. A não clareza do aluno em quais situações podem levar a luz a cada tipo de comportamento classicamente característico a ondas ou a partículas, pode ser um fator que levou a escolha desse termo “desconhecido” para a natureza da luz a partir de uma óptica moderna.

A atividade no ambiente do clube de ciências foi, portanto, extremamente positiva para demonstrar o interesse dos alunos em atividades de ensino ativo e em experimentos livres. No entanto, destaca-se que os resultados finais relacionados aos conhecimentos obtidos pelos alunos não se distanciaram em relação à atividade original.

Capítulo 6

Considerações finais

A partir do pesquisado neste estudo, somado às bases referenciais apresentadas, é capaz de afirmar-se a possibilidade de inserção de física moderna no Ensino Médio a partir de resultados experimentais concretos. Escapando, inclusive, de constantes no ensino de física moderna como o alto custo do equipamento ou o desenvolvimento matematicamente denso.

Utilizando experimentos com resultados visivelmente incompatíveis quanto à natureza da luz de acordo com a física clássica, é possível chegar a uma discussão com os alunos que leve a saída única como uma nova teoria física. Introduzindo assim a física moderna com o conceito de dualidade onda partícula.

Nesta atividade em especial, procura-se realizar experimentos com tais resultados utilizando materiais de fácil acesso e baixo custo, além de interpretações qualitativas escapando de uma sofisticação matemática que pode distanciar professores e turmas. A sequência didática segue a experimental permitindo o aluno a gerar hipóteses, interpretar resultados e discutir com os colegas suas interpretações. Levando também a um fácil direcionamento do professor, podendo corrigir e conduzir os alunos a partir de suas falas e anotações.

Ao demonstrar-se os fenômenos de interferência e difração da luz no experimento análogo ao experimento da dupla fenda de Young foi possível reafirmar para os alunos a natureza clássica da luz como onda. Reafirmar, pois estes já reconheciam que a luz era uma onda a partir dos seus estudos até então de óptica.

Destaca-se, no entanto, que existiram alterações realizadas neste momento da prática experimental que foram percebidas como necessárias a partir das aplicações realizadas. Em destaque, a medição das distâncias entre os máximos consecutivos de cores de diferentes fontes de luz foi adicionada ao experimento para ratificar aos alunos as características da onda clássica de luz que definem sua cor, visto que nas aplicações os alunos, de modo geral, não tinham esse conhecimento do comprimento da onda de luz definir sua cor diferente do esperado.

O segundo momento da prática experimental foi onde os alunos estudaram o efeito fotovoltaico a partir da emissão de uma luz laser em um LED desligado conectado a um voltímetro. Testando e em um terceiro momento reconhecendo os resultados de diferentes

variações do mesmo experimento utilizando LEDs de diferentes cores e fontes de diferentes cores e potências.

A quebra de expectativa quando utilizadas luzes abaixo da frequência limite de cada diodo foi o que levou os alunos ao questionamento esperado. Onde os mesmos reconheceram uma divergência entre o resultado que o seu conhecimento até o momento de física o levava a esperar e o obtido. Com base nesses resultados, foi retomada a discussão quanto à natureza da luz levando a conclusão da necessidade de uma nova teoria física, onde introduziu-se a física moderna.

Outro destaque positivo das aplicações realizadas foi o interesse dos alunos quando mencionada uma utilização prática deste fenômeno moderno sendo ela a construção dos painéis solares. Onde os alunos, interligando o resultado obtido com uma situação de seu universo fora da escola, se interessaram muito mais pelo experimento e adentraram significativamente na discussão por visualizar uma aplicação real do estudado.

Ainda uma percepção dos resultados é a percepção dos alunos quanto a ciência como uma construção de modelos com limitações e validações em certos contextos. A percepção de uma discrepância entre a hipótese produzida a partir do conhecimento científico e o resultado experimental observado leva a necessidade de uma nova teoria científica para explicar este resultado em específico. Demonstrando a constante evolução da natureza mas também não descartando diretamente os modelos antigos, visto que em determinados contextos estes ainda são válidos. Além de auxiliar a compreender o mundo contemporâneo, a física moderna melhora o entendimento do aluno quanto às teorias da física clássica, visto que passa-se a conhecer seus limites e os contextos onde cada uma pode ser utilizada, como afirma Pérez (2001).

Um dos principais facilitadores deste desenvolvimento é a troca do efeito fotoelétrico, comumente utilizado para explicar a dualidade onda partícula, para utilização do efeito fotovoltaico. Que apesar de ter resultados similares têm uma construção mais fácil e não leva a complicadas discussões quanto à função trabalho do elétron. Apesar do efeito fotoelétrico utilizar uma voltagem ligada no sistema para acelerar ou desacelerar os elétrons e o efeito fotovoltaico gerar uma diferença de potencial dentro de um sistema sem a mesma, os resultados quanto à natureza da luz são os mesmos.

É destacável também a possibilidade de utilização desta prática experimental com variações que permitem sua adaptação a diferentes situações, de acordo com o interesse do professor. Exemplificadas pela aplicação realizada no clube de ciências, onde o processo pedagógico foi adaptado para uma prática experimental aberta, onde os próprios alunos

procuraram realizar experimentos que comprovassem a natureza ondulatória da luz, para depois chegarem à discussão moderna de dualidade. Visto que neste espaço em específico os encontros eram mais longos e se baseavam sempre em processos experimentais comumente abertos e investigativos. Estas adaptações que conciliaram a proposta pedagógica com as peculiaridades desta sala em específico, potencializaram as discussões geradas pelos alunos e o interesse dos mesmos na atividade.

Entretanto, é pertinente a necessidade de um significativo domínio do conteúdo por parte dos professores para a boa utilização desta aplicação. Pois mesmo sendo uma sequência experimental com matemática simples e um desenvolvimento físico não muito complexo, o professor que conduz a atividade precisa ter um domínio claro do efeito fotovoltaico e da dualidade onda partícula, de maneira a não direcionar os alunos a pensamentos errados ou dúbios. O medo do professor de inserir a física moderna por falta dessa base própria e por medo da matemática complexa comumente associada à mesma, acabam sendo algumas das principais dificuldades da utilização de física moderna no Ensino Médio, como destaca Pietrocola (Pietrocola, 2018)

O ensino de física moderna pode ser desafiador para muitos professores do Ensino Médio que estão acostumados com aulas tradicionais ensinando os conceitos da física clássica. Sendo, como consequência, um conteúdo com pouco espaço no cenário da educação brasileira. Apesar de sua importância para explicação de diversos fenômenos naturais, como a impossibilidade de ultrapassagem da velocidade da luz no vácuo, e funcionamento de tecnologias construídas a partir do século XX, como as características de absorção de fótons dos painéis solares. “Hoje parece consolidada a certeza da necessidade de inserção desses temas nos programas escolares e, pelo que indicam as pesquisas em ensino de Física, parece também haver um consenso quanto à importância de uma mudança curricular.” (Brockington, pág 3, 2005).

Nesta atividade, a introdução para conteúdos de física moderna se fez de maneira matematicamente simples, necessitando de poucas bases conceituais clássicas e a partir de experimentos que atizaram o interesse dos estudantes, além de serem facilmente repetíveis e financeiramente acessíveis. É evidente que existam possibilidades de melhora e desenvolvimento, entretanto, estes surgirão com a prática e com os resultados construídos a partir de cada aplicação desta sequência.

Até o dado instantâneo, o principal resultado é que, de maneira eficiente e interessante para os alunos, a partir desta sequência experimental, foi possível introduzir a ideia de dualidade onda

partícula em salas de aula de escolas públicas brasileiras. Gerando discussões ricas e entendimentos positivos dos alunos quanto a este conteúdo e a natureza da luz como um todo.

É esperado que, ao longo das aplicações e da continuação deste estudo, devolva-se cada vez mais essa estratégia para introdução à dualidade onda-partícula no Ensino Médio. De forma a cada vez mais intensificar a presença da física moderna e contemporânea nos currículos brasileiros do ensino regular, aproximando assim o entendimento científico dos alunos e as tecnologias por eles utilizadas.

Referencial Bibliográfico

Alves, A Uma abordagem para o ensino de dispositivos LED no ensino médio. Dissertação Mestrado Profissional em Ensino de Física (MNPEF). Instituto de física, UFGD. Dourados, MS, 2017

Bassalo, J, Sobre a Lei de Rayleigh-Jeans. Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 18, 1996

Batista, C, Siqueira, M, A inserção da Física Moderna e Contemporânea em ambientes reais de sala de aula: uma sequência de ensino-aprendizagem sobre a radioatividade. Caderno Brasileiro de Ensino de Física, v. 34, n. 3, p. 880-902, 2017.

Becquerel, A, Compte Rendu des Séances, Académie des sciences, 1839, France

BRASIL. Instituto Nacional de Estudos e Pesquisas Educacionais Anísio Teixeira (Inep). Censo Escolar da Educação Básica 2022: Resumo Técnico. Brasília, 2023.

BRASIL. Ministério da Educação. Base Nacional Comum Curricular. Brasília, 2018. Disponível em: http://basenacionalcomum.mec.gov.br/images/BNCC_EI_EF_110518-versaofinal_site.pdf. Acesso em: 12 de agosto de 2024

BRASIL. Ministério da Educação. Matriz de Referência ENEM Brasília, 2023. Disponível em: http://https://download.inep.gov.br/download/enem/matriz_referencia.pdf Acesso em: 17 de setembro, 2024.

Brockington, G, A Realidade escondida: a dualidade onda-partícula para estudantes do Ensino Médio. Dissertação Mestrado em Ensino de Ciências. Instituto de Física, ao Instituto de Química e Faculdade de Educação, USP, São Paulo, SP, 2005

Costa, I e Santos, M. How to introduce modern physics topics in high school

curriculum? Thinking Physics for Teaching, Edited by Carlo Bernardini et al. Plenum Press, New York, 1995

Einstein, A, On the theory of light production and light absorption fonalen der Physik 20: 199-206, 1906

Ebarhardt, D, Filho, J, Lahm, R, Experimentação no ensino de Física Moderna: efeito fotoelétrico com lâmpada néon e LEDs. Caderno Brasileiro de Ensino de Física, v. 34, n. 3, p. 928-950, 2017.

Feynman, R, The Feynman Lectures on Physics: The Definitive and Extended Edition, 2nd Edition. Portuguese language edition published by Bookman Companhia Editora Ltda., a Division of Artmed Editora S.A, São Paulo, SP, 2008

Forato, T; Pietrocola, M; Martins, R. Historiografia e Natureza da Ciência na Sala de Aula. Cad. Bras. Ens. Fís., v. 28, n. 1: p. 27-59, abr. 2011.

Gil, D e Solbes, J, The introduction of modern physics: overcoming a deformed vision of science, Department de Didàctica de les Ciències Experimentals, Universitat de Valencia, Spain, 1993

Gomes, C. Efeito da diabetes na visão como motivadora para ensino da Lei de Refração. Dissertação Mestrado Profissional em Ensino de Física. Instituto de Física. UFRJ. Rio de Janeiro, 2020.

Greca, I. M., & Freire, O. Does an Emphasis on the Concept of Quantum States Enhance Students' Understanding of QM? Science and Education, 2003

Havlíček, K, Experiments in Physics Education: What do Students Remember? WSD, proceedings of contributed papers - physics 144 - 148, 2015

Huygens, C. Tratado sobre a luz. Tradução: Cadernos de História e Filosofia da Ciências, Suplemento 4:I-99,1986. Original: La Haye, 1690

Ireson, G. A multivariate analysis of undergraduate physics students' conceptions of quantum phenomena. *European Journal of Physics*, 20(3), 1999

Junior, J. Uma abordagem experimental para o ensino da quantização da luz. Dissertação Mestrado Profissional em Ensino de Física. Instituto de Física. UFRJ. Rio de Janeiro, 2016.

Karaman, A. Teachers' Conceptions About Science and Pseudoscience. *Science & Education* n 32:499–528, 2023

Klassen, S, The Photoelectric Effect: Reconstructing the Story for the Physics Classroom, *Sci & Educ*, 20:719–731, 2011

Lautesse, P., Valls, A. V., Ferlin, F., Héraud, J-L., & Chabot, H. Teaching Quantum Physics in Upper Secondary School in France: 'Quanton' Versus 'Wave–Particle' Duality, Two Approaches of the Problem of Reference. *Science & Education*, 2015

Lemke, J, Investigar para el futuro de la educación científica: Nuevas formas de aprender, nuevas formas de vivir. *Enseñanza de las ciencias*,, 24(1), 5–12, 2006

Malheiro, J e Fernandes, P, O recurso ao trabalho experimental e investigativo: Percepções de professores de ciências, *Investigações em Ensino de Ciências – V* 20(1), pp. 79-96, 2015

Martins, R. o que é ciência do ponto de vista da epistemologia? *Caderno de Metodologia e Técnica de Pesquisa*, n 9, 5-20, 1999.

Maxwell, J. C. *A Dynamical Theory of the Electromagnetic*. The Royal Society, Inglaterra, 1864.

McKagan, S.; Handley, W; Perkins, K; Wieman, C, A research-based curriculum for teaching the photoelectric effect, *Physics education research*,, *Am. J. Phys.* 77 1, 2009

Moreira, M. Grandes desafios para o ensino da física na educação contemporânea. Revista do Professor de Física. Brasília, vol. 1, n. 1 . 2017

Nascimento, V e Carvalho, A. A natureza do conhecimento científico e o ensino de ciências. 2008, Anais.. Florianópolis, SC: Faculdade de Educação, Universidade de São Paulo, 2008. Acesso em: 17 set. 2024.

Newton, I. Opticks:: Or, A Treatise of the Reflections, Refractions, Inflections and Colours of Light. William Innys at the West-End of St. Paul's., Oxford University, 1730

Oliveira, F, Vianna, D, Gerbassi, R, Física moderna no ensino médio: o que dizem os professores. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 29, n. 3, p. 447-454, 2007

Ostermann, F; Moreira, M.Uma Revisão Bibliográfica sobre a área de pesquisa “física moderna e contemporânea no ensino médio”. Investigações em Ensino de Ciências – V5(1), pp. 23-48, 2000

Pereira, A., Solbes, J. The Dynamics of Perspective in Quantum Physics. Sci & Educ 31, 427–450 (2022). <https://doi.org/10.1007/s11191-021-00252-91>

Pérez, D; Montoro, I; Alís, J; Cachapuz, A; Praia, J. Para uma imagem não deformada do trabalho científico. Ciência & Educação, v.7, n.2, p.125-153, 2001.

Pietrocola, M. Obstáculos epistemológicos e didáticos no estudo de conceitos de física moderna e contemporânea. Atas do IX Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciências – IX ENPEC Águas de Lindóia, SP – 2013

Pontes, R. Ondas, Partículas e Luz: Uma Abordagem Fenomenológica. Dissertação Mestrado Profissional em Ensino de Física. Instituto de Física. UFRJ. Rio de Janeiro, 2019.

Rodriguez, L. Teaching the wave-particle duality to secondary school students: An analysis of the dutch context. Faculty of behavioral and social sciences. Master

educational science and technology. Enschede, 2018.

Sabino, A, Pletrocola, M, Saberes Docentes Desenvolvidos por Professores do Ensino Médio: Um Estudo de Caso com a inserção da Física Moderna, *Investigações em Ensino de Ciências – V21(2)*, pp. 200-216, 2016

Sasseron, L.H.; Carvalho, A.M.P. Alfabetização científica: Uma revisão bibliográfica. *Investigações em Ensino de Ciências*. **v.16**. p. 59-77. 2011.

Sasseron, L.H.; Machado, V. F. *Alfabetização Científica na Prática: Inovando a Forma de Ensinar Física*. Editora Livraria da Física. 2017.

Silva J, Arengghi L, Lino, A, Porque inserir física moderna e contemporânea no ensino médio? Uma revisão das justificativas dos trabalhos acadêmicos. *R. Bras. de Ensino de C&T*, vol 6, núm. 1, 2013

Sinarcas, V.; Solbes, J. Dificultades en el aprendizaje y la enseñanza de la Física Cuántica en el bachillerato, *Enseñanza de las Ciencias* 31 (3), pp. 9-25, 2013

Siqueira, M; Montanha, L; Batista, C; Pietrocola, M. Obstáculos didáticos na inserção da Física Moderna e Contemporânea: um olhar a partir da formação de professores. *Revista Tecné, Episteme y Didaxis*. Bogotá, 2018.

Smith, E, Stein, M, Walsh, C, Direct Measurement of the Impact of Teaching Experimentation in Physics Labs. *Physical Review X* 10, 011029, 2020

Spagnolo, G; Leccesse, F; Leccisi, M. LED as Transmitter and Receiver of Light: A Simple Tool to Demonstration Photoelectric Effect. *Crystals*, vol 9, 2019

Stadermann, H e Goedhart, M, Why and how teachers use nature of science in teaching quantum physics: Research on the use of an ecological teaching intervention in upper secondary schools *Physical review physics education research American Physical Society*, vol 17, 020132, College Park, MD, 2021

Stadermann, H, Van den Berg, E, Goedhart, M, Analysis of secondary school quantum physics curricula of 15 different countries: Different perspectives on a challenging topic. Physical review physics education research American Physical Society, vol 15, 010130, College Park, MD, 2019

Ximenes, S. Matéria escura no ensino médio. Dissertação Mestrado Profissional em Ensino de Física. Instituto de Física. UFRJ. Rio de Janeiro, 2016.

Young, T, The Bakerian Lecture. On the Theory of Light and Colours, The Royal Society, Inglaterra, 1801.

Apêndice

Material instrucional



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

Instituto de Física

Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física

Mestrado Profissional em Ensino de Física

**UMA ABORDAGEM EXPERIMENTAL PARA O ENSINO DE DUALIDADE
ONDA-PARTÍCULA NO ENSINO MÉDIO.**

João Gabriel Milare Mnzolillo

Lúcia Helena Coutinho

Material instrucional associado à dissertação de mestrado de João Gabriel Manzolillo, apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, Instituto de Física, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Rio de Janeiro
Novembro de 2024

Sumário:

Capítulo 1	Introdução	5
Capítulo 2	Referencial teórico	10
Capítulo 3	Metodologia experimental	16
Capítulo 4	Sequência didática	23
	Referencial bibliográfico	27
	Anexo:	29
	Material do aluno	30

Lista de figuras

Figura 2.1: Da esquerda para a direita e de cima para baixo: Onda chegando no mar, pingos em uma água parada, cordas do violão e símbolo de volume..	9
Figura 2.2: A esquerda onda grande no mar e a direita onda pequena no mar.	10
Figura 2.3: A esquerda ondas na corda com comprimentos diferentes e a direita tabela de tons musicais a partir de seu comprimento de onda..	11
Figura 2.4: Ondas circulares se encontrando na água.	11
Figura 2.5: Bolas de bilhar em uma mesa..	12
Figura 3.1: Foto da esquerda: O laser verde sobre um anteparo, foto da direita: suas características.	15
Figura 3.2: a) Laser vermelho de alta potência. b) Laser vermelho de baixa potência. c) Ambos os lasers vermelhos em comparação. d) Características do laser vermelho de alta potência (comprimento de onda 650 ± 10 nm)	16
Figura 3.3: Luz branca utilizada a partir de uma lanterna	17
Figura 3.4: Base de papelão para o fio de cabelo.	17
Figura 3.5: a) Aparato experimental com o multímetro conectado ao LED verde. b) Testagem do LED verde usando a bateria. c) Testagem do LED vermelho usando a bateria..	18
Figura 3.6: Foto da esquerda: Medição da distância entre 2 máximos consecutivos para a luz verde. Foto da direita: Medição da distância entre 2 máximos consecutivos para a luz vermelha.	19

Figura 3.7: a) emissão de luz branca no LED verde; b) emissão de luz verde no LED verde; c) emissão de luz vermelha de baixa potência no LED verde; d) emissão de luz vermelha de alta potência no LED verde..20

Figura 3.8: a) emissão de luz branca no LED vermelho; b) emissão de luz verde no LED vermelho; c) emissão de luz vermelha de baixa potência no LED vermelho; d) emissão de luz vermelha de alta potência no LED vermelho..21

Capítulo 1

Introdução

A física ensinada tradicionalmente no Ensino Médio não dialoga com o mundo vivido pelos alunos. Os estudos de física moderna e contemporânea realizados a partir do século XX, necessários para o entendimento de parte significativa das tecnologias que usamos atualmente, não estão presentes na maioria das escolas brasileiras, como Moreira (2017) explicita: “o ensino da Física estimula a aprendizagem mecânica de conteúdos desatualizados. Estamos no século XXI, mas a Física ensinada não passa do século XIX” (Moreira, pág 2, 2017).

Além disso, estes conteúdos não são necessários para o ingresso dos alunos a universidades públicas, visto que o mesmo não se encontra na Matriz de Referência do ENEM (Brasil, 2024). Sendo portanto desvalorizados e postos de lado por diversos colégios que procuram unicamente preparar os alunos para esta prova. Com isso, os alunos do Ensino Médio brasileiro ficam defasados em 2 séculos na física por eles estudada. Justificando assim resultados como os de Vogt (2003) onde, em sua pesquisa “Percepção Pública da Ciência”, o professor, perguntando para estudantes quanto ao seu interesse nas disciplinas das ciências da natureza tais como física, química e biologia, recebeu mais de 78% das respostas classificando-as como “muito chatas no cenário escolar” (Vogt, 2003).

A partir destes dados, diversos professores e pesquisadores têm se voltado à tentativa de aproximar os alunos das aulas de física. Entre as soluções mais discutidas está a diminuição desse espaço temporal entre a física estudada e o mundo vivido pelo aluno. Levando assim a um aumento significativo dos estudos sobre a inserção de física moderna no Ensino Médio, como afirma Pietrocola: “As investigações que abordam a temática da inserção da Física Moderna e Contemporânea (FMC) no Ensino Médio vem avançando nas últimas décadas. Hoje, é uma linha de pesquisa consolidada na área de Ensino de Ciências.” (Pietrocola, pág 2, 2018)

Para então inserir a física moderna no Ensino Médio existem diversos caminhos e métodos com características individuais que os tornam próprios para determinadas turmas e propostas pedagógicas de cada colégio. Neste trabalho, procura-se uma introdução à física moderna a partir da experimentação, onde os alunos analisam resultados experimentais destoantes da

física clássica, levando-os a discussões de possibilidades que solucionem este contraste entre a expectativa gerada a partir dos conceitos teóricos e os resultados práticos observáveis.

Essa dinâmica é pensada para os alunos compreenderem diretamente no contato com este estudo, as necessidades das mudanças radicais no modelo científico utilizado que ocorreram no século XX. Compreendendo que a física moderna não surge de maneira instantânea, mas a partir de uma necessidade, vista a incapacidade da física clássica de explicar e prever determinados resultados observáveis.

Não obstante, entre as características almejadas por este trabalho está também a acessibilidade, tanto matemática, quanto financeira e laboratorial. Este foco em uma acessibilidade matemática se baseia na fala de Pietrocola afirmando que a complexidade matemática da física moderna é uma das dificuldades enfrentadas por professores para incluí-la no Ensino Médio. “entendemos que o professor por ter passado muito tempo inserido em uma perspectiva que enfatiza o conteúdo, principalmente aquele focado no formalismo matemático, cria representações e concepções de que não é possível ensinar a Física Moderna e Contemporânea, devido ao alto grau de sofisticação matemática”. (Pietrocola, pág 4, 2018).

Enquanto a procura por uma acessibilidade financeira e de manuseio se baseiam no alto custo de equipamentos e materiais, além da complexidade das técnicas laboratoriais para reprodução dos principais experimentos característicos da física moderna. Considerando a notória falta de recurso financeiro das escolas, especialmente públicas, do país, além da ausência de laboratórios de ciências em 56% das escolas brasileiras de acordo com o Censo Escolar de 2018. (Brasil, 2022)

A partir de ambas as considerações, propõe-se uma atividade de baixo valor de mercado utilizando itens de fácil acesso para compra e fácil manuseio como o multímetro, lasers e LEDs. Que também se baseie em discussões teóricas fundamentadas nos conceitos bases da ondulatória clássica, não necessitando assim de uma extensiva matematização.

A proposta realizada é, então, introduzir o conceito de dualidade onda-partícula no Ensino Médio, a partir de uma sequência de experimentos acompanhados por discussões entre os alunos mediadas pelo professor pré e pós experimentos. Estes experimentos são divididos em 3 etapas: a difração e interferência da luz; o efeito fotovoltaico com uma luz única; o efeito fotovoltaico com diferentes fontes de luz.

Para sua boa aplicação, espera-se que seja desenvolvida com alunos do segundo ou terceiro ano do Ensino Médio após o seu estudo, no mínimo, de ondulatória concluído. O tempo esperado para a boa aplicação é de pelo menos uma hora e quarenta minutos. Isto é, dois tempos médios dentro do cronograma escolar brasileiro.

Inicialmente, é sugerida uma conversa com os alunos recapitulando as características principais de ondas e de partículas, separando-as em dois grupos visivelmente distintos com interações próprias e exemplos claros. O papel do professor como condutor desta recapitulação é essencial para enfatizar respostas que podem indicar caminhos interessantes de diálogos e intervir, caso necessário, com alguns complementos como os fenômenos ondulatórios característicos, caso nenhum aluno os comente. Então, é perguntado em qual grupo a luz se encontra, levando resposta natural dos alunos afirmando a caracterização da luz como um fenômeno ondulatório. A partir daí, passa-se para os experimentos a fim de confirmar ou contrariar essa hipótese.

O primeiro experimento é o de difração e interferência da luz, inspirado na experiência da dupla fenda de Thomas Young (Young, 1801). Este experimento consiste na incidência de um feixe de laser sobre um fio de cabelo, levando à difração da luz. A partir desta, a luz difratada segue em direção a parede da sala que serve como anteparo, no entanto, neste movimento até a parede ocorre a interferência entre segmentos da luz difratada. Obtendo assim o resultado de pontos de máximo e mínimo na parede igualmente espaçados que caracterizam o comportamento ondulatório.

O experimento é realizado tanto com o laser verde quanto com o laser vermelho, medindo com a régua as distâncias entre os máximos subsequentes em cada um deles. Esta distância auxiliará os alunos a reconhecerem as distinções conceituais entre as cores a partir da física clássica. Após as discussões quanto ao experimento e seus resultados em relação à natureza da luz, apresenta-se o segundo experimento: o efeito fotovoltaico.

Comumente, se utiliza do efeito fotoelétrico para introduzir o estudo da dualidade onda partícula, como afirma Stephen Klassen “O efeito fotoelétrico é constantemente utilizado em livros didáticos para confirmar a existência dos quanta de luz ou fótons, sendo essa uma das suas principais importâncias didáticas.” (Klassen, pág 2, 2009, Tradução livre). Entretanto, sua reprodução historicamente acurada depende de um aparato experimental de alto custo e difícil acesso. Portanto, é proposta a utilização do efeito fotovoltaico a partir dos LEDs, que apresenta resultados igualmente relevantes para a discussão da natureza ondulatória, porém é consideravelmente mais acessível.

Este efeito é produzido a partir da emissão do laser verde sobre um LED verde desligado, dentro de um ambiente de baixa iluminação mas conectado a um multímetro. Quando a radiação luminosa for recebida pelo LED, os fótons irão ser absorvidos pelos elétrons semi-livres que estão em sua banda de valência, promovendo-os para um nível de energia mais alto, semelhante ao efeito fotoelétrico. O diferencial é que, ao invés dos elétrons serem

retirados da superfície metálica e conduzidos para uma placa coletora a partir de uma diferença de potencial externa, neste caso o fóton absorvido fará com que um par elétron-buraco da junção pn seja separado, com o elétron sendo promovido para a banda de condução do material tipo n, e o buraco para a banda de valência do material tipo p. Gerando assim uma diferença de potencial elétrico entre as extremidades do LED.

Este experimento, isoladamente, não tem contradição alguma com a teoria ondulatória da luz, assim como a existência do efeito fotoelétrico também não contradiz a física clássica. No entanto, os resultados obtidos tanto no efeito fotoelétrico, quanto no fotovoltaico, em determinadas frequências abaixo da frequência limite, que são inexplicáveis por esta teoria do século XIX.

Após o entendimento do experimento então pelos alunos e a discussão quanto aos resultados do mesmo, são propostas as variações para análise de resultados. Neste momento, o LED verde é iluminado por luzes vermelhas de diferentes potências levando todas, independente da potência, a uma diferença de potencial nula no voltímetro. Este resultado inesperado pela física clássica é apresentado aos alunos, que são desafiados a tentar justificá-lo de alguma forma. A única solução sem falhas é então apresentada pelo professor: a física que até então foi estudada tem um limite e fora desse limite é necessário um novo modelo científico.

A dualidade onda-partícula é, então, apresentada e discutida entre o professor e os alunos. Outras variações do efeito fotovoltaico são realizadas e em meio a esta prática os alunos individualmente anotam, em momentos específicos, os resultados por eles observados, suas interpretações dos mesmos e, principalmente, suas expectativas de resultados anteriores a cada experimento. Essa construção de hipóteses pré-experimento é essencial para levar o aluno à quebra de expectativa ao final da prática. Auxiliando, assim, na compreensão da necessidade de desenvolvimento de uma física distinta da física clássica.

Outra particularidade interessante desta atividade é a possibilidade de explicação do funcionamento das placas fotovoltaicas, os populares painéis solares. Apesar destas placas utilizarem a emissão de luz do sol policromática e neste experimento serem utilizadas luzes laser monocromáticas, o funcionamento deste método de obtenção de energia se explica a partir do efeito fotovoltaico. Demonstrando assim uma aplicação prática concreta aos alunos do estudo realizado nesta atividade.

Nas diferentes ocasiões que esta proposta foi aplicada, as respostas dos alunos mostraram resultados positivos. Como em duas turmas de um Colégio Estadual do Rio de Janeiro, com somados 49 alunos participando da atividade, onde 77,6% destes responderam a pergunta final

quanto à natureza da luz, afirmando que esta não poderia ser definida nem como onda nem como partícula.

A utilização de experimentos os quais os resultados destoam das hipóteses concebidas a partir da física clássica auxiliam o aluno a compreender como estruturou-se a física moderna e identificar parte das características que a tornam tão distante das suas teorias anteriores. O diálogo quanto aos resultados e, em especial, a criação de hipóteses e comparação entre as hipóteses geradas e os dados obtidos, são ótimos exercícios que auxiliam o aluno não somente a compreender melhor a física moderna e os limites da física clássica, mas também a própria produção de conhecimento científico.

Como afirmam Pérez e Solbes: “O ensino de ciências está dando aos alunos uma visão incorreta e simplista da imagem da ciência. Essa é marcada pelo empirismo, mas com a ausência de relevantes aspectos como a formação de hipóteses e a construção experimental.” (Perez e Solbes, pág 1, 1993, Tradução livre). Mesmo ocorrendo adaptações e variações a partir das individualidades de cada professor e particularidades de cada turma e colégio, é indispensável quando aplica-se esta atividade, a utilização da mesma como oportunidade para o aluno discutir, gerar hipóteses, observar resultados e perceber contradições entre diferentes modelos científicos a partir da condução do professor.

Capítulo 2

Referencial teórico

Tal experimento baseia-se em uma reformulação da distinção entre partículas materiais e ondas. Portanto, é de extrema importância que se revisem tais definições. Inicialmente, ao pensarmos em ondas, a primeira associação feita é sempre com as ondas do mar. E, de fato, parte das características principais das ondas são facilmente contempladas na análise dessa onda em específico. No entanto, podemos usar também para tal estudo as ondas nas cordas do violão, as ondas consequentes de algum pequeno corpo (normalmente um pingo) caindo em uma água parada e as ondas sonoras, que para nós são invisíveis, mas ainda assim perceptíveis e analisáveis.

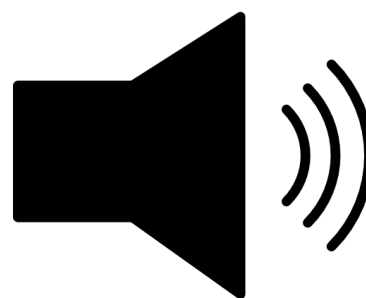


Figura 2.1: Da esquerda para a direita e de cima para baixo: Onda chegando no mar, pingo em uma água parada, cordas do violão e símbolo de volume. Disponíveis respectivamente em: <https://surfguru.com.br/conteudo/a-influencia-das-aguas-rasas-nas-ondas-que-chegam-a-uma-praia-2017-01-19-15329.html>, <http://eientretenimentoinformacao.blogspot.com/2012/06/tenha-um-pingo-de-consciencia-economize.html>, <https://www.youtube.com/watch?v=51CHZjnxgTs>, https://www.flaticon.com/br/icone-gratis/alto-falante-com-contorno-de-ondas-sonoras_28601 (Acesso em 17 de setembro de 2024)

Ao procurar características em comum entre tais ondas percebemos inicialmente uma não-pontualidade. Todas as ondas da figura se encontram em diversos locais ao mesmo

tempo, a onda do mar encontra a praia em toda a sua extensão assim como a onda do som é escutada por todos até uma certa distância de sua fonte. Podemos definir em algumas uma localidade de formação mas em nenhuma pode ser definido um ponto localizado único atingido pela onda ou então um único caminho que ela percorreu. Ondas também não são quantizadas discretamente, sendo impossível se reduzir uma onda a sua parte mínima, suas variações se realizam em contínuos constantes e não inteiros.

Diferenciando agora ondas de mesma natureza a partir de suas singularidades podemos, ao comparar duas ondas distintas no mar, perceber facilmente qual fará possivelmente mais estrago ao chegar na costa, a partir de uma distinção clara: sua altura. Ondas mais altas são consideradas mais fortes e ondas mais baixas, mais fracas. A esta altura damos o nome de amplitude, e a esta “força” associada à sua amplitude, damos o nome de intensidade. Outro exemplo dessa diferença de intensidade é na onda sonora, onde se percebe uma variação de volume direta à variação de amplitude.



Figura 2.2: A esquerda onda grande no mar e a direita onda pequena no mar. Disponíveis respectivamente em: <https://www.correiobraziliense.com.br/mundo/2022/12/5059937-onda-gigante-atinge-praia-na-africa-do-sul-e-pr-ovoca-tres-mortes.html>, <https://thumbs.dreamstime.com/z/onda-pequena-na-costa-81377697.jpg> (Acesso 17 de novembro de 2024)

Outra característica que caracteriza as ondas é seu comprimento de onda, sendo esse o tamanho longitudinal de uma oscilação. Comprimentos distintos são facilmente diferenciados em movimentos de cordas mas seu grande destaque se encontra nas ondas sonoras onde diferentes comprimentos levam a diferentes tons musicais. A distinção entre uma nota Lá e uma nota Dó, tocadas em um mesmo violão, é a variação de comprimento entre elas. Percebe-se que essa distinção não se relaciona a diferença de amplitudes, visto que ondas sonoras podem ter volume alto ou baixo independente de seus tons.

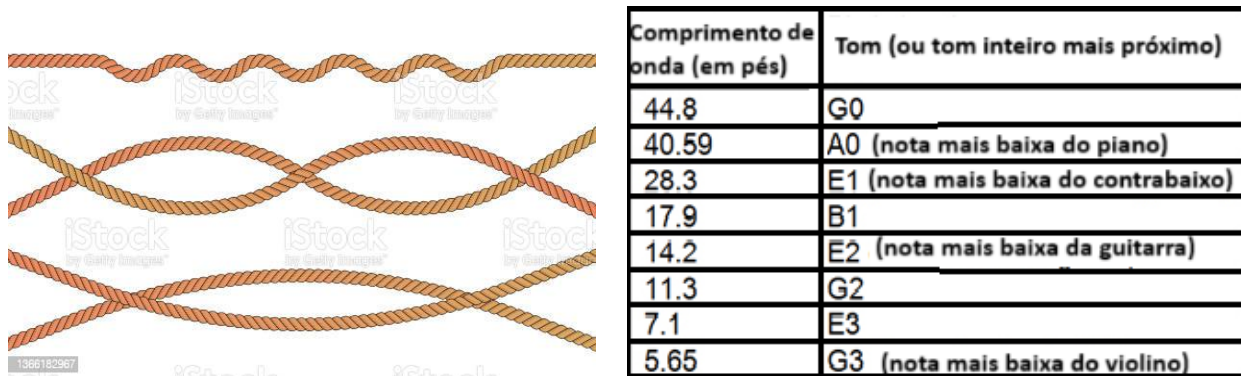


Figura 2.3: A esquerda ondas na corda com comprimentos diferentes e a direita tabela de tons musicais a partir de seu comprimento da onda no vácuo. Respectivamente disponível em <https://www.istockphoto.com/br/vetor/cordas-de-quadro-diferente-gm868491116-144528509>, e adaptado de <https://www.prosoundweb.com/the-long-and-short-of-it-acoustic-wavelengths> (Acesso 17 de novembro de 2024)

Por fim, discute-se a interação entre ondas. Ao fenômeno de sobreposição das ondas damos o nome de interferência, onde essa pode ser construtiva, quando as ondas se reforçam levando a uma onda resultante de maior amplitude que as originais, ou destrutiva, quando as ondas se anulam, chegando possivelmente a um ponto de amplitude zero.



Figura 2.4: Ondas circulares se encontrando na água. Disponível em: <https://mundoeducacao.uol.com.br/fisica/interferencia-ondas.htm> (Acesso 17 de novembro de 2024)

Por outro lado, as partículas têm características completamente opostas nestes quesitos. Sua localidade é pontual e muito bem definida. Como consequência, quando observamos uma partícula material chegando a um certo ponto, definimos de forma clara um caminho por ela percorrido. Suas singularidades são também mais claras, como a massa e velocidade, que definem quanta energia a partícula terá em seu movimento. Sua quantização também é bem definida e discreta, onde existem quantidades naturais de corpos sem valores contínuos, que não pertencem aos números inteiros. Tomando como exemplo as bolas de bilhar, podemos dizer que na mesa existem uma, duas, três ou quatro bolas, mas nunca uma quantidade não

natural como 5,7 bolas. Por fim, o choque entre partículas é caracterizado pelo princípio da impenetrabilidade da matéria, que afirma ser impossível dois corpos materiais distintos ocuparem o mesmo lugar no espaço ao mesmo tempo, as bolas de bilhar também servem como um bom exemplo para essa colisão.



Figura 2.5: Bolas de bilhar em uma mesa. Disponível em: <https://www.livescience.com/46278-kinetic-energy.html> (Acesso em 17 de novembro de 2024)

Para grande parte dos elementos de nosso meio, como a bola de bilhar ou o som, é trivial a compreensão de qual dos dois grupos o elemento participa. No entanto, a luz foi uma exceção a essa regra durante muito tempo. Ao longo do século XVII, a discussão quanto à natureza da luz recebeu destaque na ciência, com Newton e Huygens acreditando na teoria corpuscular e ondulatória da luz, respectivamente. Esse confronto se manteve significativamente presente até 1801, quando Young, a partir do experimento de dupla fenda, chega a resultados de uma luz ondulatória, que passam a ser aceitos como coerentes pela comunidade científica e perduram por mais de um século.

No século XX, entretanto, com o nascimento da física moderna a partir de Einstein e Planck, surgem novos experimentos e evidências que retomam a discussão da natureza da luz. Tais experimentos comprovam uma quantização da luz, sendo ela composta por pequenas quantidades de energia como pacotes que são quantizados e discretos, a esta quantidade mínima de energia da luz damos o nome de fótons. Esses fótons, observados em determinados experimentos com comportamentos característicos de partículas, levam a uma quebra da teoria ondulatória clássica da luz. Todavia, também não pode ser desconsiderada a presença de fenômenos classicamente ondulatórios, como a interferência, na composição da natureza da luz.

Portanto, em determinados experimentos podemos perceber características da luz que levam a considerá-la como onda, e em outros destacam-se características da mesma que são

relacionadas às partículas. Esse não pertencimento em nenhuma das duas naturezas clássicas é o que estudaremos a seguir, sendo tal estranheza denominada de dualidade onda-partícula. Entre os experimentos do século XX que vão de encontro à teoria ondulatória clássica da luz, está o efeito fotoelétrico.

O efeito fotoelétrico é a emissão de elétrons de uma superfície metálica devido à incidência de luz sobre ela; o que o torna significativo para nossa discussão é sua disparidade em relação aos resultados esperados pela física clássica. Pela teoria ondulatória, espera-se uma relação direta entre intensidade da onda e energia. Logo, no efeito fotoelétrico, a energia cinética máxima deveria ser obtida quando a amplitude é máxima. Para além, na teoria ondulatória a frequência não deveria variar algo mais que características externas da onda (no caso da luz, a cor) e o experimento deveria funcionar para toda e qualquer frequência. Todavia, quando realiza-se tal experimento, percebe-se que a energia cinética dos elétrons retirados depende diretamente da frequência da luz, e não necessariamente de sua amplitude, sendo inclusive necessária uma frequência mínima para a ejeção dos elétrons em cada material. Estando abaixo dessa frequência limite o efeito não ocorre, independente da intensidade de luz emitida, logo tal experimento não é contemplado por uma teoria clássica de luz ondulatória.

O experimento do efeito fotoelétrico que resulta em uma natureza da luz não ondulatória, será neste roteiro substituído por uma variação do mesmo de maior acessibilidade, mas com resultados finais muito similares, o efeito fotovoltaico. Tal adaptação consiste na incidência de luzes de diferentes frequências em LEDs de diferentes cores, desligados. Para bem compreender tais resultados, é importante compreender antes o que são os LEDs. Na natureza temos condutores, isolantes e semicondutores, sendo os condutores materiais como os metais, onde os elétrons transitam entre níveis energéticos com facilidade, gerando assim facilmente um campo elétrico e, em contrapartida, sendo os isolantes aqueles com um grande espaço entre seus níveis energéticos, dificultando o movimento dos elétrons e a geração de um campo elétrico, como por exemplo a borracha. Os semicondutores são, como esperado, um meio termo entre esses dois, onde existe uma distância considerável entre os níveis energéticos, possibilitando um movimento dos elétrons somente na presença de um campo elétrico externo, ou seja, quando energiza-se de alguma forma tal material. O LED é um desses semicondutores, onde os elétrons conseguem migrar de um nível energético para outro a partir da aplicação de uma energia externa sobre eles. Nessa transição de nível, o elétron libera sua energia na forma de radiação eletromagnética, ou seja, de luz. A cor da luz depende do tamanho desse gap entre os níveis energéticos, que definirá quanto de energia será necessária para o elétron transitar de um nível para o outro e, conseqüentemente, quanta energia ele

emitirá na forma de radiação eletromagnética ao migrar. Esse funcionamento consegue justificar a natureza não ondulatória da luz na física moderna, pois a energia emitida pelo elétron irá definir a cor do LED e não sua intensidade, levando a uma relação direta entre energia e frequência, e não energia e amplitude.

Em nosso experimento, no entanto, iremos fazer um processo inverso para bem conseguir visualizar essa distinta natureza. Emitindo uma luz diretamente no LED, iremos energizar seus elétrons fazendo-os migrar de nível energético, o que produzirá uma diferença de potencial. A ocorrência dessa transição, no entanto, está condicionada à quantidade de energia recebida pelos elétrons, e logo, relaciona-se à frequência da luz incidida. Tal experimento poderá nos auxiliar a compreender a dualidade onda partícula da luz, pois segundo a física clássica, a voltagem resultante da emissão de luz diretamente no LED, dependeria somente da intensidade da luz emitida e não de sua frequência ou cor.

Capítulo 3

Metodologia experimental

Tanto para a montagem do primeiro processo experimental inspirado na dupla fenda de Young, quanto nos dois processos experimentais do efeito fotovoltaico, foram necessários materiais próprios específicos consideravelmente acessíveis. Esses materiais são: uma fonte de laser verde de cerca de 550 nm, dois lasers vermelhos de comprimento de onda aproximado de 650 nm com potenciais visivelmente diferentes, uma fonte de luz branca, um fio de cabelo, uma base para o fio, fita adesiva, uma régua, uma caixa pequena como base para o LED, um LED verde, um LED vermelho, um voltímetro, uma bateria pequena tipo botão e cabos com pontas de garra popularmente conhecidos como cabos jacaré.

A começar pela fonte de luz verde, essa tem como potência mínima necessária um valor que seja suficiente para a percepção da diferença de potencial pelo voltímetro utilizado no efeito fotovoltaico. Além de ser necessariamente vista de maneira clara quando emitida na parede a uma curta distância, de forma a ser possível observar os padrões de interferência no primeiro experimento. Para as aplicações foi usada uma fonte de 1 mW de 532 ± 10 nm de comprimento de onda e classe I.

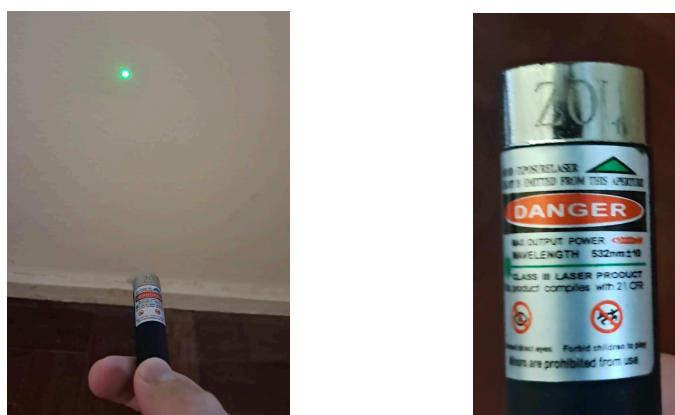


Figura 3.1: Foto da esquerda: O laser verde sobre um anteparo, foto da direita: suas características (comprimento de onda de 532 ± 10 nm)

Em contrapartida, os lasers vermelhos são necessários para estudar tanto a diferença entre frequências distintas em cada experimento, quanto as alterações que ocorrem pela variação de intensidade (de maneira especial no efeito fotovoltaico). As potências necessitam ser visualmente diferentes, como apresentado na figura 3.2, para os alunos gerarem expectativas

associadas à relação da física clássica entre intensidade da luz e energia. Para as aplicações foram utilizadas duas fontes laser de 650 ± 10 nm sendo a mais fraca de classe I e a mais forte de classe II.

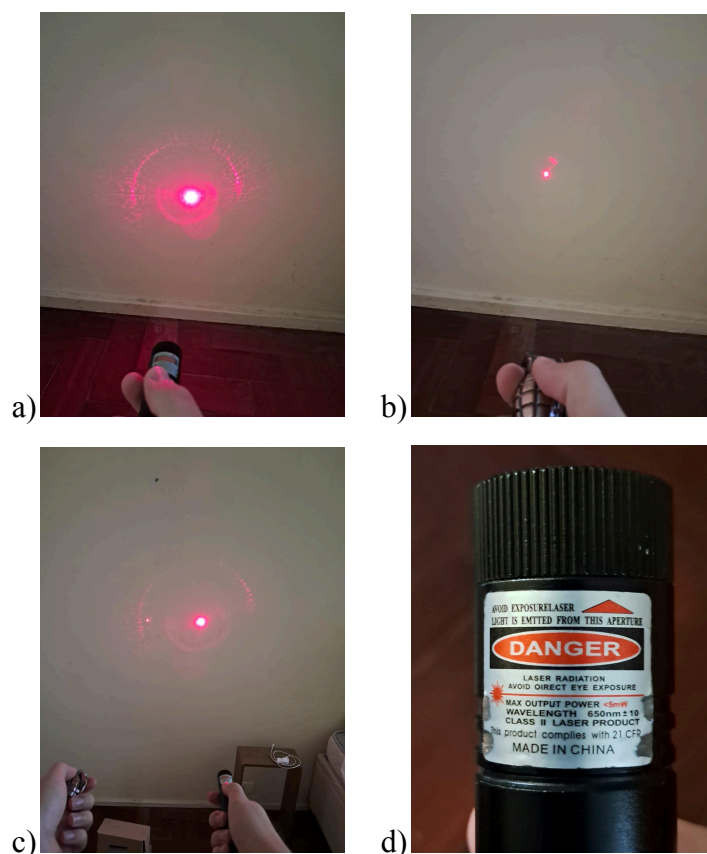


Figura 3.2: a) Laser vermelho de alta potência. b) Laser vermelho de baixa potência. c) Ambos os lasers vermelhos em comparação. d) Características do laser vermelho de alta potência (comprimento de onda 650 ± 10 nm)

A fonte de luz branca, em contrapartida, não necessita de uma intensidade específica, sendo seu papel unicamente para auxiliar os alunos a testar possíveis diferentes situações no efeito fotovoltaico. A presença de uma luz policromática gerando voltagem em qualquer LED pode gerar outras diversas discussões. Além de impedir pensamentos incorretos, como a expectativa de alguns alunos em somente o laser verde gerar uma voltagem no LED verde e justificar essa voltagem pela coincidência de suas cores. Novamente, sua intensidade precisa ter um valor mínimo de modo a ser visto mas sem uma potência própria necessária.

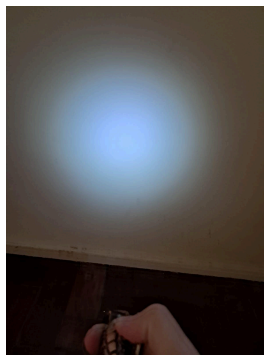


Figura 3.3: Luz branca utilizada a partir de uma lanterna.

A base para o fio de cabelo no primeiro momento pode ser composta de material reciclável, como apresenta-se a figura 3.4. Para apoiar o fio de cabelo foi realizado um corte retangular na tampa de uma caixa de papelão pequena, prendendo neste corte o fio e apoiando as abas da tampa nas laterais da caixa para esta ficar em pé.

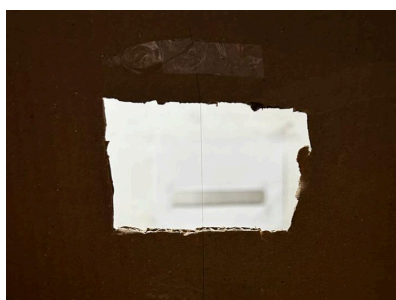


Figura 3.4: Base de papelão para o fio de cabelo

Quanto aos componentes finais, os LEDs não precisam ter intensidades específicas, mas é importante checar se são LEDs da própria cor ou são produzidos pela combinação de outras cores, o que pode influenciar no resultado do experimento. Ressaltando, porém, que LEDs amarelos e azuis são comumente produzidos a partir da combinação de outras cores, mas raramente LEDs verdes e vermelhos não são produzidos pela cor natural. O voltímetro não precisa de uma precisão muito elevada,, podendo ser utilizado um multímetro digital portátil de baixo custo como o da imagem 3.13, capaz de ler diferenças de potencial entre 0 e 2 V.. A bateria, por fim, tem a função de ligar facilmente o LED e demonstrar para os alunos as cores de cada um que será utilizado no experimento. Logo, qualquer voltagem é válida, desde que seja suficiente para uma clara iluminação como mostram as figuras 3.5 (b) e 3.5 ©. Nas aplicações realizadas foi utilizada uma bateria de 3V.

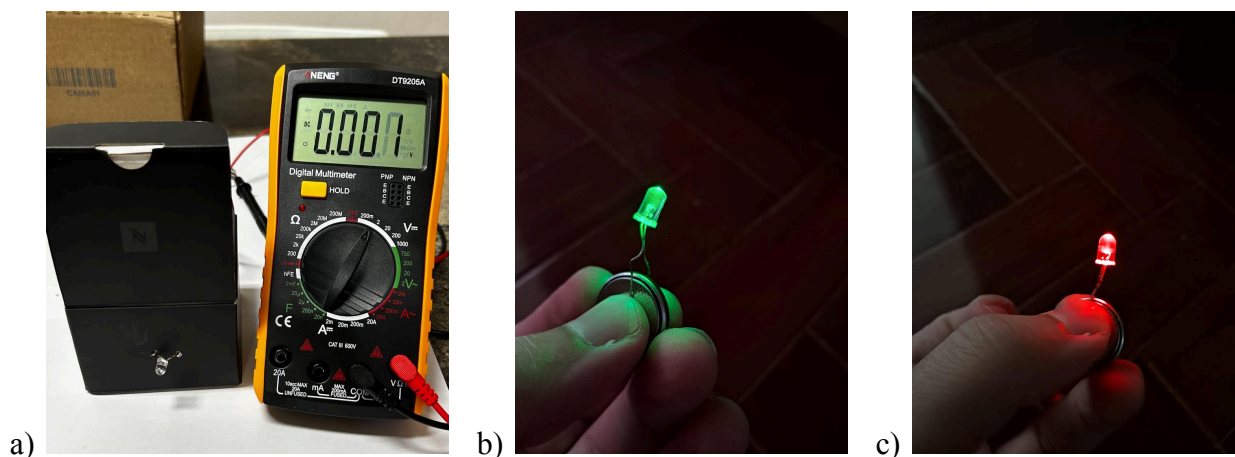


Figura 3.5: a) Aparato experimental com o multímetro conectado ao LED verde. b) Testagem do LED verde usando a bateria. c) Testagem do LED vermelho usando a bateria.

Para a primeira sequência experimental, utiliza-se somente o laser verde, um dos lasers vermelhos (o que for melhor para observar o padrão de interferência na parede), o fio de cabelo, sua base e a régua. Entre os principais cuidados necessários em sua montagem está a precaução com a medição das distâncias entre os máximos subsequentes do laser verde e os máximos subsequentes da fonte vermelha. Tal distinção não é possível a olho nú, sendo portanto necessária a régua.

Nas aplicações realizadas em específico as distâncias entre os máximos consecutivos com o laser verde e o laser vermelho, respectivamente, foram de 6 mm e 8 mm. No entanto, estes valores não necessariamente se repetirão em outras aplicações pois além de dependerem do comprimento de onda do laser utilizado dependem da distância entre a parede e o fio de cabelo e do diâmetro do fio.

Para as medições, assim como na figura 3.6, destacarem de fato a diferença entre o comprimento de onda do verde e do vermelho pela física clássica, é necessário que a distância entre o fio de cabelo e a parede seja a mesma em ambos os exercícios. Não obstante, mesmo sem um valor físico, é interessante que as luzes sejam postas em um ponto também de distancia comum para os alunos interpretarem como de fato situações análogas e não associarem a diferença de medição entre os máximos subsequentes a fatores externos como a distância entre a fonte de luz e o fio de cabelo. Destaca-se também a preocupação com a iluminação da sala. Uma sala de claridade muito elevada impossibilita a boa percepção do padrão de interferência na parede. Por outro lado, uma sala totalmente escura impossibilita a leitura dos valores medidos pela régua.

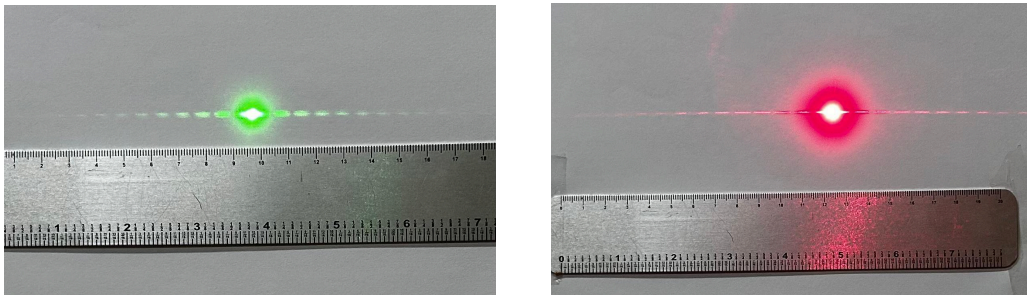


Figura 3.6: Foto da esquerda: Medição da distância entre 2 máximos consecutivos para a luz verde. Foto da direita: Medição da distância entre 2 máximos consecutivos para a luz vermelha.

Seguindo então para os experimentos de efeito fotovoltaico, neles serão utilizados os dois LEDs, as quatro fontes de luz, o multímetro, a bateria e os cabos jacarés. Inicialmente é importante mostrar para os alunos a cor de cada LED utilizando a bateria, assim como nas figuras 3.5 (b) e (c). Então conecta-se o LED verde com o multímetro a partir dos cabos jacaré e ilumina-se o LED com a fonte de luz laser verde, levando à aparição de uma voltagem registrada pelo voltímetro, como mostra a figura 3.7(a).

Um cuidado importante para não influenciar negativamente o raciocínio dos alunos é não realizar contato direto entre a fonte luminosa e o laser. Pois apesar de não existir uma diferença física no caso com ou sem esse contato, o mesmo pode gerar interpretações dúbias dos alunos. Não é necessária uma grande distância, no entanto, para prevenir pensamentos incorretos dos estudantes é interessante mostrar claramente um afastamento mínimo entre a fonte luminosa e o LED.

Após os resultados do efeito fotovoltaico especificamente com tanto o laser quanto o LED verde, os resultados são discutidos com a turma, anotados pelos estudantes e o professor faz a apresentação desse novo fenômeno físico. A partir desse momento, o professor pede aos alunos que pensem em hipóteses para os possíveis resultados com lasers de diferentes cores e potências, e LEDs de diferentes cores. Após os alunos escreverem suas propostas de resultados é realizado o mesmo experimento com a luz vermelha de baixa potência, a luz vermelha de alta potência e a luz branca, todos incidindo no LED verde, assim como mostra a figura 3.7.

Depois os experimentos se repetem sendo utilizado agora o LED vermelho. As quatro fontes de luz são repetidas como mostra a figura 3.8, e novamente os alunos anotam os resultados. Depois destes dados obtidos, é incentivada a conversa para os alunos compararem

suas expectativas pré-experimento com o real resultado obtido, e sugerirem hipóteses para a justificativa destes resultados. Em meio a este diálogo, o professor pode, no momento que considerar propício, conduzir para a possibilidade de uma nova teoria física, introduzindo assim a dualidade onda-partícula e, conseqüentemente, a física moderna no ensino regular.

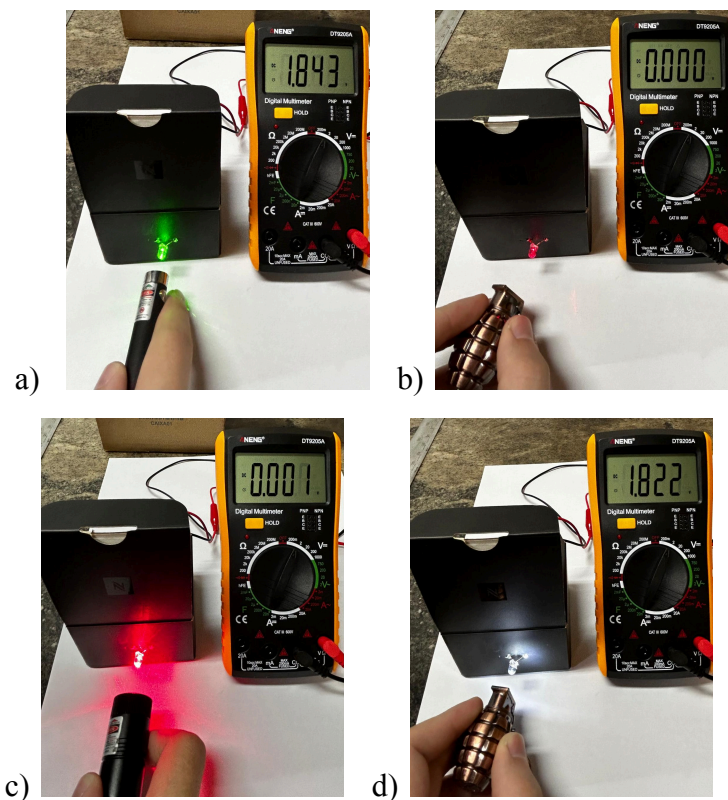


Figura 3.7: a) emissão de luz verde no LED verde; b) emissão de luz vermelha de baixa potência no LED verde; c) emissão de luz vermelha de alta potência no LED verde; d) emissão de luz branca no LED verde.

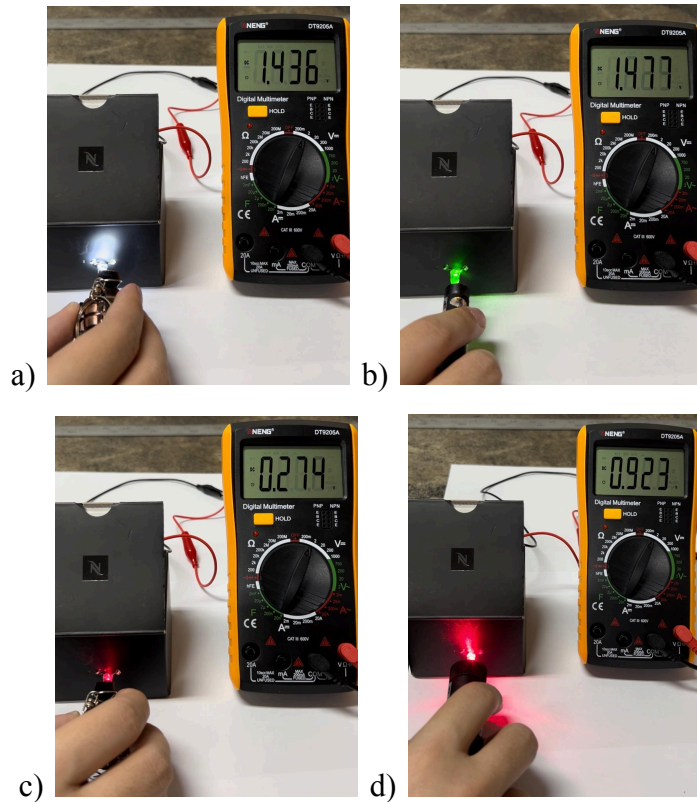


Figura 3.8: a) emissão de luz branca no LED vermelho; b) emissão de luz verde no LED vermelho; c) emissão de luz vermelha de baixa potência no LED vermelho; d) emissão de luz vermelha de alta potência no LED vermelho.

Capítulo 4

Sequência didática

Como observado à frente, a atividade está dividida em três momentos experimentais com debates, diálogos e perguntas para os alunos, anteriores e posteriores a cada um desses 3 momentos. Neste capítulo, explica-se de maneira mais detalhada a sequência didática dos experimentos e das intervenções do professor anteriores e posteriores a cada momento experimental.

Inicialmente, é proposta uma recapitulação dos conceitos de onda e partícula junto aos alunos. O professor pede para os alunos citarem características particulares das ondas e das partículas com exemplos, anotando-os no quadro. O objetivo é especialmente auxiliar os alunos a retomar essas diferenças drásticas da física clássica. Caso nenhum aluno destaque os fenômenos ondulatórios, o professor pode intervir ressaltando-os e lembrando-os, de maneira especial a difração e a interferência. Para realizar o devido contraste com a física das partículas, o professor pode ainda destacar o choque que ocorre no encontro entre duas partículas corpusculares como uma característica própria, destoando-o da interferência que ocorre quando há o encontro de duas ondas.

Após essa recapitulação, o professor se volta para a introdução do material pedagógico, lecionando sobre a história da discussão de natureza da luz. Esta parte pode servir tanto na forma de leitura da introdução do material, como uma explicação própria do professor da mesma introdução. Ao finalizá-la, o professor informa aos alunos a proposta principal da atividade: a definição e confirmação da natureza da luz.

A começar pelo experimento de difração e interferência, que confirma a natureza ondulatória da luz a partir da óptica clássica, o professor explica o que ocorrerá para os alunos responderem a primeira sequência de perguntas, o pré experimento. Explica-se que na sequência será emitida uma luz na parede sem um obstáculo no meio, depois irá se adicionar um obstáculo, sendo ele um fio de cabelo apoiado em uma base. Por fim, irá se alterar a fonte de luz, mudando a cor de luz incidida, para estudar se existe alguma diferença entre uma cor e outra. Após os alunos responderem as 3 perguntas no tempo estimado pelo professor, ocorrem os experimentos. Dependendo do tamanho da sala e da quantidade de alunos, pode ser interessante pedir para os estudantes que levantem e se aproximem do aparato, para visualizar melhor os resultados.

Primeiro, com a luz sem nenhum obstáculo emitida na parede não ocorrerá nenhuma peculiaridade, no entanto, quando o fio de cabelo é inserido entre a fonte e o anteparo, surge um padrão de interferência. Alinhar o laser emitido com o fio de cabelo pode ser complicado, por isso a base para o fio pode auxiliar nessa tarefa. Enquanto o professor controla o laser para se manter de maneira clara o padrão de interferência, ele pode pedir a um aluno com uma régua para medir a distância entre dois máximos consecutivos para essa fonte. Depois da medição e dos alunos anotarem o valor, o professor deve alterar a fonte para outro comprimento de onda, e pedir novamente para algum aluno medir a distância entre os máximos consecutivos e para os alunos anotarem esta resposta.

Este processo é necessário para os alunos visualizarem fenômenos classicamente ondulatórios na luz, e ainda associarem a diferença entre cores com a diferença de comprimento da onda da luz. Em seguida o professor pede que os alunos respondam em conjunto qual imaginam ser a natureza da luz após esse experimento, e por quê. Também é solicitado que os alunos respondam qual a diferença por eles observadas entre as fontes de cores diferentes. Após o diálogo entre os alunos, mediado pelo professor, o mesmo pede que todos se sentem para responder as perguntas sobre a análise dos dados.

Após o tempo determinado pelo professor, volta-se para a segunda etapa, o efeito fotovoltaico. O professor novamente faz uma introdução histórica, podendo ser lida ou explicada com suas palavras, agora quanto a uma descrição do início do século XX de Albert Einstein para fenômenos com resultados inesperados, que retoma a discussão quanto à natureza da luz.

Novamente, o professor explica o que ocorrerá experimentalmente, neste caso, que irá incidir uma fonte de luz laser verde sobre um LED também verde desligado, mas conectado a um voltímetro. Neste momento de explicação, o professor aproveita e testa o material mostrando para os alunos o LED conectado à bateria para confirmar sua cor e a voltagem lida pelo voltímetro sem a emissão de luz. Os alunos então respondem ao segundo pré-experimento, demonstrando suas expectativas de resultados.

Após as anotações, o professor novamente convida os alunos a levantarem e observarem o experimento. O voltímetro conectado ao LED desligado irá apontar uma voltagem nula, no entanto, ao incidir luz no LED a voltagem irá subir e se manter em valores expressivos, após um pequeno tempo de flutuações. O professor pede então que os alunos discutam o que ocorreu e como ocorreu.

Nesta discussão é possível que o professor tenha que realizar mais intervenções, chegando, no final, a trazer à tona o efeito fotovoltaico e explicar seu funcionamento. Para não utilizar

termos complexos e que atrapalhem o entendimento dos alunos, o professor pode explicar o fenômeno através do conceito de energia, justificando a aparição de voltagem como uma transmissão de energia da fonte luminosa para o LED. Este momento também pode ser interessante para exemplificar onde ocorre este mesmo efeito em momentos do cotidiano, explicando sobre as placas fotovoltaicas da energia solar. Pelas aplicações já realizadas, trazer esta aplicação prática intensifica significativamente o interesse dos alunos na prática como um todo. Após a discussão, os alunos são convidados a novamente se sentarem e responderem a segunda análise de dados.

Além de uma análise do resultado do experimento observado, este grupo de perguntas também servirá como pré-experimento para o último momento da atividade. Questionando aos alunos os acontecimentos, caso a fonte de luz ou o LED sejam trocados, já propõe-se a criação de hipóteses quanto à terceira etapa experimental da atividade. Esta então é explicada, e novamente os lasers e LEDs são testados.

O professor então refaz o experimento, agora, no entanto, emitindo a luz branca policromática sobre o LED verde, emitindo os lasers vermelhos de alta e baixa potência, e depois repetindo o experimento com as 4 fontes para o LED vermelho. A partir das práticas já realizadas, é destacável a surpresa dos alunos com a ausência de voltagem quando a luz vermelha de alta potência ilumina o LED verde e igualmente com a presença de voltagem quando a luz verde ilumina o LED vermelho.

Este momento é então definitivo, pois após os resultados experimentais, o professor pede para os alunos explicarem o que observaram e em diálogo procurarem justificativas para tais resultados. A grande discussão deve se pautar na ideia de que, a partir do conhecimento até então gerado nas aulas anteriores, e na própria atividade, o comprimento de uma onda (e consequentemente a cor da luz) não deveria intervir em sua energia, sendo somente sua amplitude definitiva para isso. De forma ainda mais inesperada, a luz laser verde pode levar a geração de energia quando emitida sobre um LED vermelho, e a luz laser vermelha de maior potência não leva a energia alguma quando emitida sobre um LED verde.

É improvável que sozinhos os alunos cheguem à conclusão de existir um erro na teoria física e afirmarem uma nova teoria válida para a natureza da luz. Entretanto, é importante que o professor preserve e promova esse diálogo ao máximo, para incentivar os alunos em suas gerações de hipóteses e construções de modelos. Em certo momento, porém, o professor muito provavelmente terá de intervir e lecionar sobre a dualidade onda -partícula para a sala.

Com esse momento de aprendizado, o professor pede que os alunos respondam a terceira e última análise dos dados levando ao fim da atividade. Existem pequenas variações possíveis a

partir dos contextos da turma e do colégio, sendo uma possibilidade o fim da atividade questionando se a mesma dualidade pode ocorrer em outros conceitos da física além da luz. Levando a possibilidade de estudo na aula seguinte da dualidade no elétron e no nêutron, caso estas façam parte do cronograma pensado pelo professor para o ano. Independentemente destas pequenas variações, o importante é que os alunos nesta atividade tenham possibilidade de gerarem hipóteses, discutirem resultados e ainda, a partir deles, compreenderem o que é a dualidade onda-partícula.

No anexo está o material proposto para utilização do professor ao desenvolver a atividade. Propõe-se que cada aluno tenha sua própria cópia deste material e a utilize tanto para responder quanto para acompanhar os procedimentos realizados ao longo do processo experimental. Destaca-se o papel do professor de, além de conduzir a aula seguindo este material, sugerir momentos de discussões, comentários e respostas públicas dos alunos ao longo da atividade. Especialmente nos momentos de pré-experimento, ocasionando assim diálogos saudáveis e construtivos entre a turma.

Referencial Bibliográfico:

Alves, A Uma abordagem para o ensino de dispositivos LED no ensino médio. Dissertação Mestrado Profissional em Ensino de Física (MNPEF). Instituto de física, UFGD. Dourados, MS, 2017

BRASIL. Ministério da Educação. Base Nacional Comum Curricular. Brasília, 2018. Disponível em: http://basenacionalcomum.mec.gov.br/images/BNCC_EI_EF_110518-versaofinal_site.pdf. Acesso em: 12 de agosto de 2024

BRASIL. Ministério da Educação. Matriz de Referência ENEM Brasília, 2023. Disponível em: http://download.inep.gov.br/download/enem/matriz_referencia.pdf Acesso em: 17 de setembro, 2024.

Brockington, G, A Realidade escondida: a dualidade onda-partícula para estudantes do Ensino Médio. Dissertação Mestrado em Ensino de Ciências. Instituto de Física, ao Instituto de Química e Faculdade de Educação, USP, São Paulo, SP, 2005

Gil, D e Solbes, J, The introduction of modern physics: overcoming a deformed vision of science, Department de Didàctica de les Ciències Experimentals, Universitat de Valencia, Spain, 1993

Gomes, C. Efeito da diabetes na visão como motivadora para ensino da Lei de Refração. Dissertação Mestrado Profissional em Ensino de Física. Instituto de Física. UFRJ. Rio de Janeiro, 2020.

Klassen, S, The Photoelectric Effect: Reconstructing the Story for the Physics Classroom, Sci & Educ, 20:719–731, 2011

Ostermann, F; Moreira, M. Uma Revisão Bibliográfica sobre a área de pesquisa “física moderna e contemporânea no ensino médio”. *Investigações em Ensino de Ciências* – V5(1), pp. 23-48, 2000

Pontes, R. Ondas, Partículas e Luz: Uma Abordagem Fenomenológica. Dissertação Mestrado Profissional em Ensino de Física. Instituto de Física. UFRJ. Rio de Janeiro, 2019.

Siqueira, M; Montanha, L; Batista, C; Pietrocola, M. Obstáculos didáticos na inserção da Física Moderna e Contemporânea: um olhar a partir da formação de professores. *Revista Tecné, Episteme y Didaxis*. Bogotá, 2018.

Anexo

Material do aluno

A natureza da luz

Nome da escola: _____

Data: _____

Aluno: _____

Turma: _____ Professor: _____

1 Primeiro experimento: A Difração da luz

1.1. Introdução

Neste experimento, estudaremos uma questão central para a física durante os séculos XVII e XVIII: Qual a natureza da luz. Isaac Newton e Christiaan Huygens foram grandes físicos, que ao longo do século XVII tiveram um forte embate quanto à natureza da luz, se esta seria uma partícula corpuscular ou se sua natureza é ondulatória. Isaac Newton defendia que a luz teria uma natureza corpuscular, ou seja, seria feita de pequenos corpos materiais, enquanto Christiaan Huygens acreditava que o comportamento da luz seria similar ao de ondas como o som. Em 1801, ocorreu um dos grandes marcos desta discussão: O experimento de dupla fenda de Thomas Young.

Inspirados então neste experimento de Young, nesta atividade iremos testar as características da luz a partir da física clássica e, conseqüentemente, tentar defini-la como um fenômeno ondulatório ou um objeto corpuscular. Analisaremos as projeções de feixes lasers de diferentes cores em uma parede lisa em duas distintas situações. Sem um obstáculo e com um obstáculo no meio (um fio de cabelo), ambas a partir de uma mesma distância. Estudaremos a possibilidade de tanto o obstáculo quanto a mudança da cor levar a alguma alteração do resultado.

Caso ocorra alguma alteração, iremos medi-la para chegar a conclusões não somente quanto à natureza da luz, mas também a afirmações sobre suas características empíricas e quais grandezas físicas as definem.

1.2 Pré-experimento

1) O que você espera ver na parede sem o fio de cabelo no meio?

2) E com ele, como deve ficar?

3) Existirá alguma diferença se usarmos a luz verde ou a luz vermelha?

1.3. Procedimento experimental:

Material:

- . Ponteiro Laser Vermelho
- . Ponteiro Laser Verde
- . Um fio de cabelo comprido
- . Fita Adesiva
- . Base para o fio de cabelo
- . Régua

Procedimento:

1. Ligue o ponteiro Laser vermelho e aponte para uma parede lisa
2. Depois repita o procedimento com o fio de cabelo no meio do caminho em um ponto específico onde sua base esteja fixa (fixe a base onde está o fio de cabelo a uma distância aproximada de 1 m da parede).
3. Com a régua, marque a distância entre o máximo central e o logo seguinte na parede, e anote o valor obtido.
4. Repita então o processo usando agora o ponteiro laser verde, utilizando o mesmo apoio para o fio na mesma posição fixa.
5. Caso tenha alguma dificuldade de visualização, tente aproximar os ponteiros da parede deixando o padrão mais forte, no entanto caso seja necessária tal aproximação lembre-se de aproximar igualmente os dois lasers e anotar as distâncias dos máximos novamente.

1.4. Análise dos dados:

- 1) Os resultados foram próximos do que você esperava?

--

- 2) O fio de cabelo interferiu no experimento?

--

3) A partir do que foi observado neste experimento, você diria que a luz se comporta como uma onda ou como uma partícula?

4) Qual a distância encontrada entre o máximo central e o máximo seguinte com a fonte de luz vermelha? E com a fonte de luz verde?

5) Houve alguma alteração com a mudança da cor do laser do verde para o vermelho? Se sim, qual característica da luz levou a isto? O que define a "cor" da luz?

2 Segundo experimento: O efeito fotoelétrico

2.1. Introdução

Séculos após a discussão de Newton e Huygens ressurgiu a discussão quanto à natureza da luz a partir do surgimento da física moderna. Com os experimentos de Einstein e Planck percebem-se inesperados limites nas afirmações da física clássica e a natureza da luz é redefinida de forma surpreendente. Tal experimento propõe estudarmos e compreendermos esta nova definição a partir de peculiaridades de um

resultado surpreendente descoberto por Becquerel em 1839, e descrito por Albert Einstein no início do século seguinte.

Em nosso experimento, iluminaremos um LED desligado com luzes de diferentes cores e intensidades, conectando a esse LED um voltímetro. Observaremos se essa emissão de luz levará a alguma alteração na diferença de potencial elétrico medida pelo voltímetro nestes diferentes casos, objetificando identificar quais relações existem entre características da luz emitida e a diferença de potencial detectada.

2.2. Procedimento experimental para a luz verde:

Material:

LED Verde

Ponteiro Laser Verde

Multímetro

Cabo com Garra jacaré

Procedimentos:

1. Conectar o LED ao multímetro utilizando os cabos com garra jacaré e observar a medição da voltagem pelo multímetro.
2. Emitir o Laser verde em sua intensidade máxima diretamente no LED e observar o valor obtido de diferença de potencial medida pelo multímetro.

2.3. Análise dos dados para a luz verde:

- 1) A emissão de luz em cima do LED desligado mudou o valor de tensão aferida pelo multímetro?

--

2) Se mudarmos a amplitude (intensidade) da luz que incide sobre o LED, o que você acha que ocorrerá de diferente no experimento?

3) Se mudarmos o comprimento de onda (cor) da luz emitida, o que você acha que ocorrerá de diferente no experimento?

2.4. Procedimento experimental para mais fontes de luz:

Material:

LED Verde

LED Vermelho

Ponteiro Laser Verde

Ponteiro Laser Vermelho forte

Ponteiro Laser Vermelho fraco

Lanterna de luz branca

Multímetro

Cabo com Garra jacaré

Procedimentos:

3. Emitir o Laser vermelho de baixa intensidade no LED e observar o valor obtido de voltagem medida pelo multímetro.

3. Emitir o Laser vermelho de alta intensidade no LED e observar o valor obtido de voltagem medida pelo multímetro.

4. Emitir agora a lanterna branca diretamente no LED e observar o valor obtido de diferença de potencial medida pelo multímetro.

5. Trocar o LED verde por um LED vermelho e repetir o processo para as 4 luzes (verde, vermelha de alta intensidade, vermelha de baixa intensidade e branca).

2.5. Análise dos dados para mais fontes de luz:

1) Os resultados foram próximos do que você esperava?

2) A intensidade da luz interferiu no valor da voltagem? E o comprimento de onda (cor)?

3) O que podemos dizer sobre a natureza da luz a partir desse experimento?

4) Compare os resultados obtidos neste experimento com os obtidos no experimento passado. O que eles juntos dizem sobre a natureza da luz?