



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE FÍSICA
CURSO DE LICENCIATURA EM FÍSICA

ANTONIO ALYSON DA SILVA XAVIER

A NATUREZA DUAL DA LUZ PARA O ENSINO MÉDIO

FORTALEZA

2022

ANTONIO ALYSON DA SILVA XAVIER

A NATUREZA DUAL DA LUZ NO ENSINO MÉDIO

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Física do Centro de Ciências da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Licenciado em Física.

Orientadora: Prof^ª. Dra. Carla Maria Salgado Vidal Silva

FORTALEZA

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

X17n Xavier, Antonio Alyson Da Silva.

A natureza dual da luz no ensino médio / Antonio Alyson Da Silva Xavier. – 2022.
38 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências, Curso de Física, Fortaleza, 2022.

Orientação: Prof. Dr. Carla Maria Salgado Vidal Silva.

1. Ensino de física moderna. 2. Dualidade onda-partícula. 3. Phet. I. Título.

ANTONIO ALYSON DA SILVA XAVIER

A NATUREZA DUAL DA LUZ NO ENSINO MÉDIO

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Física do Centro de Ciências da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Licenciado em Física.

Orientadora: Prof^ª. Dra. Carla Maria Salgado Vidal Silva

Aprovada em: 16/12/2022.

BANCA EXAMINADORA

Prof^ª. Dra. Carla Maria Salgado Vidal Silva (Orientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Nildo Loiola Dias
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Me. Antonio Edinaldo de Oliveira Ferreira
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.

Aos meus pais, Evelma Lucia e Francisco
Eudes.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal do Ceará e a Capes, por toda estrutura e apoio financeiro da bolsa Residência Pedagógica (RP).

Agradeço à Deus e minha família e, principalmente aos meus pais, por toda luta que eles tiveram para eu chegar até esse momento. Ao meu Mestre e Amigo Dr. Heliomar, que me ajuda desde sempre com seu vasto conhecimento.

Aos meus professores, todos tiveram participação fundamental no meu desenvolvimento acadêmico, em especial à Prof^a. Dra. Carla Maria Salgado Vidal Silva por toda orientação, paciência e humildade. Aos Funcionários do Departamento de Física.

Agradeço também a todos os meus amigos de graduação e departamento, em especial a Alehff Einstein, Alyson Freitas, Gabriel Sousa, Higo Barros, Leonardo Sátiro e Vitor Julio, obrigado pelos inúmeros cafés na química e almoços no RU.

Agradeço também a Mayara Marques, por ter sido uma ótima companheira nesses últimos tempos. Agradeço também a Marcos Antonio, Mateus Vasconcelos e aos amigos do CEEAM todos irmãos de longa data que sempre me apoiaram e acreditaram em mim.

RESUMO

O ensino de Física Moderna é discutido por diversos pesquisadores na área de Ensino, tanto para a sua introdução no Ensino Médio quanto para a melhor forma de fazer essa inserção. A causa para inclusão desses temas no Ensino Médio é dada pela necessidade de fomentar uma cultura científica mais sólida em nosso corpo discente. Ao mesmo tempo que precisamos alcançar os objetivos apresentados nos Parâmetros Curriculares Nacionais. Nossos alunos estão cada vez mais cercados por tecnologias (GPS, celulares, computadores, aplicativos) que compreendem mais e mais conceitos físicos relativos à Física Moderna (relatividade, semicondutores, quantização). Por outro lado, o ensino de Física tem ocorrido de forma conteudista e tradicional, priorizando os aspectos teóricos e abstratos do conteúdo. Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo elaborar e apresentar uma proposta didática para ensinar o comportamento dual da luz, utilizando o simulador PhET como ferramenta didática para a imersão e aprofundamento do saber em nosso alunado. O referencial teórico para a formulação desse produto pedagógico foi a Teoria da Aprendizagem Significativa de David Ausubel.

Palavras-chave: ensino de física moderna; dualidade onda-partícula; phet; aprendizagem significativa.

ABSTRACT

The teaching of Modern Physics is discussed by several researchers in the area of Education, both for its introduction in high school and for the best way to make this insertion. The reason for including these themes in high school is due to the need to foster a more solid scientific culture in our student body. At the same time, we need to achieve the objectives presented in the National Curriculum Parameters. Our students are increasingly surrounded by technologies (GPS (Global Positioning System), cell phones, computers, applications) that understand more and more physical concepts related to Modern Physics (relativity, semiconductors, quantization). On the other hand, the teaching of Physics has occurred in a content and traditional way, prioritizing the theoretical and abstract aspects of the content. In this context, the present work aimed to develop and present a didactic proposal to teach the dual behavior of light and matter, using the PhET simulator as a didactic tool for the immersion and deepening of knowledge in our students. The theoretical framework for the formulation of this pedagogical product was David Ausubel's Theory of Meaningful Learning.

Keywords: teaching of modern physics; wave-particle duality; phet; learning means.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Mapa conceitual com alguns conceitos básicos da teoria Ausubel	17
Figura 2 – Modelo prático de um corpo negro	21
Figura 3 – Mapa conceitual sobre a Teoria dos <i>Quanta</i>	22
Figura 4 – Esquema do experimento do Efeito Fotoelétrico	23
Figura 5 – Energia cinética dos fotoelétrons em função da frequência da radiação incidente	25
Figura 6 – Mapa conceitual sobre o Efeito fotoelétrico	25
Figura 7 – Ilustração da Lei de Bragg	28
Figura 8 – Esquema do equipamento usado por Davisson e Germer	29
Figura 9 – Mapa conceitual sobre a Hipótese de De Broglie	30
Figura 10 – Simulação do experimento do Efeito Fotoelétrico, comprimento de onda de 590 nm e intensidade de 20% u.a.	32
Figura 11 – Simulação do experimento do Efeito Fotoelétrico, comprimento de onda de 590 nm intensidade de 100% u.a..	33
Figura 12 – Simulação do experimento do Efeito Fotoelétrico, comprimento de onda de 190 nm e intensidade de 20% u.a.	34
Figura 13 – Simulação do Experimento de Davisson-Germer. $D = 0,6 \text{ nm}$ e $v = 1840 \text{ km/s}$	35

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
2.1	A aprendizagem significativa segundo Ausubel	14
2.2	Mapa Conceitual	16
2.3	Experimentação do Ensino de Física e o PhET	18
2.3.1	<i>Experimentação do Ensino de Física</i>	18
2.3.2	<i>Simulador Interativo PhET</i>	19
3	A NATUREZA DUAL DA LUZ NO ENSINO MÉDIO .	21
3.1	Teoria dos <i>Quanta</i>	21
3.2	Efeito Fotoelétrico	23
3.3	A Hipótese de De Broglie	26
3.3.1	<i>Difração de Bragg</i>	27
3.3.2	<i>Experimento de Davisson-Germer</i>	28
4	SIMULAÇÕES INTERATIVAS PhET	31
4.1	Simulação do Efeito Fotoelétrico	31
4.2	Simulação do Experimento de Davisson-Germer	35
5.	CONCLUSÃO	37
	REFERÊNCIAS	38

1. INTRODUÇÃO

Praticamente tudo que se estuda na disciplina de Física no ensino médio constitui a chamada Física Clássica. Embora a Física Clássica tenha sua admirável utilidade, ela não é capaz de explicar uma vasta quantidade de fenômenos físicos extremamente importantes. No final do século XIX e início do século XX, várias questões continuavam sem resposta. Muitos físicos experimentais e teóricos se esforçaram para explicar o comportamento da matéria na escala atômica utilizando a Física clássica. Contudo, algum fato sempre ficava sem resposta. Durante as primeiras três décadas do século XX novas concepções da Física foram desenvolvidas, capazes de explicar satisfatoriamente muitas questões que pareciam sem solução. Além disso, essas novas concepções, que foram desenvolvidas para explicar a matéria na escala atômica, também se mostravam válidas quando aplicadas a sistemas macroscópicos. Nascia, então, a Física Moderna.

De acordo com as Orientações Complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais (PCN+) o tema de Física Moderna é definido como: “Matéria e radiação”. É estabelecido que:

Alguns aspectos da chamada Física Moderna serão indispensáveis para permitir aos jovens adquirir uma compreensão mais abrangente sobre como se constitui a matéria, de forma que tenham contato com diferentes e novos materiais, cristais líquidos e lasers presentes nos utensílios tecnológicos, ou com o desenvolvimento da eletrônica, dos circuitos integrados e dos microprocessadores. A compreensão dos modelos para a constituição da matéria deve, ainda, incluir as interações no núcleo dos átomos e os modelos que a ciência hoje propõe para um mundo povoado de partículas. Mas será também indispensável ir mais além, aprendendo a identificar, lidar e reconhecer as radiações e seus diferentes usos. Ou seja, o estudo de matéria e radiação indica um tema capaz de organizar as competências relacionadas à compreensão do mundo material microscópico. (PCN+, 2011, p. 70)

Com o advento desses novos modelos generalizados, surgiu a ideia de que partículas e ondas podem ser apenas comportamentos distintos de um mesmo objeto: a luz, que é uma onda eletromagnética, pode, às vezes, se comportar como partícula (fóton). De maneira análoga, o elétron, que é uma partícula, também pode, às vezes, se comportar como onda. O progresso tecnológico proveniente do desenvolvimento dessas novas ideias foi extraordinário. Foi a partir do entendimento desses fenômenos que fomos capazes de criar dispositivos eletrônicos de semicondutores, as lâmpadas LED, memórias de computador.

As dificuldades apresentadas por parte dos alunos na compreensão e entendimento do conteúdo da disciplina de Física está na dificuldade de associar a abstração teórica com a prática. Ou seja, a falta desse vínculo (teoria-prática) por parte dos alunos leva ao desinteresse, que pode ser manifestado na aversão à disciplina. Diante disso, fica evidente a necessidade da elaboração de alternativas que possibilitem uma melhor interação entre o conhecimento empírico e o científico de maneira prazerosa e lúdica.

As tecnologias proporcionam uma perspectiva diferenciada dos conteúdos, pois facilitam a visualização de modelos físicos que não poderiam ser observados de outra maneira, salvo a visualização estática de figuras em livros didáticos e a esquematização em lousa. Nesse âmbito, simuladores computacionais se destacam, pois facilitam o controle dos parâmetros físicos envolvidos nas diversas situações abordadas e isto proporciona um ambiente mais interativo ao estudante. Portanto, há a necessidade de uma introdução desses mecanismos no trabalho pedagógico nas aulas de Física.

Diante dessa perspectiva, este trabalho objetiva elaborar e apresentar uma proposta didática para o ensino da natureza dual da luz no ensino médio. Para isso, usamos uma abordagem diferente da tradicional, a aprendizagem significativa de David Ausubel. Focando nos conhecimentos preexistentes dos discentes e criando novos subsunçores com o auxílio do organizador prévio comparativo. Além disso, utilizamos como recurso didático o simulador interativo PhET. Uma ferramenta que possibilita simular diversos exercícios e experimentos, contribuindo para a elaboração de aulas mais dinâmicas.

Este trabalho foi separado em três capítulos fundamentais. No capítulo dois apresentamos uma fundamentação teórica sobre a teoria da aprendizagem significativa e a plataforma de simulação PhET. O primeiro tópico do capítulo três é a teoria da quantização da energia de Planck, ou Teoria dos *Quanta*. O segundo é um dos experimentos que comprovam a natureza corpuscular da luz, o Efeito Fotoelétrico. O terceiro trata da hipótese de De Broglie para o comportamento ondulatório da matéria, que foi constatada pelo experimento de Davisson-Germer. Por fim, no capítulo quatro, mostramos a utilização do PhET como ferramenta didática, para o aprendizado sair da abstração teórica e torná-lo mais atrativo aos alunos.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O presente capítulo trata a temática da teoria da aprendizagem significativa proposta por David Ausubel, o qual expõe a ideia de que para a construção da aprendizagem devemos levar em consideração a predisposição para a aprendizagem do aluno, bem como os seus conhecimentos prévios. Em seguida, trata da ideia de mapa conceitual, uma ferramenta de aprendizagem em que liga ideias chaves de forma hierárquica. Ligando o tema geral aos subtemas mais específicos. E por fim é apresentado a importância da experimentação no ensino de Física e o simulador PhET, uma ferramenta que vem ganhando cada vez mais espaço nos materiais didáticos no ensino de ciências.

2.1 A aprendizagem significativa segundo Ausubel

A maneira como o aprendizado ocorre nos seres humanos é um assunto que vem sendo amplamente estudado desde o século XX. Uma gama de teóricos reflete como os conceitos são aprendidos. Dentre eles destacam-se, Skinner, Vygotsky, Ausubel, Piaget. Estes foram conhecidos pelos seus esforços e trabalhos elaborados na área de Psicologia Cognitiva.

A teoria da Aprendizagem Significativa desenvolvida por David Ausubel tem como ideia central a aprendizagem ocorrendo através da conexão do conteúdo novo apresentado, ao conhecimento que as pessoas já possuem. Conforme as palavras do próprio Ausubel:

Se tivesse que reduzir toda a psicologia educacional a um só princípio, diria o seguinte: o fator isolado mais importante que influencia a aprendizagem é aquilo que o aprendiz já sabe. Averigüe isso e ensine-o de acordo (AUSUBEL, et al. 1980, p. 4).

A aprendizagem significativa deve ter sentido para o indivíduo. A informação deverá inter-relacionar-se as abstrações já existente na sua estrutura cognitiva, com base nos conhecimentos prévios (HONORATO, *et al.* 2018, p. 27). Seguindo essa mesma ideia Takeuchi (2009, p. 17) afirma:

O conhecimento prévio especificamente relevante é denominado subsunçor e funcionalmente serve como matriz ideacional e organizacional para a incorporação, compreensão e fixação do novo conhecimento na estrutura cognitiva de forma que o indivíduo passa a atribuir significado a nova informação.

Os subsunçores, de acordo como foi denotado, servem para organizar uma matriz de aprendizagem e pode ser associado a uma ideia de ancoragem. Podemos dizer que a aprendizagem significativa acontece quando o novo conhecimento “ancora-se” em conceitos básicos (subsunçores) preexistente na estrutura cognitiva. Concordando com essa ideia Moreira (2016, p. 8) apresenta:

Novas ideias, conceitos, proposições podem ser aprendidos significativamente (e retidos), na mesma medida em que outras ideias, conceitos, proposições, relevantes e inclusivos estejam, adequadamente claros e disponíveis, na estrutura cognitiva do indivíduo e funcionem, dessa forma, como ponto de ancoragem às primeiras.

Podemos tomar como exemplo os conceitos de força e campo já existente na estrutura cognitiva dos alunos. Estes servem como subsunçores para novas informações referentes a determinados tipos de forças e campos, por exemplo, o elétrico. Porém, este método de ancoragem do novo conhecimento sucede em expansão e remodelação dos conceitos subsunçores (força e campo). Esse exemplo pode ser replicado para aprender conceitos de outras forças e campos.

Quando os discentes não possuem subsunçores apropriados que possibilitam que eles atribuam significado aos novos conhecimentos, faz-se necessário o uso de organizadores prévios. A principal função desses organizadores é exercer o papel de ponte entre o que o aluno sabe e o que ele precisa saber. Podemos separar organizadores prévios em dois tipos: expositivos e comparativos. O primeiro é usado quando o educando não apresenta nenhuma familiaridade com o conteúdo. O segundo é utilizado quando o aluno já possui ideias as quais se podem ancorar os novos conceitos. Veremos um exemplo de organizador prévio comparativo no capítulo 3, quando faremos uma comparação entre a quantização de carga (ideia familiar) e a quantização de energia (nova ideia apresentada).

O oposto da aprendizagem significativa seria, segundo Ausubel, uma aprendizagem mecânica (ou imediata). Sendo esta uma forma de aprendizagem que não tem vínculo e não interage com os conhecimentos e conceitos preexistente na estrutura cognitiva do aluno. A nova informação é arquivada de maneira aleatória e literal, sem ligação com conceitos subsunçores específicos. Assim, outra característica da aprendizagem significativa é a interação, não somente uma associação.

A respeito dessa aprendizagem mecânica, podemos tomar como exemplo no ensino de Física, entre outras disciplinas, aquela abordagem que estimula a memorização de fórmulas, leis e conceitos. Esta perspectiva de ensino condiciona o aluno a um conhecimento sem base estrutural adequada, ou seja, ele adquire um conhecimento vago. Este podendo facilmente ser rompido e esquecido, uma vez que ele não é embasado em uma espécie de “ancoradouro de conhecimento”.

Ausubel conceitua três tipos principais de aprendizagem significativa: representacional, de conceitos e proposicional. A aprendizagem representacional é o tipo mais básico de aprendizagem, nesse tipo aprendemos o significado de símbolos individuais (normalmente palavras) ou aprendemos o que eles representam. A aprendizagem de conceitos é um tipo especial de aprendizagem representacional, pois conceitos também são representados por determinados símbolos. Segundo Moreira (2016, p. 15) esses símbolos “são genéricos ou categóricos já que representam abstrações dos atributos essenciais dos referentes, ou seja, representam regularidades em eventos ou objetos.”. Já a aprendizagem proposicional contrapõe-se à aprendizagem representacional e de conceitos, uma vez que ultrapassa a ideia de símbolos ou conceitos atribuindo significado a uma proposição como um todo.

2.2 Mapa Conceitual

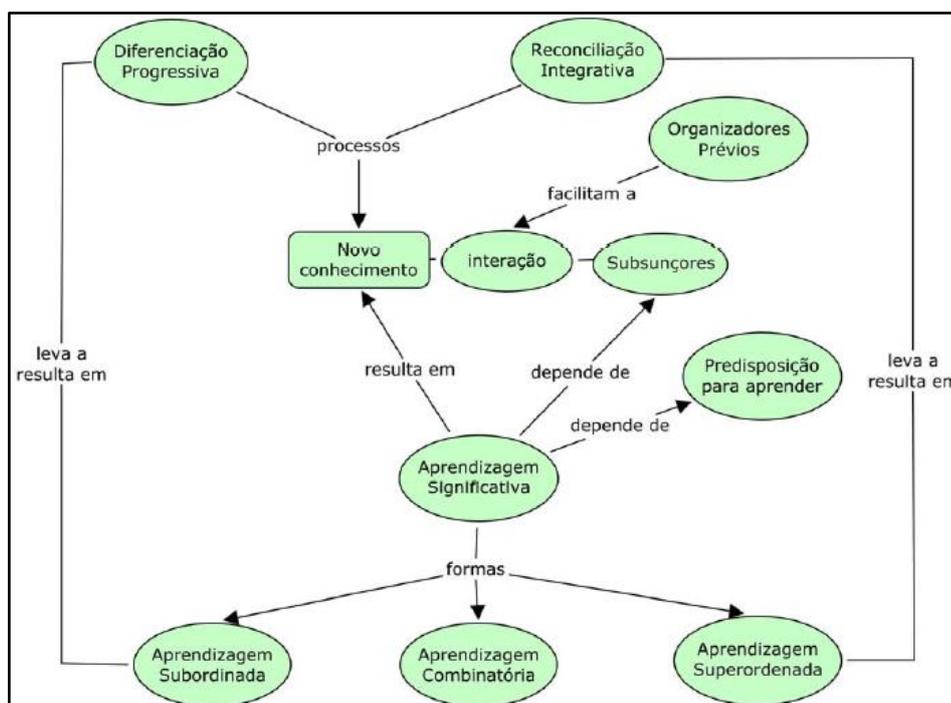
Podemos entender mapas conceituais como estruturas análogas a fluxogramas ou diagramas, frequentemente são delimitados geometricamente por caixas ou círculos, interligados por meio de setas ou linhas. Estas linhas orientam as relações entre conceitos ligados por palavras-chave hierarquizando os conteúdos de maneira progressiva, começando pelo mais geral e abrangente, localizado na parte superior do mapa. Os demais conceitos, menos gerais e mais específico, são localizados na base do mapa (ARAUJO, 2018. p. 36). Podem haver palavras ou frases de ligação sobre as linhas que ligam as caixas. Mapas conceituais não buscam classificar conceitos, mas sim relacioná-los e hierarquizá-los.

Os mapas conceituais são diagramas que abrangem a diferenciação progressiva e reconciliação integrativa. A diferenciação progressiva, segundo Moreira (2012, p. 6) “é o processo de atribuição de novos significados a um dado subsunçor resultante da sucessiva utilização desse subsunçor para dar significado a novos conhecimentos”. Já a reconciliação integrativa, conforme afirma Moreira (2010, p. 6):

A reconciliação integradora, ou integrativa, é um processo da dinâmica da estrutura cognitiva, simultâneo ao da diferenciação progressiva, que consiste em eliminar diferenças aparentes, resolver inconsistências, integrar significados, fazer superordenações

A teoria que cerca os mapas conceituais possuem uma gama de aplicações: aprender um conteúdo, realizar uma síntese de texto, organizar o conteúdo programado para uma determinada disciplina. Mapas conceituais podem ser empregados como recursos em todas essas etapas, assim como um indicativo de aprendizagem significativa, ou seja, na avaliação da aprendizagem. A Figura 1 apresenta um mapa conceitual sobre alguns conceitos básicos da teoria de Ausubel que foram apresentados neste trabalho.

Figura 1. Mapa conceitual com alguns conceitos básicos da teoria de Ausubel.



Fonte: MOREIRA, 2010.

2.3 Experimentação no ensino de Física e o PhET

2.3.1 Experimentação no ensino de Física

A disciplina de Física tradicionalmente apresenta um enfoque nos seus aspectos teóricos e abstratos. Podemos verificar essa afirmativa analisando os livros didáticos da disciplina que são utilizados nas salas de aula do ensino médio. Uma gama de conceitos matemáticos e exercícios de fixação. Daí encontramos os obstáculos encontrados pelos alunos na assimilação e entendimento do conteúdo. A dificuldade de assimilar conceitos físicos abstratos com fenômenos naturais vivenciados pelo educando.

Neste contexto, a experimentação se apresenta como uma ferramenta didática que facilita a assimilação e o interesse dos alunos, pois estabelece um vínculo entre o conhecimento teórico e a vivência experimental concreta, além de reter o conhecimento e gerar estímulos para a aprendizagem através da observação, investigação e levantamento de hipóteses (GRASSELLI & GARDELLI, 2014). De maneira convergente a esse âmbito de preocupações, a utilização de recursos experimentais como método de ensino de Física tem sido apontada, por professores e alunos, como uma das maneiras mais eficazes de amenizar as dificuldades dos educandos (ARAUJO & ABIB, 2003). Dessa maneira o ensino se torna mais significativo e consistente. Conforme as diretrizes apresentadas pelos Parâmetros Curriculares Nacionais do Ensino Médio (PCN+), no que tange o ensino de Física:

É indispensável que a experimentação esteja sempre presente ao longo de todo o processo de desenvolvimento das competências em Física, privilegiando-se o fazer, manusear, operar, agir, em diferentes formas e níveis. É dessa forma que se pode garantir a construção do conhecimento pelo próprio aluno, desenvolvendo sua curiosidade e o hábito de sempre indagar, evitando a aquisição do conhecimento científico como uma verdade estabelecida e inquestionável. (PCN+, 2001, p. 84)

2.3.2 Simulador Interativo PhET

Para que as aulas experimentais se tornem um hábito educacional nas escolas é de extrema importância que se trabalhe com materiais de baixo custo e fácil acesso. A maioria das escolas públicas não dispõe de uma estrutura e nem dos recursos necessários para a obtenção de um laboratório adequado ao ensino. A elaboração de experimentos simples se torna uma ferramenta de grande ajuda, tornando as aulas mais interessantes e estimulando o conhecimento dos alunos, facilitando sua aprendizagem (PREUSSLER *et al.* 2017).

Neste cenário a utilização de mecanismos para a elaboração de experimentos de maneira acessível se torna um problema relevante. Muitas vezes também há uma baixa carga horária da disciplina, junto de aulas fragmentadas e demanda de tempo longo de alguns experimentos. Uma possível solução para esses problemas é a utilização de simuladores interativos, que permitem aos alunos vivenciar as ciências e as práticas matemáticas de novas maneiras, sem a necessidade de um aparelhamento sofisticado e o tempo com a elaboração de experimentos em sala.

A aplicação de simuladores virtuais no ensino de Física proporciona ao educando desenvolver a cognição de conceitos, levando-o ao processo efetivo da aprendizagem, passando a ser um agente ativo ao começar a perceber e agir sobre o objeto de estudo, relacionando o objeto com acontecimentos no cotidiano (CARRARO *et al.* 2014). Seguindo esta ideia Valente (2019, p. 103) afirma:

Os ambientes virtuais de aprendizagem dispõem de outros recursos que podem ser explorados pedagogicamente, como discussão com colegas de modo síncrono ou assíncrono, e realização de exercício autocorrigidos. Além disso, as tecnologias digitais oferecem recursos como animações, simulações ou mesmo o uso de laboratórios virtuais, que o aluno pode acessar e complementar com as leituras, ou mesmo os vídeos mais pontuais que ele assiste.

Uma plataforma que apresenta bastante relevância nesse campo é o Simulador Interativo PhET, por toda a sua interatividade e ambiente intuitivo, no estilo jogo, que é ideal para estimular a aprendizagem dos alunos de maneira mais lúdica e pode ser aplicado nas diversas ciências. Foi criado em 2002 pelo Prêmio Nobel Carl Wieman e é um projeto da Universidade de Colorado Boulder. As simulações são baseadas em uma extensa pesquisa em educação que ajudam a envolver os alunos no processo de aprendizagem.

O PhET é um material bastante completo. Suas simulações podem auxiliar o professor, trazendo uma experiência de laboratório para a sala de aula. Outra vantagem é o baixo recurso computacional necessário para a sua utilização. Ou seja, não é necessário um computador potente, pois o PhET é um simulador online, não precisa baixar e é totalmente gratuito. Com ele podemos simular qualquer assunto relacionado não somente a Física, mas ao ensino das demais ciências. Veremos no capítulo 4 a utilização do PhET para ajudar a compreensão do Efeito Fotoelétrico e o experimento de Davisson-Germer.

3. A NATUREZA DUAL DA LUZ NO ENSINO MÉDIO

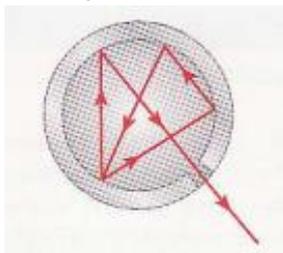
Neste capítulo é fornecido um estudo para tornar os professores aptos a lecionar os conceitos relacionados a dualidade onda-partícula. Conforme a teoria de David Ausubel, os conteúdos a seguir devem ser apresentados aos educandos após os conceitos básicos de luz, as características das ondas e as propriedades da partícula. Somente assim eles terão os subsunçores necessários para ancorar os novos conhecimentos.

Começaremos tratando da chamada Teoria dos *Quanta*, estabelecida pelo pesquisador Max Planck. Em seguida, apresentaremos um exemplo experimental da natureza dual da luz, o efeito fotoelétrico. O estudo deste efeito garantiu o Prêmio Nobel ao Albert Einstein. Por fim, analisaremos a hipótese de de Broglie para a dualidade da matéria e o experimento Davisson-Germer, que confirmou esta hipótese.

3.1 Teoria dos *Quanta*

No ano de 1900, o físico alemão Max Planck, formulou uma teoria conhecida como Teoria dos *Quanta*. Esta teoria buscava relacionar a temperatura e o comprimento de onda com a quantidade de energia irradiada pelos corpos aquecidos, em particular um corpo negro. Podemos entender um corpo negro como um objeto oco com um pequeno orifício (Figura 2). Este objeto é então aquecido através de uma fonte de calor, localizado em seu interior. Por meio do orifício tem-se a emissão de radiação por aquecimento. Qualquer radiação incidente no orifício será absorvida pelas paredes internas do objeto oco.

Figura 2. Modelo prático de um corpo negro.



Fonte: RAMALHO *et al.*, 2003

Com finalidade de explicar o caráter da radiação eletromagnética emitida pela superfície de um corpo negro, Max Planck apresentou a seguinte hipótese: um elétron que oscila com frequência f , emite (ou absorve) uma onda eletromagnética de igual frequência, entretanto, a energia não é emitida (ou absorvida) de maneira contínua. Ou seja, Planck considerou que a energia radiante era emitida de maneira discreta (porções descontínuas). Esses “pacotes” transportavam, cada qual, uma quantidade de energia E bem definida. Esses minúsculos “pacotes” foram denominados fótons – mais adiante veremos como eles também podem se comportar como partículas. A energia E para cada fóton é chamada de *quantum*, por isso que é a Teoria dos *Quanta* (em latim, *quanta* é plural de *quantum*).

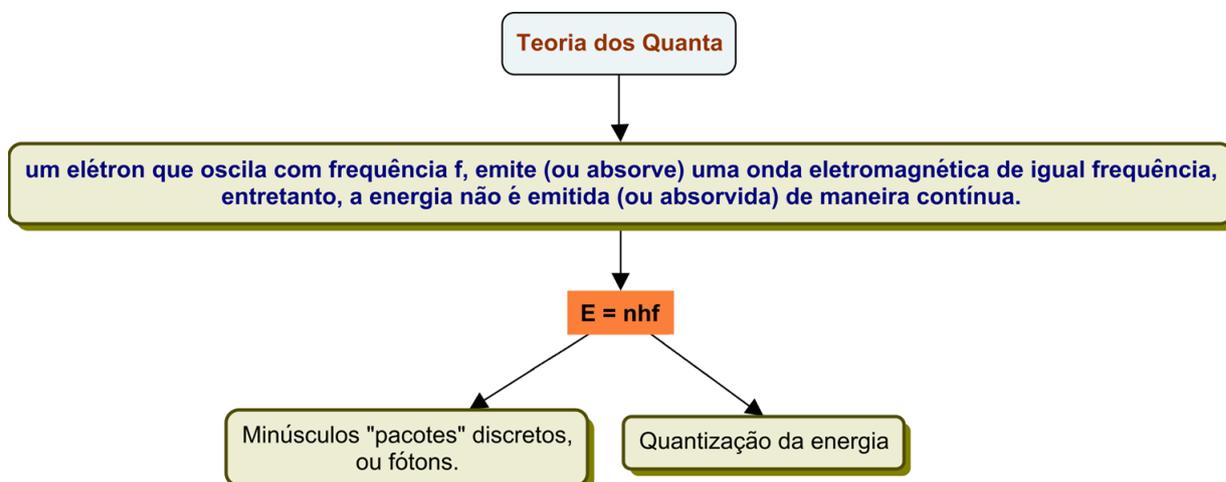
A partir dessa hipótese Planck estabeleceu uma relação quantizada para a energia:

$$E = nhf \quad (1)$$

em que n é um número inteiro e h é a constante de Planck e f a frequência. No SI, a constante de Planck é dada por $h = 6,63 \times 10^{-34}$ Js. Pela descoberta da quantização da energia, Planck recebeu o prêmio Nobel em 1918.

Um possível conhecimento prévio dos alunos para a assimilação dessa nova ideia de quantização, é a quantização da carga estudada no conteúdo de eletricidade. Na Figura 3 a seguir é apresentando um mapa conceitual com um básico resumo relacionado ao tema abordado nesta seção.

Figura 3. Mapa conceitual sobre a Teoria dos *Quanta*.



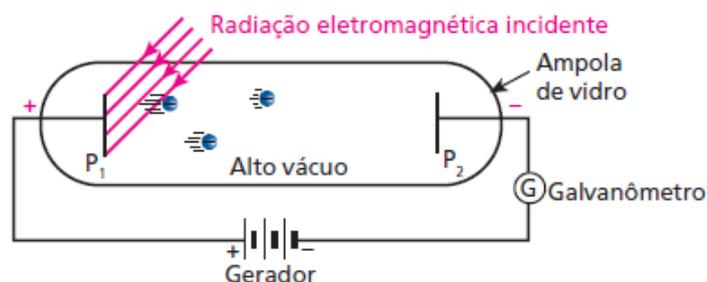
Fonte: elaborado pelo autor.

3.2 Efeito Fotoelétrico

A primeira observação referente a esse fenômeno foi feita pelo físico russo Alexander Stoletov, em 1872. Durante a retirada do ar de um pequeno frasco onde haviam duas placas metálicas, eletricamente isoladas uma da outra e ligadas aos terminais de uma bateria, ele observou o surgimento de uma corrente elétrica na bateria quando uma luz de mercúrio incidia sobre uma das placas (HELOU *et al.*, 2002). Também foi observado que essa corrente cessava quando a luz parava de iluminar a placa.

O experimento do efeito fotoelétrico está esquematizado na Figura 4. Quando uma radiação eletromagnética (luz) adequada incide na placa, o galvanômetro lê uma corrente fechando o circuito. Portanto, a energia da radiação eletromagnética proveniente da luz é suficiente para extrair os elétrons (fotoelétrons) da placa P_1 , adquirindo energia cinética o bastante para chegarem até a placa metálica P_2 .

Figura 4. Esquema do experimento do Efeito Fotoelétrico.



Fonte: HELOU *et al.*, 2003

Muitas questões na observação do efeito fotoelétrico não eram respondidas sob a luz da Física Clássica: (1) a energia cinética dos fotoelétrons não depende da intensidade da radiação incidente. Ou seja, intensidade mais alta deveria implicar em “ceder mais energia” ao elétron, mas isso não era observado. (2) Os elétrons deveriam demorar um tempo considerável para reunir energia necessária à extração. Pela teoria ondulatória temos que a intensidade da luz é definida pela sua potência (Energia/tempo), logo, intensidades baixas implicam em menor potência e maior tempo para os elétrons acumularem energia e serem arrancados da placa. Porém

esse não era o caso, o tempo de resposta era desprezível. (3) A energia cinética dos fotoelétrons depende da frequência. Pela teoria ondulatória isso não deveria acontecer, já que a potência (ou a energia) na onda eletromagnética está relacionada com a intensidade, não com a frequência.

Em 1905 Albert Einstein, levando em consideração a teoria dos *quanta*, desenvolveu uma teoria capaz de explicar o efeito fotoelétrico. Ele propôs que nessa situação a luz não trocava energia como onda, mas sim como partículas de luz (fótons). Isso acontecia através de uma série de colisões entre os elétrons da placa e essas partículas. Essas interações ocorrem instantaneamente, ficando então os elétrons da placa cada qual com uma energia adicional hf . E esses fótons só podem ser absorvidos um de cada vez, sem frações. Completamente de acordo com as hipóteses de Planck. Dessa maneira, Einstein foi capaz de explicar o motivo pelo qual a energia que o elétron absorve deve aumentar com a frequência e não com a intensidade.

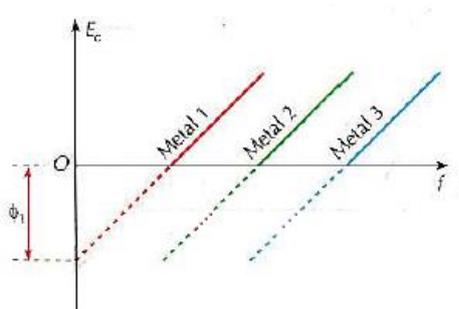
Para o elétron escapar da placa é preciso ter uma quantidade mínima de energia. A energia serve para o elétron vencer os impactos com os átomos adjacentes e a atração elétrica dos núcleos desses átomos. Essa energia é denominada função trabalho do metal φ . Para cada metal há um valor característico dessa função trabalho.

Sendo assim, a energia que o elétron recebe proveniente da colisão com o fóton incidente, é suficiente para ele ser extraído da placa, superando a função trabalho ; a energia excedente é conservada pelo elétron na forma de energia cinética E_{cin} , isto é:

$$hf = \varphi + E_{cin} \rightarrow E_{cin} = hf - \varphi \quad (2)$$

Podemos notar que a equação (2) descreve uma reta com coeficiente angular igual à constante h de Planck. A Figura 5 a seguir representa as energias cinéticas para diferentes metais, todas as retas com o mesmo coeficiente angular e φ distintos.

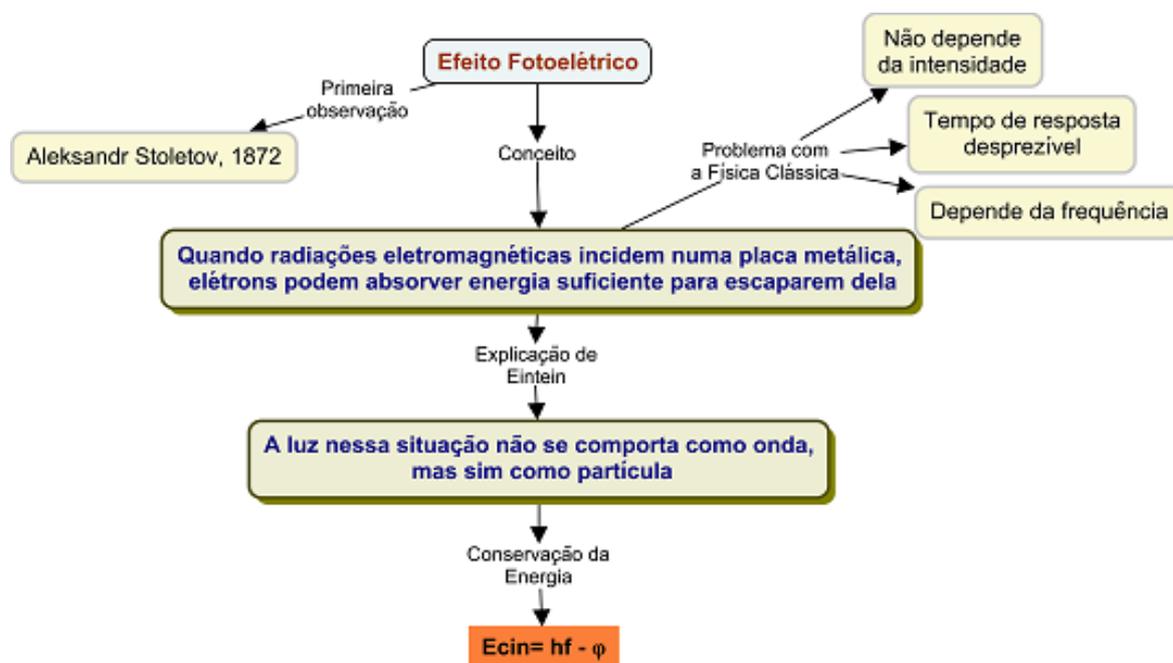
Figura 5. Energia cinética dos fotoelétrons em função da frequência da radiação incidente.



Fonte: adaptado de RAMALHO *et al.*, 2003.

Os conceitos usados para descrever o efeito fotoelétrico possuem uma matemática bem simples. Os conhecimentos prévios necessários para o seu entendimento, com exceção da quantização da energia, são conteúdos ministrados no ensino médio: princípio da conservação da energia mecânica, colisões, frequência e equação da reta. A Figura 6 apresenta um mapa conceitual contendo um resumo sobre as ideias básicas abordadas na explicação do efeito fotoelétrico.

Figura 6. Mapa conceitual sobre o Efeito fotoelétrico.



Fonte: elaborado pelo autor.

3.3 A Hipótese de De Broglie

Em vários experimentos a luz sempre era vista como onda, por exemplo, o padrão de interferência da luz ao passar por uma dupla fenda. Entretanto, quando analisamos os experimentos do efeito fotoelétrico, efeito Compton e raio-X de frenagem, a luz apresenta um caráter de partícula. Logo, não podemos mais entender a luz apenas como uma onda, mas sim como uma entidade que apresenta características de onda e de partícula.

Em 1924, o físico francês Louis De Broglie lançou a hipótese de que, se a luz manifesta uma natureza dual, uma partícula pode comportar-se de modo semelhante, apresentando também propriedades ondulatórias. Ou seja, propôs que um elétron, por exemplo, também pode comportar-se como uma onda de determinado comprimento de onda λ .

A Teoria da Relatividade nos diz que a energia E de um fóton relaciona-se com a quantidade de movimento P e a velocidade da luz c por meio da expressão:

$$E = Pc \tag{3}$$

Então, usando a relação de Planck para a energia de um fóton Eq. (1) e a relação da velocidade da onda para a luz, $c = \lambda f$, obtemos:

$$P = \frac{E}{c} = \frac{hf}{c} = \frac{h}{\lambda} \rightarrow \lambda = \frac{h}{P} \tag{4}$$

a Eq. (4) prevê o comprimento de onda de De Broglie λ de uma onda de matéria associada ao movimento de uma partícula material que tem quantidade de movimento P .

Em 1927, os físicos norte-americanos Clinton Joseph Davisson e Lester Halbert Germer, lançando um feixe de elétrons sobre um bloco de níquel, constataram um fenômeno até então considerado exclusivamente ondulatório: a difração de elétrons. Confirmando a hipótese de De Broglie.

3.3.1 Difração de Bragg

O raio-X foi descoberto em 1885, pelo pesquisador Wilhelm Roentgen, ele utilizou um tubo de Crookes para a emissão de raios catódicos a uma distância consideravelmente longa de uma tela de bário e acabou observando algo notável: a placa que continha bário em uma das suas faces iluminou-se, e isso acontecia mesmo se a superfície da placa estivesse virada ao contrário (LIMA *et al.* 2009). Com base em outros experimentos, Roentgen, chegou à conclusão de que se tratava de um novo tipo de raio invisível, capaz de atravessar materiais opacos à luz e a outras radiações conhecidas, o raio-X.

Após a descoberta do raio-X, William Bragg, em 1912, iniciou alguns estudos usando raio-X e cristais NaCl e ZnS. Com isso foi possível observar a difração do raio-X por meio dos cristais e elaborou uma lei que relaciona o comprimento de onda do raio-X com o ângulo de reflexão da onda.

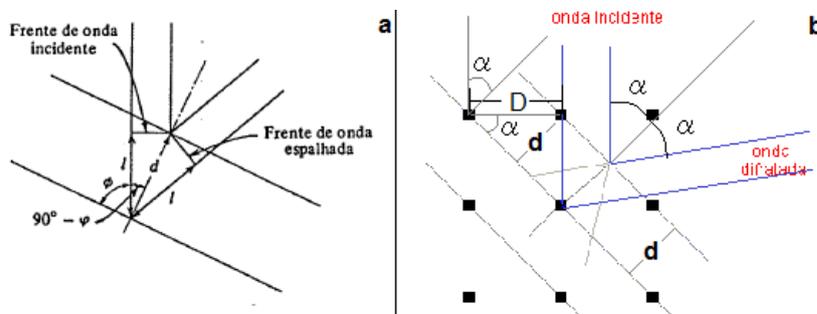
Vamos imaginar uma rede cristalina com um espaçamento d entre seus planos atômicos, conforme a Figura 7a. A diferença de caminho ótico entre raios refletidos por planos consecutivos é de $2d\text{sen}(\varphi)$. A interferência será construtiva se a diferença de caminho ótico ($2l$) for um múltiplo inteiro n do comprimento de onda λ . A Lei de Bragg é:

$$n\lambda = 2d.\text{sen}(\varphi) \quad (5)$$

Analisando a Figura 7b podemos chegar a uma outra relação que depende da separação entre os átomos, D , e fazendo $2\alpha = \theta$:

$$n\lambda = D.\text{sen}(\theta) \quad (6)$$

Figura 7. Ilustração da Lei de Bragg.



Fonte: adaptado de EINSBERG & RESNICK, 1994.

3.3.2 Experimento de Davisson-Germer

Se a proposta apresentada por De Broglie fosse verdadeira: os elétrons poderiam apresentar propriedades ondulatórias além das suas propriedades corpusculares. Então, experimentos de interferência e difração poderiam ser realizados com elétrons. O problema para se comprovar isso é o seguinte: para que haja interferência da onda em um experimento de fenda dupla, é necessário que o comprimento de onda do feixe incidente seja da mesma ordem de grandeza do espaçamento entre as fendas. Ou seja, o espaçamento entre as fendas deveria ser da ordem de nanômetros. A fenda criada pela distância entre átomos em um sólido apresenta essa ordem de grandeza.

Davisson e Germer, interessados em estudar o espalhamento de elétrons sobre sólidos, emitiram um feixe de elétrons sobre um bloco de níquel. Quando os elétrons eram espalhados, ao colidirem com a superfície do bloco, foi observado no anteparo que não havia elétron em todo lugar, havia apenas elétrons formando franjas. A existência dessas franjas demonstrava qualitativamente a hipótese de De Broglie, pois elas só podem ser explicadas como uma interferência construtiva de ondas espalhadas pelo arranjo periódico dos átomos do cristal. Esse fenômeno é idêntico ao espalhamento de raios-X pelos planos atômicos de um cristal e é explicado pela difração de Bragg.

A Figura 8a mostra esquematicamente o equipamento usado por Davisson e Germer. Elétrons acelerados por uma diferença de potencial de $V = 54 \text{ V}$ são

emitidos pelo canhão de elétrons G com energia cinética de 54 eV. O feixe incide sobre o bloco de níquel em C. O detector é colocado em D fazendo um ângulo $\theta = 50^\circ$ com o feixe incidente. A Figura 8b é uma ampliação do feixe incidente com seus respectivos valores experimentais, $\theta = 50^\circ$, $\varphi = 65^\circ$ e $d = 0.091 \text{ \AA}$. O comprimento de onda calculado a partir da Eq. 5, supondo $n = 1$, é

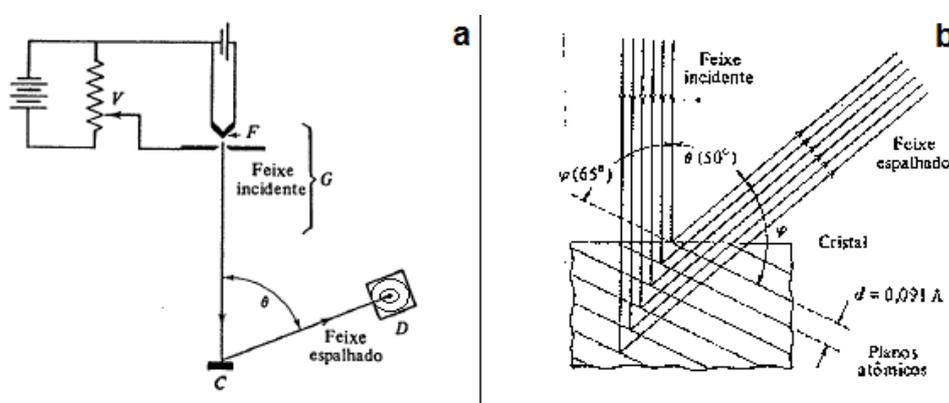
$$\lambda = 2 d \sin(\varphi) = 2 \times 0,091 \times 10^{-10} \times \sin(65^\circ) \rightarrow \lambda = 1,65 \text{ \AA}$$

O comprimento de onda de De Broglie, Eq. 4, para a energia cinética de 54 eV, é

$$\lambda = \frac{h}{P} = \frac{h}{\sqrt{2meV}} = \frac{6,6 \times 10^{-34} \text{ Js}}{\sqrt{(2 \times 9,1 \times 10^{-31} \times 54 \times 1,6 \times 10^{-19})}} \rightarrow \lambda = 1,65 \text{ \AA}$$

A consistência dos resultados demonstra quantitativamente a validade da relação de De Broglie.

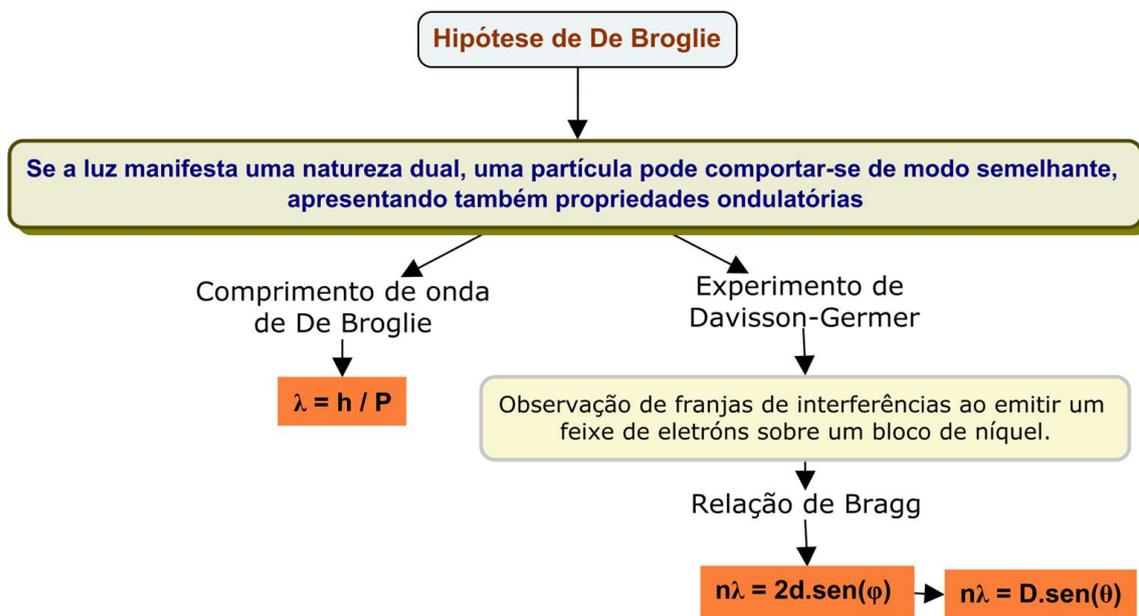
Figura 8. Esquema do equipamento usado por Davisson e Germer.



Fonte: adaptado de EINSBERG & RESNICK, 1994.

A matemática apresentada na explicação do experimento que comprovou a hipótese de De Broglie é bem simples, basta ter conhecimento de geometria básica. Os conhecimentos prévios utilizados aqui, salvo o resultado da Teoria da Relatividade de Einstein e a quantização de energia, são apresentados no decorrer do ensino médio: quantidade de movimento, comprimento de onda, interferência e difração. A Figura 9 apresenta um mapa conceitual contendo um resumo sobre as ideias básicas abordadas na explicação da hipótese de De Broglie.

Figura 9. Mapa conceitual sobre a Hipótese de De Broglie.



Fonte: elaborado pelo autor.

4. SIMULAÇÕES INTERATIVAS PhET

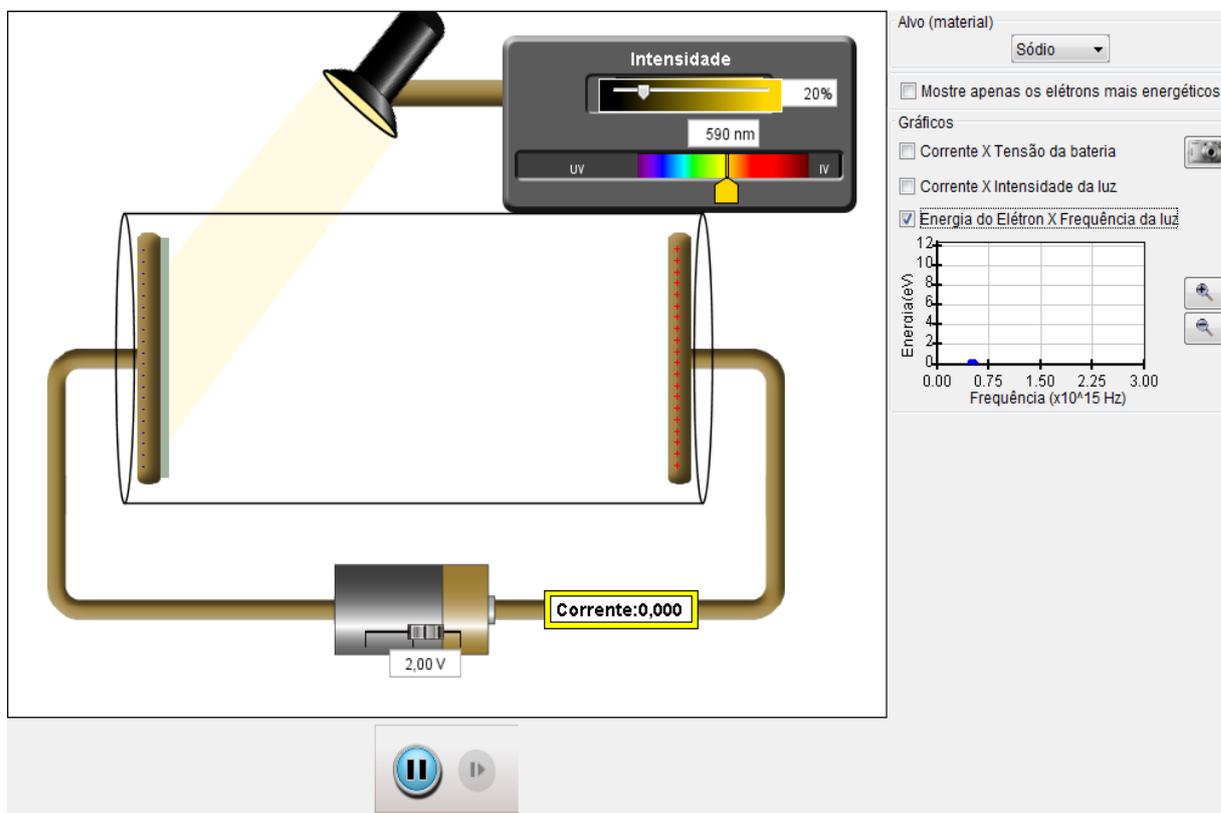
Podemos separar as simulações virtuais em dois grupos de acordo com suas características: as estáticas e as dinâmicas. Nas simulações estáticas, o educando tem quase nenhum controle sobre os parâmetros da simulação. Enquanto que nas simulações dinâmicas os dados podem ser constantemente modificados, desta forma o estudante tem maior controle e pode verificar as implicações de cada variação dos parâmetros e as suas consequências no resultado do experimento observado. O PhET é um exemplo de plataforma dinâmica. Nele é possível realizar diversas atividades e experimentos, ajudando os professores na elaboração de aulas mais dinâmicas.

Neste capítulo mostraremos o uso do simulador PhET como meio de auxiliar professores no ensino da natureza dual da luz e matéria. Para isto, será apresentado duas simulações: 1) Efeito Fotoelétrico, 2) Experimento de Davisson-Germer. Dessa maneira, o educador será capaz de ir além do ensino tradicional e criar maneiras de melhorar a assimilação e entendimento do conteúdo por parte dos alunos.

4.1 Simulação do Efeito Fotoelétrico

Como vimos na seção que trata do Efeito Fotoelétrico, muitas questões não eram respondidas com os conhecimentos da Física Clássica: (1) A energia cinética dos fotoelétrons não depende da intensidade da radiação incidente. (2) O tempo de resposta é desprezível. (3) A energia cinética dos fotoelétrons depende da frequência. A Figura 10 apresenta a interface da simulação desse experimento.

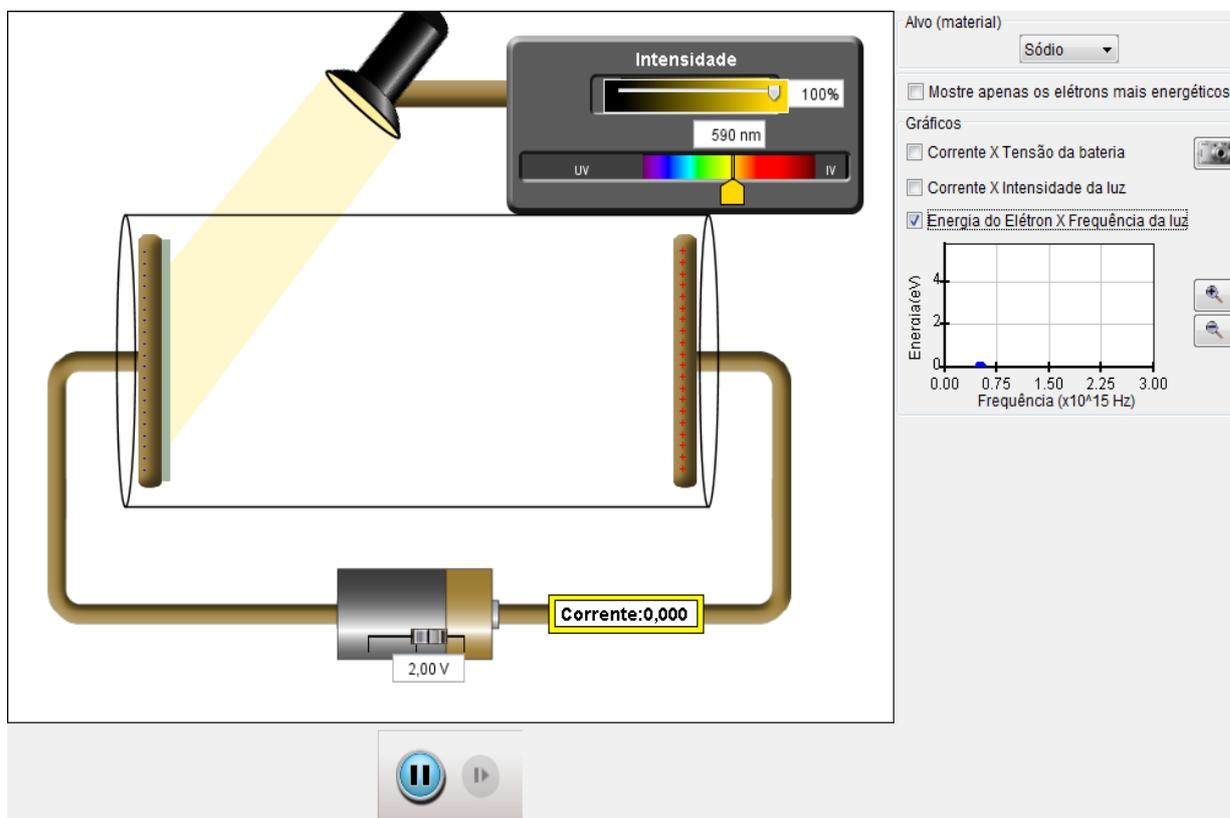
Figura 10. Simulação do experimento do Efeito Fotoelétrico, comprimento de onda de 590 nm e intensidade de 20% u.a..



Fonte: https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/legacy/photoelectric, 2022.

Para os parâmetros da simulação temos: diferença de potencial de 2.00 V, comprimento de onda de 590 nm (espectro visível da luz), o material usado na placa é sódio e a intensidade é de 20% u.a.. Vemos pelo gráfico (Energia do Elétron x Frequência) localizado à direita da imagem que não há energia do elétron e não há corrente no circuito. A Figura 11 mostra a mesma simulação, porém desta vez a intensidade está em 100% u.a..

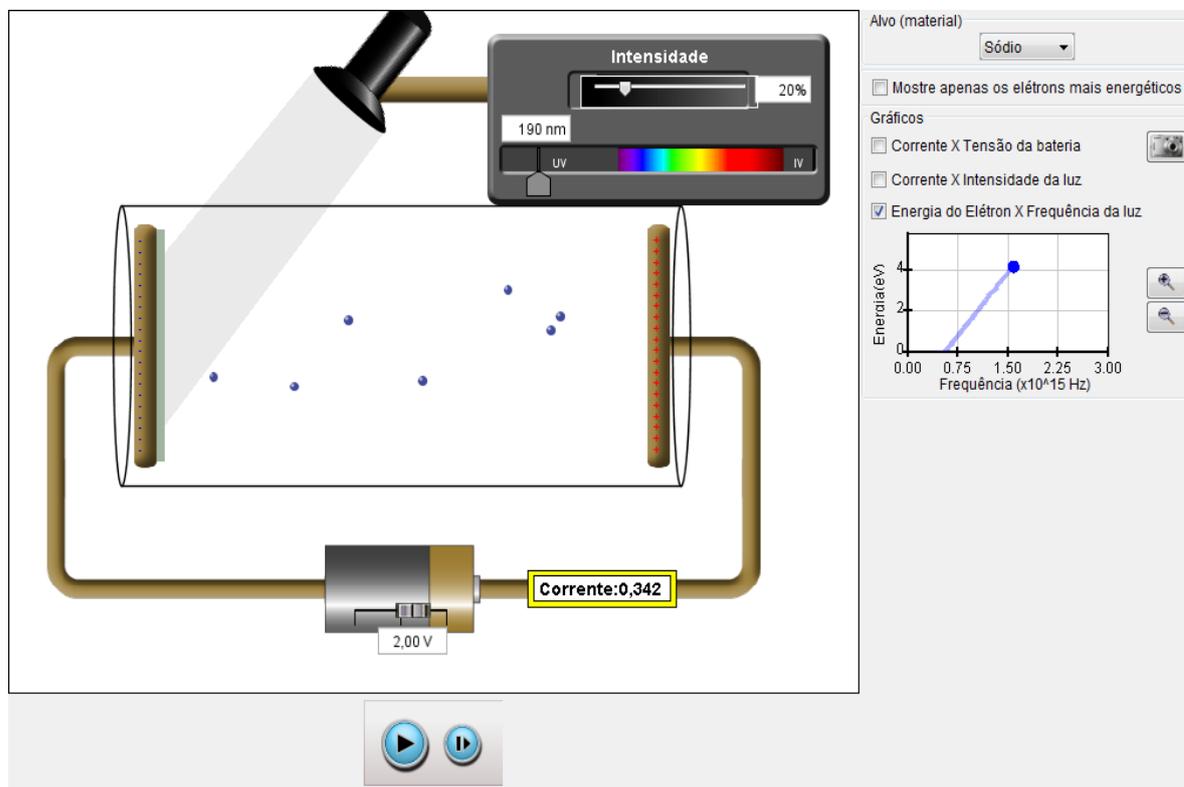
Figura 11. Simulação do experimento do Efeito Fotoelétrico, comprimento de onda de 590 nm intensidade de 100% u.a..



Fonte: https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/legacy/photoelectric, 2022.

Mais uma vez percebemos que não há energia do elétron e a corrente permanece marcando zero. Comprovando que a energia cinética dos elétrons não está vinculada a intensidade da radiação incidente. A Figura 12 mostra a mesma simulação, mas dessa vez voltamos para a intensidade em 20% u.a. e modificamos o comprimento de onda para 190 nm (espectro do ultra-violeta).

Figura 12. Simulação do experimento do Efeito Fotoelétrico, comprimento de onda de 190 nm e intensidade de 20% u.a..



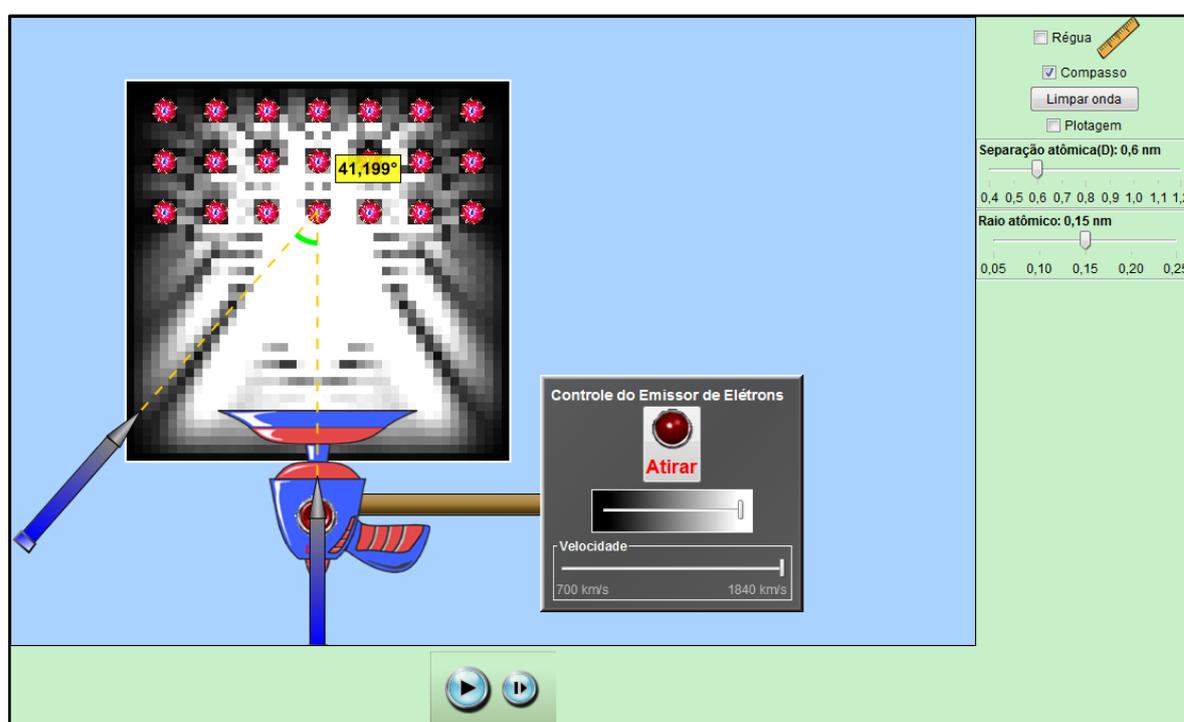
Fonte: https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/legacy/photoelectric, 2022.

Ao modificarmos o comprimento de onda, consequentemente modificamos a frequência ($c = \lambda f$). Dessa vez há corrente no circuito, $i = 0,342$ A. Podemos observar que o gráfico da Energia x Frequência apresenta uma reta, conforme foi demonstrado pela Eq. (2). A simulação no PhET é dinâmica, a reta vai se formando a medida que vamos modificando os valores da frequência. Assim, verificamos que a energia cinética dos fotoelétrons depende da frequência. A imagem capta apenas um *frame* do experimento, entretanto, assim que a frequência mínima é atingida, os elétrons podem ser observados saindo da placa à esquerda e indo para a placa da direita. Como a colisão entre o fóton e o elétron acontece instantaneamente, o tempo de resposta é desprezível e o elétron é arrancado da placa assim que a colisão ocorre. Outros parâmetros como a voltagem e o material da placa podem ser modificados e trabalhados em sala de aula, fazendo os devidos comentários e observações. Tudo isso de maneira interativa e dinâmica.

4.2 Simulação do Experimento de Davisson-Germer

Como foi mostrado na seção do Experimento de Davisson-Germer, a observação das franjas de interferência do anteparo só pode ser explicada mediante uma teoria ondulatória. Esse fenômeno é análogo a difração de Bragg sobre um cristal. A Figura 13 apresenta a interface da simulação desse experimento.

Figura 13. Simulação do Experimento de Davisson-Germer. $D = 0,6 \text{ nm}$ e $v = 1840 \text{ km/s}$.



Fonte: https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/legacy/davisson-germer, 2022.

Para os parâmetros da simulação temos a separação atômica, $D = 0,6 \text{ nm}$ e a velocidade de emissão dos elétrons, $v = 1840 \text{ km/s}$. Utilizando a Eq. (4), obtemos:

$$\lambda = \frac{h}{P} \rightarrow \lambda = \frac{6,62 \times 10^{-34}}{9,1 \times 10^{-31} \times 1,84 \times 10^6} \rightarrow \lambda = 3,95 \text{ \AA}$$

Para a Eq. (6), com $n = 1$ e $\lambda = 3,95 \text{ \AA}$, podemos encontrar o ângulo da franja de

interferência que aparece na simulação. Assim:

$$n\lambda = D.\text{sen}(\theta) \rightarrow \theta = \text{arcsen}(\lambda/D) \rightarrow \theta = 41,17^\circ$$

Usando a ferramenta “Compasso” da simulação, verificamos que uma franja de interferência faz um ângulo $\theta = 41,199^\circ$ com a normal. Constatando a eficácia da simulação.

A simulação do PhET acontece de maneira interativa. Os parâmetros da separação atômica, raio atômico e a velocidade de emissão dos elétrons podem ser alterados e trabalhados em sala de aula como maneira de avaliar o entendimento por parte dos discentes.

5. CONCLUSÃO

Nesse estudo, tivemos como objetivo inicial fazer a apresentação de uma proposta didática para o ensino da natureza dual da luz e da matéria focada no ensino médio. Buscamos criar um material adequado para os professores lecionarem de maneira lúdica e significativa aos educandos, saindo da educação tradicional baseada em exercícios de fixação. Utilizamos como base a filosofia cognitivista da teoria da aprendizagem significativa segundo Ausubel. Visamos associar os possíveis conhecimentos prévios, adquiridos ao longo das séries do nível médio (subsunçores), com novos conceitos da Física Moderna. Além de apresentar mapas conceituais que facilitam as associações dos conteúdos apresentados. Justificando a proposta de ensino, temos a necessidade de inserir temas de Física Moderna apresentada nos Parâmetros Curriculares Nacionais do Ensino Médio, para possibilitar aos alunos uma melhor compreensão do mundo. Como complemento, apresentamos simulações interativas da plataforma PhET, que podem auxiliar os docentes na elaboração de uma aula mais dinâmica e acessível a realidade do ensino público. Essa plataforma pode ser usada não apenas para o ensino de Física Moderna, mas também para os demais conteúdos.

Outro experimento que pode ser proposto aos discentes do nível médio, como forma de demonstrar a natureza corpuscular da luz, é o experimento do Efeito Compton. A explicação desse fenômeno requer um conhecimento básico sobre colisões, vetores e relatividade. O entendimento desse experimento pode facilitar a absorção por parte dos discentes desse novo conceito: a dualidade onda-partícula.

REFERÊNCIAS

- ARAUJO, G. S. **Ensino da dualidade onda-partícula por meio de vídeos de experimentos**. 2018. 96 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Ensino de Ciências do Instituto de Ciências Exatas e Biológicas) - Universidade Federal de Ouro, Ouro Preto, 2018.
- ARAÚJO, M. S. T.; ABIB M. L. V. S. Atividades experimentais no ensino de Física: diferentes enfoques, diferentes finalidades. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 25, n. 2, 2003.
- AUSUBEL, D. P.; NOVAK, J.D.; HANESIAN, H. **Psicologia educacional**. Rio de Janeiro: Interamericana, 1980.
- BRASIL. Secretaria de Educação Média e Tecnológica. **PCN+ Ensino Médio: orientações educacionais complementares aos parâmetros curriculares nacionais. ciências da natureza, física**. Brasília, 2001. Disponível em: <http://portal.mec.gov.br/seb/arquivos/pdf/CienciasNatureza.pdf>. Acesso em 01 jan. 2022.
- CARRARO, F. L.; PEREIRA, R. F.; O uso de simuladores virtuais do PhET como metodologia do ensino de eletrodinâmica. *In*: PARANÁ. Secretaria de Estado da Educação. Superintendência de Educação. **Os Desafios da Escola Pública Paranaense na Perspectiva do Professor PDE, 2014**. Curitiba: SEED/PR, 2016. v. 1. (Cadernos PDE). ISBN 978-85-8015-080-3. Disponível em: http://www.diaadiaeducacao.pr.gov.br/portals/cadernospde/pdebusca/producoes_pde/2014/2014_uem_fis_artigo_francisco_luiz_carraro.pdf . Acesso em: 02 jan. 2022.
- EISBERG, R.; RESNICK, R. **Física Quântica: átomos, moléculas, sólidos, núcleos e partículas**. 6. ed. Rio de Janeiro: Elsevier: Campus, 1994.
- GRASSELLI, E. C; GARDELLI, D. O Ensino da Física pela experimentação no Ensino Médio: da teoria à prática. *In*: PARANÁ. Secretaria de Estado da Educação. Superintendência de Educação. **Os Desafios da Escola Pública Paranaense na Perspectiva do Professor PDE, 2014**. Curitiba: SEED/PR, 2016. v. 1. (Cadernos PDE). ISBN 978-85-8015-080-3. Disponível em: http://www.diaadiaeducacao.pr.gov.br/portals/cadernospde/pdebusca/producoes_pde/2014/2014_uem_fis_artigo_erasmo_carlos_grasselli.pdf . Acesso em: 01 jan. 2022.
- HELOU, R. D.; GUALTER, J. B.; NEWTON, V. B. **Tópicos de Física**. 15 ed. São Paulo: Saraiva, 2003. v. 3. 464 p.
- HONORATO, C. A; DIAS, K. K. B.; DIAS, K. C. B. Aprendizagem Significativa: uma introdução à teoria. **Mediação**, Pires do Rio - GO, v. 13, n. 1, p. 22-37, jan./ jun. 2018.

LIMA, Rodrigo da Silva; AFONSO, Júlio Carlos; PIMENTEL, Luiz Cláudio Ferreira. Raios-x: fascinação, medo e ciência. **Quím. Nova**, São Paulo, v. 32, n. 1, p. 263-270, 2009. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-40422009000100044&lng=en&nrm=iso. Acesso em: 14 jan. 2022.

MOREIRA, A. M. **Subsídios teóricos para o professor pesquisador em ensino de ciências**. 2. ed. rev. Porto Alegre: Ufrgs, 2016.

MOREIRA, M. A. **Aprendizagem significativa: a teoria e textos complementares**. São Paulo: Livraria Editora da Física, 2012.

MOREIRA, M. A. **Mapas conceituais e Aprendizagem Significativa**. São Paulo: Centauro, 2010. 80 p.

PREUSSLER, V. V.; COSTA, C. D. S.; MÄHLMANN, C. M.; A Importância da Experimentação no Ensino de Física. *In*: VI SEMINÁRIO NACIONAL DA INFÂNCIA E DA EDUCAÇÃO, 2017, Santa Cruz do Sul. Disponível em: https://online.unisc.br/acadnet/anais/index.php/pibid_unisc/article/view/17861/4715. Acesso em: 14 jan. 2022

RAMALHO, F. J.; NICOLAU, G. F.; TOLEDO, P. A. S. **Os Fundamentos da Física**. 8. ed. São Paulo: Moderna, 2003. v. 3. 472 p.

TAKEUCHI, M.Y. **Estudo do uso de mapa conceitual na promoção de aprendizagem significativa de conteúdo de neurociência na graduação**. 2009. 85 f. Dissertação (Mestrado em Neurociência e Comportamento) - Instituto de Psicologia da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

VALENTE, J. A. Tecnologias e educação a distância no ensino superior: uso de metodologias ativas na graduação. **Trabalho & Educação**, Belo Horizonte, v. 28, n. 1, p. 97–113, 2019. DOI: 10.35699/2238-037X.2019.9871. Disponível em: <https://periodicos.ufmg.br/index.php/trabedu/article/view/9871>. Acesso em: 2 jan. 2022.

WIEMAN, Carl. PhET interactive simulations. s. d. https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/legacy/photoelectric. Acesso em: 12 jan. 2022.

WIEMAN, Carl. PhET interactive simulations. s. d. https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/legacy/davisson-germer. Acesso em: 21 jan. 2022.