

**INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA
CAMPUS ARARANGUÁ**

LICENCIATURA EM FÍSICA

MALU DE ARAUJO HUFF

**LABORATÓRIO DIDÁTICO COM ABORDAGEM CONSTRUTIVISTA:
PROPOSTA DE ENSINO DO EFEITO FOTOELÉTRICO A PARTIR DE UMA
ATIVIDADE EXPERIMENTAL HISTÓRICA.**

**ARARANGUÁ
2019**

**INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA
CAMPUS ARARANGUÁ**

LICENCIATURA EM FÍSICA

MALU DE ARAÚJO HUFF

**LABORATÓRIO DIDÁTICO COM ABORDAGEM CONSTRUTIVISTA:
PROPOSTA DE ENSINO DO EFEITO FOTOELÉTRICO A PARTIR DE UMA
ATIVIDADE EXPERIMENTAL HISTÓRICA.**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Instituto Federal de Santa Catarina – Câmpus Araranguá como parte dos requisitos para obtenção do título de Licenciada em Física.

Orientador: Prof. Me. Bruno Leal Dias
Coorientador: Prof. Me. Israel Müller dos Santos

**ARARANGUÁ
2019**

RESUMO

Este trabalho apresenta uma proposta de sequência didática para o ensino do Efeito Fotoelétrico no Ensino Médio, desenvolvida a partir de aportes educacionais, epistemológicos e metodológicos com enfoque construtivista. Por meio de pesquisa bibliográfica, percebeu-se que não há consenso em tratar o tema no ensino médio, tampouco através de uma visão em que se reproduza, através de experimentação, as contradições previstas pela teoria clássica em relação ao que é observado no fenômeno, como proposto no trabalho em questão. Consideramos que essa abordagem pode permitir uma melhor compreensão sobre o desenvolvimento da construção do conhecimento científico, afastando-se de uma visão positivista da ciência. E, que além do tema apresentar potencial para abordar aspectos históricos do desenvolvimento científico, este possibilita a introdução do laboratório didático em uma perspectiva construtivista.

Palavras-chave: Efeito fotoelétrico, Ensino de Física, Experimentação História e Filosofia da Ciência.

ABSTRACT

This paper presents a didactic sequence proposal for the teaching of the Photoelectric Effect in High School, developed from educational, epistemological and methodological contributions with a constructivist approach. Through bibliographic research, it was realized that there is no consensus on dealing with the subject in high school, nor through a view that reproduces, through experimentation, the contradictions predicted by the classical theory in relation to what is observed in the phenomenon, as proposed in this paper. We consider that this approach may allow a better understanding about the development of the construction of scientific knowledge, moving away from a positivist view of science. And, that besides the theme has potential to address historical aspects of scientific development, it allows the introduction of the didactic laboratory in a constructivist perspective.

Keywords: Photoelectric effect, Physics Teaching, Experimentation History and Philosophy of Science.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	8
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	10
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	13
3.1	APORTE EDUCACIONAL: O CONSTRUTIVISMO DE JEAN PIAGET	13
3.2	APORTE EPISTEMOLÓGICO: OS OBSTÁCULOS EPISTEMOLÓGICOS DE GASTON BACHELARD	15
3.3	APORTE METODOLÓGICO: O LABORATÓRIO DIDÁTICO DE PINHO ALVES	16
3.4	COMENTÁRIOS A PARTIR DA EPISTEMOLOGIA DE GASTON BACHELARD	19
4	METODOLOGIA	21
5	PLANEJAMENTO DA SEQUÊNCIA DIDÁTICA	24
5.1	AULA 1	24
5.2	AULA 2	26
5.3	AULA 3	29
5.4	AULA 4	31
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	34
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA	37
	APÊNDICE A	40
	APÊNDICE B	43
	APÊNDICE C	45
	APÊNDICE D	47
	APÊNDICE E	49
	APÊNDICE F	51
	APÊNDICE G	54
	APÊNDICE H	57
	APÊNDICE I	62
	APÊNDICE J	64

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Modelo representativo de uma onda eletromagnética68

Figura 2 - Espectro Eletromagnético68

Figura 3 - Esquema de relação entre teorias da Física da Luz e Visões Filosóficas20

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Lista de artigos analisados em cada periódico	11
Tabela 2 - Organização da sequência didática proposta	23

LISTA DE ABREVIATURAS

C&E - Ciência & Educação

CBEF - Caderno Brasileiro de Ensino de Física

EENCI - Experiência em Ensino de Ciências

EF - Efeito Fotoelétrico

EM - Ensino Médio

EPEC - Ensaio Pesquisa em Educação em Ciências

FC - Física Clássica

FM – Física Moderna

FMC - Física Moderna e Contemporânea

FNE - Física na Escola

HFC - História e Filosofia da Ciência

IENCI - Investigação em Ensino de Ciências

LED - Light Emitting Diode (Diodo Emissor de Luz)

RBEF - Revista Brasileira de Ensino de Física

1 INTRODUÇÃO

Comunicação de satélites, celulares, fibras ópticas, óptica eletrônica, placas fotovoltaicas, entre outras tecnologias modernas cercam o nosso cotidiano e são fruto de estudos científicos que se desenvolveram a partir da Física Moderna e Contemporânea (FMC). Apesar desse cenário, a disciplina de Física na escola de educação básica ensina, quando muito, sobre mecânica newtoniana, termometria, física geométrica, entre outras, deixando de lado grande parte do conhecimento desenvolvido ao longo do século XX (Terrazan, p. 209, 1992).

Muitos autores apontam para a necessidade da inserção de FMC no ensino médio, e suas justificativas são variadas, como as apontadas por Ostermann e Moreira (2000), dentre as quais destacamos: aumentar o interesse dos jovens por uma carreira científica; despertar a curiosidade dos estudantes ajudando a entender a Física como uma construção humana; proporcionar discussões acerca da filosofia da ciência; ter contato com a ciência que está presente em seu cotidiano garantindo o exercício de sua cidadania. Ainda cabe ressaltar que estudos como de Kalmus, Wilson, Swinbank (apud Ostermann e Moreira, 2000) destacam que os alunos têm interesse em assuntos relacionados a FMC, como buracos negros, relatividade e partículas elementares.

Apesar do consenso na literatura sobre a necessidade de sua inserção, poucos são os trabalhos que buscam criar estratégias para introdução de FMC no contexto de sala de aula. Terrazan (1994) indica que é o professor quem deve definir quais as metodologias que utilizará para introdução desses conteúdos e destaca a utilização de experimentos e de história e filosofia da ciência (HFC) como facilitadoras dessa abordagem.

Sabe-se que no cotidiano do professor os livros didáticos são a base para abordagem dos conteúdos de Física. Essa ideia é reiterada por Ossak e Bellini (2009, p.3) quando afirmam que o livro didático é material instrumental básico para o ensino de ciências, devido a uma série de dimensões políticas nas escolas, como o excesso de aulas, a falta de experimentação entre outras. Como resultado dessa utilização em massa do livro didáticos, de acordo com Silva e Zanon (2000), acaba-se difundindo nas escolas um modelo de ensino centrado na transmissão-recepção de conteúdos tidos como verdades inquestionáveis e imutáveis, tendo como consequência a repercussão de uma visão empirista da ciência.

Postman e Weingartner (1969 appud Moreira, 2005) alertam para as consequências deste tipo de educação, pois, como resultado, teremos alunos que não estarão preparados para viver em um mundo de grandes mudanças. Alunos com personalidades passivas, intolerantes e conservadoras, que resistirão à mudança para não modificar o ideal de certeza. Moreira (p. 3, 2005) aponta a necessidade da inserção de conteúdos condizentes com a época na qual vivemos, trabalhados de maneira à promover um “novo tipo de pessoa”, com personalidade inovadora, flexível, crítica e tolerante.

Pensando nos apontamentos realizados e na proposição de um tema que pudesse conduzir uma proposta de sequência didática, classificamos a Física Moderna como área de trabalho levando em conta a sua atualidade e grande aplicabilidade nas tecnologias. Mais especificamente escolhemos o conceito de Efeito Fotoelétrico (EF) como conteúdo central da sequência, por motivos de afinidade e por percebermos o seu potencial em trabalhar a experimentação em conjunto à história e filosofia da ciência. Nesse viés, este trabalho busca responder ao seguinte **problema de pesquisa**: *Como seria possível ensinar o efeito fotoelétrico por meio da experimentação sem incorrer em uma epistemologia positivista?* Tem-se como **hipótese que**: ensinar EF por meio de uma atividade experimental histórica minimizará a visão positivista na abordagem desse tópico.

Para tanto, o **objetivo geral** deste trabalho é o de desenvolver uma sequência didática utilizando-se da atividade experimental histórica como elemento mediador para o ensino do EF. Mais especificamente, o de a) realizar uma revisão bibliográfica, investigando na literatura trabalhos que contribuam para pesquisa; b) apropriar-se e refletir acerca de aportes teóricos e metodológicos coerentes e complementares; c) revisar e refletir sobre a evolução dos modelos físicos para a luz; e d) redigir os planos de aula que constituem a sequência didática.

Espera-se que com a proposição dessa sequência didática este trabalho possa contribuir para discussões de questões históricas relacionadas ao EF, proporcionando a reflexão sobre o desenvolvimento da ciência; e para a introdução da Física Moderna no contexto escolar, considerando a atividade experimental histórica como mediadora desse processo. Almeja-se também, quando de sua implementação, que forneça subsídios para abordagem do tema, possibilitando ao aluno agregar às suas concepções pessoais, concepções formais e científicas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Com o intuito de compreender o que vem sendo realizado na área de Física com relação ao ensino do conceito de efeito fotoelétrico, aponto nesta sessão trabalhos que já foram realizados por outros pesquisadores dentro deste âmbito. Cabe ressaltar que o objetivo desta pesquisa não foi o de realizar um estado da arte acerca dos indicadores apresentados, mas de descrever brevemente trabalhos que, em alguma medida, coadunavam com a proposta desta pesquisa.

Os trabalhos aqui destacados estão publicados em periódicos eletrônicos de classificação A e B no Qualis/CAPES, na área de ensino, considerando um recorte temporal dos últimos 10 anos. As revistas selecionadas foram: Revista Brasileira de Ensino de Física (RBEF), Caderno Brasileiro de Ensino de Física (CBEF), Investigação em Ensino de Ciências (IENCI), Experiência em Ensino de Ciências (EENCI), Ciência & Educação (C&E), Física na Escola (FnE) e Ensaio Pesquisa em Educação em Ciências (EPEC).

Os indicadores principais utilizados para realizar a busca em cada site dos periódicos selecionados acima, foram *efeito fotoelétrico e ensino de Física*, podendo ser combinados com os indicadores *experimentação, experimento, história e filosofia da ciência (HFC)*. O único critério utilizado para exclusão de artigos foi o de não manifestar características relacionadas ao ensino do efeito fotoelétrico como apresentadas pelos indicadores utilizados. A tabela 1 apresenta os artigos encontrados em cada revista, ressalvo as revistas que não apresentaram artigos relacionados.

Na RBEF, dois artigos foram encontrados a partir das variações dos indicadores. Sales et al. (2008) apresentam uma metodologia de modelagem exploratória por meio de um software intitulado Pato Quântico. O qual possibilita a matematização da constante de Planck por meio de suposições de variáveis dentro da modelagem computacional, embasado na teoria de aprendizagem de David Ausebel. Sales et al. (2008) conclui que a atividade possibilitou uma aprendizagem significativa para os alunos, e que o software, por ser em um formato de jogo atraiu os alunos. No entanto, afirma que nenhum recurso é altamente significativo se não houver o envolvimento de todas as partes.

O outro artigo entrado é de Santos (2018), que trata em sua pesquisa questões teóricas relacionadas ao experimento realizado por Millikan em 1916, o

qual foi responsável por determinar com precisão a carga do elétron e a constante de Planck. Nele é apresentado o erro sutil que Millikan comete durante a descrição da equação, ao esquecer um sinal na equação do potencial de contato. Santos (2018) assume a importância do seu trabalho de suprir a formação de docentes para que tenham um compromisso com a formação histórica e formativa, já que ele aponta que esses fatos são desconsiderados pela literatura.

Tabela 1 - Lista de artigos analisados em cada periódico

REVISTAS	ARTIGOS
RBEF	Santos (2018) Sales et al. (2008)
CBEF	Eberhardt, Rocha Filho, Lahm e Barros Baitelli (2017) Assis e Silva (2012)
IENCI	Carvalho Neto et al. (2009)
EENCI	Lima, Santos, Oliveira, Vaz e Carvalho (2017)

Fonte: A autoria própria, 2019.

Na CBEF, foram encontrados dois artigos. O primeiro de Eberhardt, Rocha Filho, Lahm e Baitelli (2017) apresenta sinteticamente fatos históricos relacionados ao efeito fotoelétrico como uma maneira de auxiliar o ensino do tema EF e uma atividade experimental baseada em LED's de néon para verificação da corrente fotoelétrica. Os autores enfatizam que a abordagem de sua proposta não deve ser considerada como única, pois questões de historicidade podem tornar-se complexas e controversas e caracterizam seu trabalho como instrumental para professores.

No segundo artigo, Silva e Assis (2012) aplicam uma atividade experimental intitulada "Ouça seu controle remoto", como maneira de motivar o aluno a querer aprender e mediar o conteúdo em questão. Evidenciam os benefícios de se trabalhar com a Física Moderna no Ensino Médio pois apresentam potencial para fazer referências com tecnologias atuais ligadas ao cotidiano dos alunos.

Na revista IENCI, o artigo encontrado, se embasa na teoria de David Ausubel e busca enfatizar a diferença entre as probabilidades das previsões da mecânica quântica e as previsões estatísticas da mecânica clássica, por meio de eventos individuais iguais. Eventos como: efeito fotoelétrico, átomo de Bohr e a dualidade

onda-partícula, todos analisados inicialmente a partir da mecânica clássica. Carvalho Neto et al. (2009) concluem que confrontar os conhecimentos da mecânica clássica e da mecânica quântica foram eficazes, e proporcionaram uma aprendizagem significativa aos alunos, sendo mais eficaz ao utilizar a mecânica clássica meramente como analogia.

Por fim, na revista EENCI, Lima, Santos, Oliveira, Vaz e Carvalho (2017) apresentam um trabalho com enfoque para o ensino de química sobre o funcionamento das placas fotovoltaicas. A temática revela aspectos socioculturais, econômicos e ambientais que, associados aos experimentos, segundo os autores e referências utilizadas, é uma abordagem com um grande potencial por tratar da prática de vida dos alunos e possuir um caráter motivador e lúdico.

Com relação aos trabalhos acima, percebemos a maioria dos trabalhos, com exceção ao trabalho de Sales et al. (2008) e Carvalho Neto et al. (2009), não apresentam referencial teórico explícito que embasam a construção das aulas ou a descrição da história e filosofia da ciência, percepção reiterada por MOREIRA (2014) ao dizer que a maioria das pesquisas no ensino de ciências omitem referenciais teóricos, epistemológico e metodológicos. Como também, que apenas um dos trabalhos entre os quatro, apresenta uma proposta que busca trabalhar história e filosofia da ciência, ainda que muito rasa, em conjunto à experimentação.

Os trabalhos acima mostram que diversas metodologias podem ser utilizadas, que podem contribuir para o processo de ensino e aprendizagem, como uso de experimentos, simulações, história da ciência e jogos. Metodologias que podem servir para o planejamento futuro das aulas que serão propostas nesse trabalho.

Contudo, em consideração ao levantamento realizado, percebemos que são poucos os trabalhos que buscam criar estratégias para o ensino do efeito fotoelétrico, tão pouco, que envolvam a experimentação e contextualização histórica - de maneira a apresentar suas contradições e controvérsias - por meio de referenciais teóricos coerentes. Proposta da qual este trabalho se propõe a realizar.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para que este trabalho possa realmente contribuir para o âmbito das pesquisas em educação de ciências, consideramos que seu propósito é fazer com que o aluno interprete o mundo do ponto de vista científico identificando aspectos históricos, epistemológicos e culturais das ciências (MOREIRA, 2014).

Para tanto, apresentaremos os referenciais teórico-educacional, epistemológico e metodológico que se articulam coerentemente com o problema de pesquisa, ou seja, para nos posicionarmos com relação ao modo como a aprendizagem se estrutura e se condiciona, como também como se dá a construção do conhecimento científico e qual o aporte metodológico que conduzirá a sequência didática. Todos esses referenciais se conectam por fazerem parte de uma mesma vertente filosófica, o construtivismo.

3.1 APORTE EDUCACIONAL: O CONSTRUTIVISMO DE JEAN PIAGET

Jean Piaget desenvolveu pesquisas sobre o desenvolvimento do raciocínio lógico e infantil, para ele, “o ideal da educação não é aprender ao máximo, maximizar os resultados, mas é antes de tudo aprender a aprender; é aprender a se desenvolver e aprender a continuar a se desenvolver depois da escola” (PIAGET, 1974, p. 353). Nesse sentido, ensinar é mais que repassar conteúdos prontos, é possibilitar ao aluno desenvolver-se para além do ambiente escolar. Perspectiva que exige que entendamos teoricamente o processo de desenvolvimento cognitivo para que a partir dele possamos atuar na aprendizagem de nossos alunos.

Piaget (1997) compreende o processo de desenvolvimento cognitivo como a busca de um equilíbrio superior, esta busca auxilia na formação de novos conhecimentos. Ao indivíduo já são atribuídos esquemas que advêm de sua interação com o mundo, ou seja, conceitos existentes que utilizamos para interpretar e organizar as informações que recebemos. Portanto, ao nos depararmos com uma situação desequilibradora, que gera um conflito com sua percepção de mundo, o indivíduo busca entender a situação com o propósito de adaptar-se às novas situações, superando o desequilíbrio. Para o autor, o conhecimento não é uma cópia da realidade; conforme nossos interesses e possibilidades, interagimos com

peças e objetos, construindo nossos esquemas/conhecimentos. Nesse sentido, conhecer é, sobretudo, reconstruir.

Os desequilíbrios são considerados a fonte real para transformação dos esquemas, pois eles “obrigam um sujeito a ultrapassar o seu estado atual e procurar seja o que for em direções novas [...] Os desequilíbrios constituem o motor da investigação, porque sem eles, o conhecimento manter-se-ia estático” (PIAGET, 1977, p. 23 e 24). Pode ser entendido que na busca de soluções para um problema, surgem ideias inovadoras e criativas que formam um elemento de desequilíbrio na estrutura cognitiva do sujeito possibilitando novos processos mentais em busca do equilíbrio. Nesse processo de desenvolvimento cognitivo, as novas ideias preenchem ações antigas desenvolvendo, assim, esquemas mais complexos. Processo que possibilita novas agrupações das estruturas mentais, que se adaptam e se organizam ao meio caracterizado.

Processos inconscientes que envolvem assimilação e acomodação das novas informações que compõem seus esquemas. A assimilação está relacionado no modo de como os elementos do meio exterior são apresentados à estrutura, enquanto que a acomodação está relacionado diretamente com as mudanças que ocorrem na estrutura, a partir do momento em que há um “diferenciação e integração de esquemas de assimilação” (Ferracioli, 1999, p. 186). Ou seja, quando o pensamento se adapta a uma realidade, e em sua estrutura conseguem ser feitas diferenciações dessa realidade, acomodando-as aos novos elementos, caso lhe façam sentido. Para Piaget (1964 appud Ferracioli, 1999), o sujeito só irá apresentar respostas aos estímulos do meio, caso sua estrutura permita a assimilação.

Para tanto, “na relação entre sujeito e objeto de conhecimento, a assimilação representa a ação do sujeito sobre o objeto, enquanto que a acomodação exprime a ação do objeto sobre o sujeito” (MONTENEGRO e MAURICENAVILLE, 1998, p. 118) demonstrando que ao contrário da atividade teórica, com enunciados verbais onde a compreensão geralmente não é simples, as atividades experimentais possibilitam a relação mais direta entre sujeito e objeto, tornando as explicações mais eficientes, acessíveis e menos abstratas.

Portanto, utilizando os conceitos de Piaget, buscaremos causar um desequilíbrio cognitivo no aluno, ao confrontar características da Física Clássica e da Física Contemporânea, em busca do entendimento do fenômeno EF. Gerando, possivelmente, uma reestruturação em sua estrutura cognitiva.

3.2 APORTE EPISTEMOLÓGICO: OS OBSTÁCULOS EPISTEMOLÓGICOS DE GASTON BACHELARD

Para Bachelard (1996), o progresso da evolução científica está relacionado a dois tipos de evolução do conhecimento: um de *ruptura epistemológica*, caracterizado pelo rompimento de um saber antigo que reorganizado constituirá um novo saber. Ou, por um processo de *corte epistemológico*, o qual é caracterizado pela constituição de um novo conhecimento, desvinculado totalmente do antigo saber; inicia-se aí o começo da ciência, apresentando uma descontinuidade na produção do saber (Bachelard, 1996). Esse processo de corte ou de ruptura de um conhecimento não implica na destruição total dos conhecimentos anteriormente estabelecidos, mas em pô-los em uma nova ordem de racionalidade.

Antecedente ao progresso da evolução da ciência, a *problemática*, segundo Bachelard (1996), torna-se conceito chave da produção de determinado conhecimento, pois é a partir da *formulação* do problema, pelo pesquisador, que o pensamento científico começa. A resolução da problemática característica de *vigilância* é evidenciada, pois, ao pesquisador, cabe estar atento à aplicação do método e da prova com relação ao seu objeto de estudo de maneira a afastar-se de obstáculos, chamados por ele de *obstáculos epistemológicos*.

Bachelard (1996) apresenta os *obstáculos epistemológicos* como maneira de evidenciar que a evolução do espírito científico não é fruto de um processo uniforme. Os *obstáculos epistemológicos* podem ser tidos como dificuldades, as quais dificultam a formulação de abstrações corretas e o desenvolvimento de novas ideias. Nomeados, alguns deles, como: obstáculo verbal, experiência primeira, opinião, obstáculo substancialista, obstáculo animista, libido, entre outros. Nas palavras do autor, “aquilo que cremos saber com clareza ofusca o que deveríamos saber” (Bachelard, 1996, p. 18). Esses obstáculos assinalam a insuficiência dos primeiros esboços, dos adjetivos, da suposição de metáforas para descrever objetos.

Para superar esses obstáculos, Bachelard (2006, p. 169) afirma que “toda cultura científica deve começar, [...] por uma catarse intelectual e afectiva”, para substituir o *saber fechado* por um conhecimento “aberto e dinâmico”. Assim,

“acender à ciência, é rejuvenescer espiritualmente, é aceitar uma brusca mutação que contradiz o passado” (BACHELARD,1996,p.18).

O autor compara aos *obstáculos epistemológicos* os obstáculos de caráter pedagógico. Assim como aquele, este para ser superado deve conceber que o sujeito possui conhecimentos empíricos já constituídos que devem ser modificados em busca do entendimento do conhecimento científico. “Não se trata, portanto, de *adquirir* uma cultura experimental, mas sim de *mudar* a cultura experimental, de derrubar os obstáculos já sedimentados pela vida cotidiana” (Bachelard, 1996, p. 23).

No que diz respeito à Física Contemporânea, a qual utilizaremos para explicar o efeito fotoelétrico, Bachelard (2006, p.58 a 73) tece contribuições quanto à Filosofia da Ciência devido ao desenvolvimento do novo espírito científico. Características como de choque, reação e reflexão material ou luminosa têm de ser revistas, já que, neste espírito científico, o corpúsculo não é dotado de dimensões absolutas assinaláveis e nem de um lugar muito preciso, pois, “não se lhe confere mais do que uma *ordem de grandeza*. Esta ordem de grandeza determina mais ou menos uma zona de *influência* do que uma zona de *existência*. Ou, mais exactamente, o corpúsculo só existe nos limites do espaço que actua” (Bachelard, 2006, p. 60). Deste ponto de vista, é a noção de energia que representa as características fenomenais da matéria. Portanto, características que definam a matéria como uma *coisa* devem ser eliminadas, uma vez que evidenciam características de forma e posição ao corpúsculo.

3.3 APORTE METODOLÓGICO: O LABORATÓRIO DIDÁTICO DE PINHO ALVES

A Física sempre esteve muito próxima da atividade experimental, segundo Pinho Alves (2000, p. 44), “este pensamento tornou-se tão fortemente arraigado, que levou à introdução do laboratório nos cursos de Física [...]”.

No ensino tradicional brasileiro, a prática do laboratório didático nunca se estabeleceu na rotina do professor. Por volta da década de 50, algumas escolas já possuíam laboratórios e alguns materiais para práticas pedagógicas específicas, devido ao surgimento do movimento Escola Nova (GASPAR, 2005). Essas, eram

caracterizadas como rígidas, pois dispunham de um roteiro experimental pré-concebido e não visava proporcionar surpresas ou descobertas para os alunos.

No entanto, é importante ressaltar que, mesmo após o movimento, o laboratório didático não apresentou bons resultados no processo de ensino e aprendizagem. Isso porque, ainda hoje, ele é utilizado de maneira mecânica, transpondo uma visão epistemológica da ciência empirista. Segundo Pinho Alves (2000):

“Demonstramos através da Transposição Didática que, por longo período, a presença do laboratório didático no processo escolar foi justificada pela concepção empirista de ciência que permeava os textos utilizados para a transmissão do saber[...]” (PINHO ALVES, 2000, p. 287)

Uma vez que os livros textos, geralmente, são materiais de apoio à preparação da aula do professor, e estes, conforme citado acima, possuem concepções empiristas-indutivista, divulgam a imagem de que os experimentos fornecem as leis físicas, o processo de ensino-aprendizagem não poderia acontecer de maneira diferente. Nesta perspectiva, na proposição do autor, o laboratório didático vem sendo aplicado como maneira de fazer do aluno um “mini cientista”, ou seja, possibilitar ao aluno desenvolver capacidades manuais; treinar a manipulação de instrumentos; descrever resultado em forma de tabelas, gráficos. Assim, o laboratório didático se mostra apenas como coadjuvante do conteúdo ensinado, tendo como objeto de ensino o método científico, e não o conteúdo em questão (PINHO ALVES, 2000).

O objetivo da utilização do laboratório didático por meio de uma concepção construtivista é de introduzi-lo no processo de ensino “na condição de elemento mediador para ensinar conteúdos de Física e não mais como método experimental” (PINHO ALVES, 2000, p. 254). Os motivos para sua introdução são apontados por Tamir (1991 apud PINHO ALVES 1996) e Schawab (1960 apud PINHO ALVES, 2000), (1) a necessidade dos alunos em verem o concreto; (2) a participação do aluno em um processo de investigação real; (3) desenvolvimento de habilidades e estratégias; (4) oferecer oportunidades de identificação, diagnóstico e suprimento de suas concepções alternativas; e (5) fazer com que o aluno se torne mais motivado e interessado em ciências.

Pinho Alves (2000) salienta a necessidade de materiais que enfatizem diversas correntes e categorias didáticas com enfoque em concepções construtivistas. No entanto, enquanto esses materiais didáticos ainda não são disponibilizados, fica a cargo do professor a realização da transposição didática. Torna-se indispensável que a concepção sobre a produção de ciência e a concepção sobre o processo de ensino-aprendizagem assumam uma visão construtivista, para que não se estabeleça um conflito epistemológico¹.

Pinho Alves (2000) apresenta categorias de atividades experimentais com enfoque construtivista, ou seja, que esteja na sequência didática como objeto didático, e não mais como objeto a ensinar. As abordagens propostas pelo autor são atividade experimental: *histórica, de compartilhamento, modelizadora, conflitiva, crítica, de comprovação e de simulação*. Muitas vezes os usos dessas atividades acontecem simultaneamente, pois no decorrer da aplicação uma atividade pode ir se transformando na outra, permitindo assim, que uma categoria possa fazer parte de outra. Independentemente da categoria escolhida, elas são amplas e abrangentes, “e tem por finalidade orientar aqueles aspectos que um ensino construtivista pode/deve contemplar” (PINHO ALVES, 2002, p. 9). Portanto, os roteiros experimentais não pertencem mais a essa abordagem, essas atividades experimentais estão ligadas às dinâmicas de diálogos construtivistas, promovendo a máxima participação do estudante, independente da forma.

Cabe ressaltar que em nenhum momento o autor propõe uma prescrição detalhada de como deve ser atividade, ele apenas indica que a proposição dessas atividades devem ser *induzidas didaticamente*, como maneira de garantir a autonomia do professor na condução desse processo de ensino e aprendizagem, o que não restringe a autonomia dos estudantes. Desse modo, “fazendo uma analogia literária, ter-se-ia em todas as turmas o mesmo final da história, mas o enredo de cada uma será diferente” (PINHO ALVES, 2002, p. 9).

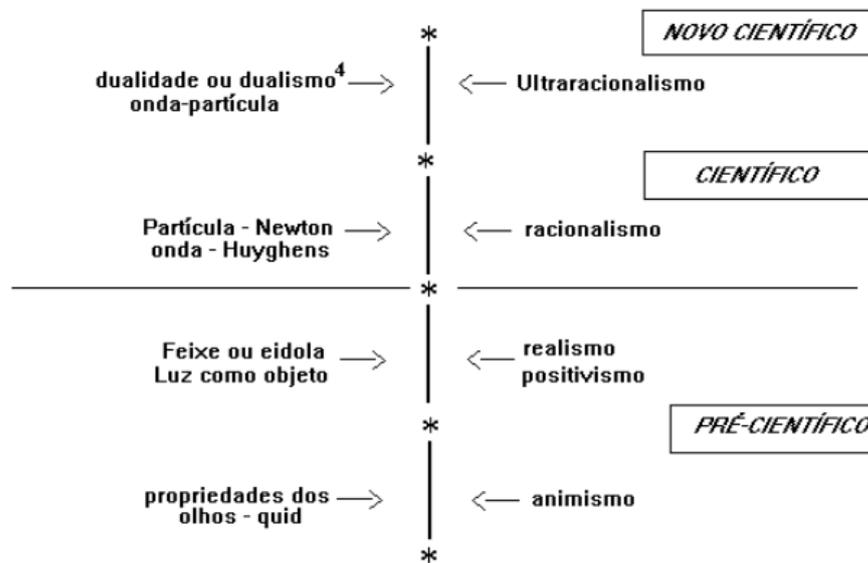
1 Neste trabalho não estamos nos comprometendo com a transposição didática proposta por Chevallard (1991).

3.4 COMENTÁRIOS A PARTIR DA EPISTEMOLOGIA DE GASTON BACHELARD

Bachelard (1996), em seu livro *A formação do espírito científico* (1996), descreve a trajetória do *espírito científico*, desde a percepção à abstração do conhecimento. Como justificativa de obter certa clareza, o autor apresenta etapas históricas do pensamento científico, as quais são divididas em três períodos, que estão relacionadas com o campo da Física. O primeiro período representa o *estado pré-científico*, compreendido entre a Antiguidade Clássica e os séculos do Renascimento (XVI até XVIII), quando se buscava a superação dos modelos construídos sob o pensamento mítico e teológico. O segundo período representa o *estado científico*, compreendido entre o final Século XVIII até início do Século XX. Neste, buscou-se a universalidade do método científico como estratégia de investigação valendo-se de procedimentos experimentais e levantamento de hipóteses. E o terceiro, conhecido como o *novo espírito científico*, compreendido após 1905, erige-se em meio a mudanças de conceitos primordiais devido, principalmente, ao conceito de Relatividade de Einstein.

A Figura 3, abaixo, desenvolvida por Pinto e Zanetic (1999) esquematiza os espíritos científicos classificados por Bachelard (1996) relacionado-os com diferentes visões filosóficas da ciência.

Figura 1 - Esquema de relação entre teorias da Física da Luz e Visões Filosóficas



Fonte: PINTO, A. C; ZANETIC, J. É possível levar a física quântica para o ensino médio? Caderno Catarinense de Ensino de Física, v. 16, n. 1: p. 7-34, abr. 1999.

No estado pré-científico, estão as visões filosóficas relacionadas às noções primitivas da luz como o *animismo*, teoria esta proposta pelos pitagóricos, que definem a luz como propriedade dos olhos, e o *realismo* baseado em fatos empíricos, que faz uso da noção de feixe de luz, dotando-o de propriedades corpusculares realísticas (Pinto; Zanetic, p. 13, 1999).

O *estado científico* caracterizar-se-ia por visões realistas que se utilizam de modelos matemáticos, como o modelo corpuscular de Newton e o ondulatório de Huygens (Pinto; Zanetic, p. 14, 1999). Por fim, no estado *novo científico*, visões ultra-racionalistas compreendem as teorias quânticas para a natureza da luz, desde a dualidade de Einstein, que delimita o recorte histórico definido por esse trabalho, à dualidade ondulatória de Schrödinger e causal de De Broglie (Ibidem).

4 METODOLOGIA

Tendo como objetivo oferecer aos professores de Ensino Médio (EM) uma proposta didática que possibilite aos alunos compreensões sobre problemas físicos e epistemológicos relacionados ao entendimento do Efeito Fotoelétrico (EF), a metodologia deste trabalho constitui-se de maneira a viabilizar a introdução deste tópico de Física Moderna (FM) por meio de uma abordagem experimental histórica de vertente educacional construtivista.

Portanto, torna-se fundamental que, durante o processo de aplicação desta sequência didática, o professor esteja consciente da validade da teoria construtivista no processo de ensino e aprendizagem. Ou seja, que possa garantir um diálogo entre professor/aluno em que fiquem claras as características cognitivas de cada personagem neste processo. Desse modo, segundo Pinho Alves (2002):

De um lado tem-se a figura do professor com sua bagagem cultural e científica, em condições de exercitar ao máximo suas estruturas e funções cognitivas. De outro lado, os estudantes, adolescentes que, sob a ótica piagetiana, estão na fase de desenvolvimento das operações formais, sendo que “A principal característica deste período é a capacidade de raciocinar com hipóteses verbais e não apenas com objetos concretos. É o pensamento proposicional, por meio do qual o adolescente, ao raciocinar, manipula proposições. O ponto de partida é a operação concreta, porém o adolescente transcende este estágio: formula os resultados das operações concretas sob a forma de proposições e continua a operar mentalmente com eles” (Moreira, 1999:98).(PINHO ALVES, 2002, p.5)

Demarcando essas diferenças cognitivas, a sequência didática propõe atividades que buscam um compartilhamento de proposições, de maneira coletiva. Elas permitem que o aluno formule questionamentos e soluções condizentes com seu período de desenvolvimento cognitivo. Como resultado, espera-se que o aluno consiga agregar às suas concepções pessoais, concepções formais e científicas de maneira a transformar suas estruturas mentais.

Com o intuito de minimizar características lineares e cumulativas da produção do conhecimento científico, a sequência didática proposta inicia por meio da interpretação da luz na visão da FC, para, em sequência, introduzirmos o conceito de EF. Assim, acreditamos, que por meio dos desdobramentos históricos presentes na sequência, referentes à cada modelo – apresentados na sessão anterior – seja possível que o aluno perceba a Física como uma criação humana, a qual está em busca da explicação da natureza, um processo de incertezas, alógico e não linear (GIL-PÉREZ, 2001).

A introdução do conceito de EF se dará por meio de um experimento qualitativo no qual o professor recriará o cenário histórico das explicações do conceito, induzindo os alunos a realizar questionamentos semelhantes aos dos cientistas da época. Essa abordagem é orientada pela categoria **atividade experimental histórica**, sugerida por Pinho Alves (2000), e é por meio dela que buscamos responder o problema dessa pesquisa.

O experimento é composto por um eletroscópio eletrizado para o qual será, primeiramente, apontada uma lâmpada de vapor de mercúrio, a radiação removerá parte da carga do eletroscópio, e em seguida posicionado uma lâmpada mais intensa, porém incandescente, não ocasionará nenhum efeito. De acordo com a teoria piagetiana, a qual propõe o desequilíbrio cognitivo como incentivador do processo de transformação das estruturas mentais, deparar-se com esse resultado colocará em cheque suas concepções alternativas, a de esperar que o efeito fosse maior ao posicionar a luz mais intensa. Nesse momento, o professor poderá induzir a conversa para questionamentos sobre a validade da teoria ondulatória para explicação deste fenômeno.

No entanto, para criar condições em que os alunos minimamente consigam refletir com relação às insatisfações da FC para explicação do fenômeno, tivemos que definir quais conceitos desse campo serviriam como suporte para os conceitos de FM envolvidos para explicação do EF. Optamos, neste trabalho, por chamá-los **conceitos de base**. Para definirmos os conceitos de base olhamos “de trás para frente” a nossa sequência didática, analisando quais os conceitos de FM serão abordados. Chegamos então aos três pontos que a FC não conseguia explicar – os enumerados na sessão 4.2 –, e a partir deles que conseguimos definir os conceitos de base, sendo eles: **intensidade de onda, frequência da onda, distribuição de energia de uma onda**.

Em uma concepção construtivista, na qual o conhecimento é construído pelo sujeito devemos, conforme Piaget (1974) e Bachelard (1996), entre outros autores, considerar que estes sujeitos já possuem modelos alternativos para explicações sobre o mundo físico que vivenciam. Estas ideias devem ser ponto de partida do professor para iniciar a transformação de suas estruturas mentais, pois, de acordo com Villani (1986) embasado nas concepções piagetianas, “[...] as ideias espontâneas constituem o campo de aperfeiçoamento natural das estruturas e das operações mentais”. Portanto, torna-se mais eficaz partir de um conhecimento prévio

do aluno a impor explicações científicas aos fenômenos físicos. Dentre as ideias espontâneas encontradas na literatura e que foram consideradas para o desenvolvimento da nossa sequência didática estão: modelo da óptica geométrica (Harres, 1993), o modelo ondulatório (Pacca e Utges 1999; Errobidart et al, 2013), a energia (Barbosa; Borges, 2005) e a características gerais da óptica (Andrade, J. M., 1995).

Os recursos didáticos utilizados para preparação da proposta didática foram: slides, experimentação, simuladores, vídeos e aula expositiva dialogada. Na próxima sessão será detalhada a sequência didática proposta, que foi organizada de acordo com a tabela 2, abaixo, onde cada aula, entendida como encontro, representa uma sequência de duas horas-aula.

Tabela 2 - Organização da sequência didática proposta

	Conteúdo	Recursos
Aula 1	História modelo corpuscular X modelo ondulatório para luz.	Slides + Experimentação
Aula 2	Características e definições do modelo corpuscular da luz + desequilíbrio.	Slide + experimentação + simulador + vídeos
Aula 3	História e Física do Efeito fotoelétrico: teoria da quantização de Einstein.	Experimentação + slides
Aula 4	Atividade avaliativa + dualidade onda-partícula.	Slides + vídeos

Fonte: Autoria própria, 2019.

Os planos de aula desenvolvidos para o planejamento da sequência didática foram construídos como proposto por Libâneo (1993), caracterizado por ser um instrumento sistematizador dos conhecimentos, atividades e procedimentos que guiarão a prática do professor em sala de aula. Para tanto, são apresentados: os dados da escola e turma; o tema da aula; os conceitos abordados; os objetivos da aula; o roteiro sequencial das atividades, a metodologia, os materiais necessários, um espaço para observações e as referências.

5 PLANEJAMENTO DA SEQUÊNCIA DIDÁTICA

5.1 AULA 1

Nesta primeira aula buscamos trabalhar conceitos de modelo científico e método científico, como também, apresentar um apanhado histórico dos conceitos sobre a definição da luz, desde a antiguidade até a concepção ondulatória. Segundo plano de aula 1, abaixo:

PLANO DE AULA 1	
DADOS DE IDENTIFICAÇÃO	
Escola:	
Professor:	
Data de aplicação:	
Duração da atividade (períodos): 2h/aula	
Ano:	
Componente curricular: Física	
TEMA	
Natureza da Luz: O que é a luz?	
SABERES/CONTEÚDOS	
Modelos e método científico, Contexto histórico a partir das concepções gregas até o fim do século XIX, interpretação da luz como corpúsculo e como onda.	
OBJETIVOS	
a) Entender as teorias científicas como modelos de construção arbitrária e provisória; b) Conhecer a história da natureza da luz, e sua interpretação como partícula e como onda. c) Perceber as limitações da teoria corpuscular que levaram ao sucesso da teoria ondulatória.	
ROTEIRO	
a) Cumprimentos à turma e aplicação da Atividade de modelização; b) Problematização: O que é a luz? Do que ela é feita? Como podemos enxergar um objeto? c) Aula expositiva dialogada com auxílio de slides sobre contexto histórico; d) Continuação da aula expositiva dialogada sobre modelo corpuscular; e) Experimento de reflexão e refração; f) Continuação no slide sobre modelo ondulatório; g) Experimento de interferência;	

h) Continuação no slide sobre espectro eletromagnético; j) Pedir para os aluno baixarem o aplicativo de gerador de frequência.
METODOLOGIA (Procedimentos)
(a) Iniciar a aula fazendo os cumprimentos à turma, e aplicar a atividade de modelização. Após a discussão coletiva da atividade como proposto no apêndice B, (b) começar a desenvolver o assunto por meio de uma pergunta: O que é a luz? Em seguida introduzir outras: Do que ela é feita? Como podemos enxergar um objeto? Após serem realizadas as perguntas e discutidas de maneira a deixar a dúvida no aluno, ou seja, sem concordar ou discordar. (c) Iniciar a explanação do contexto histórico de interpretações do que é a luz, por meio do auxílio dos slides. Introduzindo primeiramente as concepções de luz dos gregos, passando pela definição corpuscular de Isaac Newton até a concepção ondulatória de Christiaan Huygens. (d) Trabalhar pontualmente a definição corpuscular da luz. (e) Realizar o experimento de reflexão (apêndice C), mostrando que o ângulo de incidência, em uma superfície regular, é o mesmo que o ângulo de refletido; em seguida mostrar o desvio causado quando a luz passa por um meio refrator (apêndice D), e ainda sobre refração mostrar um lápis dentro de um copo, mostrando que aparenta estar quebrado. Após os experimentos, (f) falar pontualmente sobre o modelo ondulatório, e mostrar que na história ele pode explicar fenômenos não explicados pelo modelo corpuscular. (g) Realizar o experimento de interferência (apêndice E), por meio de uma fenda dupla Young. (h) Trabalhar na apresentação o espectro eletromagnético, pontuando sobre a luz visível ser uma pequena parte do espectro, sua classificação com relação ao comprimento de onda e frequência (não aprofundar muito nessa parte, pois será assunto da próxima aula). Por fim, (j) o professo deve pedir para que os alunos baixem o aplicativo <i>Frequency Sound Generator</i> , disponível gratuitamente para celulares <i>Android</i> .
RECURSOS
Slide, caixa preta, folhas de ofício, Prisma, laser, espelho, base com ângulos, fenda dupla, copo com água, fonte para dispersão da luz.
AVALIAÇÃO
Todos os comentários realizados por eles no decorrer da aula.
OBSERVAÇÕES
<ul style="list-style-type: none"> • Encher o copo com água antes de iniciar a aula; • Caso o professor não disponha dos materiais para realizar a dispersão da luz branca, pode-se demonstrar por meio de um vídeo.
REFERÊNCIAS
Marque, G. C. e Ueta, N. Ótica. Nível: básico. Disponível em < http://efisica.if.usp.br/optica/basico/ > Acesso em: 16 out. 1018.
Andrade, J. M. Concepções alternativas em óptica. Disponível em:

<<http://repositorio.unicamp.br/jspui/handle/REPOSIP/252398>> Acesso em: 16 out 2019.

A primeira atividade proposta da caixa-preta (apêndice B) caracterizamos dentro da categoria de **atividade experimental modelizadora**, pois é a partir do processo de modelização da caixa-preta, que o aluno poderá compreender e se apropriar mais profundamente sobre questões epistemológicas. A partir dela, pretende-se mostrar aos alunos que as teorias científicas não são um retrato fiel da realidade (PINHO ALVES, 2002), ou seja, o comportamento da natureza é independente do modelo criado para entendê-la. Essa atividade também é parte da estratégia de fazer com que o aluno sintam-se mais à vontade para participar ativamente no processo de ensino e aprendizagem nas aulas que se sucederem.

As atividades de experimentação realizada para os fenômenos de reflexão (apêndice C), refração (apêndice D), interferência (apêndice E) caracterizamos dentro da categoria da **atividade experimental de comprovação**, visto que, seu objetivo é a comprovação das leis que regem esses fenômenos físicos. Este tipo de atividade não traz muita novidade à tradição escolar, no entanto, em uma abordagem construtivista, na qual “[...] já tenha ocorrido o processo de ensino aprendizagem com o compartilhamento de variáveis, construção de modelos, estabelecimento de leis, conceitos etc. se faz importante um espaço para confirmação das previsões teóricas” (PINHO ALVES, 2002, p. 16).

Torna-se importante que o professor consiga entrar em contato com os alunos, por meio de redes sociais ou na própria escola, lembrando-os de baixarem o simulador *Frequency Sound Generator*, aplicativo disponível para *download* gratuito em aparelhos com sistema *Android*.

5.2 AULA 2

Para iniciar aula fazemos uma retomada do que havia sido trabalhado ao fim da aula anterior definindo, que final do século XIX, a aceitação e o entendimento pela comunidade científica da interpretação da luz a partir do modelo ondulatório, colocando fim à teoria corpuscular de Newton.

O desenvolvimento da aula se dará segundo plano de aula 2, abaixo:

PLANO DE AULA 2	
DADOS DE IDENTIFICAÇÃO	
Escola:	
Professor:	
Data de aplicação:	
Duração da atividade (períodos): 2h/aula	
Ano:	
Componente curricular: Física	
TEMA	
A luz é uma onda!	
SABERES/CONTEÚDOS	
Movimentos ondulatórios, características de uma onda: comprimento de onda, amplitude, frequência, velocidade, energia e intensidade.	
OBJETIVOS	
<p>a) Identificar movimentos ondulatórios;</p> <p>b) Interpretar o espectro eletromagnético, relacionando os comprimentos de ondas com a frequência.</p> <p>c) Entender a propagação de energia em um onda luminosa;</p> <p>d) Relacionar a amplitude da onda com a intensidade.</p>	
ROTEIRO	
<p>a) Cumprimentos à turma e lembrar a aula anterior;</p> <p>b) O que caracteriza um movimento ondulatório;</p> <p>c) Atividade com mola;</p> <p>d) Voltar a apresentação de slides, formalizando características do movimento ondulatório;</p> <p>e) Explicação das características do movimento ondulatório usando simulação computacional;</p> <p>f) Atividade experimental de compartilhamento de um aplicativo (gerador de frequência) em grupo, para discussão envolvendo energia, intensidade e frequência.</p> <p>g) Entrega da atividade.</p>	
METODOLOGIA (Procedimentos)	
<p>(a) Iniciar a aula fazendo os cumprimentos à turma, e começar com a recapitulação do que foi visto na aula anterior. Por meio de auxílio de slides (b) apresentar tipos de movimentos ondulatórios e definir o que caracteriza um movimento como ondulatório. Em seguida, por meio (c) da demonstração de ondas longitudinais e transversais, com o auxílio de uma mola, o professor poderá demonstrar uma onda sonora realizando o movimento de compressão e</p>	

<p>descompressão da mola longitudinalmente, e uma onda luminosa com movimentos de vai e vem na direção transversal à propagação do pulso. Nesse momento poderá mostrar as características de comprimento de onda, amplitude, crista, vales, pulso e trem de ondas. (d) Formalizar os conceitos voltando aos slides e pedindo que registrem no caderno; ainda nos slides, dar sequência apresentando os conceitos de frequência e velocidade, caso necessário retomar o experimento da mola. Ao fim da primeira aula, definidas e discutidas essas características, com o uso da simulação computacional (d), evidenciará as relações entre as variáveis frequência e amplitude e as características do movimento ondulatório representado. Ainda utilizando da simulação, poderá discutir sobre como esses parâmetros relacionam-se com o transporte de energia por uma onda. Após, questionar os alunos (e) sobre quem baixou o aplicativo <i>Frequency Sound Generator</i> no celular, e dividi-los em grupos, para contabilizar apenas um celular por grupo. Com isso, introduzir a atividade experimental de compartilhamento (apêndice G), para poderem relacionar características de frequência e amplitude com a energia e intensidade da onda, finalizando-a com (g) a entrega das questões propostas respondidas.</p>
RECURSOS
Slide, mola, folha com perguntas.
AVALIAÇÃO
Todos os comentários realizados por eles no decorrer da aula, entrega dos trabalhos
OBSERVAÇÕES
<ul style="list-style-type: none"> • Enfatizar aos alunos que durante a atividade com o aplicativo, será permitido apenas um celular por grupo.
REFERÊNCIAS
<p>ERROBIDART, N.C.G. et al. Modelos mentais e representações utilizadas por estudantes do ensino médio para explicar ondas. <i>Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias</i> v. 12,n. 3, 440-457, 2013.</p> <p>ONDA E CORDA. In: Phet Interactive Simulations. University of Colorado Boulder. Disponível em https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/wave-on-a-string. Acesso em: 30/09/2020</p> <p>FREQUENCY SOUND GENERATOR. In: Play Store. Disponível em: https://play.google.com/store/apps/details?id=com.luxdelux.frequencygenerator&hl=en_US. Acesso em: 30/09/2020</p>

A demonstração do simulador computacional por meio do professor, se enquadra dentro da categoria de **atividade experimental de simulação**, por ser uma simulação realizada via computador, na qual estão ausentes montagens e experimentos concretos. De acordo com Pinho Alves (2002), a simulação para movimentos ondulatórios são situações ricas para se fazer do uso de simulações, pois as variáveis envolvidas neste modelo podem ser imediatamente percebidas.

Já a atividade realizada por meio do aplicativo, apesar de não apresentar materiais concretos, não se encaixa na categoria citada acima por, por ser um gerador real de frequência, e não um simulador. Portanto a enquadramos como **atividade experimental de compartilhamento**, por caracterizar as relações de causa e efeito devido a modificação das variáveis.

5.3 AULA 3

Na primeira aula será feita a recapitulação das duas aulas anteriores, juntamente com a correção coletiva do trabalho da aula anterior, ou seja, o professor comentará sobre as questões e as respostas dos alunos, legitimando as respostas corretas e esclarecendo as com erros conceituais. O professor pode dar exemplos de respostas e discutir junto com a turma a sua explicação com base na teoria Física.

Na segunda aula o professor realizará o experimento do EF (apêndice H) embasado na categoria, proposta por Pinho Alves (2000), **atividade experimental histórica**. A escolha dessa categoria é devido ao potencial apresentado por esse experimento para a reconstituição do cenário histórico de identificação do efeito. Em primeira instância, o professor terá que ter postura mais neutra quanto a formalização dos conceitos, pois esse é o momento no qual o aluno refletirá criticamente sobre o experimento, caso o professor perceba que não há interação poderá introduzir perguntas conforme proposto no apêndice H. Para, posteriormente às discussões, realizar as formalizações dos conceitos e apresentar o modelo quântico desenvolvido por Einstein para explicação desse fenômeno.

A aula está estruturada de acordo com o plano de aula 3, abaixo:

PLANO DE AULA 3
DADOS DE IDENTIFICAÇÃO
Escola:
Professor:
Data de aplicação:
Duração da atividade (períodos): 2h/aula
Ano:
Componente curricular: Física

TEMA
Efeito fotoelétrico: a luz é uma onda?
SABERES/CONTEÚDOS
Características ondulatórias: energia frequência, intensidade.
OBJETIVOS
a) Identificar as limitações do modelo ondulatório para explicação do efeito fotoelétrico;
ROTEIRO
<p>a) Cumprimentos à turma, iniciar com a recapitulação do que foi trabalhado nas aulas anteriores;</p> <p>b) Correção coletiva do trabalho em grupo de simulação;</p> <p>c) Explicação do funcionamento do eletroscópio;</p> <p>d) Atividade experimental histórica por meio da demonstração qualitativa do efeito fotoelétrico;</p> <p>e) Apresentar o contexto histórico, desde a visualização do fenômeno a explicação de Einstein;</p> <p>f) Apresentar as objeções das quais a teoria clássica não conseguia explicar;</p> <p>g) Adiantar Einstein conseguiu criar um modelo que explicava perfeitamente esse fenômeno.</p>
METODOLOGIA (Procedimentos)
<p>(a) Iniciar a aula fazendo os cumprimentos à turma, e começar com a recapitulação do que foi visto na aula anterior. (b) Realizar a correção coletiva dos trabalhos em grupos da atividade experimental de simulação. Neste momento o professor pedirá para que os alunos reúnam-se no grupo da aula anterior e realize a entrega dos trabalhos. Comentado sobre cada questão do trabalho, retificando as questões que foram respondidas corretamente e dando exemplos de algumas questões com erros conceituais juntamente com sua justificativa. Após a realização da correção, indicar aos alunos a realização da atividade experimental, mas antes de inicia-la propriamente (c) realizar uma breve explicação do funcionamento do eletroscópio e mostrar as lâmpadas. Em seguida (d) realizar a atividade experimental histórica demonstrando o experimento qualitativo do efeito fotoelétrico (apêndice H), e por meio diálogo construtivista ir realizando as questões descritas no roteiro, estimulando a participação do aluno. Após as discussões e possíveis explicações dos alunos para o fenômeno, (e) apresentar o contexto histórico mostrando que os cientistas fizeram perguntas semelhantes, pois perceberam que o modelo clássico não satisfazia as observações experimentais. (f) Apresentar, por meio das características ondulatórias o porquê a teoria clássica não era satisfatória para explicação desse fenômeno. Neste momento o professor deve trabalhar cada uma das três objeções, se preciso voltar ao experimento, passo a passo, construindo juntamente com os alunos as inadequações</p>

da teoria clássica para explicação de cada objeção. Para finalizar a aula o professor realizará um breve resumo sobre as três objeções, pedindo que os alunos anotem em seus cadernos. (g) Em seguida já indicará que um modelo proposto por Einstein em 1905, conseguiu satisfazer essas objeções, mas que demorou 15 anos para ser aceito pois teriam que abandonar uma teoria de grande sucesso, a óptica ondulatória.
RECURSOS
Lâmpada de vapor de mercúrio, eletroscópio, canudo e papel toalha.
AValiação
Todos os comentários realizados por eles no decorrer da aula
OBSERVAÇÕES
•
REFERÊNCIAS
FÍSICA NA PRÁTICA. Efeito Fotoelétrico. 13min.34s.18 de set. de 2019. Disponível em < https://www.youtube.com/watch?v=C_d0Uh4cdu9w&t=4s > Acessado dia 26 de set. de 2019.

Cabe ressaltar, que o momento da aplicação da atividade experimental histórica será o mais difícil e que demandará mais esforços para o professor, pois ele terá que induzir os alunos a realizar questionamentos que os próprios cientistas realizaram. Portanto é preciso ter paciência, pois o mais importante é que o aluno consiga acompanhar o desenvolvimento de cada objeção, para que, quando realizada a formalização do efeito fotoelétrico, por meio da teoria do *lightquanta*, tenha sentido o modelo de Einstein para a resolução destas objeções.

5.4 AULA 4

A última aula da sequência busca iniciar a formalização dos conceitos do EF por meio da teoria quântica de Einstein. Com base nisso, a aula será iniciada com a recapitulação histórica trabalhadas nas aulas anteriores, até o modelo de Einstein. Para posteriormente, realizar o experimento histórico (apêndice H) novamente relembando as objeções não satisfeitas pela teoria clássica, possibilitando a introdução da teoria quântica, para suas resoluções.

PLANO DE AULA 4
DADOS DE IDENTIFICAÇÃO

Escola: Professor: Data de aplicação: Duração da atividade (períodos): 2h/aula Ano: Componente curricular: Física
TEMA
Efeito fotoelétrico: a explicação de Einstein.
SABERES/CONTEÚDOS
Fóton, energia quantizada, energia cinética, trabalho necessário para remover o elétron, dualidade onda-partícula.
OBJETIVOS
a) Identificar as limitações do modelo ondulatório para explicação do efeito fotoelétrico; b) Compreender o que é um fóton; c) Entender a teoria de Einstein para explicação do efeito fotoelétrico;
ROTEIRO
a) Cumprimentos à turma, iniciar com a recapitulação do que foi trabalhado nas aulas anteriores; b) Realizar o experimento do EF novamente para relembrar as objeções; c) Trabalhar o contexto histórico da explicação de Einstein; d) Trabalhar a teoria de Einstein para explicação do EF; e) Atividade de compartilhamento do EF; f) Conclusão.
METODOLOGIA (Procedimentos)
(a) Iniciar a aula fazendo os cumprimentos à turma, e começar com a recapitulação do que foi visto na aula anterior. Iniciando pela recapitulação histórica, desde os modelos utilizados pelos gregos às interpretações de Newton e Huygens. (b) Realizar novamente o experimento do EF para relembrar as objeções das quais o modelo clássico não satisfazia. (c) Apresentar o contexto histórico das explicações de Einstein, e em seguida (d) apresentar a teoria de Einstein, que satisfazia as objeções, formalizando conceitos como: o que é um fóton? Como está distribuída sua energia? (e) Para que abstraíam a teoria de Einstein aplicar a atividade do Jogo de Bolinhas (apêndice I), lembrando de diferenciar o fóton da analogia da bolinha, evitando interpretações erradas sobre o modelo de fóton. Após a atividade, conforme sugerido no apêndice I, realizar um momento de conversa pedindo para que os alunos relacionem a atividade de compartilhamento do EF, com a teoria de Einstein. Construir juntamente ao aluno essa interpretação. f) Apresentar aos alunos que apesar da resistência à teoria de Einstein, ela foi

aceita pela comunidade científica, e que ela é apenas um modelo de interpretação da luz, um modelo não totalmente completo pois há dificuldades quanto a interpretação dos processos de interferência.
RECURSOS
Slide, lâmpada de vapor de mercúrio, eletroscópio, canudo, papel toalha, garrafas, bolinhas menos e mais massivas.
AVALIAÇÃO
Todos os comentários realizados por eles no decorrer da aula
OBSERVAÇÕES
•
REFERÊNCIAS
FÍSICA NA PRÁTICA. Efeito Fotoelétrico. 13min.34s.18 de set. de 2019. Disponível em < https://www.youtube.com/watch?v=Cd0Uh4cdu9w&t=4s > Acessado dia: 26 de set. de 2019.

A **atividade experimental de compartilhamento** do EF (apêndice I), foi enquadrada nessa categoria por apresentar características de causa e efeito assim como na atividade do aplicativo de gerador de frequências (apêndice G). A partir dela, buscamos que o aluno abstraia o conceito teórico do EF de modo a facilitar seu entendimento com relação entre as variáveis físicas envolvidas e o acontecimento do efeito.

Após a realização do experimento o professor deve ressaltar as características do fóton, para evidenciar as limitações da utilização de representações de bolinhas como fótons.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresentou a proposta de uma sequência didática desenvolvida a partir de referenciais teóricos construtivistas, considerando os aportes educacional, epistemológico e metodológico. Cujo objetivo era de responder ao seguinte **problema de pesquisa**: *Como seria possível ensinar o efeito fotoelétrico por meio da experimentação sem incorrer em uma epistemologia positivista?*

A partir do entendimento sobre o modo como a aprendizagem se estrutura e se condiciona, com base na teoria de Piaget (1997) em relação aos desequilíbrios cognitivos, e do modo como se dá a construção do conhecimento científico, propositado por Bachelard (1996) quanto aos obstáculos epistemológicos, foi possível mobilizar algumas categorias de atividades experimentais propostas por Pinho Alves (2000), afastando-se de uma epistemologia positivista.

O tema escolhido, o EF, mostrou potencial para a possibilidade de reconstituir um cenário histórico por meio da categoria da **atividade experimental histórica**. Ao propor aos alunos, quando de sua implementação, realizar questionamentos que possivelmente a comunidade científica realizou na época, os permitem ter contato com os obstáculos epistemológicos que deveriam ser superados. Como por exemplo, o de abandonar uma teoria que estava consolidada, o de propor uma nova explicação totalmente desvinculada da antiga e o de superar as armadilhas da observação. Como também, permite que eles utilizem e questionem seus esquemas mentais na elaboração de uma possível explicação, uma vez que a atividade promove um desequilíbrio cognitivo a partir do confronto com suas ideias prévias.

A introdução da HFC por meio de um experimento pode valorizar o contexto histórico, quando aplicado a partir de uma concepção construtivista e sem a utilização de anedotas, pois dá ao professor a possibilidade de expor questões semelhantes às científicas e apresentar o desenrolar histórico de maneira mais intrincada do que poderia conceber um positivista.

A opção pela mobilização do uso da **atividade experimental de modelização** situa-se no primeiro encontro, estrategicamente posicionada, para que desde o início da aplicação da sequência didática se estabeleça o tipo de visão de ciência, a qual o aluno deve conceber durante as aulas; além de promover a criticidade em sua análise quando apresentado a uma teoria científica. Outro motivo

para mobilizar essa atividade é o de fazer com que o aluno sintá-se parte do processo de ensino-aprendizagem e tenha a liberdade de expor seus conhecimentos prévios nas aulas que se seguirem.

Quanto as **atividade experimentais de comprovação**, realizadas para validar as teorias físicas, ainda que não apresentaram grande novidade no contexto escolar (PINHO, 2000), elas são propostas de maneira a promover um diálogo construtivista junto à turma e não utilizam de roteiros experimentais engessados.

Apesar de na maioria das atividades experimentais propostas o aluno não aparece como o executor, ou seja, o professor é quem as manipula, não significa que ele será um sujeito passivo no processo de ensino-aprendizagem. Ao assumir a concepção construtivista pelo professor, este conduzirá a aula, em todos os momentos de modo a promover a participação ativa do estudante. No entanto, são nas **atividades experimentais de compartilhamento**, e a de **modelização**, que ele posiciona-se como executor da tarefa, tendo maior propensão a expor seus pensamentos e reflexões, o que se almeja para uma abordagem construtivista.

Cabe ressaltar que, por mais que tenhamos mobilizado e enquadrado essas atividades nessas categorias, todas apresentam potencial para se enquadrar nas categorias de atividade experimental de compartilhamento e de conflito. Pois, dependerá diretamente do diálogo que o professor irá estabelecer durante a aplicação das atividades aqui propostas.

Dentre as dificuldades que encontramos para o desenvolvimento desse trabalho, selecionamos as que identificamos como sendo mais importantes. Como a falta de materiais em língua portuguesa que apresentem o contexto histórico do EF de maneira a debruçar-se sobre as nuances históricas; assim como, as limitações dos textos básicos de física, por omitirem acontecimentos históricos dentro desse contexto, fato que pode ser reiterado pela pesquisa de LIMA (2017). Ainda nesse sentido, muitas são as sutilezas filosóficas que podem passar despercebidas pelo professor, como também, que puderam ter sido despercebidas por nós investigadores desse estudo.

Outra dificuldade, pode ser relacionada ao uso de analogias para abstrações da teoria quântica, pois acabamos caindo em analogias mecânicas e clássicas, as quais apresentam suas limitações filosóficas com relação a interpretação do fóton. Fato este, que se apresenta como um problema em aberto para pesquisas na área do ensino de física. Sendo assim, como perspectivas futuras, ficam a aplicação

desta sequência didática, pois, somente assim poderemos contornar essas limitações e a disponibilização da sequência didática na rede mundial de computadores.

Com relação a sequência didática proposta para o ensino do efeito fotoelétrico, conseguimos propor uma maneira de inserção do experimento como mediador do processo de ensino e aprendizagem, que aliado ao desequilíbrio gerado pelos obstáculos epistemológicos do momento histórico, podem minimizar características lineares, cumulativas e dogmáticas acerca do desenvolvimento do conhecimento científico. Como também, motivar o aluno à reflexões sobre a epistemologia da ciência, concebendo uma visão de que as teorias para serem aceitas passam por um processo lento de adequação.

Por fim, acreditamos que o embasamento teórico mostrou-se coerente com os objetivos propostos como também coerente entre si, por se conectarem fazendo parte de uma mesma vertente filosófica, o construtivismo. Além disso, evidenciamos sua contribuição para pesquisas na área do ensino, nas quais, Moreira (2014) aponta para ausência de trabalhos que articulem esses valores, como também para a contribuição da inserção da FM no contexto do EM.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA

- ANDRADE, J. M. **Concepções alternativas em óptica**. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Educação, Campinas, SP. 1995. Disponível em: <<http://www.repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/252398>>. Acesso em: 20 jul. 2018.
- ASTOLFI, J-P e DEVELAY, M. **A Didática das Ciências**. Campinas: Papyrus, 1995.
- BACHELARD, G. **A epistemologia de Gaston Bachelard**. Lisboa: Edições 70, 2006.
- BACHELARD, G. **A Filosofia do Não**. Lisboa: Presença, 1991.
- BACHELARD, G. **A formação do espírito científico**: contribuição para psicanálise do conhecimento. Rio de Janeiro: Contraponto, 1996.
- BARBOSA, J. P. V.; BORGES, A. T. O entendimento dos estudantes sobre energia no início do ensino médio. **Caderno Brasileiro Ensino de Física**. v. 23, n. 2: p. 182-217, ago. 2006.
- BRASIL. Ministério da Educação. Parâmetros Curriculares Nacionais – Ensino Médio – Ciências da Natureza. Brasília: Ministério da Educação, 1997.
- BROCKINGTON, G. e PIETROCOLA, M. Serão as regras da transposição didática aplicáveis aos conceitos de física moderna? *Investigação em Ensino de Ciências*. v. 10(3), pp. 387-404, 2005.
- CAVALCANTE, M. A. O Ensino de uma nova física e o exercício da cidadania. **Revista Brasileira de Ensino de Física**. vol. 21, n. 4, dez.1999. Disponível em: <http://sbfisica.org.br/rbef/pdf/v21_550.pdf>. Acesso dia: 08 jun. 2019.
- CHEVALLARD, Y. **La Transposición Didáctica**: del saber sabio al saber enseñado. La Pensée Sauvage, Argentina, 1991.
- EBERHARDT, J.; FILHO, R.D.; LAHN, R. A. e BAITELLI, P. B. Experimentação no ensino de Física Moderna: efeito fotoelétrico com lâmpada néon e LEDs. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**. v.34, n. 3, 2017.
- ERROBIDART, N.C.G. et al. Modelos mentais e representações utilizadas por estudantes do ensino médio para explicar ondas. **Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias**. v. 12,n. 3, 440-457, 2013.
- GASPAR, A. **Experiências de Ciências para o Ensino Fundamental**. 1° ed.São Paulo: Editora Ática, 2005.
- GIL-PÉREZ, D. et al. Para uma imagem não deformada do trabalho científico. **Ciência & Educação**, Bauru – SP, v. 7, n. 2, p. 125-153, 2001.

GRAF. **Física 2: Física Térmica/Óptica**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo. 5ed, 2º imp, 2005.

HARRES, J. B. S. Um teste para detectar concepções alternativas sobre tópicos introdutórios de ótica geométrica. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**. Lagedo – RS. v.10,n.3: p.220-234, dez.1993.

KRAGH, H. A Sense of History: History of Science and the Teaching of Introductory Quantum Theory. **Science & Education**. v. 1, p. 349-363, 1992.

LIBÂNEO, J. C. **Organização e gestão escolar: teoria e prática**. Goiânia: Alternativa, 1993

LIMA, E. F. S et al. Células solares: uma abordagem experimental no ensino de estrutura atômica e ligações químicas. **Experiências em Ensino de Ciências**. v. 12, n.1, 2017.

LIMA, N. W.; et al. A história do fóton em livros de física. In: X Congresso Internacional sobre Investigación en Didáctica de las Ciencias. Sevilla. n. extraordinário, p. 1953-1957. 5-8 de set. de 2017.

MONTANGERO, Jacques; MAURICE-NAVILLE, Danielle. **Piaget ou a inteligência em evolução**. Porto Alegre: ArtMed, 1998.

NIAZ, M; et al. Reconstruction of the History of the Photoelectric Effect and its Implications for General Physics Textbooks. **Science Studies and Science Education**. p. 904 – 931, 2010.

OSSAK, Ana Lúcia; BELLINI, Marta. O livro didático em ciências: condutor docente ou recurso pedagógico? **Ensino, Saúde e Ambiente**, Niterói, v.2 n.3 p. 2-22. dez. 2009.

OSTERMANN, F. MOREIRA, M. A. Uma revisão bibliográfica sobre a área de pesquisa “física moderna e contemporânea no ensino médio. **Investigações em Ensino de Ciências**. v. 5(1), p. 23-48, 2000.

PACCA, J. L. A.; UTGES, G. Modelos de onda no senso comum: as analogias como ferramenta de pensamento. In: Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciências, II, 1999, Valinhos – SP. Disponível em: <http://abrapecnet.org.br/atas_enpec/iienpec/Dados/trabalhos/A26.pdf>. Acesso em: 19 set. 2019.

PAGLIARINI, C. R. **Uma análise da história e filosofia da ciência presente em livros didáticos de física para o ensino médio**. 2007. Dissertação (Mestrado em Ciências – Física Básica) – Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo.

PIAGET, Jean. **Desenvolvimento e aprendizagem**. Porto Alegre: UFRGS/FACED/DEBAS, 1995.

PIAGET, Jean. **O desenvolvimento do pensamento: equilíbrio das estruturas cognitivas.** Lisboa: Dom Quixote, 1977.

PIAGET, Jean. **Problemas de psicologia genética.** Trad. de Célia E. A. Di Piero. São Paulo: Abril Cultural, 1974. v. LI. (Coleção Os Pensadores).

PINHO ALVES, J. **Atividade experimental: uma alternativa na concepção construtivista.** VIII Encontro de Pesquisa em Ensino de Física, 2002.

PINHO ALVES, J. Regras da transposição didática aplicadas ao laboratório didático. **Caderno Catarinense Ensino de Física.** v.17, n. 2, p.174-188. 2004.

PINHO ALVES, J.. **Atividades experimentais: do método à prática construtivista.** 2000. Tese (Doutorado em Educação) - Programa de Pós-Graduação em Educação, Universidade Federal de Santa Catarina.

PINTO, A. C; ZANETIC, J. É possível levar a física quântica para o ensino médio? **Caderno Catarinense de Ensino de Física.** v. 16, n. 1: p. 7-34, abr. 1999.

SANTOS, C. A. Millikan e a questão do potencial de contato no experimento do efeito fotoelétrico. **Revista Brasileira de Ensino de Física.** v. 40, n. 3, 2018.

SILVA, L. F. e ASSIS, A. Física Moderna no Ensino Médio: um experimento para abordar o efeito fotoelétrico. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física.** v.29, n. 2, 2012.

SILVA, L. H. A., ZANON, L. B. A experimentação no ensino de ciências. In: SCHNETZLER, R. P. e ARAGÃO, R. M. R. (orgs.). **Ensino de Ciências: fundamentos e abordagens.** Piracicaba: CAPES/UNIMEP, 2000.

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

TERRAZZAN, Eduardo Adolfo; MENEZES, Luiz Carlos de. **Perspectivas para a inserção da física moderna na escola média.** 1994.Universidade de São Paulo, São Paulo, 1994.

VILLANI, A. **Ideias espontâneas e ensino de física.** Instituto de Física, Universidade de São Paulo, out. de 1986. Acessado dia: 109 de set de 2019. Disponível em < <http://web.if.usp.br/bib/sites/web.if.usp.br.bib/files/PDFs/pd607.pdf>>

Wheaton, B. R. Philipp Lenard and the photoelectric effect, 1889 - 1911. **Historical Studies in the Physical Sciences,** v.9, p.199 – 322, 1978.

APÊNDICE A



PRZYMOCENNA
SANTA CATARINA

O QUE É A LUZ?

Malu de Araujo Huff
8º fase de Licenciatura em Física

O QUE É LUZ?



Desde a antiguidade, discussões com relação a natureza da luz já causavam controvérsias entre filósofos gregos. Postulou-se então, que os raios luminosos se propagavam em linhas retas, tornando a óptica uma divisão da geometria.



Isaac Newton
(1643 – 1727)





Christiaan Huygens
(1629 – 1695)

No século XII, duas correntes de pensamento científico estabeleceram-se, para definição do que era luz, a teoria corpuscular da luz, defendida por Isaac Newton e a teoria ondulatória da luz, defendida por Christian Huygens; o modelo ondulatório da luz, que era defendido por Christian Huygens. Segundo Isaac, a luz era formada por partículas; já Huygens defendia a hipótese de que a luz era uma onda..

Modelo corpuscular da luz

Newton considerava a luz como partículas que se propagavam no éter. Assemelhava sua teoria com o comportamento de pequenas esferas, que ao colidirem com uma superfície lisa são refletidas de modo que o ângulo de incidência seja igual ao ângulo de reflexão.

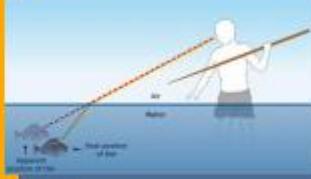
Experiências realizadas por Francesco Maria Grimaldi mostraram falhas nas previsões da óptica geométrica, utilizada pelo modelo corpuscular. O sucesso de Newton na física garantiu a aceitação de sua teoria corpuscular durante todo o século XVIII e o começo do século XIX.



Francesco Maria Grimaldi
(1618 a 1663)



Isaac Newton
(1643 – 1727)



Atividade Experimental 1 e 2
Reflexão e refração




Modelo ondulatório

O modelo de Huygens poderia explicar, além dos fenômenos de reflexão e refração, os fenômenos de **interferência** e **difração** observados por Grimaldi.

Foi em 1803 que Thomas Young retoma os experimentos de Grimaldi e faz um paralelo entre a interferência de ondas sonoras com as ondas de luz.

Definitivamente em 1850, Léon Foucault realiza a medida da velocidade da luz, confirmando que, em água, a velocidade da luz diminuiu, assim como o previsto pelo modelo ondulatório.



Léon Foucault (1819 – 1868)



Thomas Young (1773 – 1829)



Christiaan Huygens (1629 – 1695)



Fenômenos de difração e interferência

Atividade Experimental 3 Fenda Dupla

DIFRAÇÃO



Ondas planas de água que sofrem difração ao passar por uma fenda.

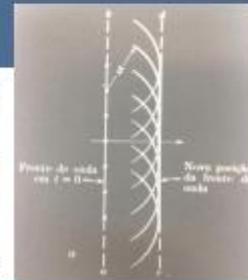


Ondas sonoras que sofrem difração ao contornar a esquina.

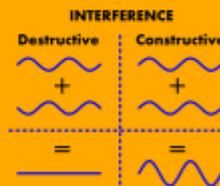
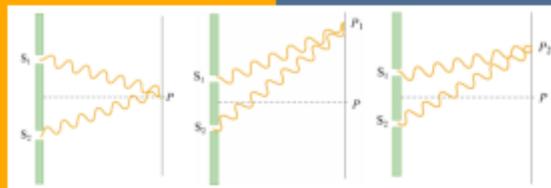
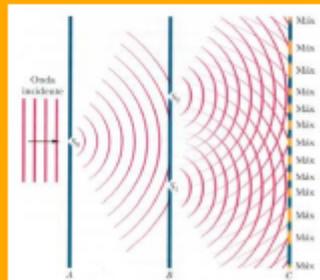


Ondas luminosas que sofrem difração ao passar por uma fenda.

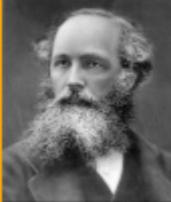
"Todos os pontos de uma frente de onda devem ser considerados como fontes puntiformes para produção de ondas esféricas secundárias."
Christiaan Huygens



INTERFERÊNCIA



AFINAL, O QUE É A LUZ?

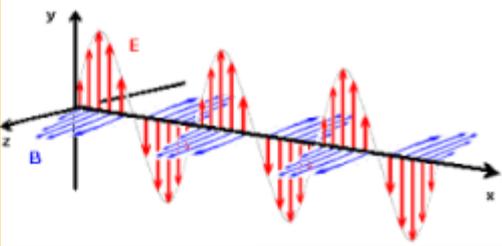


James Clerk Maxwell
(1831 – 1879)



Heinrich Hertz
(1857 – 1894)

No fim do século XIX, em 1864, Maxwell (1831 a 1879) identifica a luz como uma onda eletromagnética, demonstrando que campos elétricos e magnéticos podiam se propagar como uma onda, que viajaria à velocidade da luz.

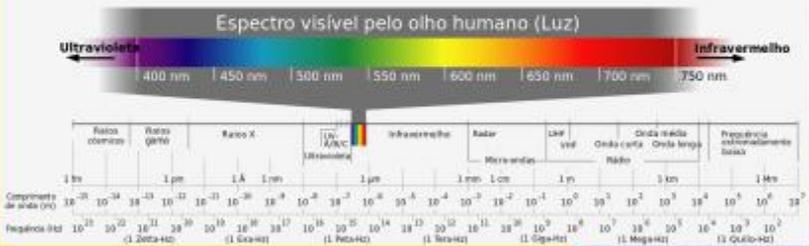


Velocidade da luz no vácuo:

$$v_{\text{luz}} = c = 299\,792\,458 \text{ m/s}$$

A LUZ É UMA ONDA

As ondas eletromagnéticas não necessitam de um meio para se propagar. Elas podem se propagar no vácuo, como no espaço.



Raio cósmico		Raio gama		Raio X		UV-A/UV-B/UV-C		Infravermelho		Radar		Luz visível		Onda curta Rádio		Onda média Onda longa Rádio		Propriedade eletromagnética básica	
1 km	1 μm	1 Å	1 nm	1 μm	1 mm	1 cm	1 m	1 km	1 m	1 m	1 m	1 m	1 km	1 km	1 km	1 km	1 km	1 km	
Comprimento de onda (m)	10^{-25} 10^{-24} 10^{-23} 10^{-22} 10^{-21} 10^{-20} 10^{-19} 10^{-18} 10^{-17} 10^{-16} 10^{-15} 10^{-14} 10^{-13} 10^{-12} 10^{-11} 10^{-10} 10^{-9} 10^{-8} 10^{-7} 10^{-6} 10^{-5} 10^{-4} 10^{-3} 10^{-2} 10^{-1} 10^0 10^1 10^2 10^3 10^4 10^5 10^6 10^7 10^8 10^9 10^{10} 10^{11} 10^{12} 10^{13} 10^{14} 10^{15} 10^{16} 10^{17} 10^{18} 10^{19} 10^{20} 10^{21} 10^{22} 10^{23} 10^{24} 10^{25}	Freqüência (Hz)	10^{25} 10^{24} 10^{23} 10^{22} 10^{21} 10^{20} 10^{19} 10^{18} 10^{17} 10^{16} 10^{15} 10^{14} 10^{13} 10^{12} 10^{11} 10^{10} 10^9 10^8 10^7 10^6 10^5 10^4 10^3 10^2 10^1 10^0 10^{-1} 10^{-2} 10^{-3} 10^{-4} 10^{-5} 10^{-6} 10^{-7} 10^{-8} 10^{-9} 10^{-10} 10^{-11} 10^{-12} 10^{-13} 10^{-14} 10^{-15} 10^{-16} 10^{-17} 10^{-18} 10^{-19} 10^{-20} 10^{-21} 10^{-22} 10^{-23} 10^{-24} 10^{-25}																

Atividade Experimental 4
Dispersão da luz branca

O QUE É A LUZ?
Onda eletromagnética com comprimentos de onda capazes de sensibilizar o olho humano.

APÊNDICE B

ATIVIDADE DE MODELIZAÇÃO CAIXA PRETA

DESCRIÇÃO

A atividade de modelização da caixa preta consiste no desenvolvimento, pelo professor, de uma pequena caixa de papelão, na qual dois palitos de churrascos são posicionados paralelamente em seu interior, sendo apenas visível parte deles para fora caixa, uma parte na extremidade direita e outra na esquerda. Os dois palitos serão conectados um ao outro por meio de outro palito, posicionado na diagonal, utilizando elásticos, conforme demonstrado na figura abaixo. O professor apresentará a caixa preta pronta no contexto de sala de aula, a qual deve estar completamente forrada para que o aluno não tenha acesso ao mecanismo de funcionamento.

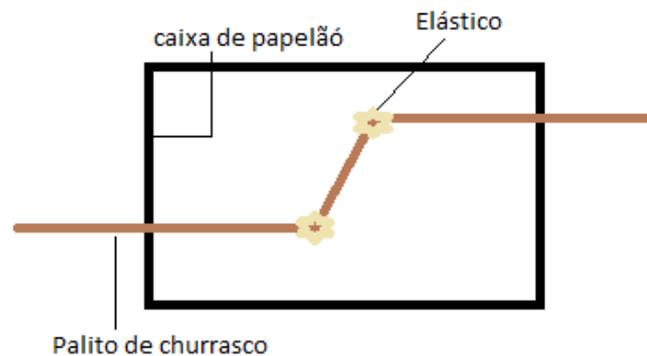


Figura 1: Caixa-Preta com seu mecanismo a mostra.

A dinâmica da atividade consiste em, primeiramente, o professor demonstrar o funcionamento da caixa, mostrando que ao empurrar um dos palitos para o interior da caixa, o outro palito, conseqüentemente, também seria empurrado para dentro. Em seguida, o professor disponibiliza a caixa para que os alunos possam reproduzir o que lhes foi demonstrado. Após todos os alunos manusearem a caixa, o professor pede aos alunos para que façam um desenho esquemático de como seria o mecanismo que possibilita o movimento sincronizado dos palitos.

Ao terminarem os desenhos, o professor pede para que alguns dos alunos, ou a quem se dispôr, apresentem seus modelos de mecanismos que desenvolveram para explicação do funcionamento da caixa. Logo após as apresentações, o professor discutirá a questão de que mais de um modelo apresentado, possa satisfazer ao que foi observado, e que cabe a eles definir em qual dos modelos irão escolher para explicação do mecanismo. Neste momento, é esperado que os alunos peçam para que o professor abra a caixa preta

para saberem qual é o real mecanismo, no entanto o professor não abrirá a caixa, pois ele afirmará que é assim que se comporta a natureza. Completará dizendo que não podemos ter a real certeza de como a natureza se comporta, pois somos nós que a descrevemos, de acordo com os nossos conhecimentos e por meio das teorias físicas.

Discussão sobre modelo científico.

Os modelos científicos, de acordo com Sayão (2001) são representações inteligíveis e simplificadas, as quais permitem descrever características essenciais de acordo com cada campo estudo. Portanto, eles são explicados de acordo com a percepção de mundo de quem os teoriza, podendo assumir ou não, a veracidade de acordo com a realidade que é modelada.

Ao propor essa atividade em sala de aula podemos fazer o aluno perceber que cada colega realiza uma análise diferente da caixa, e que constrói seu mecanismo de acordo com os esquemas que já estão estabelecidos em suas estruturas cognitivas, pois haverá várias possibilidades para explicá-lo. Nesse contexto, o professor poderá desenvolver a ideia, de que apesar de estarem exercitando a observação, há teorias que antecedem esse desenvolvimento. Nesse sentido, de acordo com Moreira (1993) o método científico não possui uma receita, pois cada cientista irá delinear o caminho de sua pesquisa, indo e voltando, refletindo, realizando testes, errando e adaptando em busca de uma teoria que o satisfaça.

Observações

- Para facilitar a construção dos desenhos por parte dos alunos o professor pode dividi-los em grupos.
- Caso o professor pretenda despende mais tempo para realização da atividade, pode propor aos alunos que desenvolvam suas próprias caixa pretas.

Referências

MOREIRA, M. A. Sobre o ensino do método científico. Caderno Catarinense de Ensino de Física. V. 10, n. 2, p. 108 – 117, ago. 1993.

SAYÃO, L. F. Os modelos teóricos em ciência da informação. Ciência da Informação. Brasília. v.30, n. 1, p. 82-91, jan/abril de 2001.

APÊNDICE C

REFLEXÃO EM ESPELHO PLANO

DESCRIÇÃO

O experimento de reflexão em um espelho plano consiste na demonstração, dos ângulos de incidência e reflexão. Ao posicionar o espelho sobre um base com marcações angulares, e direcionar o laser ao espelho, com um ângulo de incidência qualquer, pode-se perceber que o ângulo de reflexão é o mesmo ao de incidência.

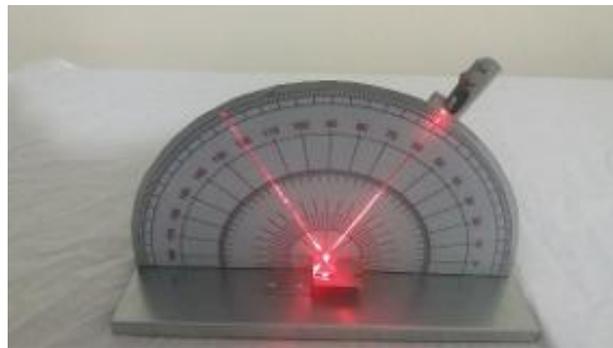


Figura 1: Experimento de reflexão em espelho plano.

PRINCÍPIOS FÍSICOS

A luz do laser é direcionada ao espelho plano. Ao ser refletida formará um ângulo, com relação à normal, igual ao ângulo de incidência. Esse modelo é conhecido como a Lei de Reflexão, a qual diz que: (a) o raio incidente, o raio refletido e a normal estão em mesmo plano; (b) o ângulo refletido é igual ao ângulo de incidência. (Figura 2).



Figura 2: Formação de imagem em um espelho plano.

Observações

- Caso o professor não possua a base com os ângulos, ele pode desenhar uma em um papelão com o auxílio de um transferidor.
- Para melhor visualização do experimento, posicione-o rente ao quadro. De frente para a turma.

APÊNDICE D

REFRAÇÃO EM PRISMA

DESCRIÇÃO

O experimento de refração em um prisma consiste na demonstração dos ângulos de incidência e refração. Ao posicionar o prisma sobre um base com marcações angulares, e direcionar o laser ao prisma com um ângulo de incidência qualquer, pode-se perceber que o raio refratado sofre um desvio com relação à normal.

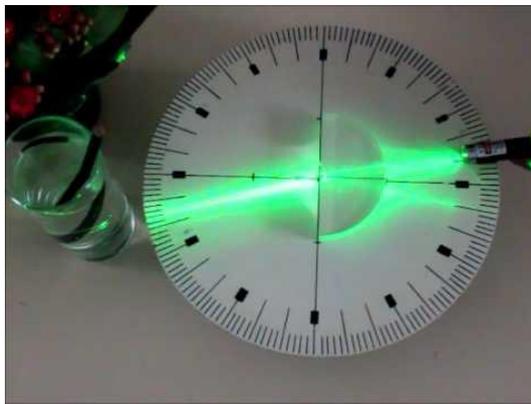


Figura 1: Experimento de refração em prisma, do lado esquerdo da imagem, lápis dentro de um copo com água.

PRINCÍPIOS FÍSICOS

Ao ser incidida a luz do laser no prisma, o feixe de luz sofre um desvio. Esse desvio é causado pela mudança de velocidade de propagação, como consequência da mudança do meio de propagação da luz (Figura 2).

Esse modelo é descrito por meio das Leis Refração da Luz de Snell-Descartes, a qual diz que: (a) o raio incidente, o raio refratado e a normal estão em mesmo plano; (b) para cada par de meios e para cada luz monocromática que se refrata é constante o produto do seno do ângulo que o raio forma com a normal e o índice de refração do meio em que o raio se encontra.

A segunda lei é descrita pela equação abaixo:

$$n_1 \cdot \sin\theta_1 = n_2 \cdot \sin\theta_2$$

Onde, n = índice de refração.

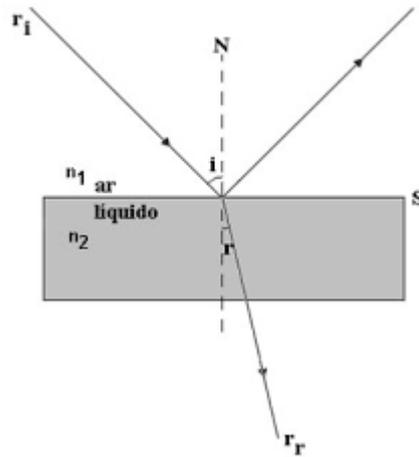


Figura 2: Desvio do feixe de luz devido a mudança de meio.

Observações

- Caso o professor não possua a base com os ângulos, ele pode desenhar uma em um papelão com o auxílio de um transferidor.
- Pode-se adicionar um experimento, para que os alunos percebam o efeito visualmente, que consiste em um copo com água e um lápis dentro. Visto frontalmente, o lápis irá aparentar estar quebrado.

APÊNDICE E

FENDA DUPLA DE YOUNG

DESCRIÇÃO

O experimento da fenda dupla de Young consiste em direcionar um *laser* à uma fenda dupla para projetar na parede um padrão de interferência, esse padrão se forma devido a interferência construtiva (pontos mais claros) e destrutiva (pontos escuros). Como representado na figura 1, abaixo.

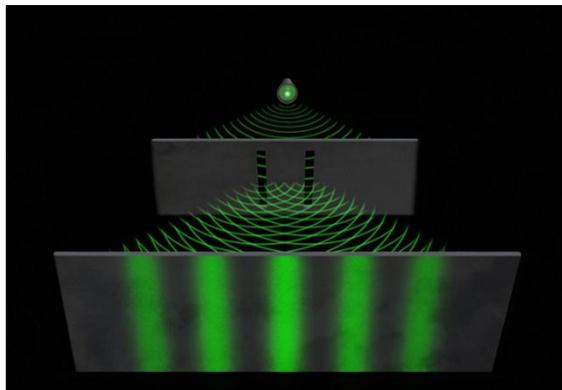


Figura 1: Demonstração esquemática de um laser incidindo em uma fenda dupla e gerando um padrão de interferência.

PRINCÍPIOS FÍSICOS

Ao incidirmos o laser na fenda dupla, a onda contornará as duas fendas (anteparo B representado na figura 2) devido sua capacidade contornar obstáculos com ordem de grandeza próximas aos do comprimento de onda da luz de incidência, esse fenômeno é nomeado como **difração** e sua explicação pode ser determinada pelo Princípio do Huygens. Esse princípio diz, resumidamente, que cada ponto do meio atingido por uma frente de onda num dado instante, comporta-se como uma fonte de ondas secundárias com as mesmas características da onda que se propaga. Portanto ao contornar as fendas, duas novas frentes de ondas secundárias serão emitidas circularmente.

As novas fontes de ondas secundárias, ao continuarem se propagando irão se sobrepor, essa superposição de ondas é denominada **interferência**, representada pela figura 2, entre o anteparo B e C. Ao se sobrepor as ondas podem sofrer interferência construtiva, caso as ondas se encontrem em mesmas fase (crista com crista, ou vale com vale), ou interferência destrutiva (vale com crista), caso as ondas se encontrem em fases diferentes.

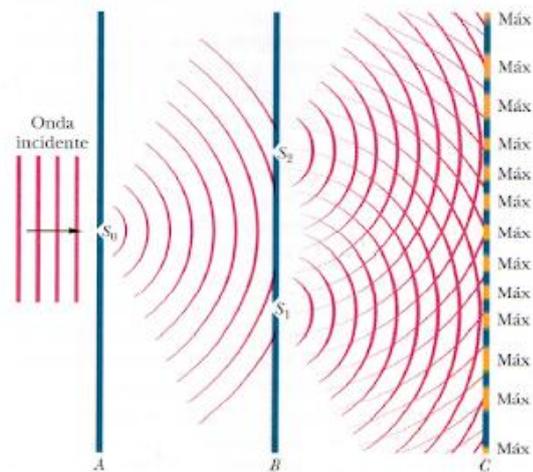


Figura 2: Sobreposição de frentes de onda, representado entre o anteparo B e C.

Observações

- Caso o professor não possua uma fenda dupla, ele pode mostrar o padrão de interferência por meio da incidência do laser em um fio de cabelo.

APÊNDICE F



A LUZ É UMA ONDA

No fim do século XIX, em 1864, Maxwell (1831 a 1879) identifica a luz como uma onda eletromagnética, demonstrando que campos elétricos e magnéticos podiam se propagar como uma onda que viajaria à velocidade da luz.

James Clerk Maxwell
(1831 – 1879)

Heinrich Hertz
(1857 – 1894)

Velocidade da luz no vácuo:
 $v_{\text{luz}} = c = 299\,792\,458\text{ m/s}$

A LUZ É UMA ONDA

As ondas eletromagnéticas não necessitam de um meio para se propagar. Elas podem se propagar no vácuo, como no espaço.

tipo de radiação	rádio	micro-ondas	infravermelho	visível	ultravioleta	raios X	raios gama
comprimento de onda	10^3 m	10^{-2} m	10^{-6} m	$0.5 \times 10^{-9}\text{ m}$	10^{-8} m	10^{-10} m	10^{-14} m
Escala aproximada do comprimento de onda	edifícios	humanos	borboletas	ponta da agulha	protozoários	moléculas	átomos
Frequência (Hz)	10^4	10^8	10^{12}	10^{15}	10^{16}	10^{18}	10^{23}

O movimento ondulatório é uma forma de transferência de energia, assim como uma onda de rádio aciona um rádio.

Características de uma onda: Comprimento de onda

A onda é caracterizada por seu comprimento de onda (λ), referente à distância entre duas cristas da onda, e pela frequência de suas oscilações.

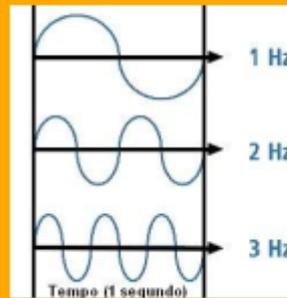


Atividade Experimental 1
mola

Figura corda

Características de uma onda: frequência

A frequência de uma onda é a quantidade de oscilações em um período de tempo.



No Sistema Internacional de Medidas (SI), a unidade do período é o segundo, e a unidade da frequência é o ciclo por segundo, denominado hertz (Hz).

$$f = \frac{1}{T}$$

f = frequência
 T = período

Características de uma onda : Velocidade

Em um mesmo meio de propagação as ondas de maior comprimento terão menor frequência, já ondas de menor comprimento terão maior frequência.

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t}$$



$$v = \frac{\lambda}{T}$$



$$v = \lambda \cdot f$$

$$* f = \frac{1}{T}$$

No Sistema Internacional de Medidas (SI), a unidade do comprimento de onda é o metro, e a unidade do tempo é o segundo, para tanto a unidade da velocidade é metro por segundo (m/s)

Atividade Experimental 1
continuação: mola

Características de uma onda : Energia e Intensidade

A energia da onda está distribuída igualmente ao longo de sua propagação e é proporcional a sua amplitude ao quadrado.

Paralelo com ondas sonoras

O EFEITO FOTOELÉTRICO

Em 1886 e 1887, Heinrich Hertz realizou experimentos que confirmaram a relação da luz com as ondas eletromagnéticas descritas por Maxwell.

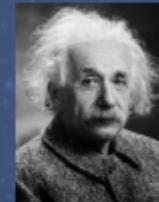
Objeto de estudo da física quântica, explicada por Einstein



Atividade Experimental 2
Efeito Fotoelétrico

EXPLICAÇÃO DE EINSTEIN

Albert Einstein (1905) colocou em questão a teoria clássica da luz, a qual conseguiu interpretar os resultados experimentais de Lenard, propondo uma nova teoria, na qual a luz se comporta como fluxo de energia quantizada, denominado *h*quanta, ou quanta de luz, e que mais tarde foram chamados de fótons.



Albert Einstein
(1879 – 1955)

A teoria de Einstein não foi levada a sério pela comunidade científica devido aos físicos conservadores, incluindo Einstein, terem percebido que havia um alto preço a pagar pela aceitação da teoria deixando de lado uma das teorias mais aceitas da física, a teoria ondulatória.

APÊNDICE G

ATIVIDADE EXPERIMENTAL DE COMPARTILHAMENTO

DESCRIÇÃO

A atividade experimental de compartilhamento será realizada por meio do celular dos alunos, que em uma aula anterior farão o download do aplicativo *Frequency Sound Generator* (figura 1) em suas casas. Por isso é sugerido que esta atividade seja realizada em grupo, para que pelo menos um integrante do grupo tenha baixado o aplicativo.

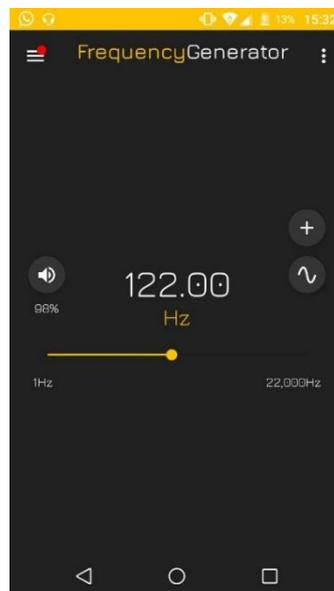


Figura 1: Tela do aplicativo Frequency Sound Generator

Na figura 2, são mostrados os botões que serão utilizados nessa prática. A figura 2a apresenta o botão para realização de configurações gerais, a figura 2b, a opção para definição da forma da onda (para esta atividade usaremos o formato de onda senoidal), a figura 2c, o botão para regulação da intensidade do som, e por fim, a figura 2d, a barra de modificação de frequência.



Figura 2: Botões de controle de configurações. (a) habilitar funções; (b) mudança de formato da onda sonora; (c) mudança de intensidade da onda sonora; (d) mudança de frequência da onda sonora.

Antes de iniciar a atividade o aluno deverá clicar no botão para realizar as configurações gerais (figura 2a). Ao clicar, abrirá uma segunda tela, apresentada na figura 3a, na qual ele deverá selecionar a opção *settings*. Em seguida, abrirá uma terceira tela, apresentada na figura 3b, na qual devem ser habilitadas todas as funções (*run in the background, show wave animation, low latency, decimal precision*).

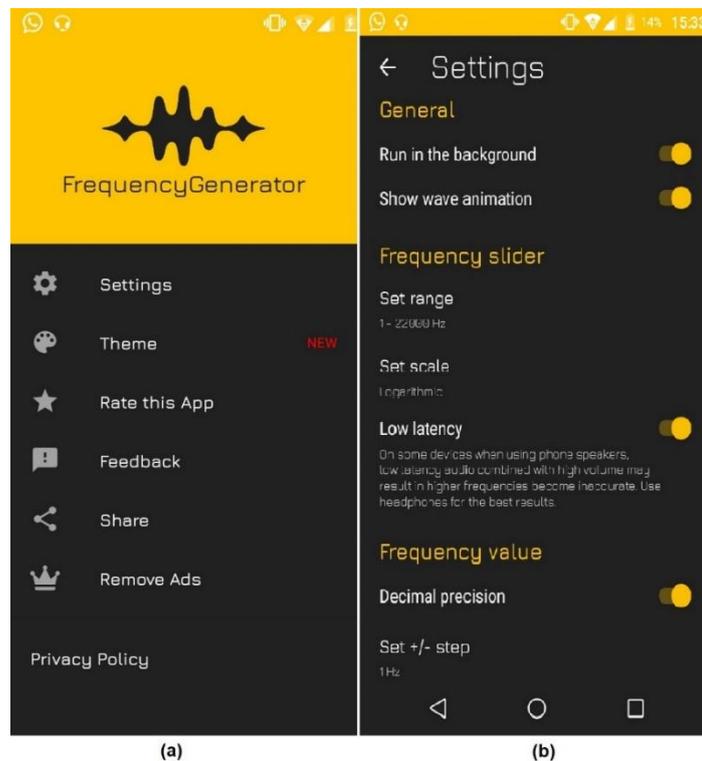


Figura 3: Botões para habilitar funções. (a) opções, selecionar settings; (b) habilitar todas as opções.

Habilitadas as funções necessárias, os alunos interagirão com o aplicativo. Baseados na manipulação do aplicativo e na formalização dos conceitos previamente trabalhados, os alunos deverão responder (e entregar suas repostas) as seguintes questões:

- a) É possível modificar a intensidade da onda sonora sem alterar sua frequência? Se sim, o que você percebe ao realizá-lo? Pode relacionar isso à alguma variável do movimento ondulatório vista anteriormente?
- b) É possível modificar a frequência da onda sonora sem alterar sua intensidade? Se sim, o que você percebe ao realizá-lo? Pode relacionar isso à alguma variável do

movimento ondulatório vista anteriormente?

- c) Considerando que a sensibilidade do som (pela audição) está ligada à transferência de energia, possível estabelecer alguma relação entre os parâmetros alterados no aplicativo com a energia da onda sonora?
- d) É possível fazer alguma relação entre as ondas sonoras e as ondas luminosas?

PRINCÍPIOS FÍSICOS

A onda que representa o movimento ondulatório do som, é caracterizada como uma onda mecânica, a qual necessita de um meio para que possa propagar-se. Sua direção de propagação é no sentido longitudinal, pois produz deformações no sentido de sua propagação. Essas propagações estão relacionadas com as áreas de alta e baixa pressão geradas pela energia transferida através da moléculas presentes no ar. O ouvido humano é capaz de distinguir sons de 20Hz a 20kHz, acima ou abaixo dessas frequências ele não é sensibilizado, e para os de maiores frequência podem causar um incomodo. A audição dos cachorros é sensível a frequências de som de 15Hz a 50kHz possuindo uma capacidade auditiva maior.

Já a onda luminosa, é caracterizada como uma onda eletromagnética, a qual não necessita de um meio para propagar-se. Seu pulso é propagado transversalmente produzindo movimentos perpendiculares ao seu sentido de propagação. E assim como para o ouvido, o olho humano também possui limitações quanto a percepção de radiações eletromagnéticas. A parte visível do espectro compreende as frequências na ordem de $7,5 \cdot 10^{14}$ Hz a $4,0 \cdot 10^{14}$ Hz.

Todo movimento ondulatório ocorre devido a transferência de energia a partir de pulsos gerados pela fonte emissora. O número de pulsos realizados em um certo intervalo de tempo é denominado a frequência da onda. Portanto quanto maior for o número de pulsos, maior a frequência da fonte e conseqüentemente, maior a energia transferência.

Observações

- Para que o aluno consiga ouvir bem as frequências geradas no aplicativo pode ser sugerido a utilização do fone de ouvido.

Referências

REF. **Física 2**: Física Térmica/Óptica. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo. 5ed, 2º imp, 2005.

APÊNDICE H

EXPERIMENTO DO EFEITO FOTOELÉTRICO

DESCRIÇÃO

Esse experimento é inspirado no vídeo disponibilizado no *YouTube*, no canal Física na Prática. Os materiais necessários para sua realização são, um eletroscópio, um canudo e um papel toalha (para eletrização do eletroscópio), uma lâmpada de laboratório de vapor de mercúrio e uma lâmpada incandescente de alta intensidade.

Anteriormente a demonstração do efeito fotoelétrico, precisaremos eletrizar o eletroscópio. Primeiramente, carregaremos o canudo negativamente por meio da eletrização por atrito com o papel toalha. Em seguida, por meio da eletrização de contato do canudo com o eletroscópio, este será carregado negativamente e como consequência as perninhas do eletroscópio se afastarão por estarem com cargas elétricas iguais. Esse processo de eletrização poderá ser explicado resumidamente para os alunos.

Após eletrizado o eletroscópio, incidiremos nele a lâmpada de vapor de mercúrio, o que acarretará no fechamento das suas perninhas internas ocasionado pela perda de elétrons no metal devido a incidência de luz Ultra Violeta (figura 1). Eletrizaremos novamente o eletroscópio, e perguntaremos aos alunos o que acontecerá se incidirmos a outra lâmpada, que possui um tamanho maior e mais é mais intensa. Intuitivamente os alunos responderão que o efeito será intensificado. No entanto ao inci-la nada acontecerá com o eletroscópio.

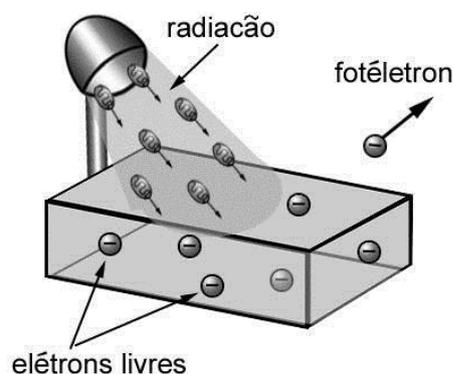


Figura 1: Elétrons sendo liberados sob incidência de fonte ultra violeta.

Algumas perguntas devem ser realizadas para os alunos com o intuito de fazerem refletir a cerca desse fenômeno. Qual o motivo da luz mais intensa não ter ocorrido o efeito? De acordo com a teoria ondulatória, por possuir uma intensidade maior a sua energia

também não seria maior portanto o efeito não teria que ser intensificado? Talvez seja porque eu não deixei a luz incidindo em tempo suficiente pro efeito ocorrer, já que a energia está distribuída em toda a onda luminosa? Mas por que o efeito acontece tão rápido com a primeira lâmpada? Nesse momento o professor deverá escutar as proposições dos alunos, e evitar dar respostas, apenas produzir novas perguntas incentivando a criação de preposições.

Depois desse momento de reflexão, dizer que historicamente questões parecidas com essas foram de grande discussão dentro da comunidade científica, e que muitos pesquisadores criaram explicações utilizando a teoria ondulatória, realizando algumas suposições e modificações. Que um cientista, utilizando o modelo ondulatório, conhecido como Phillip Lenard ganhou o Prêmio Nobel, em 1902, por essa explicação.

No entanto, Einstein, em 1905, apresentou outra teoria para explicação do Efeito Fotoelétrico, que inicialmente não foi bem aceita, pois teriam que abandonar a teoria ondulatória. Durante 6 anos após o desenvolvimento da teoria quântica por Einstein toda comunidade científica ainda acreditava que Lenard estava correto, e que a teoria quântica não teria sucesso.

Em 1926, Millikan, decidiu colocar em prova a teoria de Einstein, e com o objetivo de corroborar sua teoria realizou um experimento, gerando resultados que favoreceram a teoria de Einstein. E em 1921, Albert Einstein ganhou o prêmio Nobel pela explicação do Efeito Fotoelétrico.

Ao terminar a contextualização histórica pode ser comentado com os alunos que demorou 15 anos para teoria de Einstein ser totalmente aceita, e que antes dele outras teorias como a de Lenard também explicavam o Efeito Fotoelétrico sem abandonar a teoria ondulatória. Mas que apesar de existirem outra teoria aprenderemos a teoria que é aceita hoje, que é a explicação quântica de Einstein.

O que mostra que a ciência é cheia de incertezas, que hoje o que creiamos que esteja certo possa futuramente ser comprovada que está errada. E que são apenas modelos criados para explicar esse fenômeno e que nada impede de outro modelo ser apresentado para sua explicação, e que consiga abranger outros fenômenos também.

PRINCÍPIOS FÍSICOS

Realizada as perguntas, e deixado as dúvidas nos alunos, cabe ao professor apresentar o conceito do Efeito Fotoelétrico e quais os questionamentos que a comunidade científica realizou na época acerca de sua explicação. Questionamentos que,

experimentalmente, não era satisfeitos a partir das explicações fornecidas pela teoria ondulatória. Por meio de anotações no quadro pode-se elencar os três questionamento facilitando a visualização dos aluno.

O primeiro questionamento é quanto à intensidade da luz, de acordo com a teoria ondulatória aumentando a intensidade da luz aumentaria a ocorrência do efeito, no entanto, não foi o que se percebeu experimentalmente, pois por mais que ela fosse aumentada o efeito não acontecia. Retomar ao experimento e mostrar que mesmo a fonte de luz que é mais intensa não provoca a liberação de elétrons na placa.

O segundo questionamento diz que de acordo com a teoria ondulatória que com qualquer fonte de luz o efeito aconteceria, ou seja com fontes de diferentes frequências, no entanto não foi o que constatamos experimentalmente. A fonte de luz de vapor de mercúrio utilizada no experimento emite nos comprimentos de onda entre 180-260nm, que possibilitou o efeito. Já a lâmpada fluorescente emite predominantemente na faixa de comprimento de onda de 370 – 570nm, compreendendo boa parte no espectro visível, e que não ocasiona o efeito.

Quanto ao terceiro questionamento, segundo a teoria ondulatória, deveria ocorrer um atraso; um tempo entre a incidência e a geração do efeito, já que a energia está distribuída pela onda. O que não é percebido experimentalmente, o efeito é quase instantâneo.

Por meio da teoria quântica de Einstein, aceita ainda hoje, foi possível descrever o efeito fotoelétrico entre outros fenômenos da óptica. Em sua teoria o *lighquanta* ou quantum de luz representa uma partícula de luz, que possui uma quantidade de energia (E) ligada dependente, em proporção direta, da frequência da fonte (f) e da constante de Plank (h), de acordo com a equação abaixo:

$$E = hf(1)$$

De acordo com a suposição de Einstein, se a energia está quantizada em cada quanta de luz, um elétron, em um átomo, recebe energia de um quanta de luz de cada vez. Ele supôs também que “quando um elétron é emitido da superfície do metal, sua energia cinética (K) é descrita pela:

$$K = hf - w \quad (2)$$

Onde, hf é a energia do fóton incidente absorvido e w é o trabalho necessário para remover o elétron do metal” (EINBERG e RESNICK, 1979, p.55). Considerando que o trabalho necessário para remover um elétron do metal está relacionado com sua ligação ao

metal, quanto maior for sua ligação mais energia dispendera para que seja removido. Portanto de acordo com a teoria quântica, existe uma frequência mínima (f_0) necessária, que é diferente para metais diferentes, para que o efeito possa acontecer.

Caso o elétron seja ejetado com energia cinética máxima, considera-se que a energia do fóton (hf_0) é igual à função trabalho (w), como demonstrado na equação abaixo:

$$hf_0 = w(3)$$

Com sua teoria, pôde satisfazer todas as objeções experimentais das quais a teoria clássica não conseguiu. Quanto à objeção 1, a energia cinética do fotoelétron não depende da intensidade da iluminação, concordando integralmente com a experiência. Pois, por exemplo, triplicar a intensidade da luz, apenas triplicará a quantidade de fótons e portanto triplicará a corrente fotoelétrica; isto não interfere na quantidade de energia hf de cada fóton.

Quanto à objeção 2, a proposta de Einstein a satisfaz imediatamente, já que a energia do fóton está diretamente relacionada à frequência da fonte. Portanto, ao mudar a fonte incidente, a energia fornecida também mudará. Se a frequência for menor que a função trabalho(w) realizada para ejeção do elétron do material, os fótons não terão individualmente energia suficiente para ejetar os fotoelétrons.

A objeção 3, também é satisfeita ao considerar que a energia está em “pacotes concentrados”, não distribuída uniformemente sobre uma área extensa. Portanto, assim que a luz incidida for acesa haverá a emissão de fótons e, quando de sua incidência no material, imediatamente a absorção por algum elétron; o que torna a emissão de fotoelétrons instantânea.

Durante a explicação desse momento o professor por mostrar essas soluções colocando ao lado das objeções, organizando em quadro para melhor visualização da turma.

Observações

- Não aponte a lâmpada de vapor de mercúrio para o professor e nem para os alunos!
- É preciso ter cuidado durante o manuseio da luz de vapor no mercúrio, pois a luz utilizada nesse experimento é uma luz de laboratório e não possui o revestimento de fósforo do invólucro de vidro assim como a lâmpada fluorescente. A faixa energética de maior emissão está no comprimento de onda de 180 - 280nm, compreendendo a radiação UVC, altamente nocivo à pele e olho humano.

Referências

FÍSICA NA PRÁTICA. Efeito Fotoelétrico. 13min.34s.18 de set. de 2019. Disponível em <
<https://www.youtube.com/watch?v=Cd0Uh4cdu9w&t=4s>> Acesso em: 26 de set. de 2019.

APÊNDICE I

ATIVIDADE DE COMPARTILHAMENTO DO EFEITO FOTOELÉTRICO

DESCRIÇÃO

A atividade de compartilhamento do efeito fotoelétrico assemelha-se a um jogo conhecido em parques de diversão por “tomba-latas”, cujo objetivo é derrubar as latas empilhadas em uma mesa por meio do arremesso de uma bola. Para essa atividade será preciso que o professor desenvolva os materiais como: latas, preenchidas com areia para equilibrar sua massa, e dois tipos de bolas, um com massa suficiente para derrubar as latas e outro não.

Como sugestão o professor pode desenvolver as bolas que serão arremessadas utilizando balões preenchidos de areia, nas cores vermelha e azul. O balão vermelho representando um fóton de menor frequência possuindo menor massa, e o balão azul representando um fóton de maior frequência possuindo maior massa.

A dinâmica da atividade consiste em pedir para que um dos alunos tente derrubar as latas oferecendo a ele, primeiramente, o balão vermelho (menor massa) e depois, o balão azul (maior massa). O objetivo, nessa etapa, é que no arremesso do balão vermelho o aluno não consiga derrubar as latas independentemente da força aplicada no arremesso e da quantidade de bolinhas lançadas, já no arremesso do balão azul, ele consiga tombá-las.

Ao fim dos arremessos o alunos perceberão que independentemente da quantidade de balões vermelhos (menor massa) arremessados, esses não terão massa o suficiente para derrubar as latas, contrariamente de quando arremessado o balão azul (maior massa). Durante a aplicação o professor deverá relacionar a atividade com a explicação do efeito fotoelétrico.

DISCUSSÃO DOS PRINCÍPIOS FÍSICOS

Essa atividade é uma abstração da explicação teórica do efeito fotoelétrico por meio de analogias entre as latas do jogo e a superfície de um metal, entre a quantidade arremessadas de bolinhas e a intensidade de uma fonte luminosa, e entre a massa das bolinhas e a frequência da fonte luminosa. Portanto, durante sua realização é de extrema

importância que o professor consiga deixar claro as analogias para que os alunos possam relacionar a atividade com a explicação do efeito fotoelétrico.

Por exemplo, ao arremessar as bolinhas o aluno deverá perceber a relação de suas massas com a frequência de uma fonte luminosa, ou seja, quando arremessado o balão vermelho (menor massa), relacioná-lo à uma fonte luminosa de frequência abaixo da frequência de corte, na qual o efeito não acontece. Já, ao arremessar o balão azul (maior massa), relacioná-lo a uma fonte de frequência acima da frequência de corte, que resultará no acontecimento do efeito.

A analogia entre a quantidade de bolinhas arremessadas e a intensidade da fonte de luz, significa que, independentemente da quantidade de arremessos o efeito só acontecerá quando a fonte luminosa tiver frequência suficiente para que ele aconteça.

Observações

- O professor poderá utilizar diferentes tipos de materiais para a construção do jogo, os citados neste roteiro são uma sugestão.
- Esta atividade foi inspirada em um vídeo disponibilizado no *documentário* intitulado *The Secrets of Quantum Physics*.

Referências

The Secrets of Quantum Physics. Direção e produção de Tim Usborne e Kenny Scott. British Broadcasting Corporation. 9-16 de dez. de 2014.

APENDICE J

TEXTO DE APOIO AO PROFESSOR

Tendo em vista os apontamentos realizados neste trabalho, buscamos fornecer aos professores um pouco sobre os aspectos históricos que acabam ficando de fora do livro didático, e que para aplicação da sequência proposta é de extrema importância o conhecimento do professor.

Sabemos que escrever sobre a história da ciência é um trabalho desafiador, pois há muitas sutilezas históricas que podem passar despercebidas durante a redação. No entanto esperamos que este texto possa auxiliar o professor, desde o reconhecimento de acontecimentos históricos, como também, de bibliografia complementar.

DOS GREGOS À MAXWELL

Desde a antiguidade discussões com relação a natureza da luz já causavam controvérsias entre filósofos gregos. Pitágoras (582 a 500 a.C) considerava que objetos visíveis aos olhos bombardeavam partículas ao olho. Para ele “a luz consiste de raios que agem como tateadores, viajando em linha reta do olho ao objeto e a sensação da forma é obtida quando esses raios tocam os objetos” (SALVETTI, 2008, p. 18), difundindo e desenvolvendo a geometria.

Anterior a Arquimedes, Euclides (325 a.C. a 265 a.C.), matemático grego, estudou profundamente os espelhos esféricos e postulou que os raios luminoso se propagavam em linhas retas, tornando a óptica uma divisão da geometria. Seu estudo está registrado em sua obra *Catoptrics* (300 a.C.) (BARTHEM, 2005, p.4).

Ainda na antiguidade, segundo historiadores gregos, Arquimedes (287 a 212 a.C), durante a defesa da segunda guerra púnica, desenvolveu uma tecnologia chamada de *espelhos ardentes* – artefatos capazes de criar incêndios por meio da alta concentração de raios de luz, mantendo os romanos afastados. É possível que esta história tenha sido aumentado pelos historiadores gregos, como uma maneira de demonstrar a sua superioridade. Pesquisas recentes especulam que eles tenham

usados escudos gregos bem polidos, arranjados para que refletissem em um único ponto, refletindo fortemente o sol (BARTHEM, 2005, p.3 e 4).

Princípios como o refração começaram a serem descritos em 50 a.C., por Cleomedes, e aperfeiçoados, seguidamente, por Ptolomeu (85 d.C a 165 d.C.), Alhazen (965 a 1038) e Johannes Kleper (1571 a 1630). Por fim, Willebrord Snell (1591 a 1626) deduziu a expressão matemática para a refração luminosa. Os estudos de Snell foram publicados por René Descartes (1596 a 1650), o qual omitiu sua participação. A lei de Descartes-Snell é conhecida e utilizada até hoje. (BARTHEM, 2005, p.6, 7,8 e 9).

Assim, durante a busca pelo entendimento da natureza da luz, modelos foram propostos para interpretação dos fenômenos. A visão de Demócrito (460/470 a 370/380 a.C.), considerava que a luz era constituída de partículas indivisíveis, compondo um modelo corpuscular. Posteriormente, Aristóteles (ca. 384 a 322 a.C.) assemelhou a luz à uma explicação similar sobre a vibração do som; para ele o objeto vibra, colocando em vibração o meio (“*diáfano*”), o que provocaria “*humores*” percebidos pelo olho, podendo-se compreender como um modelo pré-ondulatório. (BARTHEM, 2005, p.19 e 20).

As ideias dos gregos perpetuaram-se durante toda a antiguidade ocidental e, ao fim da Idade Média, pesquisadores, como o iraquiano Ibn al Haytham, já traziam indícios de rejeição a óptica geométrica, mas não apresentaram nenhuma reflexão com relação à natureza da luz.

No século XIII, duas correntes de pensamento científico estabeleceram-se, para a explicação do que era luz: a teoria corpuscular da luz, defendida por Issac Newton (1642 a 1727), e a teoria ondulatória da luz, defendida por Christian Huygens (1629 a 1695). Experiências realizadas por Francesco Maria Grimaldi (1618 a 1663) mostraram falhas nas previsões da óptica geométrica, utilizada pelo modelo corpuscular. Quando posicionou uma fonte de luz, a menor possível, em frente a um obstáculo, em vez de gerar uma região de luz e sombra, ele observou faixas claras, onde deveria estar a sombra, e faixas escuras, onde deveria estar iluminado. Esse fenômeno passou a ser chamado difração. (BARTHEM, 2005, p.21 e 22).

Isaac Newton (1642 a 1727), repetiu muitos experimentos de Grimaldi, mas por não conseguir explicá-los por meio de sua teoria, os deixou de lado. Mas afirmava que seu modelo, o qual considerava a luz como partículas que se

propagam no éter, era satisfatório para explicar fenômenos como reflexão e refração.

O modelo de Huygens, poderia explicar além dos fenômenos de reflexão e refração os fenômenos observados por Grimaldi. Para ele a luz se propagava como uma onda sonora, oscilando transversalmente. Ela era caracterizada por seu comprimento de onda (λ), referente a distância entre duas cristas da onda e pela frequência (f) de suas oscilações. Relacionam-se esses parâmetros por meio da velocidade de propagação (v) da onda luminosa, pela equação: $v = \lambda f$.

Os dois modelos forneciam previsões diferentes quanto à velocidade da luz, Newton afirmava que ao propagar-se na água sua velocidade aumentaria (em relação à propagação no ar), enquanto, Huygens afirmava que, ao entrar na água sua velocidade diminuiria. Para determinar quem venceria essa disputa seria necessário vencer duas etapas: “aprimorar os modelos teóricos, de modo que pudessem explicar corretamente os resultados experimentais e medir a velocidade da luz com a precisão necessária” (BARTHEM, 2005, p.24).

Com relação, a superação dessas etapas, Barthem (2005) traz algumas considerações.

A primeira etapa tinha como obstáculo o enorme peso científico do legado de Newton. Da mesma forma que a admiração por Sócrates havia canalizado o intelecto na Antigüidade para a filosofia moral, a influência de Newton sobre as gerações seguintes fez com que poucos atrevessem a contestá-lo nos cem anos que se seguiram à sua morte. A segunda etapa implicava em um avanço tecnológico que propiciasse aos cientistas uma instrumentação adequada para medir a velocidade da luz. (BARTHEM, 2005, p.24).

O sucesso de Newton na mecânica celeste ofuscou a teoria ondulatória da luz de Huygens, garantindo a aceitação de sua teoria corpuscular durante todo o século XVIII e o começo do século XIX. Foi em 1803, que Thomas Young (1773 a 1829), retoma os experimentos de Grimaldi, e faz um paralelo entre a interferência de ondas sonoras com as ondas de luz. Propôs um experimento com dois furos muito pequenos e próximos e, como resultado, gerou um padrão de interferência assim como no som, composto, nesse caso, de franjas claras e escuras.

O modelo ondulatório só foi formalizado após os trabalhos de Fresnel (1788 a 1827), apresentado na Academia de Paris em 1818, e aceito somente após superar um desafio proposto por Poisson (1781 a 1842), de mostrar que sua teoria poderia explicar o inverso, fazendo a luz contornar um obstáculo, ao invés de passar por um orifício,

demonstrando experimentalmente a observação de uma franja clara central, onde deveria ser sombra.

Posteriormente, Fresnel provou que a luz se propagavam transversalmente, por meio da explicação do fenômeno de polarização. Apesar de conseguir explicar fenômenos não compreendidos pela Física corpuscular, a teoria ondulatória ainda não havia sido totalmente aceita pela comunidade científica.

Em 1850, a medida da velocidade da luz, considerada anteriormente como uma das etapas necessárias para superação da teoria corpuscular, foi mensurada por Léon Foucault (1819 a 1868), mostrando que, em água, a velocidade da luz diminuía (em relação ao ar). Esse resultado determinou, então, o sucesso da teoria ondulatória, caracterizando a Física Clássica (FC). Cabe ressaltar que apesar do sucesso desta teoria, a teoria corpuscular é utilizada até os dias atuais por fornecer resultados precisos para os fenômenos de reflexão e refração.

Em 1864, James Clerk Maxwell (1831 a 1879) identifica a luz como uma onda eletromagnética, demonstrando que campos elétricos e magnéticos “podiam se propagar como uma onda que viajaria à velocidade da luz”. (BARTHEM, 2005, p.37)

O movimento ondulatório é uma forma de transferência de energia que interage com o meio, podemos perceber mais facilmente o transporte dessa energia, por meio das ondas longitudinais sonoras, as quais podem fazer nosso corpo vibrar quando estamos muito próximos de uma caixa de som.

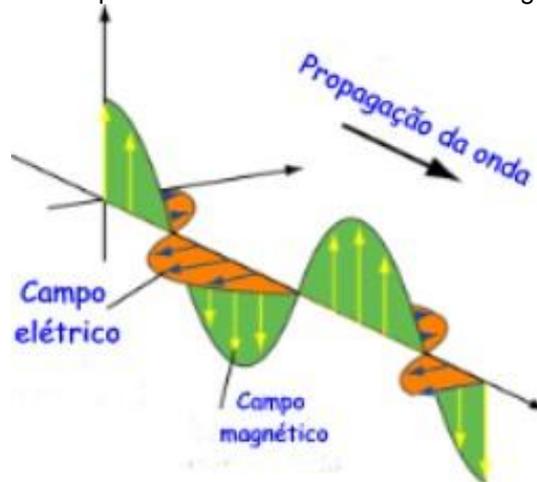
A energia da onda está distribuída igualmente ao longo de sua propagação, e é proporcional a sua amplitude ao quadrado. Um exemplo que pode demonstrar essa relação, é quando transmitimos pulsos de amplitudes diferentes em uma corda: a medida que aplicamos mais força, mais energia, a sua amplitude aumenta, e uma pessoa que a segure no outro lado pode perceber que o impacto transmitido pela onda aumenta. Diferentemente da onda sonora, a onda luminosa não necessita de um meio material para se propagar, fato conhecido a partir do início do século XX, após a ideia do éter ser enfraquecida por não encontrarem indícios de sua existência.²

Por não ter a necessidade de matéria para se propagar, as ondas luminosas são classificadas como de natureza eletromagnética, e sua oscilação são geradas

2 Alguns referenciais relacionam o seu enfraquecimento à realização do experimento conhecido por Experiência de Michelson-Morley, desenvolvido por Albert Michelson e Edward Morley em 1887, que forneceram as primeiras evidências contra a hipótese do éter.

por cargas elétricas, dando origem a campos elétricos e campos magnéticos variáveis. A Figura 1 mostra um esquema da orientação do campo elétrico e magnético em uma propagação de onda eletromagnética. (TORRES, FERRARO, SOARES e PENTEADO, 2013, p. 148).

Figura 2 - Modelo representativo de uma onda eletromagnética

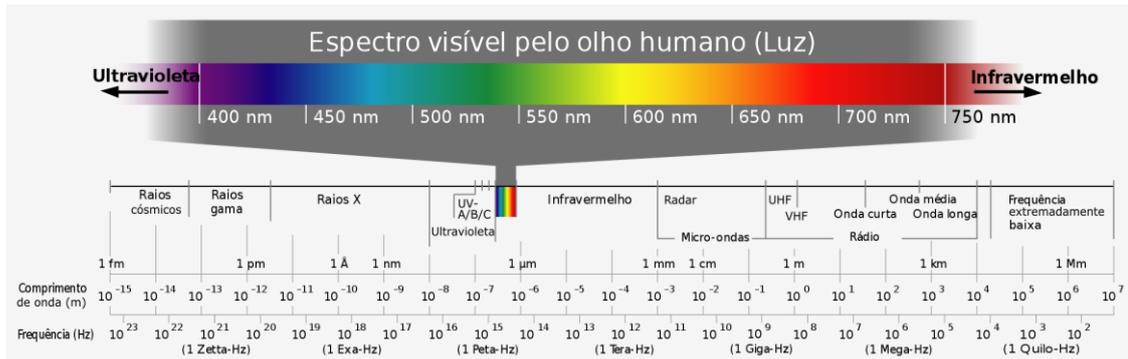


Fonte: Disponível em <

http://www.rc.unesp.br/showdefisica/99_Explor_Eletrizacao/paginas%20htmls/Ondas%20eletromag.htm > Acessado dia: 01 de out. de 2019.

Por meio da análise da equação de Huygens, a qual relaciona a velocidade da onda, a sua frequência e seu comprimento de onda, podemos considerar que quando a velocidade da onda é constante, ou seja, no vácuo ou em um meio homogêneo e isotrópico, as variáveis λ e f são inversamente proporcionais; neste caso, ondas eletromagnéticas com frequências maiores têm comprimento de onda menores e vice-versa. A figura 2 mostra as principais ondas do espectro eletromagnético, ordenadas por seu comprimento de onda, sendo destacado a parte do espectro visível, que estão entre os comprimentos de onda de 0,400 micrometros (violeta) a 0,700 micrometros (vermelho).

Figura 3 - Espectro Eletromagnético



Fonte: Disponível em < https://pt.wikipedia.org/wiki/Espectro_vis%C3%ADvel > Acesso em: 7 de out. de 2019.

A energia dos fótons emitidos pelos materiais, podem ser ou não visíveis ao nossos olhos. As radiações visíveis, correspondente a cada uma das cores que enxergamos, compreendem uma pequena parte do todo espectro eletromagnético, de modo que a menor de frequência corresponde à cor vermelha e a maior frequência a cor violeta (GREF, 2005, p.221). As radiações de frequência de superior a 100 vezes maior que a faixa do visível, caracterizadas por possuírem alta energia e frequência, compreendem as radiações de Ultravioleta, utilizada em funções terapêuticas; Raio-X, utilizados em radiografia; Raios Gama, emitido por núcleos radioativos e Raios Cósmicos. (Ibidem)

Já, abaixo da radiação do espectro visível, encontra-se as radiações menos energéticas e de menor frequência. Dentre elas estão Infravermelho, correspondente a radiação térmica; as Microondas, utilizada em radares, televisão, redes sem fio, etc.; as ondas de Rádio (curtas, médias e longas), utilizado nas radiocomunicações, na meteorologia, etc. (GREF, 2005, p.222); e as ondas de frequência extremamente baixa, utilizadas para comunicação como em código Morse, que não transferem informação áudio visual.

Cabe ressaltar, apesar de estarmos conceituando ainda a Física ondulatória e não termos introduzido o conceito de fóton, que quanto menor for a frequência da radiação, maior será a manifestação de seu aspecto ondulatório, e em consequência menor sua manifestação como partícula, ou seja, menor a energia transportada em cada fóton. O contrário acontece para radiações com frequência maiores (GREF, 2005, p.223).

O EFEITO FOTOELÉTRICO

Ao longo da segunda metade do século XIX, fenômenos como interferência, difração e polarização já estavam esclarecidos para a comunidade científica, tornando-se entendidos como comprobatórios para a concepção de luz como onda transversal, oscilante periodicamente.

Em 1886 e 1887, Heinrich Hertz realizou experimentos que confirmaram a relação da luz com as ondas eletromagnéticas descritas por Maxwell. Durante a realização do experimento ele observou que uma descarga elétrica entre dois eletrodos era facilitada pela incidência de luz ultravioleta. Este efeito posteriormente seria denominado efeito fotoelétrico e explicado em 1905 por Albert Einstein, contradizendo algumas conclusões experimentais que Hertz havia apontado sobre a teoria eletromagnética clássica (EISBERG e RESNICK, 1979). No entanto, entre a visualização do efeito por Hertz e a explicação de Einstein, muitas controvérsias, quanto ao seu entendimento, foram instituídas.

Em 1882, dois anos após a visualização do fenômeno por Hertz, a comunidade científica da Europa tinha o efeito fotoelétrico como fenômeno de extrema importância. Este consistia basicamente em iluminar uma placa de metal (submetida a uma diferença de potencial) com luz ultravioleta, iniciando um fluxo de partículas carregadas negativamente. A questão seria responder qual seria a natureza da corrente fotoelétrica.

Phillip Lenard, a partir de 1902, conduziu experimentos que comprovaram que a luz ultravioleta facilita a descarga elétrica, sendo laureado por um Prêmio Nobel, provando que a fotocorrente é proporcional à intensidade da luz. No entanto, ele não previa uma relação da energia cinética da onda com a frequência da luz, ignorando essa relação (KRAGH, 1992). Para tanto, ele relacionou a energia cinética de emissão dos fótons com a estrutura atômica do metal, portanto a luz somente desencadearia a liberação dos elétrons não transmitindo energia à eles. A contribuição de Lenard foi resumida por Wheaton (1983):

Ele descobriu o surpreendente fato de que a velocidade máxima com que os elétrons são ejetados pela luz ultravioleta é totalmente independente da intensidade da luz. Esse resultado convenceu que não poderia haver transformação da energia da luz em energia cinética eletrônica. Em vez disso, ele propôs que os elétrons em um átomo já possuem sua velocidade fotoelétrica, ou o equivalente de energia potencial, em virtude de sua

participação no sistema. A luz apenas desencadeia a liberação de elétrons selecionados; não adiciona energia para eles (Wheaton, 1983, p. 74).

Até 1911, essa hipótese de desencadeamento formou a base de quase todos os físicos para a compreensão do efeito fotoelétrico, pois era uma teoria que não confrontava a teoria ondulatória e teve grande aceitação. Mas a crítica quanto a esta explicação estava relacionada com a temperatura, descrita por Lenard, pois Millikan e Winchester (1907) não conseguiram qualquer variação do efeito fotoelétrico com a temperatura. (Niaz et al, 2009, p.907).

Albert Einstein (1905) colocou em questão a teoria clássica da luz, a qual conseguiu interpretar o resultados experimentais de Lenard, propondo uma nova teoria na qual a luz se comporta como fluxo de energia quantizada, denominado quantum de luz, e que mais tarde foram chamados de fótons. A explicação do efeito fotoelétrico é uma componente no artigo intitulado “*Concerning an Heuristic Point of View Toward the Emission and Transformation of Light*” (tradução para inglês, Jornal Americano de Física), o qual Einstein destinou 3 páginas das 17 à sua explicação.

A base de argumentação de Einstein para o desenvolvimento da teoria quântica foi baseada nas formulações de Wien por meio da “derivação da entropia da radiação eletromagnética baseado em conceitos de termodinâmica e mecânica estatística” (Lima et al, p. 1956, 2017). Portanto, Einstein utilizou a hipótese da energia do quanta de luz, $E = h.f$, teoricamente, chegando nela a um caminho não necessariamente como o de Planck.

De acordo com a suposição de Einstein, se a energia está quantizada em cada quanta de luz, um elétron, em um átomo, recebe energia de um quanta de luz de cada vez. Ele supôs também que “quando um elétron é emitido da superfície do metal, sua energia cinética (K) é descrita pela equação $K = hf - w$, onde hf é a energia do fóton incidente absorvido e w é o trabalho necessário para remover o elétron do metal” (EINBERG e RESNICK, 1979, p.55). Para tanto, considerando que uns elétrons estão ligados mais fortemente ao material (uma distância maior da superfície) do que outros, alguns perdem energia por colisões em sua trajetória. Para um elétron que possui a ligação mais fraca (superfície do metal), não haverá perda interna, emergindo com uma energia cinética máxima, $K_{max} = hf - w_0$, onde w_0 , é uma característica do metal, intitulada função trabalho, que representa a energia mínima para que o elétron escape das forças atrativas que as conectam ao metal.

A teoria de Einstein não foi inicialmente aceita pela comunidade científica devido aos físicos conservadores terem percebido que havia um alto preço a pagar pela sua aceitação, pois teriam que abandonar uma das teorias mais bem consolidadas da Física, a teoria ondulatória – fato este que nem mesmo Einstein poderia negar. De acordo com Wheaton (1983):

A hipótese de *lightquanta* de Einstein não foi levada a sério por físicos e matemáticos adeptos por mais de quinze anos. As razões são claras. Parecia ser uma rejeição desnecessária da teoria clássica da radiação altamente verificada. Como *lightquanta* poderia possivelmente explicar fenômenos de interferência sempre foi a objeção central (Wheaton, 1983, p. 19, tradução nossa).

Einstein argumentou “que as experiências de óticas bem conhecidas de interferência e difração da radiação eletromagnética haviam sido feitas apenas em situações que envolviam um número *muito* grande de fótons”. Este fato dificultaria o fornecimento de dados do comportamento individual dos fótons, concluindo que “os fótons não vão de onde são emitidos até onde são absorvidos da mesma maneira simples que partículas clássicas”, mas “se propagam como ondas clássicas”, o que explica medianamente como os fótons se propagam. No entanto, Einstein não estava preocupado com a propagação, mas sim com “como estes fótons são emitidos e absorvidos”. (EINBERG e RESNICK, 1979, p. 54 e 55).

Apesar da resistência à aceitação da sua teoria, sua hipótese explicou os fatos experimentais. Há três objeções relacionados ao que foi observado experimentalmente, que não foram explicadas pela teoria clássica, às quais são o ápice da sequência didática proposta, momento em que se busca confrontar conceitos da teoria ondulatória com a teoria quântica.

1. A teoria ondulatória requer que a amplitude do campo elétrico oscilante E da onda luminosa cresça se a intensidade da luz for aumentada. Já que a força aplicada ao elétron é eE , isto sugere que a *energia cinética* dos fotoelétrons deveria também crescer ao se aumentar a intensidade do feixe luminoso. Entretanto, [...] K_{mx} , que é igual a eV_0 , *independe da intensidade da luz*. Isto foi testado para variações de intensidade de ordem de 10^7 .
2. De acordo com a teoria ondulatória, o efeito fotoelétrico deveria ocorrer para qualquer frequência da luz, desde que esta fosse intensa o bastante para dar a energia necessária à ejeção dos elétrons. Entretanto [...] para cada superfície, um *limiar de frequências* ν_0 *característico*. *Para frequências menores que ν_0 o efeito fotoelétrico não ocorre, qualquer que seja a intensidade da iluminação*.
3. Se a energia adquirida por um fotoelétron é absorvida da onda incidente sobre a placa metálica, a “área de alvo efetiva” para um elétron no metal é limitada, e provavelmente não é muito maior que a de um círculo de raio aproximadamente igual ao raio atômico. Na teoria clássica, a energia

luminosa está uniformemente distribuída sobre a frente de onda. Portanto, se a luz é suficientemente fraca, deveria haver um intervalo de tempo mensurável [...] entre o instante em que a luz começa a incidir sobre a superfície e o instante da ejeção do fotoelétron. Durante esse intervalo, o elétron deveria estar absorvendo energia do feixe, até que tivesse acumulado o bastante para escapar. No *entanto*, nenhum *retardamento detectável foi jamais medido*. Esta discordância é particularmente marcante quando a substância fotoelétrica for um gás; nestas circunstâncias, mecanismos de absorção coletivo podem ser ignorados e a energia do fotoelétron emitido deve certamente ter sido extraído do feixe luminoso por um único átomo ou molécula. (EINBERG e RESNICK, 1979, p.53 e 54).

A hipótese de Einstein (1905) resolve as três objeções acima. Quanto à objeção 1, a energia cinética do fotoelétron não depende da intensidade da iluminação, concordando integralmente com a experiência. Pois, por exemplo, triplicar a intensidade da luz, apenas triplicará a quantidade de fótons e portanto triplicará a corrente fotoelétrica; isto não interfere na quantidade de energia hf de cada fóton.

Quanto à objeção 2, a proposta de Einstein a satisfaz imediatamente, já que a energia do fóton está diretamente relacionada à frequência da fonte. Portanto, ao mudar a fonte incidente, a energia fornecida também mudará. Se a frequência for menor que a função trabalho (w) do material, os fótons não terão individualmente energia suficiente para ejetar os fotoelétrons.

A objeção 3, também é satisfeita ao considerar que a energia está em “pacotes concentrados”, não distribuída uniformemente sobre uma área extensa. Portanto, assim que a luz incidida for acesa haverá a emissão de fótons e, quando de sua incidência no material, imediatamente a absorção por algum elétron; o que torna a emissão de fotoelétrons instantânea.

Millikan (1916), em 1923, foi agraciado ao prêmio Nobel por determinar experimentalmente a carga elementar do elétron e a constante de Planck com base na equação do efeito fotoelétrico de Einstein. Seus resultados foram rapidamente aceitos pela comunidade científica. No entanto, por mais que tenha tido embasamento na teoria de Einstein, Millikan, assim como Planck, deixa claro que a teoria de Einstein é um tanto quanto obscura e a sua equação longe de ser plenamente estabelecida. Portanto, foi “considerada por seu próprio autor como um teste experimental da equação fotoelétrica de Einstein e de nenhuma maneira uma confirmação da hipótese subjacente de *lightquanta*” ((Niaz; Klassen; McMillan e Metz, 2009, p.910).

De certa forma o experimento os resultados experimentais de Millikan (1916) podem ter contribuído para o sucesso da explicação de Einstein do efeito fotoelétrico. Em 1921, Albert Einstein foi laureado no Prêmio Nobel, por sua teoria quântica que explica o efeito fotoelétrico.

Sabemos que a evolução do entendimento sobre a luz não para por aqui, e que outros momentos importantes guiam a história para conclusões de que a luz é uma partícula que possui comportamento ondulatório, construindo o conceito de dualidade onda-partícula. Contudo o recorte para o desenvolvimento desta sequência é realizado até este momento histórico.