



UNIVERSIDADE FEDERAL DO TOCANTINS  
CAMPUS DE ARAGUAÍNA - CIMBA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO MESTRADO NACIONAL  
PROFISSIONAL EM ENSINO DE FÍSICA

**ROGÉRIO GONÇALVES PINTO**

**PROPOSTA DE USO DE ANIMAÇÃO PARA DISCUSSÃO  
DA TRANSIÇÃO DA MECÂNICA CLÁSSICA PARA A  
MECÂNICA QUÂNTICA**



ROGÉRIO GONÇALVES PINTO

**PROPOSTA DE USO DE ANIMAÇÃO PARA DISCUSSÃO  
DA TRANSIÇÃO DA MECÂNICA CLÁSSICA PARA A  
MECÂNICA QUÂNTICA**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física no curso de Mestrado Profissional em Ensino de Física (MNPEF), como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Orientador: Dr. Daniel Augusto Barra de Oliveira

# ROGÉRIO GONÇALVES PINTO

## PROPOSTA DE USO DE ANIMAÇÃO PARA IMPLEMENTAR A TRANSIÇÃO DA MECÂNICA CLÁSSICA PARA A MECÂNICA QUÂNTICA

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física no Curso de Mestrado Profissional de Ensino de Física (MNPEF), como parte dos requisitos necessários à obtenção de título de Mestre em Ensino de Física.

Orientador: Dr. Daniel Augusto Barra de Oliveira

Data da aprovação: 02/02/2023

### BANCA EXAMINADORA



Documento assinado digitalmente  
DANIEL AUGUSTO BARRA DE OLIVEIRA  
Data: 07/02/2023 17:58:07-0300  
Verifique em <https://verificador.iti.br>

---

Dr. Daniel Augusto Barra de Oliveira (UFT-MNPEF)

Participação por videoconferência

Documento assinado digitalmente  
 REGINA LELIS DE SOUSA  
Data: 06/02/2023 22:49:52-0300  
Verifique em <https://verificador.iti.br>

---

Dra. Regina Lelis de Sousa (UFT-MNPEF)

Participação por videoconferência

Sebastião Rodrigues Moura 

Assinado de forma digital por Sebastião Rodrigues Moura  
Dados: 2023.02.06 17:56:52 -03'00'

---

Dr. Sebastião Rodrigues Moura (IFPA/UFPA-PPGDOC)

Participação por videoconferência

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**  
**Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Tocantins**

---

P659p Pinto, Rogério Gonçalves.  
Proposta de uso de animação para discussão da Mecânica Clássica para a Mecânica Quântica. / Rogério Gonçalves Pinto. – Araguaína, TO, 2023.  
55 f.

Dissertação (Mestrado Profissional) - Universidade Federal do Tocantins – Câmpus Universitário de Araguaína - Curso de Pós-Graduação (Mestrado) Profissional Nacional em Ensino de Física, 2023.  
Orientador: Daniel Augusto Barra de Oliveira

1. Mecânica Quântica. 2. Transição. 3. Aprendizagem Significativa. 4. Ensino. I. Título

**CDD 530**

---

TODOS OS DIREITOS RESERVADOS – A reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio deste documento é autorizado desde que citada a fonte. A violação dos direitos do autor (Lei nº 9.610/98) é crime estabelecido pelo artigo 184 do Código Penal.

**Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFT com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).**

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente a Deus, que me permitiu chegar até aqui com saúde e força, superando todas as dificuldades após um período tão delicado de pandemia. À Universidade Federal Norte do Tocantins – UFNT, pelo curso oferecido; a todo corpo docente do curso, em especial, ao professor Dr. Daniel Augusto Barra de Oliveira, orientador deste trabalho, que com muita paciência, apoio e confiança possibilitou a elaboração do mesmo, ao qual serei eternamente grato por compartilhar seus conhecimentos, experiências e tempo, bem como de sua compreensão e parceria.

Aos representantes das instituições educacionais envolvidas, por acreditarem neste trabalho e disponibilizarem as turmas para a realização do mesmo.

Agradeço aos meus pais, a toda minha família e familiares pelo apoio incondicional, em especial, minha esposa Gessica Barcelos de Azevedo e ao meu filho José Miguel Gonçalves Barcelos, que estiveram sempre presentes ao meu lado, mesmo nas horas difíceis de fadiga e cansaço.

A todos que direta ou indiretamente fizeram parte de minha formação, o meu muito obrigado.

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

## RESUMO

A Mecânica Quântica é um assunto restrito ao ensino superior de Física. Todavia se torna cada dia mais presente no cotidiano das pessoas. A crença de que esse conteúdo é incompreensível é um paradigma suscitado pela sociedade. Livros de divulgação científica suscitam discussões interessantes sobre o tema. Todavia o arcabouço teórico-científico encontra-se mitigado nas discussões do aluno do Ensino Médio. Esse trabalho traz um produto cujo pressuposto é compreender a necessidade de criação de uma nova teoria, a Mecânica Quântica, por um viés diferenciado, a partir de um vídeo didático disponibilizado ao professor. O vídeo é assessorado por uma cartilha (subproduto) que vai acompanhar a aplicação do produto educacional. A aplicação deste produto educacional concebido a partir dos alicerces da Teoria da Aprendizagem Significativa traz resultados satisfatórios para a elucidação de conceitos, até então desconhecidos pelo aluno do Ensino Médio.

**Palavras-chaves:** Ensino de Mecânica Quântica; Teoria da Aprendizagem Significativa, Vídeo de animação.

## **ABSTRACT**

Quantum Mechanics is a subject restricted to higher education in physics. However, it becomes more and more present in people's daily lives. The belief that this content is incomprehensible is a paradigm raised by society. Scientific books of scientific popularization raise interesting discussions on the subject. However, the theoretical-scientific framework is mitigated in high school students' discussions. This work brings a product whose assumption is to understand Quantum Mechanics from a different point of view based on a didactic video made available to the teacher. The video is assisted by a booklet (by-product) that will accompany the application of the educational product. The application of this educational product conceived from the Theory Meaningful Learning brings satisfactory results for the elucidation of concepts, hitherto unknown concepts by high school students.

**Key-words:** Teaching of Quantum Mechanics, Meaningful Learning Theory, Animation Video.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Modelo triádico de Gowin.....	16
Figura 2 - Representação do fenômeno da fotocondução num material semiconductor.....	30
Figura 3 - Representação do funcionamento de uma célula fotovoltaica de silício cristalizado.....	30

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Método e forma de coleta de dados.....	18
Tabela 2 - Sequência didática e data de aplicação do produto educacional .....	43
Tabela 3 - Análise dos resultados dos questionários aplicados na Turma A.....	45
Tabela 4 - Análise dos resultados dos questionários aplicados na Turma B.....	47

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>11</b>
<b>1.1. Objetivos</b> .....	<b>12</b>
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>12</b>
<b>2.1. Aprendizagem Significativa</b> .....	<b>12</b>
<b>2.2. Unidades Potencialmente Significativas (UEPs) e o método para coleta de dados</b> .....	<b>17</b>
<b>3. FÍSICA UTILIZADA NA APLICAÇÃO DO PRODUTO</b> .....	<b>20</b>
<b>3.1. Corpo Negro</b> .....	<b>20</b>
<b>3.2. Efeito Fotoelétrico</b> .....	<b>26</b>
<b>3.3. Princípio da Incerteza de Heisenberg</b> .....	<b>31</b>
<b>3.4. Dualidade onda-partícula</b> .....	<b>34</b>
<b>3.5. Equação de Schrödinger</b> .....	<b>36</b>
<b>4. TRABALHOS CORRELATOS</b> .....	<b>37</b>
<b>5. METODOLOGIA</b> .....	<b>38</b>
<b>6. RESULTADOS OBTIDOS</b> .....	<b>45</b>
<b>7. CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÃO</b> .....	<b>49</b>
<b>8. REFERÊNCIAS</b> .....	<b>50</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A Mecânica Quântica é uma teoria cujos alicerces teóricos remontam ao início do século XX. Planck conseguiu explicar o fenômeno da radiação do corpo negro introduzindo a quantização de energia. Einstein, por sua vez, atribuiu natureza corpuscular à luz ao descrever o efeito fotoelétrico. O aumento da frequência da luz consistia em um aumento da colisão de fótons contra a placa metálica com posterior injeção de elétrons. Vale ressaltar que esta ejeção de fotoelétrons não é possível para qualquer valor de frequência e sim a uma específica, de acordo com o material. Heisenberg postulou o princípio da incerteza e se entendeu que não se poderia determinar posição e velocidade de uma partícula ao mesmo tempo, com precisão. As conquistas científicas da Mecânica Quântica levaram à introdução de novos modelos atômicos que divergiam dos que se conhecia até então.

Hoje a nanotecnologia é alicerçada sobre os modelos atômicos modernos, que permitem a criação e o estudo de novos materiais com aplicação tecnológica. A própria Biologia pode ser modelada a partir das noções do atomismo moderno. A estrutura do ácido desoxirribonucleico – ADN (deoxyribonucleic acid – DNA) pode ser compreendida a nível atômico-molecular. Novas drogas são propostas a partir de modelos moleculares baseados na Mecânica Quântica. Não obstante às conquistas em nível microscópico, as suas aplicações são visíveis em objetos macroscópicos como placas solares e portas de abertura automática, que funcionam a partir de sensores fotovoltaicos.

O produto educacional é derivado dessa tentativa de compreender a Teoria Quântica, a partir de uma perspectiva simples e utilitária. Simples nesse caso quer dizer que o objetivo do produto educacional foi trazer uma compreensão da Teoria Quântica para discente de Ensino Médio, sem evocar o conceito de equações diferenciais parciais de várias variáveis, por exemplo; o utilitarismo aqui evoca o conceito do uso ordinário que a Mecânica Quântica tem nos nossos afazeres diários.

A presente dissertação visa fazer uma análise desse produto didático em escolas públicas. O produto educacional consiste de uma pequena animação conjugada com um pequeno livreto explicativo (cartilha) de como melhor usar o produto em sala de aula. A fim de analisar a eficiência pedagógica do material fez-se uso de questionários no ambiente do Google forms. Para fins de concepção das atividades foi usada a Teoria da Aprendizagem Significativa - TAS, na qual o conhecimento prévio do aluno deve ser ancorado com a nova informação a ser inserida em sua estrutura cognitiva, tendo como articulação professor, aluno e materiais na construção deste novo significado (AUSUBEL, 1978).

Esse trabalho tem como proposta final apresentar de modo didático conceitos da Teoria Quântica em um material instrucional usado pelo professor de Física do Ensino Médio. Esse material deve ser empregado como complemento à aula do professor que visa introduzir esse assunto.

A dissertação provê conceitos da Teoria Quântica juntos com conceitos da Aprendizagem Significativa. Após esse referencial teórico são analisados os resultados da aplicação do produto para discentes do Ensino Médio.

### **1.1. Objetivos**

O trabalho tem como objetivo criar um vídeo com seu respectivo manual de uso que permita introduzir conceitos iniciais de Mecânica Quântica para discentes do Ensino Médio de forma qualitativa. A aplicação do produto educacional deve ser norteadada pelos pressupostos da Teoria da Aprendizagem Significativa conduzindo o discente à discussões avançadas a partir de certos subsunçores, presentes em seu dia a dia escolar.

## **2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

### **2.1. APRENDIZAGEM SIGNIFICATIVA**

Uma situação de ensino pode ser descrita como aquela em que uma pessoa contribui intencionalmente para que outra aprenda algo. Entretanto, cabe considerar que o conhecimento individual não é um objeto concreto e diretamente observável, ao se caracterizar como um conjunto de representações mentais que são construídas a partir de uma dinâmica interpretativa entre a figura do sujeito do saber e os objetos que o rodeiam. O que permite concluir que o ato de ensinar e aprender é mediado por diferentes representações de um mesmo conhecimento, a partir do entendimento do professor, do aluno e do material de ensino (AGRA *et al.*, 2019).

Assim, Agra *et al.* (2019) argumentam que dentro desta dinâmica a ação de aprender remete a um processo que é contínuo, pessoal, intencional, ativo, dinâmico e interativo e que gera como resultado um produto que é sempre provisório e formado por conhecimentos particulares produzidos em dado contexto e momento.

Isto evidencia a necessidade de se reconhecer e divulgar alternativas pedagógicas que possam ser adotadas em ambientes formais de ensino objetivando favorecer o processo de intelecção dentro do contexto da aprendizagem significativa, proposta desenvolvida pelo psicólogo David Paul Ausubel em 1963 (AUSUBEL, 1978).

Ausubel, durante sua infância e adolescência foi alvo de preconceito, o que resultou em uma revolta contra a educação violenta e humilhante que recebera, entretanto, esta frustração foi positiva ao fazer com que ele se especializasse na linha cognitivista e construtivista ao se formar em psicologia e buscando se opor a sua experiência escolar, desenvolveu sua Teoria da Aprendizagem Significativa (AUSUBEL, 1978).

Segundo Masini e Moreira (2017), Ausubel se graduou em Medicina e Psicologia, se especializando em Psicologia do Desenvolvimento. Ao longo de sua trajetória na docência, ocupou cátedras relacionadas com a Psicologia e Psiquiatria em universidades americanas, canadenses, suíças, italianas e alemãs, se aposentando em 1973. No que diz respeito ao campo da psiquiatria, seu objeto de interesse foi o desenvolvimento do ego, tóxico dependência e psiquiatria forense, sendo autor de diversos livros.

No Brasil, Ausubel ficou conhecido como o psicólogo da aprendizagem e psicólogo da educação, o que para Masini e Moreira (2017) reduz um pouco o espectro amplo de suas contribuições ao campo do aprendizado, ao ter como foco mais o processo de aprender, o que implica em levar em consideração toda a dialética envolvida na convergência do campo biológico, afetivo e social por parte de quem percebe, compreende, elabora e interage.

Masini e Moreira (2017) afirmam que a obra *The Psychology of Meaningful Verbal Learning* (1968) publicada por Ausubel é resultado de sua trajetória profissional no campo clínico e acadêmico, lhe permitindo afirmar que a aprendizagem significativa e seu resultado, a obtenção de significado, podem ser descritos como um fenômeno psicológico puramente idiossincrático e que se traduz pela integração de novos dados através de uma operação complexa por meio da qual ações, interações, retroações e determinações convergem na consolidação de conhecimentos.

A Teoria da Aprendizagem Significativa propõe com o novo conhecimento uma interação não arbitrária e não literal de ensino a partir de conhecimentos prévios relevantes, fazendo com que um dado conhecimento prévio possa ganhar novos significados, se tornando mais rico, refinado e diferenciado, tendo a oportunidade de servir de âncora para novas aprendizagens significativas (AGRA *et al.*, 2019). A grande aceitação de sua proposta fez com que recebesse da Associação Americana de Psicologia, o Prêmio Thorndike pela contribuição psicológica à Educação (MASINI; MOREIRA, 2017).

De acordo com Agra *et al.* (2019), Ausubel parte da constatação de que entre todos os fatores que influenciam a aprendizagem, o mais importante é a bagagem cultural e intelectual que o aluno já possui, podendo ser considerado como ponto de partida, o que implica em levar em consideração a totalidade do ser cultural e social no que se refere a suas manifestações e

linguagens corporais, afetivas e cognitivas, haja vista que

o atual processo de ensino-aprendizagem tem colaborado para uma aprendizagem mecânica, em que os alunos são acostumados a memorizar conceitos, ofuscando, desse modo, o pensar. Os conhecimentos aprendidos mecanicamente somente são aplicáveis às situações já conhecidas e que não implicam a compreensão, pois não instrumentalizam o aluno a agir com autonomia diante de sua realidade (AGRA *et al.*, 2019, p.259).

Dentro desta proposta, as informações às quais os alunos são apresentados no ambiente escolar podem ser assimiladas a partir de relações entre os conteúdos evidenciados pelo professor e as informações já consolidadas na mente do aluno. O que permite dizer que o processo de aprendizagem ocorre de modo não-literal e não arbitrário, sendo muito mais rico do que um processo mecânico de aprendizagem fundamentado na decoração de conteúdos (BIASOTTO; FIM; KRIPKA, 2020).

Darroz (2018) afirma que a proposta da Aprendizagem Significativa se opõe frontalmente a modelos caracterizados pela aprendizagem mecânica, pela importância que é dada para os ditos subsunçores, presentes na estrutura cognitiva do aluno, enquanto que em uma aprendizagem mecânica se observa que não há um trabalho voltado para fazer com que as novas informações interajam com as informações já presentes nesta estrutura cognitiva.

De acordo com Biasotto, Fim e Kripka (2020) o subsunçor é um conhecimento que se encontra bem consolidado na estrutura cognitiva do sujeito que aprende e que, por meio da interação contribui para dar significado a outros conhecimentos, pois cada indivíduo, em sua particularidade, apresenta subsunçores distintos.

Agra *et al.* (2019) consideram que, dentro do que chamam de perspectiva behaviorista de aprendizagem, a passividade, a criticidade e a reprodutividade de conhecimentos por parte do aluno representam um impeditivo para o desenvolvimento da criatividade, e mesmo que sejam respeitados os ritmos individuais, isto não é feito paralelamente ao incentivo à curiosidade e motivação intrínsecas como condição fundamental para o aprendizado.

Compreende-se que dentro deste modelo mecânico de aprendizagem, a apatia pode acabar se manifestando, uma vez que se torna dependente de ações individuais do professor para que o crescimento cognitivo ocorra, o que se explica pois não existe um esforço verdadeiro por parte do aluno em favor do aprendizado, apenas da memorização de um conteúdo, sem que sejam estabelecidas ligações diretas ou indiretas entre assuntos correlatos (AGRA *et al.*, 2019), haja vista que

é a chamada **aprendizagem mecânica** (*rote learning* em inglês), um armazenamento cognitivo, na memória de curto prazo, literal, arbitrário, sem significado, que não requer compreensão e resulta em aplicação mecânica a situações conhecidas. Por isso, os alunos estudam sempre na véspera das provas e por isso, também, os alunos reclamam que a matéria não foi dada quando situações novas, não conhecidas, “caem nas provas” (MOREIRA, 2021, p.26).

Entretanto, Ausubel não deixa de considerar que estes dois paradigmas de aprendizagem podem se complementar, ao reconhecer que uma pessoa pode em um primeiro momento aprender algo mecanicamente para então depois perceber que este aprendizado pode se relacionar com algum outro conhecimento já internalizado (DARROZ, 2018).

Isto contribui para evidenciar como a proposta da aprendizagem significativa se fundamenta principalmente sobre os subsunçores, sendo que quanto mais conexões entre os conhecimentos estiverem sendo estabelecidos dentro da mente humana, mais complexa irá se tornar a estrutura cognitiva, abrindo caminho para uma aprendizagem verdadeiramente significativa. Biasotto, Fim e Kripka (2020) consideram ainda que uma estrutura cognitiva organizada favorece a aprendizagem significativa, pela mesma lógica que leva à compreensão de que concepções imprecisas sobre determinados conceitos impedem o estabelecimento de conexões entre os conhecimentos, haja vista que

a **interação cognitiva** entre conhecimentos novos e prévios é a característica chave da aprendizagem significativa. Nesta interação, o novo conhecimento deve relacionar-se de maneira não arbitrária, i.e., não com qualquer conhecimento prévio, mas com algum que seja especificamente relevante para dar-lhe significado. Deve também relacionar-se de maneira substantiva, i.e., não ao pé da letra, com aquilo que o aprendiz já sabe (MOREIRA, 2021, p.26).

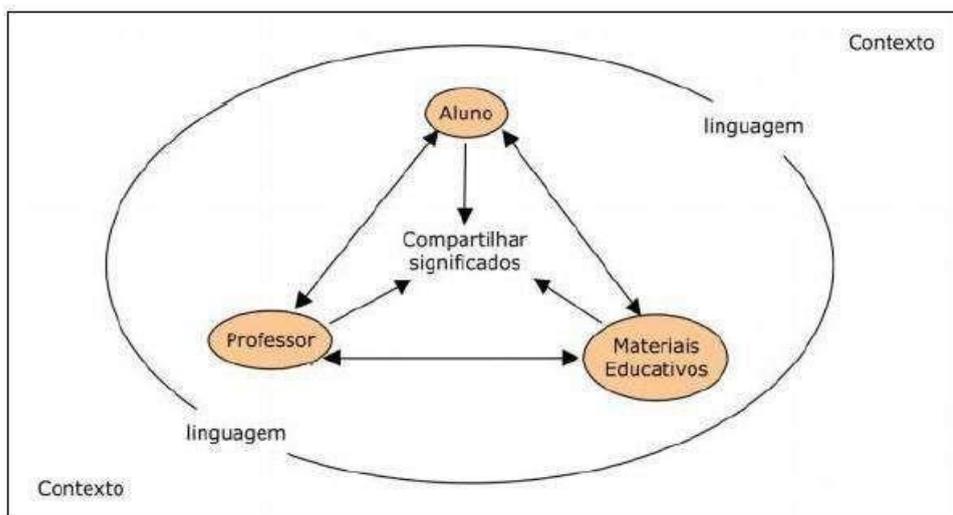
Cabe considerar a existência de algumas condições a fim de que esta aprendizagem significativa ocorra. Primeiramente, os conteúdos a serem internalizados devem ser dotados de estruturação lógica e devem poder ser relacionados com a estrutura cognitiva do estudante, de forma não arbitrária e não literal, o que permitirá a manifestação do aprendizado significativo. A segunda condição para que isto ocorra é a disposição por parte do aluno em aprender, sem ser através de memorizações. Satisfeitas estas duas condições, certamente a aprendizagem significativa se manifestará (DARROZ, 2018).

Moreira (2021) acrescenta também que os materiais instrucionais devem favorecer o aprendizado significativo, o que significa dizer que o material deve fazer sentido para quem quer aprender, o que implica em estar bem organizado e estruturado, cabendo ao aluno ter a disposição necessária para conferir significados aos conteúdos presentes no material.

Ainda de acordo com Moreira (2021) o resultado desta dinâmica é a manifestação de uma estrutura cognitiva de conhecimentos hierarquicamente organizados dentro de um escopo de conhecimentos, embora seja necessário reconhecer que esta hierarquia não é permanente, pois, com o tempo, a estrutura cognitiva vai se alterando conforme vão ocorrendo os processos de diferenciação progressiva e reconciliação integrativa.

Esta tríade pode ser relacionada com o modelo de ensino proposto por Gowin, que também acreditou existir uma relação entre professor, materiais educativos e o aluno por meio de um processo de compartilhamento de significados entre aluno e professor no que se refere aos conhecimentos presentes nos materiais educativos. Sendo que o conhecimento se consuma quando o significado que o aluno apreende do material é o mesmo significado que o professor imagina para este relacionamento entre as partes (Figura 1) (MACHADO, 2021).

**Figura 1 - Modelo triádico de Gowin**



Fonte: Moreira (2006)

De acordo com Machado (2021) o produto desta relação entre professor, materiais educativos e aluno se apresenta como o compartilhamento de significados pelo surgimento de uma linguagem rica em conceitos que operam dentro do contexto de um determinado assunto, quebrando assim como paradigma degenerativo que, por ser auto contido, impede que esta dinâmica entre as três pontas se manifeste.

## 2.2. Unidades Potencialmente Significativas (UEPS) e o método para coleta de dados

As Unidades de Ensino Potencialmente Significativas - UEPS são sequencias didáticas de ensino cujo fundamento se baseia na TAS, objetivando a facilitação da aprendizagem significativa, Moreira (2011). Na prática, A UEPS proporciona condições para que a ancoragem das novas informações com os subsunçores possam ocorrer da melhor maneira possível, ajudando o discente perceber a relação do que está sendo estudado em sala de aula com o seu cotidiano, obtendo assim uma aprendizagem significativa ao assunto estudado (DARROZ, 2018).

A educação brasileira, do nível básico ao superior, vem passando por alterações, principalmente no que se refere à metodologia, o que suscita reflexões sobre dois pontos principais em relação ao processo de aprendizagem; o conhecimento inerte e a aprendizagem passiva. O primeiro aspecto faz referência a possibilidade de se adquirir um conhecimento não acessível e que não pode ser utilizado da maneira adequada, enquanto que a aprendizagem passiva remete a situação na qual o sujeito está inserido em uma ação autodirigida e intencional (RIBEIRO; SOUZA; MOREIRA, 2018).

Como exemplo deste tipo de situação, Ribeiro, Souza e Moreira (2018) descrevem o caso em que a abordagem adotada para se apresentar um conteúdo, desconectada de embasamentos experimentais, acaba por fazer com que os conteúdos sejam desvinculados das relações que poderiam ser exploradas com fatos do cotidiano e aspectos fenomenológicos correlatos, haja vista que

no decorrer dos anos, metodologias vêm sendo desenvolvidas em diversas áreas da educação para melhorar a aprendizagem dos alunos, dentre elas, destaca-se o conhecimento prévio. (...) O papel do professor é de assegurar um ambiente, na qual os alunos possam desenvolver seus conceitos e refleti-los, e aceitar diferentes pontos de vista, de maneira que essas ideias possam ser avaliadas, e que sejam válidas em comparação com as teorias transmitidas pelo professor. Dessa maneira, o docente tendo o conhecimento prévio dos alunos, pode planejar estratégias para reconstruí-los, utilizando-se de situações problemas que possam confrontá-los (PEREIRA *et al.*, 2017, p.1).

Cabe considerar que nem todo conhecimento prévio passa pelo teste da ciência, pois pode ser formado por concepções errôneas ou alternativas. Neste caso, não é possível ao aluno estabelecer correlações entre os conteúdos ministrados em sala de aula com este tipo de conhecimento prévio pelo fato de o professor estar apresentando concepções que são aceitas

cientificamente, o que evidencia a necessidade de reconhecer que o aprendizado não se dá simplesmente por uma operação de substituição, ao ser progressiva e evolutiva, pautada pela racionalidade (MOREIRA, 2021).

No caso da pesquisa de Ribeiro, Souza e Moreira (2018), reconheceu-se a necessidade de identificar materiais potencialmente significativos dentro do contexto da evolução conceitual dos estudantes e como abordagem metodológica de coleta e registro de dados, optou-se pela análise prévia, atividades que integravam a UEPS e análise final (Tabela 1). A sigla UEPs faz referência à Unidade de Ensino Potencialmente Significativos, um termo proposto por Moreira (2011) para descrever qualquer sequência didática que tenha pertinência com o marco teórico da aprendizagem significativa.

**Tabela 1 - Método e forma de coleta de dados**

Método de coleta dos dados	Forma de registro dos dados
Análise prévia	Teste inicial para análise dos conhecimentos prévios dos alunos; Mapa conceitual para análise dos conhecimentos prévios dos alunos.
Atividades na UEPS	Registro das respostas dos alunos às atividades contidas na UEPS.
Análise final	Mapa conceitual para análise da evolução conceitual; Teste final

Fonte: Ribeiro, Souza e Moreira (2018)

Em sua pesquisa, Pereira *et al.* (2017) buscam identificar o conhecimento prévio de uma turma sobre corantes. E para este fim, os questionamentos feitos foram os seguintes:

- i. “O que são corantes?”;
- ii. “Para que servem?”;
- iii. “Quais os impactos que eles podem causar na natureza?”; e
- iv. “Quais os métodos utilizados para a remoção de corantes em meios aquáticos?”.

Neste trabalho, mostra-se que é possível reconhecer o conhecimento prévio dos alunos

quando os conceitos discutidos pelo docente envolvem nomes em relação aos quais os alunos já são familiarizados, o que facilita a compreensão e a transferência de conhecimentos, caracterizando uma aprendizagem que de fato é mais significativa (PEREIRA *et al.*, 2017).

Com o encerramento das atividades práticas, foi aplicado juntamente aos alunos um questionário com a finalidade de avaliar o que os alunos aprenderam com a oficina e se ela contribuiu significativamente para o aprendizado. As perguntas descritivas cumpriram a proposta do experimento; a aplicação do corante em meio aquoso juntamente com a argila contribuiu para a internalização de conhecimentos sobre descontaminação de águas. Como resultado, Pereira *et al.* (2017) puderam identificar que a oficina favoreceu o engajamento dos participantes e o aprendizado, haja vista que

essa progressividade da aprendizagem significativa tem a ver com outro processo importante para a organização cognitiva, o da **consolidação**. (...) consequência imediata da premissa de que o conhecimento prévio é a variável que mais influencia a aquisição significativa de novos conhecimentos, pois, se assim for, nada mais natural do que estimular o domínio de conhecimentos prévios antes de usá-los para dar significado a esses novos conhecimentos (MOREIRA, 2021, p. 30).

Stange, Moreira e Villagrà (2018) consideram que a realização de investigações antes e após a execução de uma atividade permite promover a tabulação das respostas dissertativas, contribuindo assim para uma análise mais aprofundada acerca da eficiência das respostas em relação ao objetivo traçado pelo professor e à abordagem adotada.

Cabe considerar que cada aluno irá descrever a seu modo a sua experiência com a atividade e, por sua vez, o professor deverá estabelecer juízo de pertinência e aplicabilidade no que se refere aos objetivos da questão em análise, se pautando pela resposta ideal e os conceitos necessários relacionados com o questionário (STANGE; MOREIRA; VILLAGRÀ, 2018).

Stange, Moreira e Villagrà (2018) reconhecem a importância de se discutir o tema dos questionários ao identificarem que os professores, em geral, embora tenham por hábito aplicar questionários antes e após uma atividade, não sabem explorar todo o potencial que estes questionários têm a oferecer; ao optarem por não desenvolverem representações gráficas dos resultados como forma de identificar tendências e padrões no que se refere à posturas e atitudes tomadas pelos alunos, o que poderia enriquecer o resultado deste tipo de avaliação.

### 3. FÍSICA UTILIZADA NA APLICAÇÃO DO PRODUTO

#### 3.1. Corpo Negro

Na Física, um corpo negro é um objeto hipotético que absorve toda a radiação eletromagnética que incide sobre ele: nenhuma luz que passa por ele é refletida. Objetos com essa propriedade não podem ser vistos em princípio, daí o nome corpo negro (OLIVEIRA – FILHO; SARAIVA, 2004). Apesar do nome, os corpos negros emitem radiação, o que permite determinar sua temperatura  $T$ . Em equilíbrio termodinâmico, um corpo negro ideal irradia energia na mesma proporção em que absorve energia, o que é uma das propriedades que o torna uma fonte ideal de radiação térmica. Na natureza, não existe corpo negro perfeito porque nenhum objeto pode ter absorção e emissão perfeitas (EISBERG; RESNICK, 1979).

Independentemente da sua composição, verifica-se que todos os corpos negros à mesma temperatura  $T$  emitem radiação térmica com o mesmo espectro. Da mesma forma, todos os objetos com temperatura acima do zero absoluto emitem radiação térmica. À medida que a temperatura da fonte de luz aumenta, o espectro de corpo negro exibe picos de emissão em comprimentos de onda mais curtos, começando com ondas de rádio e passando por micro-ondas, infravermelho, visível, ultravioleta, raios X e radiação gama (CORREIA, 2018). À temperatura ambiente (cerca de 300 K), corpos negros emitem na região do infravermelho do espectro.

À medida que a temperatura aumenta algumas centenas de graus Celsius, os corpos negros começam a emitir radiação em comprimentos de onda visíveis ao olho humano (entre 380 e 780 nanômetros). A cor com o maior comprimento de onda é o vermelho, seguido por cores como um arco-íris, até o violeta, o menor comprimento de onda no espectro visível (YNOUE *et al.*, 2017).

Para explicar a natureza das curvas de distribuição espectral da radiação do corpo negro foi aplicada a Mecânica Clássica, usando a teoria das ondas eletromagnéticas de Maxwell. De acordo com essa teoria, a fonte de energia radiante (na origem das ondas eletromagnéticas) são as partículas vibratórias chamadas osciladores e esses osciladores podem irradiar ou absorver qualquer quantidade de energia (GONTIJO; RODRIGUES, 2021). A frequência da energia (ou da onda) emitida é igual à frequência do oscilador. Um bom modelo de corpo negro são as estrelas, como o sol, que produzem radiação em seu interior que é emitida para o universo, aquecendo nosso planeta. A cor branca do sol corresponde a uma temperatura superficial de aproximadamente 5.750 K (PICAZIO, 2011).

Muitos estudiosos tentaram conciliar o conceito de corpo negro com a distribuição de energia prevista pela termodinâmica, mas o espectro obtido experimentalmente, embora válido para baixas frequências, é bem diferente da previsão teórica, o que pode ser explicado pela Lei de Rayleigh-Jeans para a radiação de corpo negro (OLIVEIRA – FILHO; SARAIVA, 2004).

Antes da hipótese de Planck, os físicos tentaram descrever a radiação espectral da radiação eletromagnética pela Física Clássica. A aproximação baseada na Física Clássica é conhecida como lei de Rayleigh-Jeans (VÁZQUEZ; HANSLMEIER, 2005). Da mesma forma, como para a lei de Planck, a lei de Rayleigh-Jeans fornece a radiação espectral de um corpo em função da frequência  $\nu$  na temperatura absoluta  $T$  (equação 1).

$$B_{\nu}(T) = \frac{2\nu^2 k_B T}{c^2} \quad (1)$$

Onde:

$B_{\nu}(T)$  = É a radiação espectral (a potência por unidade de ângulo sólido e unidade de área normal à propagação) densidade de frequência  $\nu$  radiação por unidade de frequência em equilíbrio térmico à temperatura  $T$ .

$c$  = É a velocidade da luz no vácuo.

$k_B$  = É a constante de Boltzmann.

$\nu$  = É a frequência da radiação eletromagnética.

$T$  = É a temperatura absoluta do corpo.

A emissão de radiação do corpo negro apresenta uma distribuição espectral que depende apenas da temperatura  $T$ . Foi Wien, que em 1893, observou pela primeira vez o comprimento de onda máximo emitido era inversamente proporcional a temperatura do corpo negro e escreveu a equação que recebeu seu nome (equação 2) (ANTUNES, 2012).

$$\lambda_m \cdot T = constante = 2,898 \cdot 10^{-3} m \cdot K \quad (2)$$

Onde:

$\lambda_m$  = Comprimento de onda para o qual a emissão por unidade de área é máxima (m).

$T$  = Temperatura do corpo negro (K).

Embora a lei de Rayleigh-Jeans funcione muito bem para grandes comprimentos de onda, ela falha para pequenos comprimentos de onda (catástrofe ultravioleta).

Objetos reais nunca se comportam como corpos negros ideais. A radiação emitida é uma

fração do que a emissão ideal deveria ser. A emissividade de um material especifica o quão bem um corpo irradia energia em comparação à um corpo negro. Esta emissividade depende de fatores como temperatura, ângulo de emissão e o comprimento de onda. De qualquer maneira, é comum na engenharia assumir que a emissividade espectral de uma superfície não depende do comprimento de onda, então a emissividade é uma constante. Isso é conhecido como corpo cinza (OLIVEIRA – FILHO; SARAIVA, 2004).

Nos estudos da radiação de corpo negro, Joseph Stefan chegou à expressão (equação 3) que mostra que a potência irradiada por unidade de área varia apenas com a temperatura, ela não depende do material de sua cor entre outras características do corpo.

$$R = \frac{P}{A} = \sigma T^4 \quad (3)$$

Onde:

A = Área de emissão do corpo negro;

R = Potência irradiada por unidade de área (W/m<sup>2</sup>)

P = Potência total irradiada (W);

$\sigma = 5,6705 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$  - também chamada de constante de Stefan;

T = Temperatura (K).

O valor de R também indica a rapidez com a qual o corpo emite energia, por exemplo se a temperatura for triplicada a energia emitida será aumentada ( $3^4=81$ ) vezes ou se for quadruplicada a nova emissão será aumentada ( $4^4=256$ ) vezes. Corpos reais irradiam menos energia por unidade de área que o corpo negro, para calcular a energia irradiada por esses corpos é necessária a inclusão de um parâmetro denominado emissividade ( $\epsilon$ ), a emissividade depende das características do material (cor, composição de sua superfície), seu valor fica entre zero e um (CARVALHO, 2021).

As leis de Wien (equação 2) dão uma boa aproximação do valor máximo de emissão em cada temperatura, mas foi Max Planck quem, ao introduzir a constante de Planck em 1901 como um recurso puramente matemático, determinou a quantificação da energia, que mais tarde levou à Teoria Quântica, que por sua vez levou ao estudo e surgimento da Mecânica Quântica (CARUSO; OGURI, 2006).

O espectro eletromagnético previsto pela equação 1 concorda com os resultados experimentais em baixas frequências (grandes comprimentos de onda), mas discorda fortemente em altas frequências (curtos comprimentos de onda). Essa inconsistência entre as observações

e as previsões da Física Clássica é comumente conhecida como catástrofe ultravioleta ou catástrofe Rayleigh-Jeans. Calculando a quantidade total de energia radiante (ou seja, a soma das emissões em todas as faixas de frequência), pode-se mostrar que um corpo negro, nesse caso, liberaria uma quantidade infinita de energia, o que está em contradição com a lei de conservação de energia (STONE, 2015; VÁZQUEZ; HANSLMEIER, 2005).

Experimentalmente, a radiação mais próxima de um corpo negro ideal é aquela emitida por pequenas aberturas em grandes cavidades. Qualquer luz que entra pela abertura tem que ricochetear nas paredes da cavidade várias vezes antes de escapar, por isso tem uma probabilidade muito alta de ser absorvida pelas paredes no processo, independentemente do material ou comprimento de onda da radiação (GONNELLI – NETTO, 2014).

Calcular a curva formada pelo espectro de radiação emitido por um corpo negro foi um dos maiores desafios enfrentados pelo campo da Física Teórica no final do século XIX. Este problema foi finalmente resolvido em 1901 por Max Planck usando a lei de Planck da radiação do corpo negro. Ele modificou a lei de radiação de Wien com base na termodinâmica e eletromagnetismo e encontrou uma fórmula matemática que poderia descrever dados experimentais satisfatoriamente (BRAGA, 2018).

Para encontrar uma explicação Física, Planck então assumiu que a energia de oscilação na cavidade foi quantificada (equação 4). Einstein estudou essa ideia e em 1905 surgiu com a quantificação da radiação eletromagnética para explicar o efeito fotoelétrico (SOARES, 2016).

$$B_{\nu}(\nu, T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{\frac{h\nu}{ek_B T} - 1} \quad (4)$$

Onde:

$B_{\nu}(\nu, T)$  = É a radiação espectral (a potência por unidade de ângulo sólido e unidade de área normal à propagação) densidade de frequência  $\nu$  radiação por unidade de frequência em equilíbrio térmico à temperatura  $T$ .

$h$  = É a constante de Planck.

$c$  = É a velocidade da luz no vácuo.

$k_B$  = É a constante de Boltzmann.

$\nu$  = É a frequência da radiação eletromagnética.

$T$  = É a temperatura absoluta do corpo.

A Lei de Planck para radiação de corpo negro exprime a radiação espectral em função do comprimento de onda e da temperatura do corpo negro. O comprimento de onda está

relacionado a frequência como (supondo propagação de uma onda no vácuo):

$$\lambda = \frac{c}{\nu} \quad (5)$$

Onde:

$\lambda$  = Comprimento de onda em m.

$c$  = Velocidade da luz =  $3.00 \times 10^8$  m.s<sup>-1</sup>.

$\nu$  = Frequência em Hz (ou s<sup>-1</sup>).

Pode-se escrever a Lei de Planck em termos de energia espectral:

$$u(\nu, T) = \frac{4\pi}{c} I(\nu, T) = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} \frac{1}{\frac{h\nu}{e^{kT} - 1}} \quad (6)$$

A energia espectral também pode ser expressa como função do comprimento de onda:

$$u(\lambda, T) = \frac{8\pi hc}{\lambda^5} \frac{1}{\frac{hc}{e^{\lambda kT} - 1}} \quad (7)$$

Onde:

$I$  = Radiação espectral.

$\nu$  = Frequência em hertz.

$T$  = Temperatura do corpo negro.

$h$  = Constante de Planck.

$c$  = Velocidade da luz no vácuo.

$e$  = Número de Euler.

$k$  = Constante de Boltzmann.

Ao tentar solucionar a discrepância entre a teoria e a experiência, Planck foi levado a considerar a hipótese de uma violação da lei da equipartição da energia sobre o qual a teoria se baseava. Planck supôs que a energia poderia ter apenas certos valores discretos, em vez de qualquer valor, e que os valores discretos fossem uniformemente distribuídos. Isto é, tomou  $E = 0, \Delta E, 2\Delta E, 3\Delta E, 4\Delta E, \dots$  como o conjunto de valores possíveis da energia. Aqui  $\Delta E$  é o intervalo constante entre valores possíveis sucessivos da energia (CARUSO; OGURI, 2006).

Planck supôs também que as energias sucessivas e a frequência da radiação emitida fossem grandezas proporcionais, portanto, escrito na forma da equação 8:

$$\Delta E = h\nu \quad (8)$$

Onde:

$h$  = é a constante de proporcionalidade.

$\nu$  = Frequência em hertz.

Cálculos posteriores permitiram a Planck determinar o valor da constante  $h$ , por meio do melhor ajuste entre sua teoria aos dados experimentais. O valor obtido por ele estava bem próximo do valor atualmente aceito, que é:  $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$  J.s. Esta constante, muito famosa e corrente na Mecânica Quântica, é chamada constante de Planck. A fórmula obtida o permitiu calcular o espectro de corpo negro em total acordo com os resultados experimentais (PICAZIO, 2011).

A contribuição de Planck pode ser colocada na forma do seguinte postulado: qualquer ente Físico com um grau de liberdade cuja "coordenada" é uma função senoidal do tempo (isto é, executa oscilações harmônicas simples) pode possuir apenas energias totais que satisfaçam a relação  $E = nh\nu$  onde  $\nu$  é a frequência da oscilação,  $h$  uma constante universal e  $n$  só pode assumir valores inteiros (EISBERG; RESNICK, 1979).

A energia do ente que obedece ao postulado de Planck é dita quantizada, os estados de energia possíveis são ditos estados quantizados, e o  $n$  é dito número quântico (EISBERG; RESNICK, 1979). A ideia de que a energia é quantizada apesar de parecer apenas um truque matemático para explicar os resultados experimentais da radiação de corpo negro, foi fundamental para o desenvolvimento de um dos pilares da Física Moderna, a Mecânica Quântica (SEGRÈ, 1987).

Esses avanços teóricos levaram à substituição do eletromagnetismo clássico pelos quanta eletrodinâmicos (quantum). Hoje, esses quanta são chamados de fótons. Além disso, levou ao desenvolvimento de versões quânticas da Mecânica Estatística, chamadas estatísticas de Fermi-Dirac e estatísticas de Bose-Einstein, cada uma das quais se aplica a diferentes classes de partículas.

### 3.2. Efeito Fotoelétrico

O efeito fotoelétrico é um fenômeno em que partículas eletricamente carregadas são liberadas de um material quando ele absorve radiação eletromagnética. O efeito fotoelétrico é muitas vezes definido como a ejeção de elétrons de uma placa de metal quando a luz incide sobre ela. Em uma definição mais ampla, a energia radiante pode ser luz infravermelha, visível ou ultravioleta, raios X ou raios gama; o material pode ser sólido, líquido ou gasoso; e as partículas liberadas podem ser íons (átomos ou moléculas eletricamente carregados), bem como elétrons (BASSALO, 1994).

O fenômeno foi fundamentalmente significativo no desenvolvimento da Física Moderna por causa das questões intrigantes relativas à natureza da luz – comportamento de partículas versus comportamento ondulatório – que foram finalmente resolvidos por Albert Einstein em 1905. O efeito fotoelétrico continua sendo importante para pesquisas em áreas da ciência dos materiais, para astrofísica, além de formar a base para uma variedade de dispositivos úteis (BATISTA, 2019).

O efeito fotoelétrico foi descoberto em 1887 pelo Físico alemão Heinrich Rudolf Hertz. Em conexão com o trabalho em ondas de rádio, Hertz observou que, quando a luz ultravioleta brilha em dois eletrodos de metal com uma voltagem aplicada sobre eles, a radiação eletromagnética é capaz de alterar a voltagem, na qual ocorre a centelha (HALLIDAY *et al.*, 1991). Essa relação entre luz e eletricidade (daí fotoelétrica) foi esclarecida experimentalmente em 1902 por outro Físico alemão, Philipp Lenard. Ele demonstrou que partículas eletricamente carregadas são liberadas de uma superfície metálica quando iluminada e que essas partículas são idênticas aos elétrons, que haviam sido descobertos pelo Físico britânico Joseph John Thomson em 1897 (ARONS; PEPPARD, 1965).

Outras pesquisas mostraram que o efeito fotoelétrico representa uma interação entre luz e matéria que não pode ser explicada pela Física Clássica, que descreve a luz como uma onda eletromagnética. Uma observação inexplicável foi que o máximo da energia cinética dos elétrons liberados não variou com a intensidade da luz, como esperado de acordo com a teoria ondulatória, mas era proporcional à frequência da luz. O que a intensidade da luz determinava era o número de elétrons liberados do metal (medido como uma corrente elétrica). Outra observação intrigante foi que praticamente não havia intervalo de tempo entre a chegada da radiação e a emissão de elétrons (ALMEIDA, 2020).

A consideração desses comportamentos inesperados levou Albert Einstein a formular em 1905 uma nova teoria corpuscular da luz na qual cada partícula de luz, ou fóton, contém

uma quantidade fixa de energia, ou quantum, que depende da frequência da luz. Em particular, um fóton carrega uma energia  $E$  igual a  $hf$ , onde  $f$  é a frequência da luz  $h$  é a constante universal que o Físico alemão Max Planck derivou em 1900 para explicar a distribuição de comprimento de onda da radiação de corpo negro – isto é, a radiação eletromagnética emitida por um corpo quente (HALLIDAY *et al.*, 1991). A relação também pode ser escrita na forma equivalente (equação 9).

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (9)$$

Onde  $c$  é a velocidade da luz e  $\lambda$  é seu comprimento de onda, mostrando que a energia de um fóton é inversamente proporcional ao seu comprimento de onda.

Estas observações sugerem que o efeito fotoelétrico seja interpretado como uma colisão do elétron com uma partícula projétil, desde que esta tenha energia suficiente para arrancar o elétron do metal. Se admitirmos que o projétil é um fóton com energia  $hf$ , onde  $f$  é a frequência da radiação, então a conservação da energia exige que a energia cinética dos elétrons seja igual à diferença entre a energia fornecida pelo fóton e a energia  $\phi$ , necessária para remover o elétron do metal. A grandeza  $\phi$  é denominada função trabalho do metal. (HALLIDAY *et al.*, 1991). Por conservação de energia, esse raciocínio levou Einstein à equação fotoelétrica (equação 10).

$$E_k = hf - \phi \quad (10)$$

Onde:

$E_k$  = É a energia cinética máxima do elétron ejetado.

$h$  = É a constante universal que o físico alemão Max Planck derivou em 1900 para explicar a distribuição de comprimento de onda da radiação de corpo negro.

$f$  = É a frequência da luz.

$\phi$  = Função de trabalho eletrônica, que representa a energia necessária para o elétron escapar do metal.

A determinação da energia cinética máxima dos elétrons é simples, bastando aumentar o potencial (negativo) da placa coletora, de modo que a corrente se anule. Quando a corrente se anula, tem-se a igualdade  $E = eV$ , onde  $e$  é a carga do elétron, e  $v$  é chamado potencial de corte

(equação 11).

$$eV = hv - \phi \quad (11)$$

Onde:

$h$  = Constante universal.

$v$  = Frequência da luz incidente.

$\phi$  = Função trabalho do metal.

Embora o modelo de Einstein descrevesse a emissão de elétrons de uma placa iluminada, sua hipótese do fóton era suficientemente radical para não ser universalmente aceita até receber uma verificação experimental adicional (BEISER, 1968). Uma corroboração adicional ocorreu em 1916, quando medições extremamente precisas do Físico americano Robert Millikan verificaram a equação de Einstein e mostraram com alta precisão que o valor da constante  $h$  de Einstein era o mesmo que a constante de Planck. Einstein foi finalmente premiado com o Prêmio Nobel de Física em 1921 por explicar o efeito fotoelétrico (FUCHS, 1972).

Em 1922, o Físico americano Arthur Compton mediu a mudança no comprimento de onda dos raios X depois que eles interagiam com elétrons livres e mostrou que a mudança poderia ser calculada tratando os raios X como feitos de fótons. Compton recebeu o Prêmio Nobel de Física de 1927 por este trabalho. Em 1931, o matemático britânico Ralph Howard Fowler ampliou a compreensão da emissão fotoelétrica estabelecendo a relação entre a corrente fotoelétrica e a temperatura em metais.

Também visto em altas energias de fótons é o Efeito Compton, que surge quando um fóton de raios X ou gama colide com um elétron. O efeito pode ser analisado pelos mesmos princípios que regem a colisão entre quaisquer dois corpos, incluindo a conservação do momento. O fóton perde energia para o elétron, uma diminuição que corresponde a um aumento do comprimento de onda do fóton de acordo com a relação de Einstein (equação 9). Quando a colisão é tal que o elétron e o fóton formam ângulos retos entre si, o comprimento de onda do fóton aumenta em uma quantidade característica chamada de comprimento de onda Compton ( $2,43 \times 10^{-12}$  metros) (SUSSUCHI *et al.*, 2010).

Esforços adicionais mostraram que a radiação eletromagnética também pode emitir elétrons em isolantes, que não conduzem eletricidade, e em semicondutores, uma variedade de isoladores que conduzem eletricidade apenas sob certas circunstâncias (BEISER, 1968; FUCHS, 1972; HALLIDAY *et al.*, 1991).

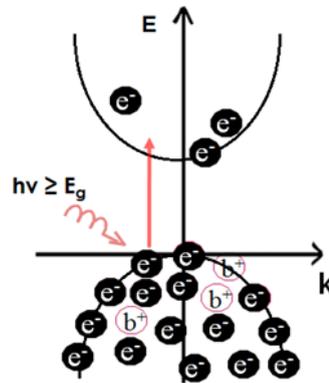
De acordo com a Mecânica Quântica, os elétrons ligados aos átomos estão em configurações eletrônicas específicas. A banda de energia mais alta ocupada por elétrons para um determinado material é conhecida como banda de valência e o grau em que ela é preenchida determina em grande parte a condutividade elétrica do material. Em um condutor típico (metal), a banda de valência é parcialmente preenchida com elétrons, que se movem prontamente de átomo para átomo, transportando uma corrente (SMITH; HASHEMI, 2013).

Em um bom isolante, como vidro ou borracha, a banda de valência é preenchida e esses elétrons de valência têm muito pouca mobilidade. Assim como os isolantes, os semicondutores geralmente têm suas bandas de valência preenchidas, mas, ao contrário dos isolantes, é necessária muito pouca energia para excitar um elétron da banda de valência para a próxima banda de energia permitida – conhecida como banda de condução, porque qualquer elétron excitado para este nível de energia mais alto é relativamente livre (ATKINS *et al.*, 2018).

Dependendo de como o material semicondutor é configurado, essa radiação pode aumentar sua condutividade elétrica adicionando a uma corrente elétrica já induzida por uma tensão aplicada (fotocondutividade), ou pode gerar uma tensão independentemente de quaisquer fontes de tensão externas (efeito fotovoltaico). A fotocondutividade surge dos elétrons liberados pela luz e também de um fluxo de carga positiva.

Os elétrons elevados à banda de condução correspondem a cargas negativas ausentes na banda de valência, chamadas de “buracos”. Tanto os elétrons quanto os buracos aumentam o fluxo de corrente quando o semicondutor é iluminado. Quando se incide uma determinada luz sobre um material, se a sua energia for maior que a energia de *gap*,  $E_g$ , ocorre a promoção de elétrons da banda de valência para a banda de condução, dando origem ao efeito da fotocondução (Figura 2).

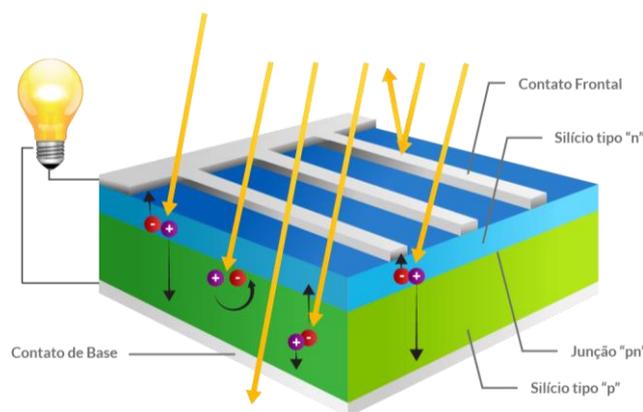
**Figura 2 - Representação do fenômeno da fotocondução num material semiconductor.**



FONTE: Pirralho (2017).

O painel solar (placa solar fotovoltaica) é um ótimo exemplo de efeito fotovoltaico. Tal equipamento é composto por células fotovoltaicas fabricadas a partir de materiais semicondutores, como o silício dopado, que absorvem a luz do sol e geram energia elétrica pelo efeito fotovoltaico (Figura 3). A placa solar funciona quando os fótons atingem as células fotovoltaicas, fazendo com que alguns dos elétrons que circundam os átomos se desprendam e migrem para a parte da célula de silício que está com ausência de elétrons, criando uma corrente elétrica, chamada de energia solar fotovoltaica (TRIX SOLAR, 2022).

**Figura 3 - Representação do funcionamento de uma célula fotovoltaica de silício cristalizado.**



FONTE: Trix Solar (2022).

Outros efeitos fotoelétricos são causados por radiação em frequências mais altas, como raios X e raios gama. Esses fótons de energia mais alta podem até liberar elétrons perto do núcleo atômico, onde estão fortemente ligados. Quando esse elétron interno é ejetado, um

elétron externo de maior energia cai rapidamente para preencher a vaga. O excesso de energia resulta na emissão de um ou mais elétrons adicionais do átomo, que é chamado de Efeito Auger (TODESCATTO, 2019).

Assim, foi possível responder aos três fatores citados anteriormente, antes não explicados sobre o efeito fotoelétrico (TAVOLARO; CAVALCANTE, 2002); o primeiro é facilmente explicado pelo conceito dos fótons, pois ao aumentar a intensidade da luz, acarreta no aumento da quantidade de fótons e não na energia que cada um contém.

Na segunda objeção, tem-se que independentemente da quantidade de fótons chegando até os elétrons, nenhum terá energia suficiente, individualmente, para fazer com que sobre energia cinética para o movimento do elétron.

Quanto ao terceiro fator, é eliminado pelo fato de o fóton ser um pacote de energia concentrado, que é imediatamente absorvido por algum átomo, causando a imediata emissão de um fotoelétron. Assim, com estas explicações, outros cientistas começaram a aceitar a teoria da quantização da energia proposta por Planck para o corpo negro.

### **3.3. Princípio da Incerteza de Heisenberg**

O princípio da incerteza de Heisenberg afirma que é impossível medir ou calcular exatamente, tanto a posição quanto o momento de um objeto simultaneamente. Este princípio é baseado na dualidade onda-partícula da matéria. Embora o princípio da incerteza de Heisenberg possa ser ignorado no mundo macroscópico (as incertezas na posição e velocidade de objetos com massas relativamente grandes são desprezíveis), ele possui um valor significativo no mundo quântico (SILVA, 2015). Como os átomos e as partículas subatômicas têm massas muito pequenas, qualquer aumento na precisão de suas posições será acompanhado por um aumento na incerteza associada às suas velocidades (ATKINS *et al.*, 2018).

Outra implicação do princípio da incerteza é que é impossível medir com precisão a energia de um sistema em uma quantidade finita de tempo.

O princípio de Heisenberg é aplicável a todas as ondas de matéria. O erro de medição de quaisquer duas propriedades conjugadas, cujas dimensões sejam joule sec, como posição-momento, tempo-energia, serão guiados pelo valor de Heisenberg (CHANG, 2005).

Para ilustrar o princípio da incerteza de Heisenberg, considere um exemplo onde a posição de um elétron é medida. Para medir a posição de um objeto, um fóton deve colidir com ele e retornar ao dispositivo de medição. Como os fótons mantêm algum momento finito, uma transferência de momento ocorrerá quando o fóton colidir com o elétron. Essa transferência de

momento fará com que o momento do elétron aumente. Assim, qualquer tentativa de medir a posição de uma partícula aumentará a incerteza no valor de seu momento (DILAMONHI, 2020). O Princípio de Heisenberg tem grande influência na ciência praticada e como os experimentos são projetados. Considere medir o momento ou a posição de uma partícula. Para criar uma medida, deve ocorrer uma interação com a partícula que irá alterar suas outras variáveis (KNIGHT, 2004). Uma medição mais precisa da posição do elétron exigiria uma partícula com um comprimento de onda menor e, portanto, mais energética, mas isso alteraria ainda mais o momento durante a colisão (MORTIMER, 1993). Em síntese, além das definições matemáticas, pode-se entender isso imaginando que quanto mais cuidadosamente se tenta medir a posição, mais perturbação existe no sistema, resultando em mudanças no momento.

Quando o fóton entra em contato com o elétron, uma parte de seu momento é transferida e o elétron agora se moverá em relação a esse valor, dependendo da razão de suas massas (CHANG, 2005).

Aplicando o mesmo exemplo a um objeto macroscópico (digamos, uma bola de basquete), pode-se entender que o princípio da incerteza de Heisenberg tem um impacto insignificante nas medições no mundo macroscópico. Ao medir a posição da bola de basquete, ainda haverá uma transferência de momento dos fótons para a bola. No entanto, a massa do fóton é muito menor que a massa da bola. Portanto, qualquer momento transmitido pelo fóton à bola pode ser desprezado (DILAMONHI, 2020).

O princípio da incerteza de Heisenberg impõe uma restrição à precisão da medição simultânea de posição e momento. Quanto mais precisa for nossa medição de posição, menos precisa será nossa medição de momento e vice-versa. A origem física do princípio da incerteza de Heisenberg está no sistema quântico. A determinação da posição por meio de uma medição no sistema o perturba o suficiente para tornar a determinação imprecisa e vice-versa. Vamos aprender sobre o princípio em detalhes abaixo (DILAMONHI, 2020).

O princípio recebeu o nome do Físico alemão Werner Heisenberg, que propôs o princípio da incerteza no ano de 1927.

Um dos pontos cruciais para a gênese do princípio da incerteza se deve unicamente à natureza dual onda-partícula. Em algumas situações, a partícula tem uma natureza ondulatória e a probabilidade de encontrar a partícula é máxima onde as formas de onda são maiores. Se a partícula tem maior ondulação, então o comprimento de onda se torna mais indistinto ou vago. No entanto, somos capazes de determinar nesta situação, o momento da partícula.

Este princípio foi formulado quando Heisenberg estava tentando construir um modelo intuitivo de Física Quântica. Ele descobriu que havia certos fatores fundamentais que limitavam

nossas ações em conhecer certas quantidades. Esse princípio basicamente destaca que a medição simultânea da posição e da velocidade ou momento das ondas de matéria microscópica terá um erro tal que o produto do erro na medição da posição e momento é igual ou maior que um múltiplo inteiro de uma constante (DILAMONHI, 2020; DIONÍSIO, 2004; HAWKING, 2015).

Se  $\Delta x$  é o erro na medição da posição e  $\Delta p$  é o erro na medição do momento, então:

$$\Delta X * \Delta p_x \geq \frac{h}{4\pi} \quad (12)$$

Como o momento,  $p = mv$ , a fórmula do princípio da incerteza de Heisenberg pode ser escrita alternativamente como:

$$\Delta X * \Delta(mv_x) \geq \frac{h}{4\pi} \text{ ou } \Delta X * \Delta m * \Delta V_x \geq \frac{h}{4\pi} \quad (13)$$

Onde,  $\Delta V$  é o erro na medição da velocidade e assumindo que a massa permanece constante durante o experimento:

$$\Delta X * \Delta V_x \geq \frac{h}{4\pi} \quad (14)$$

A medição precisa da posição ou momento indica automaticamente maior incerteza (erro) na medição da outra grandeza. Aplicando o princípio de Heisenberg a um elétron em uma órbita de um átomo, com  $h = 6,626 \times 10^{-34}$  Js e  $m = 9,11 \times 10^{-31}$  Kg, temos:

$$\Delta X * \Delta V \geq \frac{6.626*10^{-34}}{4*3.14*9.11*10^{-31}} = 10^{-4} m^2 s^{-1} \quad (15)$$

Se a posição do elétron for medida com precisão ao seu tamanho ( $10^{-10}$  m), então o erro na medição de sua velocidade será igual ou maior que  $10^6$  m ou 1000 km.

O princípio da incerteza de Heisenberg pode ser considerado como uma afirmação matemática muito precisa que descreve a natureza dos sistemas quânticos. Como tal, muitas vezes consideramos duas equações comuns: a primeira já descrita na equação 12 e a segunda, descrita abaixo (equação 16) (CHANG, 2005). Eles são:

$$\Delta E * \Delta t \sim \hbar \quad (16)$$

Onde:

$\hbar$  = Valor da constante de Planck dividido por  $2\pi$ .

$\Delta E$  = Incerteza na energia.

$\Delta t$  = Incerteza na medição do tempo.

### 3.4. Dualidade onda-partícula

A hipótese dos quanta de radiação, posteriormente denominados fótons, evidenciou a dualidade onda-partícula na descrição dos processos de propagação e interação da radiação com a matéria. A extensão de tal dualidade para as partículas materiais mostrou-se fundamental para a descrição quântica da matéria (ALMEIDA, 2020). Nossa noção de realidade é construída em experiências cotidianas. Mas a dualidade onda-partícula é tão estranha que somos forçados a reexaminar nossas concepções comuns. A dualidade onda-partícula refere-se à propriedade fundamental da matéria onde, em um momento ela se comporta como uma onda e em outro momento como uma partícula (ADETUNJI, 2012).

Com base na ideia de que a luz e todas as outras radiações eletromagnéticas podem ser consideradas como tendo caráter corpuscular ou uma natureza ondulatória, em 1923 o Físico Louis De Broglie sugeriu que o mesmo tipo de dualidade deve se aplicar à matéria. Ele propôs que qualquer partícula de matéria com momento ( $p$ ) tem um comprimento de onda associado ( $\lambda$ ).

Para uma partícula de momento  $mv$ , o comprimento de onda é dado pela equação 17.

$$\lambda = \frac{h}{mv} \quad (17)$$

Onde  $h$  é a constante de Planck,  $m$  a massa da partícula,  $\lambda$  seu comprimento de onda e  $v$  sua velocidade.

As ondas podem ser descritas como partículas; partículas como ondas e fenômenos de difração e interferência revelam um caráter de onda de matéria. Ainda assim, o efeito fotoelétrico, a absorção e a emissão pelos átomos mostram que a luz também tem um caráter semelhante à partículas.

A proposição da dualidade onda-partícula pode ser pensada como tema central, ou mesmo como o único mistério da Física Quântica (FEYNMAN *et al.*, 1965). Uma primeira sugestão sobre isso aparece em um artigo de Einstein em 1909 sobre o fenômeno quântico, com uma concepção diferente de seu trabalho seminal sobre o tema, mas foi apenas formalizado e generalizado por de Broglie no início dos anos vinte (LIMA *et al.*, 2020b; MARTINS; ROSA, 2014).

Ao longo do desenvolvimento da Física Quântica, o significado da dualidade onda-partícula variou substancialmente – atribuindo diferentes naturezas ontológicas à partícula e à onda nos fenômenos duais (PESSOA, 2003), por exemplo, propuseram que a radiação deveria ser considerada como uma onda material real se propagando no espaço de fase, enquanto seu comportamento de partícula deveria ser atribuído como consequência do átomo quantizado (uma visão compartilhada por Planck), mesmo contestando a explicação de Compton sobre a colisão entre fótons e elétrons (SCHRÖDINGER, 1927).

A dualidade onda-partícula limita nossa compreensão na determinação da posição e momento das partículas subatômicas. Na década de 1920, Werner Heisenberg e Niels Bohr tentaram diferentes experimentos para medir com precisão o comportamento das partículas (BARROS, 2018). No entanto, eles foram incapazes de medir simultaneamente a posição e o momento ao mesmo tempo.

Isso significava que, mesmo que soubessem onde estava uma partícula, não conseguiriam descobrir para onde ela estava indo nem de onde vinha, afinal a onda está espalhada. Eles concluíram que era impossível medir e determinar com precisão o momento e a posição de um elétron simultaneamente, portanto, o princípio da incerteza também é conhecido como princípio da indeterminação (BARROS, 2018; LIMA *et al.*, 2020b).

A relação entre momento e comprimento de onda de um elétron foi introduzida pela primeira vez pelo Físico francês Louis de Broglie em 1924 (relação De Broglie). Partindo dessa concepção de dualidade onda-partícula (que é válida para todos os corpos), De Broglie realizou um conjunto de articulações matemáticas e teóricas que o levaram à famosa relação que recebeu seu nome (equação 18) (LIMA *et al.*, 2020b).

Essa relação pode ser usada para calcular quanta energia um elétron tem quando colide com outra partícula, como um fóton. A relação De Broglie é uma equação matemática que

relaciona o momento de uma partícula ao seu comprimento de onda. Usando-o, podemos prever ou calcular algumas propriedades das partículas, como seus níveis de energia ou sua função de distribuição de momento (LIMA *et al.*, 2020b).

### 3.5. Equação de Schrödinger

No início do século XX, evidências experimentais sugeriam que as partículas atômicas também podiam exibir, sob certas circunstâncias, natureza ondulatória. Por exemplo, descobriu-se que os elétrons dão padrões de difração quando passam por uma fenda dupla de maneira semelhante às ondas de luz. Portanto, era razoável supor que uma equação de onda descreveria o comportamento das partículas atômicas.

Schrödinger foi a primeira pessoa a escrever tal equação de onda. Muita discussão então se concentrou no que a equação significava. Os autovalores da equação de onda mostraram-se iguais aos níveis de energia do sistema Mecânico Quântico, o melhor teste da equação foi quando ela foi usada para obter os níveis de energia do átomo de hidrogênio e os resultados encontrados estavam de acordo com a Lei de Rydberg (BROCKINGTON, 2005).

A equação de Schrödinger desempenha o papel das leis de Newton e da conservação da energia na Mecânica Clássica, referente aos formalismos de Lagrange e Hamilton, ou seja, prediz o comportamento futuro de um sistema dinâmico. É uma equação de onda em termos da função de onda que prediz analiticamente e precisamente a probabilidade de eventos ou resultados (ARRUDA, 2009). O resultado detalhado não é estritamente determinado, mas dado um grande número de eventos, a equação de Schrödinger irá prever a distribuição dos resultados.

A equação de Schrödinger (equação 18) é usada, por exemplo, para encontrar os níveis de energia permitidos de sistemas Mecânicos Quânticos (como átomos ou transistores). O quadrado da função de onda associada dá a probabilidade de encontrar a partícula em uma determinada posição (SOUZA, 2021).

$$H\psi = E\psi \tag{18}$$

Onde,  $H$  é o operador hamiltoniano (Equação 19) que descreve a energia do sistema e  $E$  é o autovalor da energia.

$$\hat{H} = -\frac{\hbar^2}{2m} \left( \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} \right) + V(x, y, z) \Psi \quad (19)$$

Onde T é o operador energia cinética e V o operador que descreve as relações interativas das partículas elementares conforme descrito pelas equações 20 e 21.

$$T = -\frac{\hbar^2}{2m} \left( \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} \right) \quad (20)$$

$$V = \frac{-e^2}{4\pi\epsilon r} \quad (21)$$

A solução da Equação de Schrodinger para o átomo de hidrogênio envolve a conversão de coordenadas retangulares para coordenadas esféricas conforme a Equação 22

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \psi(r, \theta, \phi) + V(r) \psi(r, \theta, \phi) = E \psi(r, \theta, \phi) \quad (22)$$

A solução dessa equação é um função de onda com coordenadas radiais e esféricas. Soluções analíticas só são possíveis para o átomo de hidrogênio. Para os demais átomos aproximações devem ser usadas. Uma solução para equação 22 é a função de onda descrita abaixo (equação 23).

$$\psi_{100} = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \left( \frac{z}{a_0} \right)^{\frac{3}{2}} e^{-\rho} \quad (23)$$

Onde a quantidade z é a carga nuclear e a<sub>0</sub> é o raio de Bohr. Sabemos que os orbitais s são esfericamente simétricos. O quadrado da função de onda demonstrará a região de maior probabilidade de encontrar o elétron em uma região do espaço.

#### 4. TRABALHOS CORRELATOS

O produto educacional desenvolvido neste trabalho tem como princípio o uso de animações para a introdução do Ensino da Teoria Quântica para alunos do Ensino Médio. O

uso de animações para o ensino de ciências é documentado na literatura. Pinto (2022) e Saavedra (2022) demonstraram como a produção colaborativa de animações podem auxiliar no Ensino de Física (PINTO; SAAVEDRA, 2022). Costa (2022) e Ferreira (2022) usaram animações também para o ensino de genética mendeliana (COSTA; FERREIRA, 2022). Recursos audiovisuais disponíveis para atividades de divulgação científica também têm sido aplicado na educação científica (ARRUDA; TEIXEIRA, 2022). Para Martins (2022) os estudos ainda têm aventado o uso do YouTube para o ensino da Biologia durante o período pandêmico da COVID-19 (COSTA *et al.*, 2022).

Notadamente o ensino de Física Quântica na educação básica vem sendo trazido à tona por vários autores. Dias (2022) realizou uma proposta didático pedagógica para a introdução de Física Quântica para discentes do nono ano (DIAS – FILHO, 2022).

Há ainda alguns trabalhos de dissertação de Mestrado Profissional de Ensino de Física que trazem a aplicação de propostas didáticas para o Ensino de Mecânica Quântica. Almeida (2022) traz uma sequência de ensino-aprendizagem para apresentar os postulados da Mecânica Quântica no Ensino Médio (ALMEIDA, 2022). Loureiro (2022) e Silva (2022) usaram ferramentas de Web Quest para o ensino do conceito de energia para a primeira série do novo Ensino Médio usando abordagens clássicas, quânticas e relativísticas (LOUREIRO; SILVA, 2022).

Nunes (2022) e Macedo (2022) trazem experiências sobre a introdução da Física Quântica no Ensino Médio (NUNES; MACEDO, 2022). Ostermann (2005) e colaboradores propuseram o uso de experimentos virtuais para o Ensino de Física Quântica como resultado de pesquisa associada ao Mestrado Profissional de Ensino de Física (OSTERMANN *et al.*, 2005). Segundo Lobato (2012) e colaboradores, a literatura sobre o assunto está em expansão com o estudo de conceitos da Teoria Quântica na grade curricular do Ensino Médio em outros países (LOBATO *et al.*, 2012).

Diante da literatura exposta o produto educacional contempla uma animação para a introdução de conceitos qualitativos de Mecânica Quântica para discente do Ensino Médio concebido a partir da aprendizagem significativa. Em nossa abordagem faz-se o uso ainda de uma cartilha (subproduto) para a orientação do produto educacional.

## **5. METODOLOGIA**

O estudo foi desenvolvido a partir de pesquisa de campo, feita através de 01 (um)

questionário, formulado no *Google forms*, com 16 questões objetivas, uma cartilha de orientação (subproduto educacional) ao professor e um vídeo de animação (como produto educacional), todos baseados no tema “Proposta de uso de animação para discussão da transição da Mecânica Clássica para a Mecânica Quântica”.

As questões a seguir, elaboradas por mim, fazem parte do questionário aplicado nas turmas A e B, dos 3º anos do Ensino Médio, as quais serão mencionadas logo abaixo. A aplicação ocorreu na sala de informática de cada instituição de ensino.

**Questão 1:** Ao aquecermos um corpo, ele irá aumentar sua temperatura e, conseqüentemente irá emitir:

- radiação;
- frio;
- partículas quentes;
- ondas de rádio;
- ondas sonoras.

**Questão 2:** Quais das contribuições abaixo não foram baseadas nos estudos realizados pelo físico Isaac Newton?

- A lei da inércia;
- A lei da ação e reação entre dois corpos;
- A lei da gravitação universal;
- O princípio fundamental da dinâmica;
- O efeito fotoelétrico.

**Questão 3:** O que você entende por Mecânica Quântica?

- é a parte da física que estuda o DNA humano;
- é a parte da física que estuda o mundo subatômico, ou seja, o mundo microscópico;
- é a parte da física que estuda o mundo onde pode-se determinar tudo com grande precisão;
- é a parte da física que estuda o movimento e a posição dos elétrons ao mesmo tempo;
- é a parte da física que Isaac Newton deu início aos estudos dos átomos e partículas.

**Questão 4:** Qual o cientista que é considerado o pai da Física Quântica?

- Albert Einstein;
- Isaac Newton;
- Max Planck;
- Stephen Hawking;
- Werner Heisenberg.

**Questão 5:** Na sua opinião, um fóton é o:

- nome que se dá a um filme fotográfico;
- nome que se dá a uma fotografia computadorizada;
- nome que se dá a um pacote de energia que viaja a baixa velocidade;
- nome que se dá a um pacote de energia que viaja a média velocidade;
- nome que se dá a um pacote de energia que viaja a alta velocidade (na da luz).

**Questão 6:** Qual físico alemão ganhou o prêmio Nobel de Física pela descoberta do efeito fotoelétrico?

- Isaac Newton;
- Albert Einstein;
- Bohr;
- Max Planck;
- Stephen Hawking.

**Questão 7:** O cientista Werner Heisenberg elaborou um princípio que preconiza que não se poderia determinar com exatidão a posição e a velocidade do elétron ao mesmo tempo. Este princípio ficou conhecido como:

- princípio fundamental da dinâmica;
- princípio da inércia;
- principia;
- princípio da incerteza;
- princípio da exatidão.

**Questão 8:** Para o físico francês Louis de Broglie, o elétron tinha característica:

- dual, ou seja, ora se comporta como onda, ora se comporta como partícula;
- corpuscular, ou seja, se comporta como partícula;
- ondulatória, ou seja, se comportava como onda;
- que não se podia determinar;
- duvidosa.

**Questão 9:** Qual físico dinamarquês propôs um modelo atômico semelhante ao nosso sistema solar, em que o elétron passaria de uma órbita a outra se recebesse uma certa quantidade discreta de energia?

- Louis de Broglie;
- Albert Einstein;
- Werner Heisenberg;
- Isaac Newton;
- Niels Bohr.

**Questão 10:** O físico teórico austríaco Erwin Schrodinger propôs um modelo atômico que:

- através de uma equação matemática, regiões do espaço dentro do átomo (os orbitais) estariam associadas a uma maior probabilidade de encontrar os elétrons;
- era semelhante ao nosso sistema solar;
- era representado por uma esfera maciça, cheios de partículas minúsculas e indivisíveis;
- era representado por uma partícula esférica de carga positiva, não maciça, incrustada de elétron;
- Não tenho conhecimento sobre este físico.

**Questão 11:** Sabemos que quando os átomos são combinados eles compartilham seus orbitais e formam as ligações químicas, ligações estas que explicam muitos fenômenos que observamos em nosso cotidiano. Dentro do estudo da Mecânica Quântica, como as cores que nós conhecemos interagem nos objetos?

- através da interação entre a luz e as cores vivas que o objeto possui;
- através da interação entre a cor existente no objeto e seus olhos;
- através da interação entre a luz e as moléculas presentes no objeto;
- através da interação entre a cor do objeto e a falta de luz;
- através da interação entre as moléculas existentes no objeto e a tinta presente nele.

**Questão 12:** Em quais situações abaixo do nosso dia a dia não há a presença da Física Quântica?

- mudar o canal da tv através do controle remoto;
- usar o computador para digitar um texto;
- tirar uma bela foto com uma câmera digital;
- aquecer um sanduíche no microondas;
- o lançamento de uma pedra no lago.

**Questão 13:** Na cinemática podemos determinar ao mesmo tempo e com grande precisão, a posição e a velocidade de um objeto visto a olho nu (objeto macroscópico). Isto pode ser observado em um jogo de futebol, por exemplo, quando um jogador lança uma bola para seu companheiro de time ou até mesmo em um jogo de bilhar, ao tentarmos "matar", com a bola branca, uma outra bola da mesa. Na sua opinião, caso o objeto não possa ser visto a olho nu (objeto microscópico), podemos determinar também, ao mesmo tempo, a posição e a velocidade deste objeto com a mesma precisão?

- Sim, pois, o tamanho do objeto não interfere em nada;
- Não, porque só podemos determinar e sem precisão apenas a posição de um objeto microscópico;

- ( ) Não, porque só podemos determinar e sem precisão apenas a velocidade de um objeto microscópico;
- ( ) Não, porque para objetos microscópicos não conseguimos determinar com precisão, nem sua posição muito menos sua velocidade;
- ( ) Não, porque quando determinamos, com precisão, a posição deste objeto microscópico, não conseguimos nenhuma informação sobre sua velocidade.

**Questão 14:** Nos corredores de prédios encontramos com frequência lâmpadas que apagam e acendem "sozinhas". Isso pode ser explicado devido:

- ( ) ao acionamento do interruptor liga - desliga, operado pelo síndico do prédio;
- ( ) ao acionamento do interruptor liga - desliga, operado por uma pessoa qualquer do prédio;
- ( ) ao acionamento da chave de disjuntor geral do prédio;
- ( ) ao sensor fotoelétrico, que converte um sinal luminoso (sombra ou luz) num sinal elétrico;
- ( ) ao sensor de calor, que consegue captar a temperatura da pessoa ao passar pela lâmpada.

**Questão 15:** Quando aquecemos uma barra de ferro a altas temperaturas podemos observar que a barra adquire uma cor de vermelho intenso (rubro). Na sua opinião, isto se deve:

- ( ) ao fato da barra se comportar como um corpo negro, emitindo radiação eletromagnética;
- ( ) ao fato da barra se comportar como um corpo negro e sempre adquirir esta cor, indiferente da temperatura que ela estiver;
- ( ) ao fato de todo corpo negro aumentar seu calor, quando aquecido;
- ( ) ao fato da barra se comportar como um corpo negro, emitindo temperatura;
- ( ) ao fato da barra se comportar como um corpo negro, por ser sempre adquirir uma cor preta.

**Questão 16:** Sabe-se que uma pessoa que possui grandes dimensões (corpo macroscópico) não é capaz de atravessar uma parede de concreto. Caso o corpo seja de dimensões extremamente pequenas (corpo microscópico), será que este corpo teria a capacidade de atravessar a mesma parede de concreto?

- ( ) Não, pois, nenhum corpo tem esta capacidade, indiferente de suas dimensões;
- ( ) Sim, porque os corpos microscópicos podem se comportar, ora como uma onda, ora como uma partícula;
- ( ) Não, pois, o material de que o muro foi feito não permite que este fenômeno ocorra;
- ( ) Sim, desde que o corpo esteja em altas temperaturas;;
- ( ) Sim, desde que suas dimensões sejam iguais às de um grão de areia.

A pesquisa teve como público alvo duas turmas de estudantes - uma da rede federal e a outra da rede estadual de ensino. Iremos aqui nomeá-las de turma **A (rede federal)** e turma **B (rede estadual)**. A turma **A** é composta por 20 estudantes de um Instituto Federal do Pará. Já a

turma **B** é composta por 15 estudantes de uma Escola Estadual pertencente à Secretaria de Educação do Estado do Pará. A pesquisa teve como alicerce a sequência didática representada por 3 momentos, realizados entre os dias 27 de Outubro a 10 de Novembro de 2022, para que fosse possível a coleta dos dados. Os 3 momentos estão dispostos na tabela 2.

**Tabela 2 - Sequência didática e data de aplicação do produto educacional**

<b>Momento</b>		<b>Data</b>	<b>Turma</b>	<b>Horário</b>
<b>1º Momento</b>	Aplicação do questionário	27/10/2022	Turma A	<b>7:00 às 7:50</b> <b>(1º horário)</b>
	Levantamento de conhecimentos prévios dos estudantes.	28/10/2022	Turma B	<b>9:50 às 10:40</b> <b>(4º horário)</b>
<b>2º Momento</b>	Aplicação do produto educacional - vídeo de animação.	31/10/2022	Turma A	<b>7:00 às 7:50</b> <b>(1º horário)</b>
		01/11/2022	Turma B	<b>9:50 às 10:40</b> <b>(4º horário)</b>
	Aula expositiva - apresentação do slide “linha do tempo”.	31/10/2022	Turma A	<b>7:50 às 8:40</b> <b>(2º horário)</b>
		01/11/2022	Turma B	<b>10:40 às 11:30</b> <b>(5º horário)</b>
<b>3º Momento</b>	Aplicação do mesmo questionário - levantamento de dados para análise de índice de efetiva aprendizagem significativa.	03/11/2022	Turma A	<b>7:00 às 7:50</b> <b>(1º horário)</b>
		<b>04/11/2022</b>	<b>Turma B</b>	<b>9:50 às 10:40</b> <b>(4º horário)</b>

Fonte: Autoria própria

No primeiro momento ocorreu a aplicação do questionário aos estudantes de cada uma

das turmas, nos dias e horários especificados conforme a tabela 2. Este primeiro momento visou analisar os conhecimentos prévios, ou seja, os subsunçores, que os estudantes possuem em relação ao tema proposto. Desta maneira, o levantamento destes dados é de essencial importância para que se possa fazer um diagnóstico acerca do que eles conhecem sobre a Mecânica Clássica e Quântica.

No segundo momento ocorrem a “intervenção” do professor de maneira a vir ensinar ou reforçar os conceitos básicos dos fenômenos que levaram à passagem da Mecânica Clássica para a Mecânica Quântica. Esta intervenção ocorreu através da aplicação do produto educacional – vídeo de animação e da apresentação do slide “linha do tempo” que se encontra anexado à cartilha (subproduto) de orientação da aplicação do produto educacional.

Vale ressaltar que tanto o produto educacional quanto o subproduto educacional auxiliam o professor no processo de ensino, para que possibilite que seus discentes possam obter uma aprendizagem efetivamente significativa.

O produto educacional, como ferramenta facilitadora deste processo de ensino - aprendizagem é o vídeo de animação, elaborado através do software Videoscribe, que possibilita a criação de vídeos de animações no estilo “quadro branco” com “mãos escrevendo” ou “mãos desenhando”. O vídeo contém um breve relato, de forma lúdica, dos fenômenos mais relevantes e seus respectivos colaboradores, que marcaram a transição de parte da Mecânica Clássica para a Mecânica Quântica. A cartilha de orientação (subproduto educacional) para aplicação do produto educacional, além de facilitar o processo de aplicação do produto, dispõe-se de um slide denominado “linha do tempo”, que traz de forma resumida, esta transição dos principais fenômenos da Física Clássica para a Quântica, juntamente com seus colaboradores.

O terceiro momento analisou-se o que o estudante conseguiu aprender dos conceitos propostos da Mecânica Quântica após à aplicação do produto educacional e da apresentação do *slide*, ambos realizados pelo professor.

Esta análise foi feita após a reaplicação do questionário, composto por 16 questões objetivas, na data e horário descrito na tabela 2 e os discentes receberam um feedback dos resultados no momento da roda de conversa, que ocorreu na aula posterior ao terceiro momento.

Após toda esta sequência didática, os dados coletados no questionário, aplicados em cada uma das turmas, A e B, foram analisados de maneira qualitativa, com o intuito de interpretar os resultados obtidos entre os discentes das duas turmas participantes.

## 6. RESULTADOS OBTIDOS

A análise dos resultados das aplicações do questionário, composto por 16 questões objetivas para a turma A, consta listados na tabela 3.

**Tabela 3 - Análise dos resultados do questionário aplicado na Turma A**

Questionário – 1ª aplicação Total de participantes: 19			Questionário – 2ª aplicação Total de participantes: 20		
Questão	Nº de respostas corretas	Respostas corretas (em %)	Questão	Nº de respostas corretas	Respostas corretas (em %)
Questão 1	14	73,7	Questão 1	17	85
Questão 2	14	73,7	Questão 2	13	65
Questão 3	09	47,4	Questão 3	10	50
Questão 4	13	68,4	Questão 4	17	85
Questão 5	08	42,1	Questão 5	16	80
Questão 6	10	52,6	Questão 6	14	70
Questão 7	08	42,1	Questão 7	15	75
Questão 8	05	26,3	Questão 8	14	70
Questão 9	09	47,4	Questão 9	13	65
Questão 10	04	21,1	Questão 10	12	60
Questão 11	11	57,9	Questão 11	14	70
Questão 12	12	63,2	Questão 12	13	65
Questão 13	03	15,8	Questão 13	05	25
Questão 14	10	52,6	Questão 14	10	50
Questão 15	10	52,6	Questão 15	13	65
Questão 16	05	26,3	Questão 16	11	55

Fonte: Autoria própria

As questões trabalhadas no produto educacional serviram para nortear os conhecimentos prévios que os discentes tinham sobre a Mecânica Quântica. Fazendo uma análise da aplicação do questionário na turma A, a primeira questão versa sobre um assunto até então desconhecido pelos discentes do Ensino Médio que diz respeito à radiação do corpo negro. É interessante aqui notar a progressão que houve após a aplicação do produto educacional. Identificamos um aumento de acertos de 73,7% para 85%.

A segunda questão versa sobre dois requisitos importantes para a compreensão do conteúdo de quântica. Aqui faz-se uma abordagem sobre a totalidade das teorias derivadas das leis de Newton. O assunto desconhecido pelos discentes antes da aplicação do produto educacional (efeito fotoelétrico) é colocado ao lado de conceitos da Mecânica Clássica. O quantitativo menor de acertos pode estar dentro de uma margem de erro aceitável.

Analisando os conceitos relatados na terceira questão sobre o entendimento da Mecânica Quântica, os discentes se deparam com uma realidade fora do escopo de aprendizado do Ensino Médio. Essa realidade pode explicar o baixo número de respostas corretas mesmo após a aplicação do produto educacional, que foi de 50%. Isso mostra a inabilidade dos alunos de definirem conceitos mais complexos.

A quarta questão presente no questionário traz um atalho entre os cientistas e suas áreas de conhecimento. Notadamente se conhece cientistas das áreas da relatividade como Albert Einstein e se tem como desconhecidos os mentores da Teoria Quântica. Nesse processo de aprendizagem significativa fica patente o aumento de graus de acerto que passou de 68% para 85%. A quinta questão também trabalha com um conceito inicial de Mecânica Quântica que é o fóton. A aplicação do produto educacional conseguiu introduzir o conceito de fóton de maneira satisfatória fazendo com que o percentual de respostas corretas totalizasse 93,3%.

Os prêmios Nobel são um demonstrativo das contribuições científicas mais essenciais para a ciência. Desta forma os cientistas ganhadores perfazem os mais notórios pensadores da ciência. Demonstrar os ganhadores do prêmio Nobel como progenitores da Mecânica Quântica mostra a importância dessa ciência para a sociedade moderna. E é exatamente isso que a sexta questão traz na sua desenvoltura conteudista.

Não obstante essa integração da história da ciência com o conceito de efeito fotoelétrico é importante ressaltar que o conhecidíssimo cientista Albert Einstein teve seu legado Físico fundamentado pela sua contribuição na Mecânica Quântica e não na relatividade. A estatística de acertos demonstra como o conteúdo que versa sobre o efeito fotoelétrico no produto educacional consegue aumentar o nível de compreensão do discente. Houve um acréscimo de acertos de 52% para 70%.

A sétima questão evidencia um dos mais importantes pressupostos da Mecânica Quântica que é a incerteza. Ao lado do princípio da incerteza são elencados outros pressupostos da Mecânica Clássica como o determinismo. Este é um assunto muito fora da realidade dos discentes do Ensino Médio. Fato esse verificado pelo baixo número de acertos. A aplicação do produto conseguiu traduzir o conceito de incerteza para o discente de modo significativo com um aumento de 42% de questões acertadas para 75%.

A dualidade partícula-onda, presente na oitava questão é um dos conceitos essenciais para a Mecânica Quântica. Aqui também é perceptível o baixo conhecimento (26,3% de acertos) desse conceito pelos discentes do Ensino Médio que não possuem esse arcabouço teórico em seu ementário de aula. Porém, a aplicação do produto educacional produz uma notável absorção do conhecimento, concretizando-se com 70% de acertos da questão.

A nona questão possibilitou uma discussão sobre o modelo atômico de Bohr que é um modelo que assume pressupostos quânticos no que tange a quantização das órbitas dos elétrons e tem componentes clássicos quando pressupõe a localização determinista do elétron como que um planeta girando em torno de sua estrela.

Esse é um assunto que deveria ser trabalhado no Ensino Médio mas que apresentou inicialmente uma baixa compreensão por parte dos discentes. Uma ligeira progressão é observada após aplicação do produto Educacional.

A décima questão traz o modelo de átomo mais recente que foi baseado na equação de Erwin Schrödinger. Adotando os pressupostos da natureza dual do elétron, a equação de Schrodinger descreve com maestria os números quânticos usados para “localizar” os elétrons no átomo. Como é um conceito novo teve um quantitativo de acertos diminuto (21%) no período que antecede a aplicação do produto educacional. Todavia essa deficiência foi sanada com o produto o qual elevou substancialmente a porcentagem de acertos para 60%.

Já na décima primeira questão há uma tentativa de se correlacionar as cores dos objetos com as Teoria da Mecânica Quântica. O movimento de atualização do conteúdo que vai da abordagem conteudista para a experiência do cotidiano é um indício de aprendizado. Nesse caso o produto educacional permitiu uma ligeira mudança estatística nas respostas dadas à questão em apreço.

As questões 12, 13 e 14 evidenciaram a mesma problemática da décima primeira questão que é correlacionar o conteúdo de sala de aula com o cotidiano.

Findando o questionário, com a décima quinta e décima sexta questões percebe-se a tentativa de externalizar as premissas da Teoria Quântica para fenômenos ordinários que, aparentemente, não apresentam nenhuma correlação com a Mecânica Quântica.

A análise dos resultados entre as duas aplicações do questionário, compostos por 16 questões objetivas para a turma B, encontra-se na tabela 4.

**Tabela 4 - Análise dos resultados do questionário aplicado na Turma B**

Questionário – 1ª aplicação Total de participantes: 10			Questionário – 2ª aplicação Total de participantes: 15		
Questão	Nº de respostas corretas	Respostas corretas (em %)	Questão	Nº de respostas corretas	Respostas corretas (em %)
Questão 1	03	30	Questão 1	10	66,7
Questão 2	07	70	Questão 2	15	100
Questão 3	04	40	Questão 3	12	80
Questão 4	03	30	Questão 4	14	93,3

Questão 5	07	70	Questão 5	14	93,3
Questão 6	06	60	Questão 6	11	73,3
Questão 7	00	00	Questão 7	09	60
Questão 8	00	00	Questão 8	02	13,3
Questão 9	03	30	Questão 9	12	80
Questão 10	01	10	Questão 10	02	13,3
Questão 11	07	70	Questão 11	04	26,7
Questão 12	04	40	Questão 12	07	46,7
Questão 13	00	00	Questão 13	01	6,7
Questão 14	02	20	Questão 14	05	33,3
Questão 15	02	20	Questão 15	03	20
Questão 16	02	20	Questão 16	11	73,3

Fonte: Autoria própria

A tabela 3 demonstra os resultados obtidos por uma Instituição de Ensino Federal, enquanto a tabela 4 faz referência aos resultados da aplicação do produto educacional em uma Escola da Rede Estadual de Ensino. Comparando os resultados das primeiras colunas de ambas tabelas fica claro a diferença do nível de conhecimentos prévios que os discentes possuem sobre os mesmos temas. Fica bem evidente também que os estudantes da Escola da Rede Estadual foram mais privilegiados com a aplicação do produto educacional, já que as estatísticas apontam um crescimento maior de conhecimento para esse grupo de estudantes.

Notadamente, a Teoria Quântica não é trabalhada no Ensino Médio, mas os seus subsunçores deveriam estar presentes durante esta etapa da aprendizagem. Aqui, pode-se destacar alguns subsunçores que deveriam nortear os conceitos primários da Teoria Quântica. Primeiramente destaca-se o conceito de onda eletromagnética, já que a Mecânica Quântica trabalha com a natureza da luz. Em segundo lugar, as Leis de Newton que preconizam o determinismo reinante na Mecânica Clássica. Salienta-se nesse ponto que as particularidades da Mecânica Clássica como a velocidade e posição de partículas são de fundamental importância para a compreensão do Princípio da Incerteza de Heisenberg, por exemplo. Esses subsunçores deveriam anteceder a aplicação do produto educacional para que se alcance o aprendizado.

No produto educacional que foi aplicado aos discentes em diferentes Instituições de Ensino, há uma abordagem qualitativa da Mecânica Quântica. Nesse ponto os subsunçores matemáticos para uma compreensão total da Teoria Quântica não fazem parte do escopo didático pedagógico de alunos do Ensino Médio. A matemática adjacente à teoria deveria envolver equações diferenciais e álgebra linear que são subsunçores presentes no ensino superior. Por isso o produto educacional faz a opção por uma abordagem da Teoria Quântica de forma qualitativa, se abstendo de abordar o formalismo matemático adjacente.

É oportuno também discorrer sobre o tempo escolar em que seria aplicado o presente produto educacional. A própria estrutura curricular do Ensino Médio é exaustivamente pesada no que tange a quantidade de conteúdos a serem ministrados. Todavia, iniciativas como as disciplinas eletivas poderiam acomodar esse projeto que incorpora conceitos importantes da Física e que, ao mesmo tempo serve como elemento de divulgação científica.

É importante também salientar quais seriam os conceitos proveitosos para o Ensino Médio. Na presente discussão já foi colocada a questão da Teoria Quântica Qualitativa. E o que seria a Teoria Quântica Qualitativa? Nesse ponto os conceitos diferenciais da Teoria Quântica podem ser colocados diante dos pressupostos qualitativos da Mecânica Clássica. É sabido que a Mecânica Clássica é alicerçada sobre o determinismo.

Isso significa, em linhas gerais que, ao lançar um objeto podemos conhecer sua posição e velocidade com exatidão. Não se pode, no entanto, menosprezar essas premissas teóricas quando estudamos objetos macroscópicos. Tais pressuposições permitiram ao homem lançar objetos no espaço ao encontro de planetas, por exemplo.

No entanto, essas premissas não funcionam para partículas elementares como os elétrons. E se as partículas elementares possuem comportamento de partícula e onda, como poderia-se entendê-las? Poderia-se aqui introduzir o conceito de probabilismo que é um subsunçor presente no Ensino Médio. Os orbitais, vistos em cursos de Química, são ideias probabilísticas que podem ser trabalhadas no curso de Física do Ensino Médio. Um comparativo entre os modelos atômicos mostra uma escalada de mudança conceitual que vai dos modelos planetários clássicos aos números quânticos. O produto educacional desenvolvido aqui traduz essa e outras pressuposições.

Por fim, o produto educacional incita uma mudança de paradigmas no que tange a transição entre o mundo macroscópico para o mundo das partículas elementares. Os paradigmas da incerteza e do determinismo podem ser tratados de diversas maneiras no Ensino Médio demonstrando que o mundo natural não é tão simples como parece ser.

## **7. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Nesta dissertação, foram discutidos os pormenores da aplicação do produto educacional para o desenvolvimento da Teoria Quântica no Ensino Médio. A estrutura do texto comportou o referencial teórico físico e pedagógico subjacente ao uso do presente material didático. As discussões sumarizadas nas tabelas traduzem a eficácia da aplicação do produto educacional em diferentes instituições de ensino. A estatística salienta uma evolução

progressiva dos conceitos abordados no produto educacional. Nossos resultados mostram que uma abordagem da Mecânica Quântica, no seu âmbito qualitativo, pode ser trabalhada no Ensino Médio, encorajando os discentes ao desenvolvimento de subsunçores presentes em sua estrutura curricular. Mudanças de paradigmas físicos podem ser desenvolvidos pelo professor de Ensino Médio em disciplinas eletivas. Os resultados revelaram ainda que os discentes do Ensino Médio têm capacidade para desenvolver os conceitos primordiais da Mecânica Quântica. Estes resultados enfatizam ainda a necessidade do uso de outros meios educacionais para o Ensino Médio. O produto educacional evidencia os subsunçores presentes no Ensino Médio para o aprendizado da Mecânica Quântica e futuras investigações poderão traçar um diagnóstico da qualidade destes subsunçores.

## 8. REFERÊNCIAS

ADETUNJI, J. **Explainer: what is wave-particle duality.** The Conversation, 2012. Disponível em: <<https://conversadeira.com/explainer-what-is-wave-particle-duality-7414>>. Acesso em: 16 ago. 2022.

AGRA, Glenda et al. Análise do conceito de Aprendizagem Significativa à luz da Teoria de Ausubel. **Revista Brasileira de Enfermagem**, v. 72, p. 248-255, 2019.

ALMEIDA F. S. **Sequência de ensino-aprendizagem para ensinar os postulados da mecânica quântica no ensino médio.** 2022. 203 f. Dissertação (Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física) - Instituto de Ciências Exatas, Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda, 2022.

ALMEIDA, L. S. **Os Primórdios da teoria quântica e o problema da dualidade onda-partícula.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia). Universidade Estadual Paulista, 2020. Disponível em: <<https://repositorio.unesp.br/handle/11449/217850>>. Acesso em: 16 ago. 2022.

ANTUNES, L. C. S. **Radiação de corpo negro: lei de Stefan-Boltzmann, lei do deslocamento de Wien.** Dissertação (Mestrado em Ensino de Física). Universidade da Beira Interior, 2012. Disponível em: <<https://ubibliorum.ubi.pt/handle/10400.6/2872>>. Acesso em: 11 ago. 2022.

ARONS, A. B.; PEPPARD, M. B. Einstein's Proposal of the Photon Concept - a Translation of the Annalen der Physik Paper of 1905. **American Journal of Physics**, v. 33, n. 5, p. 367-374, 1965.

ARRUDA H. F. G., TEIXEIRA R. R. P. **Recursos audiovisuais disponíveis para atividades de divulgação científica e ensino de física sobre galáxias. Ensino de ciências e tecnologia em revista – ENCITEC.** V. 12 N. 3 (2022).

ARRUDA, M. S. **Estudo teórico-experimental da fotofragmentação do ácido fórmico na região da Valência.** Dissertação (Mestrado em Física). Universidade Federal da Bahia, 2009.

Disponível em: <<https://repositorio.ufba.br/handle/ri/10681>>. Acesso em: 19 ago. 2022.

ATKINS, P.; JONES, L.; LAVERMAN, L. **Princípios de Química: Questionando a Vida Moderna e o Meio Ambiente**. Bookman Editora, 2018.

AUSUBEL, J.D. Novak e H. Hanesian, *Educational psychology: a cognitive view* (Holt, Rinehart & Winston, New York, 1978)

BARROS, M. A. **Copenhague, leituras e incertezas: um texto teatral e o ensino de física quântica**. Dissertação (Mestrado em Educação Científica e Tecnológica). Universidade Federal de Santa Catarina, 2018. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/198364>>. Acesso em: 16 ago. 2022.

BASSALO, J. M. F. A Crônica da Física do Estado Sólido: III Teoria de Bandas. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 16, p. 1-4, 1994.

BATISTA, G. E. **Resolução de problemas abertos: uma proposta para o ensino de Física Quântica**. Dissertação (Mestrado em Ensino de Física). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2019. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/199254>>. Acesso em: 16 ago. 2022.

BEISER, A. **Modern Physics: an introductory survey**. Addison-Wesley Publishing Company, 1968.

BIASOTTO, L. C.; FIM, C. F.; KRIPKA, R. M. L. A teoria da aprendizagem significativa de David Paul Ausubel: uma alternativa didática para a educação matemática / David Paul Ausubel's Theory of Meaningful Learning: A Didactic Alternative to Mathematics Education. **Brazilian Journal of Development**, [S. l.], v. 6, n. 10, p. 83187–83201, 2020.

BRAGA, F. L. P. **Aventuras em quantópolis: elaboração e utilização de livro paradidático para abordagem conceitual do modelo padrão de física de partículas em turmas do ensino médio**. Dissertação (Mestrado em Ensino de Física). Universidade Federal Rural do Semi-Árido, 2018. Disponível em: <<https://repositorio.ufersa.edu.br/handle/prefix/5364>>. Acesso em: 11 ago. 2022.

BROCKINGTON, G. **A Realidade escondida: a dualidade onda-partícula para estudantes do Ensino Médio**. Dissertação (Mestrado em Ensino de Ciências). Universidade de São Paulo, 2005. Disponível em: <<https://repositorio.usp.br/item/001482517>>. Acesso em: 19 ago. 2022.

BROWN, H. R.; MARTINS, R. A. De Broglie's relativistic phase waves and wave groups. **American Journal of Physics**, v. 52, n. 12, p. 1130-1140, 1984.

CARUSO, F.; OGURI, V. **Física Moderna: origens clássicas e fundamentos quânticos**. Elsevier, 2006.

CHANG, R. **Physical Chemistry for the Biosciences**. Sausalito California: University Science Books, 2005.

(1923) **Compton effect**. Disponível em <http://www.nature.com/milestones/milephotons/full/>

milephotons05.html. Acessado em 23 ago. 2022.

CORREIA, A. J. S. R. **Integração da Termografia em Planos de Manutenção de Instalações Elétricas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Instituto Politécnico do Porto - Portugal, 2018. Disponível em: <<https://recipp.ipp.pt/handle/10400.22/12390>>. Acesso em: 11 ago. 2022.

COSTA et. al. **O uso de recursos educacionais digitais no ensino de biologia: contribuições em tempos de pandemia**. Revista Docência e Cyber Cultura. v. 6, n. 5 (2022).

COSTA M. G., FERREIRA D. C. **Uso de animações de genética molecular nas aulas iniciais de genética mendeliana**. Revista da Rede Amazônica de Educação em Ciências e Matemática. V. 10 N. 1 (2022): JANEIRO A ABRIL DE 2022

DARROZ, Luiz Marcelo. Aprendizagem significativa: a teoria de David Ausubel. **Revista Espaço Pedagógico**, v. 25, n. 2, p. 576-580, 2018.

DILAMONHI, D. N. Princípio da incerteza de Heisenberg. **Revista Eletrônica KULONGESA–TES**, v. 2, n. 4, p. 151-162, 2020.

DIONÍSIO, P. H. Física Quântica: de sua pré-história à discussão sobre seu conteúdo essencial. **Cadernos IHU Ideias**, v. 2, n. 2, 2004.

DOMINGUINI L. **Física moderna no Ensino Médio: com a palavra os autores dos livros didáticos do PNLEM**. Rev. Bras. Ensino Fís. 34 (2) • Jun 2012.

EISBERG, R.; RESNICK, R. **Física Quântica: Átomos, Moléculas, Sólidos, Núcleos e Partículas**. Elsevier, 1979.

FEYNMAN, R. P.; LEIGHTON, R. B.; SANDS, M. The feynman lectures on physics. **American Journal of Physics**, v. 33, n. 9, p. 750-752, 1965.

DIAS FILHO I.P.D. **A introdução à física quântica para alunos do nono ano do ensino fundamental**. Scientia Naturalis. v. 4 n. 1 (2022).

FUCHS, W. R. **Física Moderna**. São Paulo: Editora Polígono, 1972.

GONNELLI NETTO, O. **Análise da didatização do tema radiação de corpo negro sob a luz da teoria antropológica do didático**. Dissertação (Mestrado em Educação Científica e Tecnológica). Centro de Ciências Físicas e Matemáticas, 2014. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/123351>>. Acesso em: 11 ago. 2022.

GONTIJO, L. M. A.; RODRIGUES, C. G. Sobre a Evolução do Conceito de Calor e Energia Térmica. **História da Ciência e Ensino: construindo interfaces**, v. 24, p. 19-51, 2021.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de Física**, v. 4. Ótica e Física Moderna. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1991.

HAWKING, S. **Uma breve história do tempo**. Editora Intrínseca, 2015.

KAHN, K. **Brief introduction to quantum mechanics**. UC Santa Barbara, 2011. Disponível em: <[https://people.chem.ucsb.edu/kahn/kalju/chem126/public/qm\\_intro.html](https://people.chem.ucsb.edu/kahn/kalju/chem126/public/qm_intro.html)>. Acesso em: 11 ago. 2022.

KNIGHT, R. **Physics for Scientists and Engineers: A Strategic Approach**. San Francisco: Addison Wesley, 2004.

LIMA, A. A.; MENEZES, N. P.; SANTOS, S.; AMORIM, B.; THOMAZI, F.; ZANELLA, F.; HEILMANN, A.; BURKARTER, E.; DARTORA, C. A. Uma revisão dos princípios da conversão fotovoltaica de energia. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 42, 2020a.

LIMA, N. W.; CAVALCANTI, C.; OSTERMANN, F. Concepções de Dualidade Onda-Partícula: Uma proposta didática construída a partir de trechos de fontes primárias da Teoria Quântica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 44, 2020c.

LIMA, N. W.; NASCIMENTO, M. M.; CAVALCANTI, C.; OSTERMANN, F. Louis de Broglie's wave-particle duality: from textbooks' blackboxes to a chain of reference presentation. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 42, 2020b.

LOBATO T., GRECA I. M. **Análise da inserção de conteúdos de Teoria quântica nos currículos de física do Ensino Médio**. Ciênc. educ. (Bauru) 11 (1) • Abr 2005.

LOUREIRO B. C. O., SILVA M. C. **Ensino de física para a primeira série do novo ensino médio por meio de webquest**. Revista do Professor de Física. / v. 6 n. Especial (2022): Anais do Encontros Integrados em Física e seu Ensino 2022.

MACHADO, Dioni de Mello. **Proposta de uma sequência didática para o ensino da termoquímica no contexto da aprendizagem significativa**. Instituto de Química. Mestrado Profissional em Química em Rede Nacional, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2021.

MARTINS N. H. S. P. **Adequações para o ensino remoto: transformando o youtube® em sala de aula**. v. 17 n. 1 (2022): Experiências em Ensino de Ciências.

MARTINS, R. A.; ROSA, P. S. **História da teoria quântica: a dualidade onda-partícula, de Einstein a De Broglie**. Editora Livraria da Física, 2014.

MASINI, Elcie F. Salzano; MOREIRA, Marco Antonio. Aprendizagem significativa na escola. **Curitiba, PR: CRV**, 2017.

MOREIRA, M.A. (2006). A teoria da aprendizagem significativa e sua implementação em sala de aula. Brasília: Editora da UnB. 185p.

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

MOREIRA, Marco Antonio. Aprendizagem significativa em ciências: Condições de ocorrência vão muito além de pré-requisitos e motivação. **Ensino de Ciências e Tecnologia em Revista-ENCITEC**, v. 11, n. 2, p. 25-35, 2021.

MORTIMER, R. G. **Physical Chemistry**. San Diego: Harcourt Academic Press, 1993.

NEVES, J. L. Pesquisa qualitativa – características, uso e possibilidades. **Cadernos de pesquisa em administração**, São Paulo. V. 1, nº 3, 2ºsem. 1996

NUNES J. C, MACEDO E. R. **Introdução ao ensino da física quântica no ensino médio: um relato de experiência**. Brazilian Journal of Development 2022.

OLIVEIRA FILHO, K. S.; SARAIVA, Ma. F. O. **Astronomia e astrofísica**. São Paulo: Editora Livraria da Física, v. 780, n. 2004, p. 183, 2004.

OSTERMANN et. al. **Conceitos de Física quântica na formação de professores relato de uma experiência didática centrada no uso de experimentos virtuais**. Caderno Brasileiro de Ensino de Física, ISSN-e 2175-7941, Vol. 22, Nº. 1, 2005, págs. 9-35.

PEREIRA, Lavinia Hannah De Souza et al.. **Desenvolvendo uma aprendizagem significativa por meio do conhecimento prévio**. Anais IV CONEDU... Campina Grande: Realize Editora, 2017.

PESSOA, O. J. **Conceitos de Física Quântica**. Livraria da Física, São Paulo, 2003.

PICAZZIO, E. **O céu que nos envolve: Introdução à Astronomia para educadores e iniciantes**. [S.l.]: Odysseus, 2011.

PINTO G. M., SAAVEDRA N. C. **Contribuições para o ensino de física nos anos finais do ensino fundamental por meio da produção colaborativa de animações**. Revista Brasileira de Ensino de Ciências e Tecnologias. v. 15, n. 2 (2022).

PIRRALHO, M. J. P. **Propriedades de fotocondutividade e transporte elétrico em filmes de  $Pb_{1-x}Eu_xTe$  e  $Bi_2Te_3$** . Tese (Doutorado em Materiais para Engenharia). Universidade Federal de Itajubá, 2017. Disponível em: <<https://repositorio.unifei.edu.br/xmlui/handle/123456789/1011>>. Acesso em: 16 ago. 2022.

RIBEIRO, Tiago Nery; SOUZA, D. N.; MOREIRA, Marco Antonio. O mapa conceitual como instrumento de avaliação de uma Unidade de Ensino Potencialmente Significativa (UEPS) sobre o conteúdo razões trigonométricas no triângulo retângulo. **Aprendizagem Significativa em Revista**, v. 8, n. 1, p. 21-37, 2018.

ROSENBLUM, B.; KUTTNER, F. **O enigma quântico: O encontro da física com a consciência**. Editora Schwarcz-Companhia das Letras, 2017.

SANTOS, M. A. B. **A Mecânica Quântica no processo de formação de licenciandos em Física: um estudo de caso**. Tese (Doutorado em Ensino, Filosofia e História das Ciências). Universidade Federal da Bahia, 2012. Disponível em: <<https://ppgefhc.ufba.br/pt-br/mecanica-quantica-no-processo-de-formacao-de-licenciandos-em-fisica-um-estudo-de-caso>>. Acesso em: 16 ago. 2022.

SCHRÖDINGER, E. Über den Comptoneffekt. **Annalen der Physik**, v. 387, n. 2, p. 257-264, 1927.

SEGRÉ, E. **Dos raios X aos quarks: físicos modernos e suas descobertas**. Brasília: Editora

Universidade de Brasília. UnB, 1987.

SILVA, J. K. L. **Uma proposta de ensino de tópicos de mecânica quântica sob a ótica de Bachelard**. Dissertação (Mestrado em Ensino de Ciências). Universidade Federal do Pampa, 2015. Disponível em: <<https://repositorio.unipampa.edu.br/jspui/handle/rii/2425>>. Acesso em: 16 ago. 2022.

SILVA, V. A. S. **Diodos**. 2010. Disponível em: <<http://www.vandertronic.com/index.php/diodos/?print=print>>. Acesso em: 16 ago. 2022.

SMITH, W. F.; HASHEMI, J. **Fundamentos de engenharia e ciência dos materiais**. Amgh Editora, 2013.

SOARES, J. M. S. **Análise da história do efeito fotoelétrico em livros didáticos de física para graduação**. Dissertação (Mestrado em Ensino de Ciências e Educação Matemática). Universidade Estadual da Paraíba, 2016. Disponível em: <<http://tede.bc.uepb.edu.br/jspui/handle/tede/2623>>. Acesso em: 11 ago. 2022.

SOUZA, R. S. Um recorte histórico das contribuições de Erwin Schrödinger para a Mecânica Quântica. **Ensino & Multidisciplinaridade**, p. 42-56, 2021.

STANGE, Carlos Eduardo Bittencourt; MOREIRA, Marco Antonio; VILLAGRÁ, Jesús Ángel Meneses. Proposta de um modelo estrutural descritivo interpretativo para a análise de testes (questionários) em investigação em ensino. **Ensino e Tecnologia em Revista**, v. 2, n. 2, p. 181-201, 2018.

STONE, A. D. Einstein and the Quantum. In: **Einstein and the Quantum**. Princeton University Press, 2015.

SUSSUCHI, E. M.; MACHADO, S. M. F.; MORAES, V. R. S. **Origem da teoria quântica**. Química I, 2010.

TODESCATTO, T. **Física Radiológica**. Clube de Autores, 2019.

TRIX SOLAR. **Efeito fotoelétrico e efeito fotovoltaico**: entenda qual é geração de energia elétrica. Blue Sol, 2022. Disponível em: <<https://trixsolar.com.br/como-funciona>>. Acesso em: 20 ago. 2022.

VÁZQUEZ, M.; HANSLMEIER, A. **Ultraviolet radiation in the solar system**. Springer Science & Business Media, 2005.

VIRILIO, P. **O espaço crítico**. Editora 34, 1993.

YNOUE, R. Y.; REBOITA, M. S.; AMBRIZZI, T.; SILVA, G. A. M. **Meteorologia**: noções básicas. Oficina de Textos, 2017.

<https://www.videoscribe.co/app/> Acesso a partir de: 16 ago. 2022