

MNPEF
Mestrado Nacional
Profissional em
Ensino de Física



INSTITUTO FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE

CAMPUS NATAL – CENTRAL / DIRETORIA DE PESQUISA E INOVAÇÃO

MESTRADO NACIONAL PROFISSIONAL EM ENSINO DE FÍSICA

Dissertação de Mestrado

**Desenvolvimento e aplicação de um *e-book* para ensino de física quântica
na perspectiva da sala de aula invertida**

Por

Diêgo Brilhante Da Silva

Natal/ RN

2020

MNPEF
Mestrado Nacional
Profissional em
Ensino de Física



Desenvolvimento e aplicação de um *e-book* para ensino de física quântica na perspectiva da sala de aula invertida

Diêgo Brilhante Da Silva

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

Orientador: Tibério Magno de Lima Alves

Coorientador (a): Andrezza Maria Batista do Nascimento Tavares

Natal/ RN

2020

Desenvolvimento e aplicação de um *e-book* para ensino de física quântica na perspectiva da sala de aula invertida

Diêgo Brilhante Da Silva

Orientador: Tibério Magno de Lima Alves

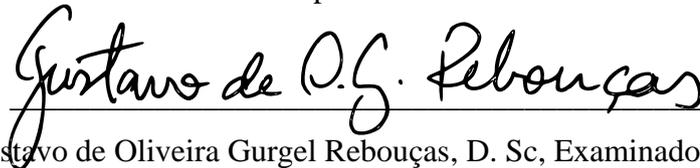
Coorientador: Andrezza Maria Batista do Nascimento Tavares

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

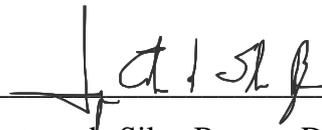
Aprovada por:



Prof. Tibério Magno, de Lima Alves, D. Sc, Presidente
IFRN Campus Natal Central



Prof. Gustavo de Oliveira Gurgel Rebouças, D. Sc, Examinador Externo
Universidade Federal Rural do Semi - Árido



Prof. Jacques Cousteau da Silva Borges, D. Sc, Examinador Interno
IFRN Campus Natal-Central

Natal, RN

Outubro de 2020

Reservado para ficha catalográfica

À minha mãe (Conceição), ao meu pai (Raminho), aos meus irmãos e sobrinhos que sempre estiveram do meu lado incentivando a minha carreira acadêmica.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família, em especial a minha mãe, que sempre esteve me apoiando em todos os momentos que passei no decorrer desse curso. Sem ela nada disso seria possível.

Ao meu pai por todo suporte, proteção e educação.

À minha irmã, Lucinete, que foi minha âncora nos momentos mais difíceis desse percurso.

Ao meu sobrinho Lucas pela maturidade que teve em compreender que nem sempre eu poderia dispor de tempo para brincar com ele.

Aos meus orientadores, Tibério e Andrezza, pela paciência, atenção e disponibilidade para me atender sempre que precisei.

Aos amigos que fiz nesse curso, pelos momentos de distração e conselhos para continuar quando as coisas pareciam não ter saída.

Ao meu amigo Jodinaldo, pelo apoio e incentivo nos momentos necessários.

A todos aqueles que contribuíram com a minha educação, da pré-escola à pós-graduação.

RESUMO

Descrevemos, nessa dissertação, a construção e a aplicação de um *e-book* e de uma sequência didática desenvolvidos como uma proposta para a abordagem de tópicos de física quântica em uma turma da 3ª série do Ensino Médio. O objetivo desse produto educacional é potencializar os processos de ensino e de aprendizagem de tópicos de física quântica (em particular, o tema dualidade onda-partícula) por meio uso das tecnologias da informação e comunicação e metodologias de aula ativas. Como metodologia de aula, utilizamos a sala de aula invertida, uma técnica que inverte a lógica da sala de aula, buscando concentrar num ambiente presencial ou virtual os conteúdos básicos para que a sala de aula exija maior esforço cognitivo do aluno. Apoiando-se na teoria cognitivista de Piaget e no histórico sociocultural de Vygotsky, durante as aulas presenciais buscou-se promover atividades que levassem em consideração a promoção de conflitos cognitivos nos estudantes, a construção e a reconstrução de significados e a socialização das aprendizagens mediante o estudo prévio do tema abordado. A eficácia do produto educacional foi testada na avaliação da aprendizagem dos tópicos apresentados no *e-book* por meio da utilização de questionários desenvolvidos na plataforma do *Google forms*. Os resultados apontam que a utilização desse produto gerou ganhos significativos de aprendizagem sobre os temas por ele abordados.

Palavras chave: *e-book*, física quântica, cognitivismo, sala de aula invertida.

ABSTRACT

We describe, in this dissertation, the construction and application of an e-book and a didactic sequence developed as a proposal for the approach of topics of quantum physics in a class of the 3rd grade of High School. The objective of this educational product is to enhance the teaching and learning processes of quantum physics topics (in particular, the wave-particle duality theme) through the use of information and communication technologies and active class methodologies. As a classroom methodology, we use the inverted classroom, a technique that inverts the logic of the classroom, seeking to concentrate in a classroom or virtual environment the basic contents so that the classroom demands greater cognitive effort from the student. Based on Piaget's cognitive theory and Vygotsky's socio-cultural history, during classroom sessions, we sought to promote activities that take into account the promotion of cognitive conflicts in students, the construction and reconstruction of meanings and the socialization of learning through prior study of the topic addressed. The effectiveness of the educational product was tested in the learning assessment of the topics presented in the e-book using questionnaires developed on the Google forms platform. The results show that the use of this product has generated significant learning gains on the topics it addresses.

Keywords: e-book, quantum physics, cognitivism, inverted classroom.

Lista de Figuras

| | |
|---|------|
| Figura 1: Procedimentos da sala de aula invertida..... | 20 |
| Figura 2: Sistematização de modelo de sala de aula invertida. | 21 |
| Figura 3: Mapa conceitual da ZDP..... | 33 |
| Figura 4: Modelo de corpo negro. | 36 |
| Figura 5: Radiância espectral de um corpo negro em função do comprimento de onda para três temperaturas diferentes. | 377 |
| Figura 6: Previsão da teoria clássica para a densidade de energia de um corpo negro. | 399 |
| Figura 7: Previsão da teoria de Planck para a densidade de energia (linha sólida) compara com os dados experimentais (círculos) e com a previsão de Rayleigh- Jeans e a Lei de Wien (linhas tracejadas). | 4141 |
| Figura 8: ilustração do tubo de vácuo utilizado para estudar o efeito foto elétrico..... | 4343 |
| Figura 9: corrente fotoelétrica em função da diferença de potencial. | 4444 |
| Figura 10: Resultado experimental de difração de elétrons por cristais de ouro..... | 4949 |
| Figura 11 : Interface do SIGIL na tela do computador..... | 5151 |
| Figura 12: instantâneo do ambiente de programação do SIGIL. | 52 |
| Figura 13: Capa do e-book. | 53 |
| Figura 14: O e-book está organizado em cinco capítulos..... | 54 |
| Figura 15: Interface do calibre com algumas versões do e-book no formato EPUB. | 55 |
| Figura 16: interface do e-book em um aparelho de smartfone. | 56 |
| Figura 17: Primeiro encontro da aplicação do produto educacional: apresentação do produto. | 5858 |
| Figura 18: Professor realizando o experimento da dispersão da luz branca com um prisma de Newton..... | 588 |
| Figura 19: Experimento de dispersão da luz branca com um prisma de Newton realizado após debate sobre a hipótese de Newton a respeito da natureza da luz..... | 59 |
| Figura 20: Alunos investigando a passagem da luz LASER por uma fenda dupla de papelão. | 6060 |
| Figura 21: Alunos investigando a difração de ondas na superfície da água..... | 6060 |
| Figura 22: Debate epistemológico sobre a aceitação do modelo ondulatório da luz mediante as contribuições de Maxwell e Hertz..... | 61 |
| Figura 23: Utilização do simulador do efeito fotoelétrico..... | 6362 |
| Figura 24: Alunos respondendo atividade com ajuda do simulador efeito fotoelétrico.. | 6362 |

Lista de Gráficos

| | |
|---|----|
| Gráfico 1: Resultado da questão 01..... | 64 |
| Gráfico 2: Resultado da questão 02..... | 65 |
| Gráfico 3: Resultado da questão 03..... | 66 |
| Gráfico 4: Resultado da questão 04..... | 67 |
| Gráfico 5: Resultado da questão 05..... | 67 |
| Gráfico 6: Resultado da questão 01 do questionário 02..... | 68 |
| Gráfico 7: Resultado da questão 02 do questionário 02..... | 69 |
| Gráfico 8: Resultado da questão 03 do questionário 02..... | 70 |
| Gráfico 9: Resultado da questão 04 do questionário 02..... | 71 |
| Gráfico 10: Resultado da questão 05 do questionário 02..... | 72 |
| Gráfico 11: Resultado da questão 01 do questionário 03..... | 73 |
| Gráfico 12: Resultado da questão 02 do questionário 03..... | 74 |
| Gráfico 13: Resultado da questão 03 do questionário 03..... | 74 |
| Gráfico 14: Resultado da questão 04 do questionário 03..... | 75 |
| Gráfico 15: Resultado da questão 05 do questionário 03..... | 76 |
| Gráfico 16: Resultado da questão 01 do questionário 04..... | 77 |
| Gráfico 17: Resultado da questão 02 do questionário 04..... | 78 |
| Gráfico 18: Resultado da questão 03 do questionário 04..... | 79 |
| Gráfico 19: Resultado da questão 04 do questionário 04..... | 80 |
| Gráfico 20: Resultado da questão 05 do questionário 04..... | 81 |
| Gráfico 21: Resultado da questão 01 do questionário 05..... | 82 |
| Gráfico 22: Resultado da questão 02 do questionário 05..... | 83 |
| Gráfico 23: Resultado da questão 03 do questionário 05..... | 84 |
| Gráfico 24: Resultado da questão 04 do questionário 05..... | 85 |
| Gráfico 25: Resultado da questão 05 do questionário 05..... | 86 |

Lista de Quadros

| | |
|--|----|
| Quadro 1: Exemplos de atividades metacognitivas e seus objetivos..... | 24 |
| Quadro 2: Etapas do processo de aprendizagem segundo Piaget..... | 29 |
| Quadro 3: problema proposto para ser resolvido em sala com a utilização das equações de De Broglie. | 86 |

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO | 13 |
| 2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS..... | 15 |
| 2.1 PROPOSTA METODOLÓGICA | 15 |
| 2.2 TECNOLOGIAS DA INFORMAÇÃO E COMUNICAÇÃO (TICS) E A SALA DE AULA INVERTIDA COMO ALTERNATIVAS FACILITADORAS DOS PROCESSOS DE ENSINO E APRENDIZAGEM..... | 16 |
| 2.3 SALA DE AULA INVERTIDA: CARACTERÍSTICAS, POSSIBILIDADES E DESAFIOS..... | 19 |
| 2.4 METODOLOGIA ATIVA, METACOGNIÇÃO E APRENDIZAGEM | 22 |
| 2.5.1 A teoria do desenvolvimento cognitivo de Jean Piaget: implicações nos processos de ensino e aprendizagem | 26 |
| 2.5.1.1 Assimilação, acomodação e equilíbrio | 28 |
| 2.5.2 A teoria do desenvolvimento cognitivo de Vygotsky: Implicações para os processos de ensino e aprendizagem | 30 |
| 2.5.2.1 Zona de desenvolvimento proximal | 32 |
| 2.5.2.1.1 <i>Ensino, Aprendizagem e Desenvolvimento na perspectiva Vygotskyana</i> | 33 |
| 3 A DUALIDADE ONDA-PARTÍCULA | 35 |
| 3.1 QUANTIZAÇÃO DA ENERGIA: O POSTULADO DE PLANCK..... | 35 |
| 3.1.1 A catástrofe do ultravioleta | 38 |
| 3.1.2 A hipótese de Planck | 40 |
| 3.2 O EFEITO FOTOELÉTRICO..... | 42 |
| 3.3 A DUALIDADE ONDA-PARTÍCULA DA LUZ..... | 46 |
| 3.4 A DUALIDADE ONDA-PARTÍCULA DA MATÉRIA | 47 |
| 3.5 PRINCÍPIO DA COMPLEMENTARIDADE DE BOHR..... | 50 |
| 4 O DESENVOLVIMENTO DE <i>E-BOOKS</i> UTILIZANDO O SIGIL..... | 50 |
| 4.1 O DESENVOLVIMENTO DO PRODUTO EDUCACIONAL | 53 |

| | |
|--|-----------|
| 4.1 QUESTIONÁRIOS DE AVALIAÇÃO | 56 |
| 5 APLICAÇÃO DO PRODUTO EDUCACIONAL..... | 57 |
| 5.1 RESULTADOS | 63 |
| 5.1.1 Análise quantiquantitativa | 63 |
| 6 CONCLUSÃO E PERSPECTIVAS | 88 |
| REFERÊNCIAS | 90 |
| APÊNDICE A | 94 |

1 INTRODUÇÃO

Com o constante desenvolvimento das tecnologias da comunicação e informação, as chamadas TICs, e a utilização frequente dessas tecnologias por alunos e professores, no ambiente escolar e fora das escolas, tem sido cada vez mais imprescindível a incorporação delas nos processos de ensino e de aprendizagem buscando o favorecimento e a utilização de novos métodos na prática pedagógica do professor. No ensino de física, conforme enfatiza Melo (2010), a utilização dessas novas tecnologias tem contribuído na compreensão dos conteúdos físicos por parte dos alunos.

A popularização das TICs permite, desde cedo, que os estudantes se apropriem da utilização de aparelhos eletrônicos, como celulares, computadores, tablets, vídeo games, etc., que fazem parte do cotidiano deles. Nesse sentido, atrair a atenção desses estudantes com os métodos tradicionais de ensino, sem grandes inovações, tem se tornado uma tarefa cada vez mais árdua para o professor de física, o que acaba afastando e desmotivando os jovens pela busca do conhecimento do mundo físico, permitindo que essa disciplina seja umas das que vem perdendo espaço na preferência dos estudantes (SOUZA, 2016, p.16).

Para tanto, a inserção das TICs como elemento mediador no ensino de Física apresenta-se como uma das possíveis soluções para esse problema podendo contribuir significativamente para o processo de ensino e aprendizagem dessa disciplina uma vez que elas permitem um leque de possibilidades, como a disponibilização de conteúdos de forma digital e a abordagem de teorias complexas de forma mais simples, exemplificada e rápida como auxílio de animações disponíveis na rede (SOUZA, 2016, p. 16 -17).

Considerando o atual contexto tecnológico e educacional, tivemos como objetivo nesse trabalho desenvolver um livro digital (*e-book*), uma sequência didática para o ensino de tópicos de física quântica e aplicá-los com a metodologia de aula conhecida como “sala de aula invertida”, que é subsidiada pelo uso das TICs. O produto educacional descrito nesse trabalho constitui o referido *e-book* que aborda tópicos de Física Quântica, questionários avaliativos de cada um dos capítulos do *e-book* e uma sequência didática como proposta de utilização desse material.

Os capítulos a seguir buscam dar suporte teórico a esse trabalho, justificando a importância da sua realização, descrevendo o passo a passo da aplicação do produto

educacional que foi gerado, bem como os resultados alcançados com a sua aplicação e as perspectivas futuras para a utilização desse material.

No capítulo, apresentamos a nossa proposta metodológica para a utilização do produto educacional, uma revisão de literatura sobre as características da sala de aula invertida e as possibilidades de utilização dessa metodologia aplicada. Também apresentamos uma revisão de literatura sobre teorias de aprendizagem cognitivistas que dão suporte a essa metodologia de aula.

No capítulo 3, é feita uma revisão dos conceitos de Física Quântica abordados no *e-book*. São eles: Quantização da energia: o postulado de Planck; o efeito fotoelétrico; a dualidade onda-partícula da luz; a dualidade onda-partícula da matéria; o princípio da complementaridade de Bohr.

No capítulo 4, descrevemos como proceder no desenvolvimento de um *e-book* com a utilização do *software* SIGIL e como se deu o desenvolvimento do nosso produto educacional com esse programa.

No capítulo 5, descrevemos a aplicação do produto educacional passo a passo e a análise dos resultados dos questionários aplicados. E, no capítulo 6, apresentamos a conclusão sobre a aplicação do produto e as perspectivas futuras para sua utilização.

A motivação para o desenvolvimento desse trabalho se deu a partir da observação da necessidade de utilização das TICs no ensino de física como medida para alinhar a prática pedagógica com os processos de ensino e aprendizagem que poderão ser melhor viabilizados com a utilização dessas ferramentas. Em relação à escolha do tema abordado no *e-book*, levou-se em consideração a importância da alfabetização científica dos estudantes na área de física quântica bem como a promoção da valoração desses conhecimentos por parte da comunidade escolar. Dessa forma, compreendendo também a importância dos conhecimentos de física quântica para o desenvolvimento das tecnologias presentes em nosso dia a dia e suas contribuições no campo da educacional, optamos por abordar o tema dualidade onda-partícula em nosso *e-book*.

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 PROPOSTA METODOLÓGICA

A metodologia que foi utilizada na realização desse trabalho é chamada como sala de aula invertida, ou *Flipped Classromm*, e faz parte do pressuposto de que a aprendizagem pode ocorrer dentro e fora do espaço físico das salas de aulas em ambientes externos que sejam mais convenientes aos alunos, sintonizada, portanto, com o pensamento da psicologia da aprendizagem cognitivista. A aula gira em torno do aluno e o professor está presente unicamente para prover *feedback* especializado (BERGMANN e SAMS, 2018, p. 36).

A sala de aula invertida consiste na combinação de diversos recursos áudio visuais (textos, imagens, vídeos, animações, simulações, instruções) que são disponibilizados em um ambiente virtual *online* ou *off-line* de modo que possam ser acessados pelo estudante antes de frequentar a sala de aula, que agora passa a ser o local para trabalhar os conteúdos já estudados, realizando atividades práticas como resolução de problemas e projetos, discussão em grupos, laboratórios etc. (VALENTE, 2014, p. 85).

Para que essa metodologia de aula fosse posta em prática, inicialmente foi preparada uma sequência de ensino-aprendizagem (conteúdo) que foi posteriormente disponibilizada aos alunos em uma plataforma virtual em que puderam acessar fora da sala de aula para estudar.

As aulas presenciais ocorreram tradicionalmente na sala de aula e no horário previamente destinados consistindo em um momento de socialização e organização dos saberes e competências adquiridas no ambiente virtual extraclasse, bem como em uma oportunidade para retirar dúvidas, realizar trabalhos e atividades relativas ao conteúdo que foi acordado no *e-book* disponibilizado virtualmente.

Baseando-se na sala de aula invertida, seguimos os seguintes procedimentos:

Durante a primeira aula de aplicação do produto educacional, foi disponibilizado aos discentes o *link* de acesso ao *e-book* intitulado [**A Dualidade Onda-Partícula: Das Ideias de Newton ao Postulado de De Broglie**](#) (baixar e abrir com um *browser* ou visualizador de epubs). No livro, os interlocutores também tiveram acesso ao conteúdo que foi apresentado

nas aulas presenciais. O conteúdo das aulas foi acessado pelo *link* citado em um momento extra o ambiente físico da sala de aula, antes das aulas presenciais.

As aulas presenciais que ocorreram no horário predestinado, e seguiram a sequência didática dos conteúdos disponibilizados no *e-book*. Nesses encontros, foram realizados, respectivamente: 1) a sistematização por meio de debate e de realização de exercícios sobre o conteúdo que abordado em cada capítulo do livro; 2) a revisão por meio de discursões a respeito do conteúdo, retomando fórmulas e conceitos, tirando dúvidas e realizando atividades experimentais; 3) a construção e reconstrução de significados; 4) e o monitoramento visando a superação de possíveis lacunas psíquicas dos alunos sobre o conteúdo estudado.

Ao final de cada aula, foi solicitado que os discentes conectassem os *links* que dão acesso aos capítulos e aos seus respectivos questionários para fins de testagem das aprendizagens conceituais.

A avaliação da aprendizagem contemplou a participação dos estudantes por meio do envolvimento nas discussões, nas atividades propostas, e na resolução dos questionários ao final de cada capítulo.

2.2 TECNOLOGIAS DA INFORMAÇÃO E COMUNICAÇÃO (TICS) E A SALA DE AULA INVERTIDA COMO ALTERNATIVAS FACILITADORAS DOS PROCESSOS DE ENSINO E APRENDIZAGEM

Nas últimas décadas, o constante desenvolvimento tecnológico aliado à sua acessibilidade tem permitido que a sociedade acesse maiores quantidades de informações rapidamente, esse fenômeno é uma experiência humana recente. As tecnologias têm mudado as formas de se informar, de se comunicar e de se relacionar. Isso também reflete na educação, o que faz com que os professores estejam alinhados com os estudos no campo educacional voltados para as mídias e os processos de ensino e aprendizagem, como esclarece Yoshizawa, Pacheco e Camas (2017):

[...] Por conta desse panorama tecnológico e pelo fato de estarmos lidando com uma diferente forma de receber informações e de nos comunicarmos, faz-se necessário o estudo de como as tecnologias estão sendo incorporadas no espaço educacional, buscando verificar a sua utilização se é feita de forma satisfatória

para os educandos e que favoreça o processo de ensino e aprendizagem (YOSHIZAWA, PACHECO E CAMAS, 2017, p. 6882).

O uso das TICs no ambiente educacional é justificado pela necessidade de adaptação da escola à sociedade do conhecimento e da informação. As instituições conectadas ao contexto de desenvolvimento tecnológico e socioeconômico conseguem ir além das possibilidades das salas de aula baseadas no modelo tradicional de ensino em que o conhecimento está centralizado no professor.

Conforme destaca Frota (2018), o atual modelo de ensino baseado na revolução industrial, com alunos sentados e perfilados assistindo à exposição do conteúdo por um especialista, precisa ser superado por meio da adoção de concepções pedagógicas que provoquem transformação no desenvolvimento dos alunos quanto a motivação e a aprendizagem dos conteúdos. A desmotivação parece ir bem mais além do que o simples desinteresse gerado pela dificuldade dos conteúdos, pode se relacionar também com a metodologia abordada na sala de aula.

As TICs oportunizam aos professores e aos alunos uma diversidade de possibilidades metodológicas que podem ser aproveitadas para superar as lacunas do sistema de ensino centrado no professor, em que o aluno é considerado um sujeito passivo e receptor conhecimento. Elas podem auxiliar no planejamento, no acompanhamento, na viabilização do processo de aprendizagem, na dosagem de desafios e nas atividades propostas em todos os tempos e lugares de aprendizagem significativa.

Moran (2015) enfatiza as vantagens da utilização das TICs nos processos de ensino e aprendizagem ao destacar que:

As tecnologias permitem o registro, a viabilização do processo de aprendizagem de cada um e de todos os envolvidos. Mapeiam os progressos, apontam as dificuldades, podem prever alguns caminhos para os que tem dificuldades específicas (plataformas adaptativas). Elas facilitam como nunca antes formas de comunicação horizontal, em redes, em grupo, individualizada. É fácil o compartilhamento, a coautoria, a publicação, produzir e divulgar narrativas diferentes. A combinação dos ambientes mais formais com os informais (redes sociais, *wikis*, *blogs*), feita de forma inteligente e integrada, nos permite conciliar a necessária organização dos processos com a flexibilidade de poder adaptá-los à cada aluno e grupo (MORAN, 2015, p. 24).

Frota (2018) enfatiza que a disseminação e o desenvolvimento das TICs proporcionaram o surgimento da modalidade de ensino através da internet (*e-learning*) que juntamente com o aprimoramento das teorias pedagógicas pensadas para ambientes computacionais culminaram em uma revolução na educação à distância (EaD) possibilitando

a transposição do ensinar e do aprender para ambientes e que estão além do espaço físico e do tempo das salas de aula.

Acompanhando o desenvolvimento tecnológico que permite a integração das salas de aulas MORAN (2015) propõe o ensino híbrido (*blended learning*) a partir do ensino através da internet (*e-learning*) como alternativas para ampliar as possibilidades do desempenho, da autonomia e do protagonismo dos alunos através da utilização de metodologias ativas de ensino.

As metodologias ativas de ensino caracterizam-se como estratégias pedagógicas que estão centradas na atividade dos alunos nos processos de aprendizagem, contrastando com o modelo tradicional centrado no professor, que é mero transmissor de informações. O ensino ativo busca envolver os alunos, engajando-os em atividades na quais são os principais responsáveis pela execução, criando situações de aplicação de conhecimentos previamente adquiridos e possibilitando a construção de outros (VALENTE, ALMEIDA e GERALDINI, 2017, p. 463).

Para Moran (2017), as metodologias ativas são estratégias de ensino centradas na participação efetiva dos estudantes durante a construção de aprendizagem nas perspectivas flexíveis, interligada e híbrida. Na educação do século XXI, o mundo conectado e digital, ampara modelos de ensino híbrido, com a possibilidade de muitas combinações possíveis.

Segundo Schmitz (2016), é a combinação de recursos e métodos presenciais ou *online* que promovem benefícios para a escola progressista que é reconhecida como ensino híbrido. No atual contexto educacional, essa modalidade de ensino surge como uma inovação que atrela sala de aula convencional com os benefícios da Educação à Distância (EaD).

Ainda segundo Schmitz (2016), a técnica mais simples que pode ser utilizada por professores para promover o engajamento dos alunos no híbrido é a “sala de aula invertida”.

A sala de aula invertida é uma metodologia de ensino híbrido que busca concentrar num ambiente presencial ou virtual os conteúdos básicos para que a sala de aula exija maior esforço cognitivo do aluno (MORAN, 2015, p. 22). A técnica consiste em inverter a lógica da sala de aula convencional, buscando levar para as aulas as atividades que anteriormente eram realizadas em casa e deixando o conteúdo da aula disponível em um ambiente *online* que pode ser acessado a qualquer hora e lugar.

Segundo Bergman (2018), dentre as vantagens da sala de aula invertida se destaca o fato de que essa técnica permite que haja uma maior interação entre professor e aluno, bem

como entre os próprios alunos, favorecendo otimização do tempo da aula uma vez que o tempo, que antes era dedicado para a exposição oral do conteúdo pelo professor ou leitura do conteúdo pelos alunos, passa a ser utilizado para a promoção de debates e para a exploração de ideias ou dúvidas individuais ou coletivas dos alunos.

A inversão da sala de aula, além de mudar a dinâmica das aulas presenciais, muda também o papel do professor no que diz respeito a responsabilidade sobre o processo de transposição e construção do conhecimento. O professor deixa de ser um mero transmissor de informações e passa a atuar como orientador da prática educativa (BERGMANS e SAMS, 2018 p. 33), propondo exercícios e estratégias que melhorem a aprendizagem dos alunos, enquanto estes tornam-se os protagonistas da sua própria aprendizagem uma vez que tomam para a si a responsabilidade de questionar, elaborar perguntas e buscar soluções para as situações problematizadas propostas pelo professor com base em seus conhecimentos.

De acordo com Schmitz (2016), apesar da inversão da sala de aula ser uma didática usual há tempos, tem sido estruturada por meio de novo conceito a aproximadamente uma década. Sem dúvida, nos últimos cinco anos o novo termo cunhado foi amplamente adotado pelas TICs que são as responsáveis por tornar essa metodologia mais acessível e mais usual. Esse fato de conceito recente explica a causa da escassez de literatura bibliográfica que dialogue sobre esse conceito (Texeira, 2003 *apud* Schmitz, 2016, p. 43).

Segundo Bergamans e Sams (2016), O’Flaherty e Phillips (2015) *apud* Schmitz (2016), não existe um modelo definido de sala de aula invertida. As buscas por experiências com o uso dessa metodologia de ensino apontam para algumas de suas características fundamentais : 1) o acesso do aluno com antecedência ao conteúdo da aula; 2) a competência do educador em entender e atender as demandas específicas e coletivas dos estudantes; e, 3) o maior aprendizado e aproveitamento no tempo da aula presencial.

2.3 SALA DE AULA INVERTIDA: CARACTERÍSTICAS, POSSIBILIDADES E DESAFIOS

A sala de aula invertida consiste na combinação de recursos áudio visuais (textos, imagens, vídeos, fóruns, animações, simulações etc.) que devem ser disponibilizados em

ambientes presencial ou virtual de modo que possam ser acessados a qualquer momento pelos estudantes e posteriormente problematizados na aula presencial.

Nessa metodologia de aula, cabe ao professor preparar as sequências didáticas de ensino e aprendizagem e disponibilizar para os alunos por meio de plataformas (biblioteca ou nuvem) de acesso para estudos metacognitivos. Com a técnica, a aula presencial ou *online*, que ocorre convencionalmente na sala de aula, no local e horário previamente destinados, tornar-se-á um momento de socialização, de organização dos saberes, de competências adquiridas, de oportunidade para retirar dúvidas, de realização de trabalhos e de atividades para o aprofundamento de conteúdo abordado nas plataformas.

Schmitz (2016) elucida as principais características do modelo de sala de aula invertida enfatizando, no entanto, que não há uma única maneira de inverter a sala de aula. Para ele, essa metodologia de ensino é considerada uma inovação de natureza híbrida porque:

- a) combina a instituição escolar convencional com desenvolvimento tecnológico centrado no aluno;
- b) preserva a função da sala de aula mantendo os alunos nesse espaço por mais tempo;
- c) amplia o conhecimento do aluno, desenvolve a sua capacidade cognitiva, relaciona o saber e o fazer, aproxima as habilidades cognitivas da gestão dos dispositivos digitais, integra os conhecimentos e todas as experiências obtidas presencialmente e *online* com as orientações do professor.

A Figura 1 elucida em um fluxograma os procedimentos da sala de aula invertida.

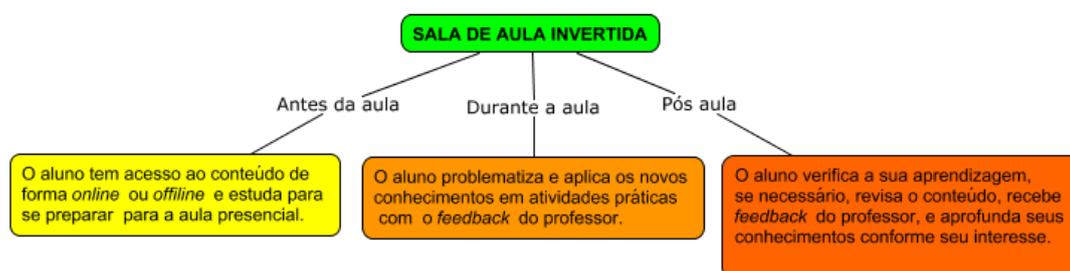


Figura 1: Procedimentos da sala de aula invertida.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Nota-se a partir das características da sala de aula invertida que o cerne dessa metodologia são as interações e as atividades significativas que são oportunizadas entre os alunos e professores e entre os alunos. Nessa técnica merece realce a visualização de vídeos, leitura de textos, visualização de imagens, simulações, entre outros.

Conforme destacam Ortega, Menuzzi, Knittel e Silva (2017), é papel do professor, neste processo, reinventar antigas metodologias para valorizar a individualidade, proporcionando situações variadas de aprendizagem que favoreçam a colaboração e a construção coletiva do conhecimento a partir das contribuições individuais de cada aluno ao mesmo tempo que incentive o seu protagonismo.

Nesse ambiente, o professor atua como um orientador da prática educativa e não como a única fonte de conhecimento, o que não reduz a sua importância no processo educacional, apenas altera a sua posição de transmissor do conhecimento, em aulas expositivas, para colaborador com a aprendizagem (YOSHIZAWA, PACHECO e CAMAS, 2015, p. 6894).

Assim, faz então necessário que o professor conheça bem a metodologia da Sala de Aula Invertida para que tenha habilidade na produção de material para o aluno trabalhar *online* e para que planeje as atividades presenciais visando o maior engajamento dos alunos em harmonia com a utilização das tecnologias.

A Figura 02 esquematiza segundo Schmitz o papel do professor e do aluno em cada etapa dessa abordagem de ensino:

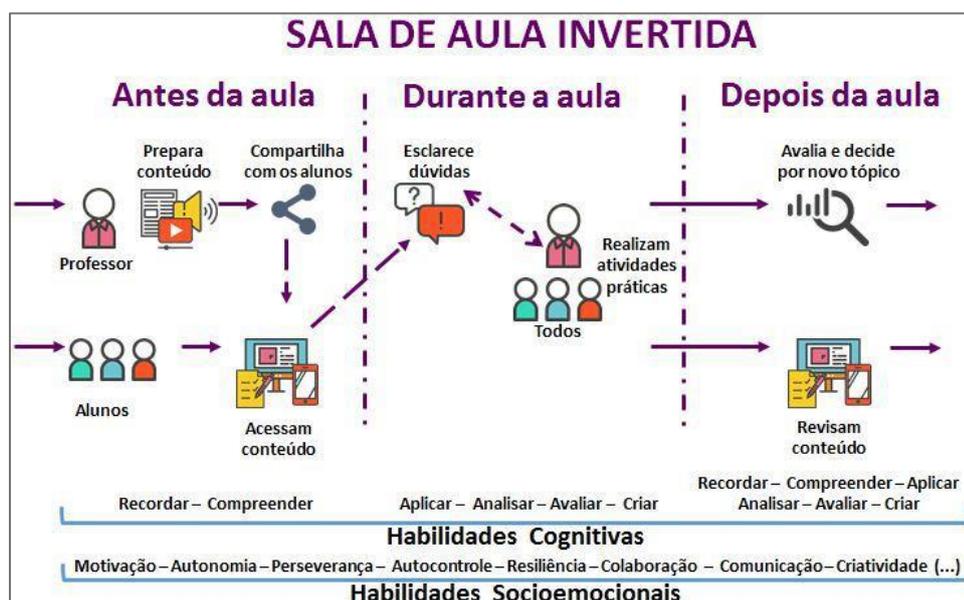


Figura 2: Sistematização de modelo de sala de aula invertida.

Fonte: Schmitz (2016)

Acesso em: maio 2018.

Observa-se que o tempo que antes era dedicado à realização das oralidades expositivas pelo professor agora é dedicado à realização de atividades para a metacognição que objetivam amentar a compreensão dos alunos por meio da discursão e aplicação de

conceitos-chave do conteúdo previamente estudado, proporcionando aos alunos atividade de autonomia e de auto avaliação no momento de verificação das aprendizagens.

No tocante as teorias cognitivistas, Schmitz (2016) observa que essa metodologia é plural na cooptação de espectros do pensamento de diferentes correntes como a teoria behaviorista, Teoria das Inteligências Múltiplas de Gardner, teorias construtivistas e sócio construtivistas de Piaget e Vygotsky, Teoria Cognitiva da Aprendizagem Multimídia de Mayer e mais a Taxonomia revista de Bloom.

Uma das limitações dessa metodologia, segundo Schmitz (2016), está na dificuldade dos professores em controlar o acesso dos alunos aos matérias *online* antes das aulas, pois os alunos são menos propensos a se engajar em atividades antes das aula, o que gera um desnivelamento na aula presencial entre os estudantes que acessam o material e os que não se propuseram a acessar, ou não puderam. Os professores precisam estar atentos para isso.

Outro fator que também deve ser levado em consideração é a falta de conhecimento do professor acerca do que o aluno absorveu do estudo *online*, o que exige mais do professor em termos de flexibilidade e criatividade para que se possa identificar possíveis erros e lacunas no entendimento dos alunos sobre o conteúdo.

De acordo com Schmitz (2016), todas as soluções com esse modelo de ensino sugerem que uma saída para essa situação é a realização de testes virtuais e presenciais enquanto o *feedback* necessário para prosseguimento das atividades.

2.4 METODOLOGIA ATIVA, METACOGNIÇÃO E APRENDIZAGEM

Na educação do século XXI há uma constante disputa pelo espaço na atenção dos alunos que vem sendo protagonizada entre os saberes mediados pelos docentes e entre as informações que são obtidas por meio das mídias sociais e televisivas, que muitas vezes exercem controle sobre os seus usuários. Nesse sentido, faz-se necessário à educação escolar a utilização de estratégias que possibilitem aos discentes o gerenciamento, a seleção e o tangenciamento dessas informações objetivando o seu melhor aproveitamento no espaço escolar e na vivência cotidiana.

Para que seja possível o desenvolvimento da consciência e da gestão da própria aprendizagem por parte dos discentes, aliados ao melhor uso dos recursos informacionais

que hoje estão disponíveis, é necessário que se priorize a reflexão sobre as formas de pensar a rotina da sala de aula.

Conforme enfatiza Davis; R. Nunes; e A. Nunes, (2004), o cerne da implementação de uma “cultura do pensamento” sobre a sala de aula é o desenvolvimento da cultura metacognitiva entre os discentes.

Tais atividades metacognitivas, como por exemplo, o auto-questionamento a respeito de um texto lido, favorecem tanto a cognição quanto a reflexão do aluno, assim como a sua forma de pensar a respeito de um conteúdo buscando ampliar o seu repertório de conhecimento (RIBEIRO, 2003).

Dessa forma, podemos entender que as atividades metacognitivas dão aos alunos a possibilidade de exercer o controle sobre a sua própria aprendizagem e sobre o processo de reflexão. A metacognição é um exercício do pensamento que deve ser empregado em outros contextos para além da sala de aula. Tendo explanado os seus benefícios, resta agora explicitar o que é a metacognição.

A metacognição, para autores como Flavell (1981) e Campione, Brown, Ferrara (1982), não é um termo facilmente conceituado, uma vez que se refere ao conhecimento acerca da aquisição do próprio conhecimento e das formas de pensar, ou seja, o metaconhecimento no sentido de se obter o controle executivo ou a auto-regulação do pensamento.

Segundo Ribeiro (2003), no domínio educacional encontramos duas formas genéricas de entendimento da metacognição: O domínio do conhecimento e o controle e a auto-regulação da cognição.

A primeira forma refere-se a tomada de consciência dos saberes e competências necessários à realização de uma tarefa. Nesse quesito, cabe aos professores promover atividades de auto-conhecimento em que o aluno terá a oportunidade avaliar-se reconhecendo o que já sabe ou ainda não sabe a respeito de um determinado assunto, podendo escolher uma estratégia que melhore seu desempenho na aprendizagem.

A segunda forma diz respeito a capacidade de avaliar a execução de uma tarefa e fazer correções quando necessário, mudando a estratégia escolhida ou adaptando-a de acordo com a nova situação enfrentada ao buscar o controle da atividade cognitiva. O professor, exercendo o papel de mediador do processo de ensino-aprendizagem, deve instigar o aluno a refletir sobre as possíveis estratégias empregadas na resolução de um problema e como a opção de utilizar uma estratégia, ou outra, irá influenciar os resultados obtidos.

O quadro 1 exibe algumas atividades metacognitivas que podem ser empregadas na sala de aula visando melhoria da capacidade cognitiva e metacognitiva dos alunos:

| Quadro 1: Exemplos de atividades metacognitivas e seus objetivos | |
|--|--|
| Atividade | Objetivo |
| Indução do autoconhecimento. | Regulação do pensamento/ controle executivo. |
| Anotações sobre a aula. | Auto-regulação da cognição. |
| Avaliação da matéria no final da aula. | Auto-regulação da cognição. |
| Construção de mapas conceituais. | Auto-regulação da cognição. |
| Análise de possíveis estratégias empregadas na resolução de um problema e das possíveis respostas obtidas. | Controle executivo. |
| Reconhecimento das estratégias que facilitam a aprendizagem de um conteúdo e a sua operacionalização. | Aprender como se aprende/ aprender a fazer. |

Fonte: Elaborado pelo autor.

O principal objetivo da utilização de atividades metacognitivas na sala de aula ativa é o desenvolvimento de habilidades metacognitivas nos alunos com foco principal no “aprender a aprender”, pois conforme Beber, Silva e Bonfiglio (2014), no momento em que o aprendiz torna-se consciente da sua própria aprendizagem e passa a utilizar estratégias para regula-la, o mesmo não é mais um simples receptor de informações, mas um agente ativo na construção de sua aprendizagem e conhecimento.

Ao adquirir habilidades metacognitivas, como por exemplo o auto-controle, o aluno torna-se consciente de que não depende exclusivamente do professor para aprender algo novo ou desenvolver uma nova habilidade.

Ao professor cabe a função de facilitador da aprendizagem, uma vez que o aluno toma consciência que é o maior responsável por sua própria aprendizagem. O professor deve então proporcionar esse momento de auto-avaliação e auto-regulação ao aluno, pois o mesmo nem sempre consegue se auto-avaliar de forma competente (BEBER, SILVA e BONFIGLIO, 2014, p.149).

Na sequência didática desenvolvida para a aplicação do produto educacional descrito nessa dissertação, são propostos dois exercícios de natureza metacognitiva nas aulas IV e VI.

O exercício proposto na aula IV consiste na construção de um mapa conceitual na lousa. Esse mapa deverá ser construído pelo professor a partir dos principais conceitos sobre o modelo ondulatório da luz que serão elencados pelos alunos após serem estimulados com perguntas problematizadoras sobre o conteúdo. O professor deverá relacionar os conceitos montando o mapa conceitual a partir da exploração das ideias dos alunos, promovendo assim um momento de aprendizagem e de reflexão sobre os conhecimentos adquiridos.

O exercício proposto na aula VI inicia a partir do levantamento de ideias dos alunos sobre a natureza da luz e da matéria a partir de uma única pergunta problematizadora seguido num momento de defesa de argumentos por parte dos alunos. Esse exercício busca fazer com que os alunos tomem consciência dos seus conhecimentos sobre o assunto e percebam se esses conhecimentos são suficientes para defender seus pontos de vista sobre a natureza da luz e da matéria.

2.5 TEORIAS COGNITIVISTAS DE APRENDIZAGEM

A teoria cognitivista inicialmente se organiza em comunidade científica nos Estados Unidos, no período entre 1950 e 1960, alcançando o seu auge nos anos 1990 (NEUFELD, BRUST e STEIN, 2011). Essa abordagem da psicologia da educação promove o resgate das teorias clássicas de Jean Piaget (1896 – 1980) e de Lev Vygotsky (1896 -1934) que apesar de não desenvolverem uma teoria para a aprendizagem propriamente dita, sistematizaram pesquisas e teses que auxiliam fundamentalmente no alcance dos objetivos relacionados a aprendizagem e ao desenvolvimento no campo da educação.

Contrapondo-se às abordagens da psicologia behaviorista e ao pensamento da pedagogia tradicional, as teorias cognitivistas de aprendizagem se propõem a analisar os processos mentais que norteiam e articulam a forma como o ser humano constrói conhecimento acerca do mundo a partir da apreciação dos aspectos envolvidos no processo interno da aprendizagem do indivíduo. “Teorias cognitivas tratam da cognição, de como o indivíduo “conhece”, processa a informação, compreende e dá significados ao pensamento” (MOREIRA, 1999, p. 21).

Para Ostermann e Cavalcanti (2011), a corrente cognitivista enfatiza os processos de cognição por meio dos quais a pessoa atribui significados à realidade na qual está inserida.

Ao tratar principalmente dos processos mentais, essa corrente se ocupa da atribuição de significados, da compreensão, transformação, armazenamento e do uso da informação envolvida na cognição (MOREIRA, 1999, p.15).

Ainda segundo Moreira (1999, p. 35 - 36), a corrente cognitivista:

[...] Trata-se de uma orientação psicológica que se ocupa muito mais de variáveis intervenientes do tipo cognições e intenções, dos chamados processos mentais superiores (percepção, resolução de problemas por insight, tomada de decisões, processamento de informação, compreensão), do que de estímulos e respostas. Em todos esses processos, a cognição (qualidade ou estado de estar cômico, ciente) tem um papel preponderante. Teorias de aprendizagem nessa linha são chamadas de cognitivistas ou centralistas, em contraposição às behavioristas, que são ditas periferalistas (MOREIRA, 1999, p. 35 -36).

Uma abordagem de ensino cognitivista deve estar centrada em múltiplos fatores como no sujeito aprendiz, nos estímulos ambientais, na maneira com que as relações sociais influenciam a aprendizagem e na mediação da relação com o mundo. Um ensino que procura desenvolver a inteligência devendo priorizar as atividades do sujeito, considerando-o inserido numa situação social (MIZUKAMI, 1986, p. 75).

Embora diversos autores tenham desenvolvido trabalhos seguindo a corrente cognitivista, dentre os quais podemos destacar Jerome Bruner (1915), David Ausubel (1918 – 2008), Novak e Kelly (1963), entre outros, na presente seção da dissertação, buscaremos apresentar os trabalhos de Jean Piaget e Lev Vygotsky sobre suas teorias do desenvolvimento cognitivo e o desenvolvimento educacional.

É importante enfatizar que a escolha dessas teorias foi realizada com base na abordagem pedagógica empregada na aplicação do produto educacional descrito nesse trabalho nos capítulos adiante, e não guiada por uma visão reducionista de que as teorias construtivistas são as mais adequadas para o desenvolvimento do ensino e da aprendizagem. Reconhecemos que todas as teorias de aprendizagem possuem aspectos importantes que podem ser usuais na orientação da prática pedagógica e na ação docente das instituições educacionais.

2.5.1 A teoria do desenvolvimento cognitivo de Jean Piaget: implicações nos processos de ensino e aprendizagem

Como já foi ressaltado, a teoria do desenvolvimento cognitivo de Jean Piaget não se trata de uma teoria de educação em sua essência, mas de uma teoria sobre como o homem constrói conhecimento. É uma teoria interacionista e construtivista do desenvolvimento da inteligência segundo a qual os conhecimentos não são resultantes de condições inatas ao ser humano, mas são gerados a partir de construções sucessivas que se apoiam na elaboração de novas estruturas cognitivas.

Conforme Mizukami (1986), considerando-se o fato de que se trata de uma perspectiva interacionista, o foco da análise na perspectiva piagetiana concentra-se na relação homem e mundo, uma vez que conforme essa abordagem, o conhecimento é produto da interação entre eles, sujeito e objeto de conhecimento.

Em seus estudos Piaget distinguiu o desenvolvimento mental das crianças em quatro períodos gerais de desenvolvimento cognitivo, a saber: sensorio – motor, pré-operacional, operacional – concreto e operacional - formal. Cada período corresponde a uma fase de desenvolvimento da criança que se inter-relaciona e se sucede aos anteriores, não existindo uma idade específica para a transição de um estágio de desenvolvimento mental para o estágio seguinte (MIZUKAMI,1986).

As características de cada fase são, segundo Furth (1974) *apud* Mizukami (1986):

1. Cada estágio envolve um período de formação (gênese) e um período de realização. Realização é caracterizada pela progressiva organização composta de operações mentais.
2. Cada estrutura constitui ao mesmo tempo a realização de um estágio e o começo do estágio seguinte, de um novo processo evolucionário.
3. A ordem de sucessão dos estágios é constante. Idades de realização podem variar dentro de certos limites em função de fatores tais como motivos, exercício, meio cultural e outros.
4. A transição de um estágio anterior ao seguinte segue a lei de implicação análoga ao processo de integração. As estruturas precedentes tornam-se parte das estruturas posteriores (MIZUKAMI, 1986, p.60).

A aprendizagem na perspectiva piagetiana está relacionada à quatro fatores comportamentais que resultam na formação das estruturas cognitivas: a maturação, a transmissão social, a experiência e a equilíbrio das estruturas cognitivas (NUÑEZ e FARIA, 2004, p. 43).

Para Nuñez e Faria (2004), a teoria de Piaget procura explicar como se gera conhecimento e se constrói a inteligência, como forma de adaptação do indivíduo ao meio em que vive. Essa adaptação ao meio, segundo Piaget, é atingida por meio de dois mecanismos: a *assimilação* e a *acomodação* que é mediada pela *equilibração* das estruturas cognitivas diante das novas situações enfrentadas pelo indivíduo.

2.5.1.1 Assimilação, acomodação e equilibração

A assimilação ocorre a partir da interação entre o sujeito e o objeto tendo que o indivíduo construir esquemas mentais para abordar a realidade retirando e retendo informações sobre o contexto. Essas informações são selecionadas a partir de esquemas mentais já existentes mentalmente. Ao assimilar uma informação, o organismo incorpora a realidade a seus esquemas de ação, impondo-se ao meio (MOREIRA, 1999, p.100).

A assimilação, de acordo com Piaget, não é a simples identificação de informação, mas sim, a construção de novas estruturas e a incorporação de novos repertórios a essas estruturas em função de conhecimentos já existentes na estrutura cognitiva.

Nas palavras de Pádua (2009):

[...] assimilação significa interpretação, ou seja, ver o mundo não é simplesmente olhar o mundo, mas é interpretá-lo, assimilá-lo, tornar seus alguns elementos do mundo, portanto, isso implica necessariamente em assimilar algumas informações e deixar outras de lado a cada relação existente entre o sujeito e o objeto (PÁDUA, 2009, p. 3).

Em muitas situações a criança, ou mesmo adulto, quando não consegue assimilar, o indivíduo precisa construir novos esquemas de assimilação, o que faz com que a sua mente se reestruture para que aconteça a acomodação, ampliando a unidade cognitiva por meio do conhecimento.

A acomodação compreende um movimento posterior a dinâmica de modificação das estruturas mentais que o indivíduo promove para conhecer o mundo. A acomodação acontece depois do conflito com uma situação nova e desestruturante, quando o ponto de vista se modifica para se adequar às necessidades e singularidades do objeto (PÁDUA, 2009).

Não há acomodação sem assimilação, pois acomodação é reestruturação da assimilação. O equilíbrio entre assimilação e acomodação é a *adaptação* à situação. Experiências acomodadas dão origem, posteriormente, a novos esquemas de assimilação e um novo estado de equilíbrio é atingido. Novas experiências, não assimiláveis, levarão a novas acomodações e a novos equilíbrios (adaptações) cognitivos [...] (MOREIRA, 1999, p. 100, grifo do autor).

Na interação entre o sujeito e o objeto de conhecimento poderá haver o desenvolvimento de um conflito cognitivo por parte do sujeito com o seu objeto de conhecimento na tentativa de assimilá-lo. O que é novo ao sujeito pode apresentar resistências à sua assimilação. O que faz com que o sujeito necessite experimentar outras mediações para modificar as suas estruturas mentais e acomodá-las.

Segundo Pádua (2009), é essa busca pela adaptação das estruturas cognitivas às novas demandas impostas pelo objeto, que Piaget chamou de *equilíbrio*. Na perspectiva piagetiana, o desenvolvimento da inteligência do sujeito é um processo conflituoso que envolve equilíbrio, *desequilíbrio* e *reequilíbrio* das suas estruturas cognitivas, não sendo um fluxo de algo estável e sim algo dinâmico.

Piaget considera que o processo de desenvolvimento se dá pelo equilíbrio entre a assimilação e a acomodação que culmina com a construção de novos significados na unidade cognitiva do sujeito. Nesse sentido, o desenvolvimento pode ser entendido como uma construção por *equilibrações* e *reestruturações* sucessivas (MOREIRA, 1999).

Considerando tais processos, Moreira (1999) enfatiza as implicações dessas proposições de Piaget para o ensino. Sobre isso afirma que ensinar (e educar num sentido amplo) consiste em provocar o *desequilíbrio* (conflito cognitivo) na mente do sujeito para que ele, procurando o equilíbrio, se reestruture cognitivamente e aprenda.

Outra implicação da teoria de Piaget para o ensino é a de que esse processo deve ser acompanhado de ações e demonstrações dando a oportunidade aos alunos de interagirem com o objeto de conhecimento. O ponto fundamental do ensino, portanto, consiste em processos e não em produtos de aprendizagem (MIZUKAMI, 1986).

O quadro 2 a seguir esquematiza esses processos em função dos produtos da aprendizagem:

Quadro 2: Etapas do processo de aprendizagem segundo Piaget

Etapas do processo de aprendizagem

| Etapas | Conceito | Aquisições |
|---------------------|--|--|
| Assimilação | Interação entre o sujeito e o objeto de conhecimento; Interpretação do contexto. | Construção de esquemas mentais. |
| Acomodação | Reestruturação das habilidades cognitivas através da modificação das estruturas mentais; Reinterpretação. | Ampliação da unidade cognitiva; Mudança na forma de pensar. |
| Equilibração | Adaptação da estrutura cognitiva às novas demandas do objeto de conhecimento. | Construção de novos significados. |

Fonte: elaborado pelo autor.

Em relação a aprendizagem, Piaget só a considera quando se produz um desequilíbrio ou conflito cognitivo. O aluno constrói conhecimento por meio do exercício contínuo e progressivo da atividade mental.

2.5.2 A teoria do desenvolvimento cognitivo de Vygotsky: Implicações para os processos de ensino e aprendizagem

Ao contrário do que propõe Piaget que determina que só há aprendizagem quando ocorre desenvolvimento cognitivo por meio de desenvolvimento e maturação das estruturas cognitivas, para Vygotsky, o desenvolvimento cognitivo do sujeito ocorre durante o processo de aprendizagem.

A teoria do desenvolvimento cognitivo de Vygotsky segue uma linha sociointeracionista e está firmada na premissa de que é através da socialização que se dá o desenvolvimento das capacidades cognitivas. A unidade de análise de sua teoria do desenvolvimento cognitivo é a interação entre o sujeito e o contexto no qual ele está inserido.

O desenvolvimento cognitivo, para Vygotsky, depende do contexto social, histórico e cultural no qual o sujeito interage e se dá por meio de processos de origem natural e social

que são mediados por instrumentos e/ou signos próprios da linguagem e comunicação humana.

Segundo Vygotsky *apud* MOREIRA (1999), os processos mentais superiores (raciocínio, linguagem, formação de conceitos, comportamento autônomo) tem origem em processos sociais. Assim, considera que o desenvolvimento cognitivo se dá pela conversão das relações sociais em funções mentais superiores por meio da internalização, que ocorre através de processos de mediação.

Moreira (1999) enfatiza a importância da mediação no desenvolvimento cognitivo do sujeito ao exemplificar a situação em que um indivíduo que entra em contato com instrumentos e signos de outras culturas, mas que não os reconhece. A ausência de significados bloqueia a identificação dos instrumentos de transmissão cultural, pois sem significados e mediação não há como o indivíduo atribuir sentidos condizentes com o contexto social.

É por meio da mediação que se dá a internalização (reconstrução interna de processos externos ao indivíduo) das atividades e comportamentos sócio-históricos e culturais.

A mediação entre as relações sociais e o desenvolvimento cognitivo do sujeito ocorre devido a utilização de instrumentos e de signos que são construções socio-históricas e culturais. Segundo Vygotsky, é por meio da apropriação e reconstrução dessas construções sociais que o indivíduo se desenvolve cognitivamente, convertendo os sistemas de regulação externas em meios de autorregulação e promovendo a construção da consciência humana (OSTERMANN e CAVALCANTE, 2011).

Segundo Moreira (1999), os instrumentos e signos são:

[...] Um instrumento é algo que pode ser usado para fazer alguma coisa; um signo é algo que significa alguma outra coisa. Existem três tipos de signos: 1) indicadores, são aqueles que têm uma relação de causa e efeito com aquilo que significam (e.g., fumaça indica fogo, porque é causada por fogo); 2) icônicos, são imagens ou desenhos daquilo que significam; 3) simbólicos, são os que têm uma relação abstrata com o que significam. As palavras, por exemplo, são signos linguísticos, os números são signos matemáticos; a linguagem, falada e escrita, e a matemática são sistemas de signos (MOREIRA, 1999, p. 111).

Conforme enfatizam Nuñez e Ramalho (2004), com os instrumentos o sujeito realiza atividades por meio das quais busca atuar sobre a realidade adaptando-se a ela, ao mesmo tempo que também a transforma e transforma a si mesmo com esses instrumentos

psicológicos mediadores. Nesse sentido, o sujeito pode ser entendido como um produto do meio e, ao mesmo tempo, um agente transformador desse meio.

Vygotsky considera que a fala é o mais importante sistema de signos para o desenvolvimento cognitivo da criança, pois é por meio da linguagem que o sujeito descontextualiza os signos e passa a utilizá-los com maior grau de abstração, desvinculando-os das situações concretas imediatas.

O desenvolvimento cognitivo pleno é então alcançado quando o pensamento e a linguagem convergem para a construção de significados e o sujeito passa a generalizar os signos em muitas outras instancias e situações, partindo do concreto para o abstrato. A linguagem é também o principal e o mais funcional meio de mediação da cultura (NUÑEZ e RAMALHO, 2004).

2.5.2.1 Zona de desenvolvimento proximal

Um dos conceitos principais da teoria de desenvolvimento cognitivo de Vygotsky é “zona de desenvolvimento proximal” (ZDP). Para ele, a apropriação de instrumentos e a internalização de signos e sistemas de signos pelo sujeito (aprendizagem) é a condição fundamental para o desenvolvimento das funções mentais superiores desde que essa internalização aconteça na zona de desenvolvimento potencial do sujeito.

A zona de desenvolvimento proximal é definida como a distância entre a Zona de desenvolvimento real (nível real do sujeito), que determina pela autonomia em fazer sozinho, e a zona de desenvolvimento potencial (nível potencial do sujeito) determinada pela superação de problemas com necessita de ajuda de outros para resolver (NUÑEZ e RAMALHO, 2004).

Vygotsky determina o limite inferior (zona de desenvolvimento real) dessa zona como o nível de desenvolvimento em que o aprendiz se encontra e o limite superior (zona de desenvolvimento potencial) como a região na qual deve haver ganho de aprendizagem. A Figura 3 sistematiza a ZDP mostrando como a interação social nos limites dessa zona produz diferentes resultados.

Mapa conceitual de Zona de Desenvolvimento Proximal para Vygotsky

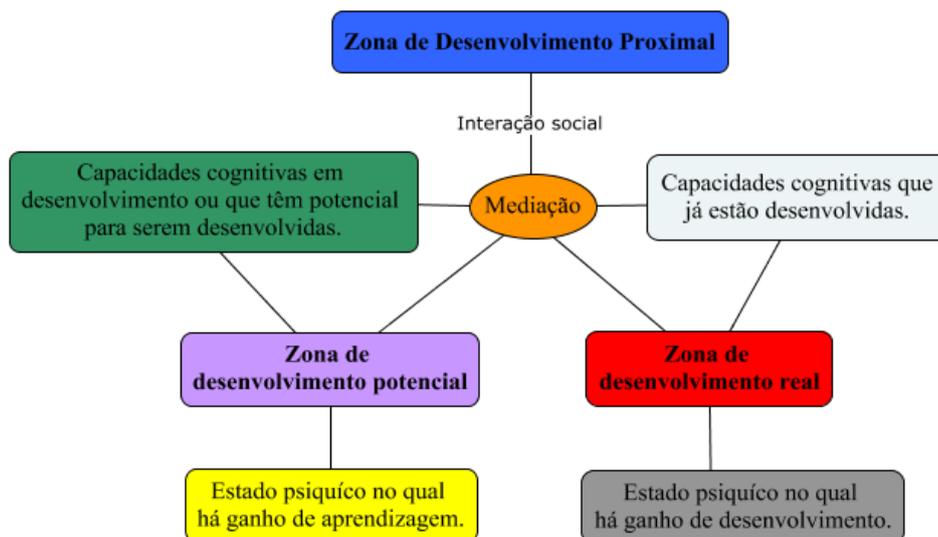


Figura 3: Mapa conceitual da ZDP.
Fonte: elaborado pelo autor.

Segundo Moreira (1999), a interação social deve acontecer dentro da zona de desenvolvimento potencial do sujeito para que haja ganho de aprendizagem. Dessa forma, os processos que ocorrem no limite inferior dessa zona não geram ganho de aprendizagem uma vez que as funções mentais necessárias para a sua transcrição já estão formadas. É na zona de desenvolvimento potencial que o desenvolvimento cognitivo acontece constantemente e que os professores devem focar as suas mediações didáticas.

2.5.2.1.1 Ensino, Aprendizagem e Desenvolvimento na perspectiva Vygotskyana

Na perspectiva Vygotskyana, tanto o ensino quanto a aprendizagem devem estar à frente do desenvolvimento cognitivo, pois conforme Vygotsky *apud* Ivan e Ivic (2010), a aprendizagem que está orientada para níveis de desenvolvimento já alcançados não é efetiva para estimular o sujeito a alcançar maiores níveis de desenvolvimento mental.

O papel do professor nessa perspectiva sócio-histórica é atuar como mediador dos significados socialmente aceitos no contexto da matéria de ensino. Ele não é o detentor de todo o conhecimento sobre o assunto abordado, mas numa situação de aprendizagem, é o

que está mais avançado em relação a bagagem de conceitos e na promoção da construção dos significados desses conceitos pelos alunos. Aos alunos cabe devolver ao professor os significados que ele internalizou e verificar se esses significados são socialmente e culturalmente aceitos. O ensino se consuma quando aluno e professor compartilham significados na situação de aprendizagem, enquanto a aprendizagem é verificada na externalização e reconstrução desses significados em outros contextos sociais (MOREIRA, 1999).

Assim, a aprendizagem é uma atividade de construção e reconstrução da cultura que é sempre mediada pela interação social iniciada desde o nascimento da criança e que persiste por toda a vida do sujeito como um aspecto indispensável ao processo de desenvolvimento das funções psicológicas. O desenvolvimento físico está condicionado em parte ao processo de maturação biológica, mas o desenvolvimento dos processos mentais mais complexos do indivíduo é gerado pela aprendizagem mediada pelas relações sociais em um determinado contexto socio – histórico e cultural.

O desenvolvimento cognitivo nessa perspectiva é sinônimo de maturação das capacidades psicointelectuais do sujeito, podendo ocorrer de forma simultânea à aprendizagem, mas não de forma proporcional. Isto é, o processo de desenvolvimento não necessariamente acompanha o processo de aprendizagem, embora exista uma dependência recíproca entre ambos (IVAN e IVIC, 2010).

“O processo de desenvolvimento não coincide com o da aprendizagem, o processo de desenvolvimento segue o da aprendizagem, que cria a condição para o desenvolvimento, desde que aconteça na zona de desenvolvimento potencial” (IVAN e IVIC, 2010, p. 100).

3 A DUALIDADE ONDA-PARTÍCULA

Quando se pensa que é seguro dizer que sabemos alguma coisa sobre o mundo quântico, que podemos medir alguma coisa, ou determinar a sua natureza com exatidão, a medição aprofunda o mistério. Na verdade, no microcosmo, a medição cria o mistério. Os trabalhos desenvolvidos no final do século XIX e início do século XX culminaram com o surgimento da Física Moderna e da Física quântica, nos proporcionando uma nova visão sobre a ótica do mundo microscópico a partir de previsões matemáticas e comprovações experimentais que desafiaram o senso comum e a imaginação dos cientistas mais otimistas.

A previsão de que a luz algumas vezes se comportam como onda e outras vezes como partícula dependendo do experimento, e a constatação dessas previsões na análise de experimentos como difração, interferência, emissão absorção e espalhamento de fótons, levou a indagação de que o mesmo também poderia ocorrer com partículas massivas, sugerindo a existência de uma natureza dual para a matéria e para a radiação. Conforme Martins (2001), a tentativa de generalizar esses resultados a partir da união da teoria eletromagnética da luz com a termodinâmica e a mecânica estatística culminou com nascimento da Mecânica Quântica, uma teoria desenvolvida a partir da década de 1920, que realizou as mudanças mais drásticas na forma como entendemos a natureza da radiação, da matéria e a energia quando analisadas do ponto de vista microscópico.

Neste sentido, o presente capítulo traz uma revisão de literatura sobre os conceitos que constituem os pilares da mecânica quântica, a chamada antiga teoria quântica, iniciando com o postulado de Planck sobre a quantização da energia, seguido pela explicação dada por Einstein para o Efeito Fotoelétrico até a formulação das principais ideias que constituem a teoria da dualidade onda-partícula, que é o tema principal dessa dissertação.

3.1 QUANTIZAÇÃO DA ENERGIA: O POSTULADO DE PLANCK

A superfície de um corpo a qualquer temperatura acima do zero absoluto emite energia na forma de radiação térmica (HALLIDAY e RESNICK, 2014). No início do século XX, a relação entre a temperatura de um corpo e o espectro da radiação emitida por ele foi

estudada exaustivamente uma vez que a forma específica desse espectro não poderia ser obtida a partir de argumentos da termodinâmica clássica. O foco desse estudo se deu mais precisamente sobre o espectro da radiação emitida pelos corpos negros, devido à propriedade peculiar que apresentam de que qualquer corpo negro, na mesma temperatura, emite radiação térmica com o mesmo espectro (EISBERG e RESNICK, 1979).

Um corpo negro é um objeto ideal que absorve toda a radiação que sobre ele incide, logo sua absorvidade a é máxima ($a = 1$) e sua refletividade nula ($r = 0$), decorrendo desse último fato o seu nome “negro”. Como bons absorvedores também são bons emissores, a taxa de emissão do corpo negro, quando ele entra em equilíbrio térmico, é máxima ($e = 1$), caracterizando-o como emissor ideal (JÚNIOR, FERRARO e SOARES, 2011). A Figura 4 mostra um modelo de corpo negro.

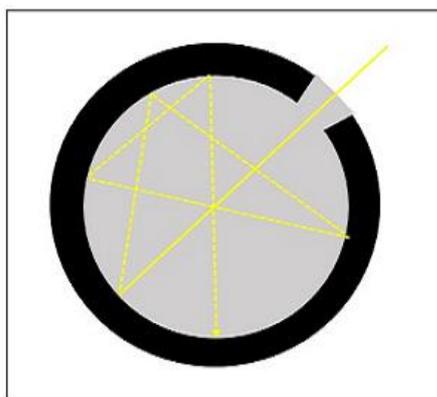


Figura 4: Modelo de corpo negro

Fonte: elaborado pelo autor

Disponível em: <https://www.dropbox.com/home/GSCEF/HyperTextos%20Diego/Produto/vers%C3%A3o%20defesa>

Verificou-se que a intensidade total I (taxa de variação da energia por unidade de tempo por unidade de área) emitida pela superfície de um corpo negro é proporcional à quarta potência da temperatura absoluta T (YOUNG e FREEDMAN, 2009, p. 203). Esse resultado, dado pela lei de Stefan-Boltzmann, afirma que a potência por unidade de área de um corpo negro é função apenas de sua temperatura e não depende de outras características do corpo como, por exemplo, a cor ou do tipo de material que é feito, está expresso na Equação 1, a seguir:

$$I = \sigma T^4 \quad (1)$$

Onde I é a intensidade total emitida a uma temperatura absoluta T e σ é a constante de Stefan. No SI, $\sigma = 5,670400 \times 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}^2}$ (YOUNG e FREEDMAN, 2009, p. 203).

Verificou-se também que essa intensidade não é uniformemente distribuída ao longo de todos os comprimentos de onda. A distribuição espectral da radiação de corpo negro é medida e descrita pela quantidade $R(\lambda) d\lambda$, chamada de radiância espectral de um corpo negro que é a potência irradiada por unidade de área e por unidade de comprimento de onda, definida de forma que seja igual à energia emitida por unidade de tempo em radiação de comprimento de onda compreendido entre λ e $\lambda + d\lambda$ por unidade de área de uma superfície a temperatura absoluta T (YOUNG e FREEDMAN, 2009, p. 203).

A radiância espectral $R(\lambda)$ e a potência por unidade de área irradiada por um corpo negro estão relacionadas por meio da Equação 2, expressa a seguir:

$$I = \int_0^{\infty} R(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

A Figura 5 apresenta medidas da radiância espectral, em função do comprimento de onda, para quatro temperaturas diferentes. Observa-se que cada temperatura possui um comprimento de onda de pico, chamado de λ_m , no qual a potência irradiada por unidade de área é máxima (YOUNG e FREEDMAN, 2009, p. 203).

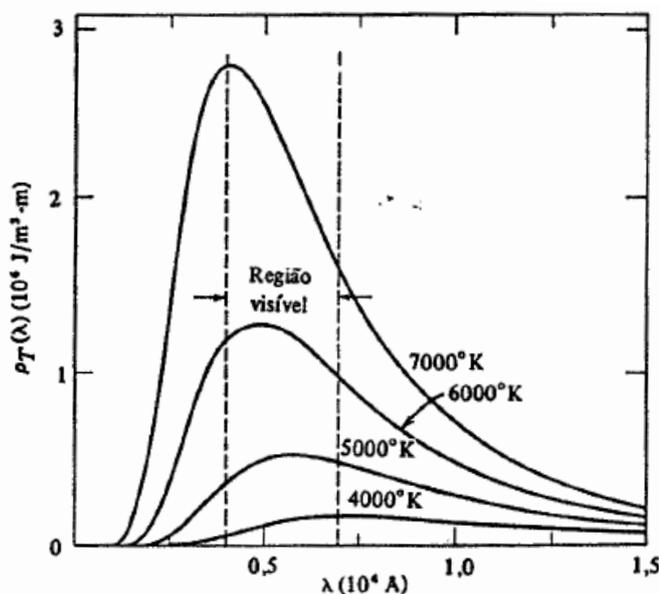


Figura 5: Radiância espectral de um corpo negro em função do comprimento de onda para três temperaturas diferentes.

Fonte: Eisberg e Resnick (1979, p. 38).

Acesso em: 03 out 2020

Observa-se na figura que a $R(\lambda)$ cresce proporcionalmente à quarta potência temperatura, um resultado já previsto teoricamente pela lei de Stefan – Boltzmann (Equação 1). A Figura 5 mostra ainda que o comprimento de onda no qual o corpo mais irradia λ_m decresce à medida que a temperatura cresce (EISBERG e RESNICK, 1979, p. 38).

Verificou-se, empiricamente, que a forma do gráfico da função de distribuição da radiância espectral para uma dada temperatura é a mesma para todas as temperaturas, bastando alterar o as escalas utilizadas (YOUNG e FREEDMAN, 2009, p. 204).

Logo, λ_m é inversamente proporcional a T, de modo que o produto dessas grandezas é uma constante. Esse resultado, chamado de lei do deslocamento de Wien, está expresso na Equação 3.

$$\lambda_m \times T = 2,9 \times 10^{-3} m \cdot k \quad (3)$$

Em que λ_m , o comprimento de onda no qual a radiância espectral é máxima, é inversamente proporcional à temperatura absoluta (ANTUNES, 2012, p. 13).

3.1.1 A catástrofe do ultravioleta

No final do século XIX e início do século XX, foram realizadas inúmeras tentativas de se deduzir as relações empíricas que pudessem explicar a curva experimental da radiação de corpo negro para cada comprimento de onda dessa radiação, Figura 4, a partir de argumentos da física clássica. Em 1905, Lord Rayleigh e James Jaens apresentaram seu modelo teórico para o cálculo da densidade de energia que deveria estar contida em um corpo negro e propuseram um modelo para explicar a curva espectral dessa radiação, o qual ficou conhecido como lei de Rayleigh – Jaens (SILVA, 2015).

Lord Rayleigh estudou a radiação contida numa caixa retangular com paredes metálicas perfeitamente refletoras aquecidas a uma temperatura T , a qual deveria funcionar como um corpo negro. A teoria eletromagnética clássica prevê que a radiação eletromagnética dentro da caixa deve existir na forma de ondas estacionárias com nós nas paredes da caixa. O objetivo de Rayleigh – Jeans era medir a distribuição de energia entre os modos de oscilação por unidade de volume e por unidade de comprimento de onda com base no princípio da equipartição da energia, o qual foi utilizado com êxito no estudo da capacidade calorífica (YOUNG e FREEDMAN, 2009, p. 204).

A energia média por modo de oscilação E é obtida através do teorema da equipartição de energia. Incluindo as energias do campo elétrico e do campo magnético, Rayleigh propôs para as ondas eletromagnéticas estacionárias contidas na caixa que a energia média deveria ser dada, pela Equação 4, conforme o teorema da equipartição clássica:

$$E = kT \quad (4)$$

Onde k é uma constante física fundamental, a constante de Boltzmann, e vale no SI: $1,381 \times 10^{-23}$ J/K (EISBERG e RESNICK, 1979).

A Equação 4 prevê que a energia total média para todas as ondas estacionárias na cavidade tem o mesmo valor e é dependente apenas da temperatura do corpo negro.

Ao determinar a energia por unidade de volume de um corpo negro a uma temperatura T no intervalo de frequências de $\nu + d\nu$ fazendo o produto da energia média por onda estacionária pelo número de ondas estacionárias contidas nesse intervalo de frequência e dividindo pelo volume da cavidade, Rayleigh - Jeans chegaram a seguinte fórmula para a densidade de energia do corpo negro:

$$u(\lambda) = 8\pi\lambda^{-4}kT \quad (5)$$

Para comprimentos de onda muito elevados, o gráfico obtido para densidade de energia espectral $u(\lambda)$ de um corpo negro a partir da fórmula de Rayleigh- Jeans se aproxima bastante dos dados experimentais expressos na Figura 4, mas à medida que o comprimento de onda diminui esses resultados não concordam com a curva experimental, como mostra a Figura 6 (YOUNG e FREEDMAN, 2009, p. 204).

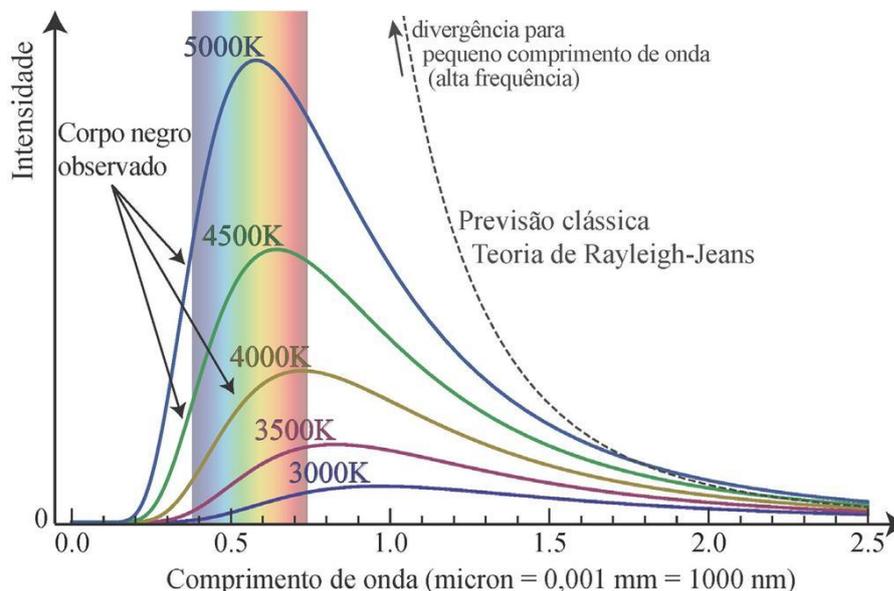


Figura 6: A curva pontilhada é a previsão da teoria clássica para a densidade de energia de um corpo negro comparada com os resultados experimentais para diferentes temperaturas.

Fonte: <https://institutedepesquisascientificas.wordpress.com/2016/04/17/o-problema-da-radiacao-de-corpo-negro-da-catastrofe-do-ultravioleta-a-teoria-quantica/>

Acesso em: 23 set 2019.

Na verdade, a curva experimental tende a zero quando λ torna-se cada vez menor, um resultado que é totalmente oposto ao previsto pela teoria clássica (Equação 5), no qual a curva teórica tende ao infinito, quanto menor for o valor de λ , sugerindo que a intensidade total de energia é infinita na região das altas frequências. As tentativas de explicar esses resultados, e a forma do gráfico da radiância, à luz das teorias clássicas do eletromagnetismo e da termodinâmica resultaram em um fracasso que ficou conhecido como a catástrofe do ultravioleta (ANTUNES, 2012, p. 14).

3.1.2 A hipótese de Planck

O modelo teórico de Rayleigh-Jeans explica a radiação de corpo negro na região de grandes comprimentos de onda (baixas frequências), mas discorda com os resultados experimentais para pequenos comprimentos de onda (altas frequências) (SILVA, 2015, p. 66). Anterior a Lord Rayleigh e James Jaens, em 1900, Max Planck lançou mão de uma hipótese para tentar solucionar a discrepância entre a teoria clássica e os resultados experimentais para a densidade de energia de um corpo negro, à custa abandonar uma das ideias mais arraigadas da física clássica (NUSSENZVEIG, 1998, p. 247). A hipótese levantada por Planck violava o princípio de equipartição da energia e na sua época foi tida por ele mesmo apenas como um artifício para que sua previsão se ajustasse ao que era observado na experiência (EISBERG e RESNICK, 1979).

Conforme a Figura 5:

$$E \rightarrow kT \quad (6)$$

Assim que:

$$\lambda \rightarrow \infty \quad (7)$$

A energia tende a kT quando λ tende ao infinito. A discrepância seria resolvida se por alguma razão:

$$E \rightarrow 0 \quad (8)$$

A energia tendesse a zero quando:

$$\lambda \rightarrow 0 \quad (9)$$

O comprimento de onda tender a zero.

A grande contribuição de Planck foi considerar a energia das ondas eletromagnéticas dentro do corpo negro como uma varável discreta em vez de uma variável contínua, como sempre considerada pela física clássica (EISBERG e RESNICK, 1979, p. 33).

A fórmula encontrada por Planck está expressa na Equação 10 (YOUNG e FREEDMAN, 2009, p. 205).

$$I(\lambda) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 (e^{hc/\lambda kT} - 1)} \quad (10)$$

Nessa expressão, h é a constante de Planck, c é a velocidade da luz, k é constante de Boltzman, T é a temperatura absoluta, e λ é o comprimento de onda. No S.I, $h = 6,63 \times 10^{-34}$ J.s. Verificou-se que essa função concorda com as curvas de intensidade obtidas experimentalmente (YOUNG e FREEDMAN, 2009, p. 205).

A grande contribuição dada por Planck foi postular que a energia das ondas eletromagnéticas emitas pelos osciladores nas paredes do corpo negro é trocada como uma variável discreta (MUÑOZ, 2015, p. 8), contrariando a teoria clássica que prevê uma emissão contínua de energia. Foi assim que ele supôs que os osciladores eletromagnéticos nas paredes do corpo negro, vibrando com frequência f , poderiam assumir apenas valores discretos de energia iguais a $nhf, 2hf, 3hf, \dots$ onde $n = 1, 2, 3 \dots$ (EISBERG e RESNICK, 1979).

Conforme o modelo teórico de Planck, a energia das ondas estacionárias no interior do corpo negro é dada conforme a Equação:

$$E = hf \quad (11)$$

A Figura 7 mostra um gráfico de distribuição espectral de energia obtida com a fórmula de Planck em comparação com a previsão teórica de Rayleigh- Jeans e com a lei de Wien:

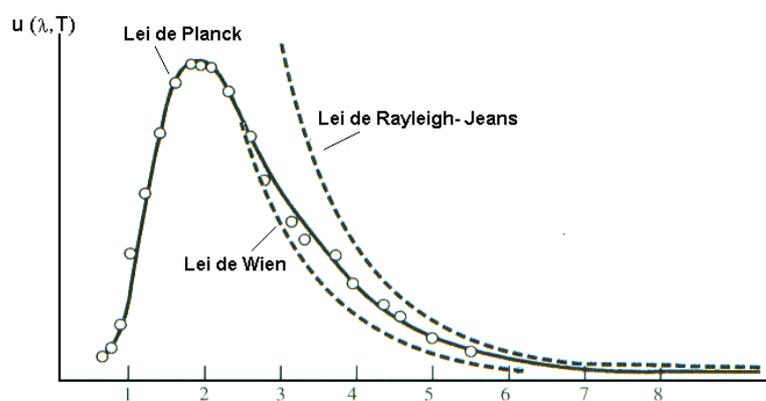


Figura 7: Previsão da teoria de Planck para a densidade de energia (linha sólida) compara com os dados experimentais (círculos) e com a previsão de Rayleigh- Jeans e a Lei de Wien (linhas tracejadas).

Fonte: <http://www.ensinoadistancia.pro.br/EaD/QG/aula-3/aula-3.html>.

Acesso em: 23 set 2019.

Pode-se observar na Figura 7 que a previsão teórica de Planck concorda com as curvas de intensidades obtidas experimentalmente, tanto para os grandes comprimentos de onda quanto para os pequenos, como a indicada na Figura 5, o que presumia a validade de sua expressão.

Planck procurou por muito tempo uma explicação para o seu postulado que se ajustasse a física clássica, mas não obteve sucesso. O mesmo chegou a afirmar que a sua hipótese era uma tentativa desesperada de encontrar uma explicação teórica para a densidade de energia do corpo negro. Acabou, muito a contragosto, convencendo-se de que uma explicação pela teoria clássica não seria possível (NUSSENZVEIG, 1998, p. 249).

3.2 O EFEITO FOTOELÉTRICO

Em 1887, quando realizava experiências com ondas eletromagnéticas, o físico alemão Heinrich Rudolf Hertz (1857 – 1894) percebeu que dois eletrodos próximos, carregados com cargas opostas, ao serem iluminados pela luz de um arco- voltaico, liberavam uma centelha elétrica. Meses depois, Wilhelm Hallwachs (1859 – 1922) percebeu que objetos constituídos de certos metais ficavam positivamente carregados quando suas superfícies eram expostas à luz ultravioleta, sugerindo que partículas carregadas haviam sido removidas (EBERHARDT, FILHO, LAHAM e BAITELLI, 2017, P. 930 – 931). A princípio, esse fenômeno parecia poder ser explicado pela física clássica, contudo, investigações posteriores realizadas por Philipp Lenard (1862 – 1947) revelaram uma série de características intrigantes, contraditórias ao que seria esperado pelas previsões da física clássica (NUSSENZVEIG, 1998, p. 249).

A partir da descoberta do elétron, em 1897, presumiu-se que essas partículas emitidas pela superfície metálica eram elétrons e tornou-se claro que de alguma forma a luz fazia com que os elétrons fossem ejetados com mais facilidade pela placa iluminada. A emissão de elétrons de uma superfície, devido à incidência de luz sobre essa superfície, é chamada de efeito fotoelétrico. A existência de uma barreira de energia potencial já era havia sido presumida nessa época e sabia-se que o elétron necessita de uma energia mínima para escapar de uma dada superfície, a função trabalho dessa superfície, designada por w (YOUNG e FREEDMAN, 2009, p. 181).

Quando uma luz suficientemente energética (ultravioleta) incide sobre uma superfície metálica (catodo), os elétrons do material absorvem a energia da luz e são ejetados dessa superfície deslocando-se em direção a outra placa metálica (anodo) formando uma corrente elétrica. Um campo elétrico é estabelecido entre as placas estando orientado do catodo para o anodo. Hallwachs e Lenard estudaram durante os anos de 1886 a 1900 a forma como a fotocorrente varia com a voltagem, com a frequência e com a intensidade da luz incidente (YOUNG e FREEDMAN, 2009, p. 182).

A Figura 8 esquematiza como ocorre o fenômeno do efeito fotoelétrico. Pode-se observar que ao ser iluminada pela luz ultravioleta, a placa emissora libera partículas que são captadas pela placa coletora. Uma fonte de tensão é utilizada para controlar a diferença de potencial entre as duas placas e um amperímetro mede a intensidade da fotocorrente gerada no fenômeno.

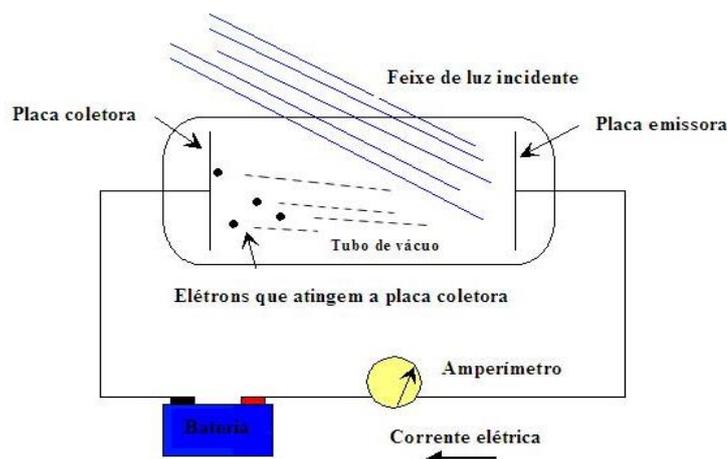


Figura 8: Ao ser iluminada pela luz ultravioleta, a placa emissora libera elétrons que se deslocam em direção à placa coletora gerando uma corrente elétrica.
Fonte: https://www.if.ufrgs.br/tex/fis142/fismod/mod03/m_s01.html

Para corrente (i) e potencial (V) constantes, todos os fotoelétrons ejetados da placa emissora são coletados pelo anodo quando a diferença de potencial aplicada é positiva, e a corrente atinge um valor limite (corrente de saturação) (NUSSENZVEIG, 1998, p. 250). Se o sinal de V é invertido e sua intensidade aumentada gradativamente, os fotoelétrons vão desacelerando até chegar um valor de potencial $-V_0$ que anula a corrente, o chamado potencial de corte é atingido mesmo que a intensidade da luz seja elevada (EISBERG e RESNICK, 1979).

A Figura 9 mostra um gráfico da fotocorrente em função da diferença de potencial V para um feixe de luz com frequência constante e intensidades diferentes:

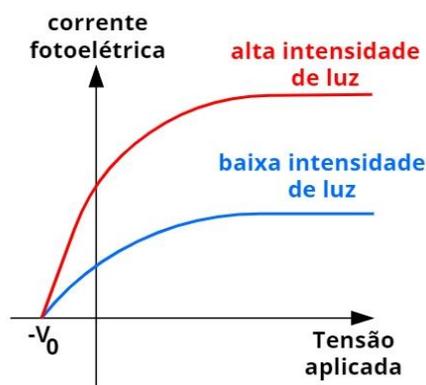


Figura 9: O gráfico mostra uma importante característica do efeito fotoelétrico: quanto mais intensa é a luz sobre a placa emissora, mais intensa é a fotocorrente medida para o mesmo potencial.

Fonte: <https://brasilecola.uol.com.br/fisica/o-efeito-fotoeletrico.htm>

Acesso em: 16 jul 2019

Esse potencial limite no qual ainda é medido algum valor de corrente multiplicado pela carga elementar (e) fornece a energia cinética máxima K_{max} do mais rápido fotoelétron emitido. Como o potencial de corte não se altera com a variação da intensidade luminosa, constatou-se que a energia cinética dos fotoelétrons também não depende da intensidade (EISBERG e RESNICK, 1979).

$$K_{max} = eV_0 \quad (12)$$

Verificou-se também que, não é qualquer radiação que é capaz de causar a emissão de elétrons pela superfície do cátodo. Hallwachs e Lenard descobriram que quando a luz monocromática incide sobre o cátodo, nenhum fotoelétron é detectado se a frequência da luz incidente estiver abaixo do limiar de frequências, que é chamado de frequência de corte. O potencial de freamento V_0 , para uma dada frequência ν , varia de substância para substância: é uma característica do material (NUSSENZVEIG, 1998, p. 251).

Conforme Eisberg e Resnick (1979), havia três pontos no efeito fotoelétrico que não podiam ser explicados pela teoria clássica ondulatória da luz:

O primeiro ponto diz respeito ao fato de que essa teoria prevê que ao aumentarmos a intensidade do campo elétrico (amplitude da onda) os elétrons seriam ejetados com mais energia, o que não é observado (HALLIDAY e RESNICK, 2013, p. 181). Quando se aumenta a intensidade da luz, aumentam o número de elétrons ejetados e não a energia cinética dos elétrons, visto que o potencial de corte não se altera.

O segundo ponto que não pode ser explicado pela teoria clássica é que o efeito fotoelétrico deveria ser observado para qualquer faixa de frequência, desde que a luz fosse

suficientemente intensa para fornecer a energia necessária à ejeção dos fotoelétrons. Entretanto, foi observado que cada material possui um limiar de frequências ν_0 característico. Para frequências menores que ν_0 , a ejeção de elétrons não ocorre, independentemente da intensidade luminosa (EISBERG e RESNICK, 1979, p. 53).

O terceiro fato que a teoria ondulatória também não explica é que os elétrons são ejetados instantaneamente do material, assim que a luz o atinge, e de acordo com a teoria ondulatória, seria de se esperar que os elétrons levassem um longo intervalo de tempo para atingir a energia necessária a partir de um feixe fraco de luz (YOUNG e FREEDMAN, 2009, p. 183).

A esse respeito, Nussenzveig (1998) enfatiza que:

[...] Por mais intensa que seja, luz infravermelha não produz efeito fotoelétrico. Por outro lado, luz ultravioleta de intensidade extremamente fraca produz fotoelétrons alguns nanossegundos depois de incidir sobre um material, quando, segundo a imagem clássica, levaria muito mais tempo para transmitir energia suficiente a um fotoelétron (NUSSENZVEIG, 1998, p. 253).

A solução para essas questões até então não explicadas pela física clássica viria poucos anos mais tarde com as contribuições revolucionárias do físico alemão Albert Einstein (1879 – 1955). As ideias de Einstein vieram balançar os alicerces da física clássica, pois introduziram conceitos novos e revolucionários a partir do desenvolvimento da hipótese de quantização da energia apresentada por Max Planck (SILVA, 2000).

Em 1905, Albert Einstein analisou a teoria clássica da luz e propôs uma nova teoria na qual sugere explicações para o efeito fotoelétrico, o fenômeno até então não explicado satisfatoriamente pela teoria ondulatória da luz. Einstein baseou-se na hipótese de Planck de que a energia dos elétrons nas paredes do corpo negro só pode ser emitida na forma de pequenos pacotes localizados ($h\nu$) e sugeriu que a luz também é quantizada e é absorvida pelos fotoelétrons na forma de pequenos pacotes concentrados, os quais viriam posteriormente ser chamados de fótons ou quanta (SILVA, 2000).

De acordo com Einstein, cada fóton transporta uma energia que dada pela Equação (11). Quando um feixe de luz incide sobre a superfície de um material, ocorrem colisões entre os fótons de luz e os elétrons do material. Cada elétron só pode absorver um único fóton por vez, desde que a energia do fóton seja suficiente para libertá-lo do material. O fóton fornece toda sua energia ao elétron que instantaneamente adquire uma energia cinética igual a:

$$K_c = hf - w \quad (13)$$

Onde hf é a energia do fóton absorvido e w é a energia mínima, necessária para arrancar um elétron de um determinado material, chamada de função trabalho.

Einstein explicou a primeira objeção levantada contra a teoria ondulatória clássica argumentando que a intensidade da fotocorrente se eleva ao aumentar a intensidade da luz, porque isso faz aumentar o número de fótons que incidem sobre o material liberando mais elétrons. Quanto mais elétrons são liberados, maior é a fotocorrente. A energia de cada fóton não é alterada e, conseqüentemente, energia cinética dos fotoelétrons permanece a mesma uma vez que ela é função da frequência e não da intensidade luminosa.

A segunda objeção é explicada quando consideramos a situação em que a energia cinética é igual a zero. Equação (14):

$$K_c = 0 \quad (14)$$

Nesse caso temos que:

$$hf = w \quad (15)$$

A interpretação é que a energia do fóton é apenas suficiente para fazer o elétron vencer a barreira de potencial que o mantém ligado ao material. Se a frequência da radiação for menor que f_0 , não importa a quantidade de fótons pois eles não terão energia suficiente para ejetar os elétrons.

A terceira objeção é eliminada quando se considera que o fóton é uma partícula de luz e possui toda a sua energia concentrada em um único ponto, diferente de uma onda que se espalha por todas as direções. A falta de retardamento na emissão dos fotoelétrons ocorre porque os fótons são absorvidos imediatamente pelos átomos do material, caso tenham energia suficiente para liberar os elétrons, não havendo tempo considerável para a absorção.

3.3 A DUALIDADE ONDA-PARTÍCULA DA LUZ

Com a interpretação dada ao efeito fotoelétrico, Einstein percebeu que a teoria ondulatória da luz não era capaz de explicar alguns fenômenos físicos. Fenômenos como a difração, reflexão, refração, dispersão, interferência e polarização são descritos satisfatoriamente pela teoria ondulatória clássica, enquanto a emissão e a absorção de luz só

são bem esclarecidas quando se considera a luz como fótons, partículas de energia localizada (SILVA, 2000).

Diversos físicos não aceitaram essa incerteza a respeito da natureza da luz, até que uma evidência mais direta de propriedades corpusculares da luz foi obtida entre 1919 e 1923 por Arthur H. Compton (1892 – 1962) observando o espelhamento de raios X monocromáticos por um alvo de grafita. Compton interpretou o fenômeno do espalhamento como consequência de uma colisão entre duas partículas (fóton e elétron) ((NUSSENZVEIG, 1998).

Para Young e Freedman (2009, p. 206), podemos encontrar a resposta para essa aparente contradição onda-partícula usando o princípio da complementaridade de Bohr. Segundo esse princípio, a descrição ondulatória é complementar à descrição corpuscular. Ou seja, precisamos das duas para completar o modelo da natureza da luz.

3.4 A DUALIDADE ONDA-PARTÍCULA DA MATÉRIA

Conforme Young e Freedman (2009, p. 217), a luz e outras ondas eletromagnéticas algumas vezes se comportam como ondas e outras vezes como partículas. A interferência e a difração revelam o comportamento ondulatório, enquanto a emissão e a absorção de fótons demonstram o aspecto corpuscular. Desse modo, a necessidade de adoção da hipótese do quantum, ou partícula localizada, é inegável quando tratarmos de fenômenos nos quais há interação de luz com a matéria, como na emissão, na absorção e no espalhamento de fótons. O modelo ondulatório da luz por sua vez é essencial para explicar os fenômenos que envolvem a propagação das ondas eletromagnéticas.

Em 1924, o físico francês Louis de Broglie (1892 – 1987) propôs uma teoria que generalizava o comportamento dual da luz para a matéria. De Broglie levantou a hipótese de que partículas massivas também poderiam exibir propriedades ondulatórias. Ele supôs que se um feixe luminoso é uma onda, mas transfere energia e momento a partículas de matéria apenas em eventos pontuais, através de pacotes de energia chamados de fótons, então um feixe partículas, como prótons e elétrons, pode ter as mesmas propriedades podendo se comportar como ondas de matéria (HALLIDAY e RESNICK, 2013).

A hipótese de De Broglie estava fundamentada no comportamento dos fótons de luz em vários fenômenos, como o espectro de emissão de um corpo negro, o efeito foto elétrico, o efeito Compton e a teoria da relatividade restrita.

De acordo com a teoria da relatividade restrita, a energia de um fóton é dada por:

$$E = pc \quad (16)$$

Onde p e c são o momento linear relativístico do fóton e o módulo da velocidade da luz, respectivamente.

E de acordo com a explicação dada por Einstein para o efeito foto elétrico, a energia de um único fóton é dado pela Equação (11):

$$E = hf$$

Combinando essas duas equações, De Broglie encontrou uma relação entre frequência e quantidade de movimento:

$$E = pc = hf \quad (17)$$

Onde, reagrupando os termos podemos obter a seguinte relação:

$$\frac{c}{f} = \frac{h}{p} \quad (18)$$

O comprimento (λ) de onda fica então determinado em termos da constante de Planck (h) e da quantidade de movimento:

$$\lambda = \frac{h}{p} \quad (19)$$

Nessa expressão, os conceitos relativos a partículas, energia E e momento p , estão ligados através da constante de Planck h aos conceitos relativos a ondas, frequência f e comprimento de onda λ . A equação é chamada relação de de Broglie (EISBERG e RESNICK, 1979, p. 88).

De Broglie postulou que essa relação também é válida para qualquer partícula livre de massa (m), movendo-se a uma velocidade não-relativística (v), que deve ter um comprimento de onda λ associado ao seu momento linear $p = mv$, do mesmo modo que um fóton, como expresso pela Equação (19). O comprimento de onda de de Broglie, associado a uma partícula em movimento fica então expresso pela seguinte relação (YOUNG e FREEDMAN, 2009, p. 218):

$$\lambda = \frac{h}{mv} \quad (20)$$

A Equação (20) prevê o comprimento de onda de de Broglie λ de uma onda de matéria associada ao movimento de uma partícula material que tem um momento linear p (EISBERG e RESNICK, 1979, p. 88).

Conforme Eisberg e Resnick (1979), a Equação (20) mostra que o comprimento de onda λ da onda associada à partícula é inversamente proporcional ao seu momento linear p . Logo, para partículas macroscópicas usuais, como uma bola de futebol ou um automóvel, por exemplo, a massa é tão grande que o momento é sempre grande o suficiente para que o comprimento de onda de Broglie seja bastante pequeno, uma vez que ele é o resultado da divisão da constante de Planck (cuja ordem de grandeza é 10^{-34}) pelo momento linear, ficando além dos limites do que pode ser detectado experimentalmente, e a mecânica clássica predomina. É também por essa razão que só as partículas microscópicas podem ter comportamento ondulatório observado (EISBERG e RESNICK, 1979, p. 92 - 94).

Segundo Rosa (2004), de 1927 a 1935, vários experimentos foram realizados utilizando-se elétrons de energias cada vez maiores produzindo uma boa confirmação experimental da Equação (19), entre os quais podemos destacar os experimentos de C. J. Davisson e L. H. Germer do Bell Telephone Laboratories e George P. Thomson da Universidade de Aberdeen (HALLIDAY e RESNICK, 2013, p. 189). Em 1929, pouco tempo depois da confirmação experimental da sua equação, Louis de Broglie foi contemplado com o prêmio Nobel pela sua descoberta da natureza ondulatória dos elétrons (ROSA, 2004, p. 172).

A Figura 10 mostra as figuras de difração obtidas com um feixe de raios X (esquerda), que são ondas eletromagnéticas e com um feixe de elétrons (direita), que, segundo de Broglie, são ondas de matéria. A semelhança é notável. (HALLIDAY e RESNICK, 2013, p. 191).

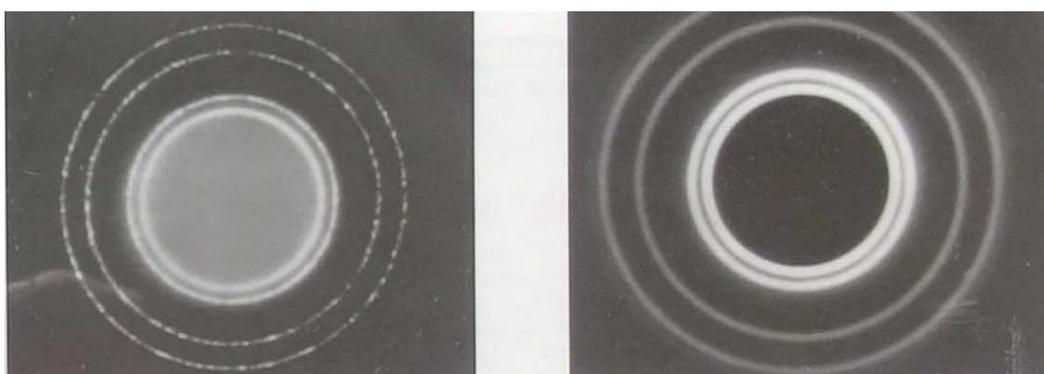


Figura 10: Resultado experimental de difração de raios X e de elétrons por cristais de alumínio mostrando experimentalmente o comportamento ondulatório dos elétrons.

Fonte: Halliday e Resnick (2013).

Acesso em: 15 ago 2019.

3.5 PRINCÍPIO DA COMPLEMENTARIDADE DE BOHR

O Princípio da complementaridade foi enunciado pelo físico dinamarquês Niels Bohr (1885 – 1962), no ano de 1928, e constitui-se em uma alternativa para a interpretação do caráter dual da luz e da matéria. Sob algumas condições, a radiação (luz) teria o comportamento de onda ou de partícula e o elétron (matéria), conforme as condições, teria também um comportamento de partícula ou de onda (ROSA, 2004, p. 168).

Conforme Resnick (1979, p. 95), não é possível detectar o caráter corpuscular e ondulatório simultaneamente em um experimento. Se uma medida prova o caráter ondulatório da matéria ou radiação, então é impossível provar o caráter corpuscular na mesma medida, e vice-versa. A descrição ondulatória é complementar à corpuscular, mas nunca precisaremos utilizar ambas simultaneamente para descrever uma determinada ocorrência (YOUNG e FREEDMAN, 2009, p. 206).

O experimento da difração de elétrons, mostrado na Figura 10, nos dá uma visão razoável sobre a complementaridade. Neste caso pode-se observar que, quando o ente é detectado por algum tipo de interação, ele atua como uma partícula no sentido de que é localizado. Quando está se movendo, age como uma onda, no sentido de que se observam fenômenos de interferência, tem extensão e não é localizada. A escolha de que modelo usar é determinada pela natureza da medida (RESNICK, 1979, p. 95).

Em sumo, para o Princípio da Complementariedade de Bohr, os modelos ondulatório e corpuscular são duas formas diferentes de caracterizar um mesmo objeto. Onda e partícula são naturezas complementares, pois descrevem dois aspectos do mesmo objeto, porém não pode se detectar essas duas naturezas em um mesmo experimento simultaneamente. Essa é a essência do princípio da complementaridade.

4 O DESENVOLVIMENTO DE *E-BOOKS* UTILIZANDO O SIGIL

A construção do *e-book* que constitui o produto educacional descrito nessa dissertação deu através do *software* SIGIL, que é um editor de EPUBs. Esse *software* pode ser baixado livremente através do endereço <https://sigil.br.uptodown.com/windows/download>. Para baixar o programa, basta clicar no *link* que dá acesso a página de apresentação do *software*. Depois, clicando em download, o programa começa a baixar no seu computador ou notebook. Após baixá-lo, é só ir à pasta onde o download foi efetuado, clicar duas vezes sobre o ícone e aceitar os termos de instalação do programa.

A interface do SIGIL é mostrada na Figura 11 a seguir:

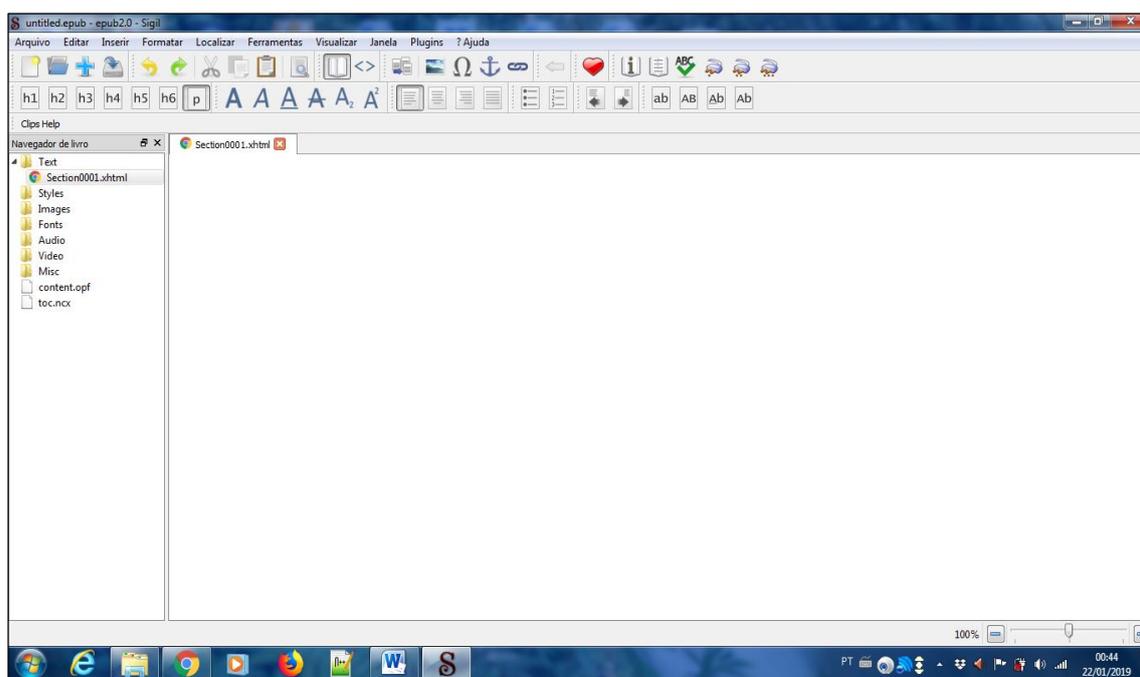


Figura 11 : Interface do SIGIL na tela do computador.

Como já foi mencionado, o SIGIL é um *software* editor de EPUB livre, ou seja, não é pago, sendo permitida a instalação e uso em qualquer máquina com sistema operacional compatível com as especificações do produto.

As vantagens desse programa estão em permitir que os seus usuários produzam arquivos em formato HTML sem necessariamente saber linguagem de programação, pois ele permite a importação de arquivos de texto e recursos audiovisuais, como imagens, gifs,

vídeos e outros, em uma espécie de biblioteca chamada de “Navegador do livro”. Caso o usuário sinta a necessidade de inserir algum objeto ou texto no EPUB, basta ir ao navegador do livro, selecionar o objeto desejado e inseri-lo sem que haja a necessidade de escrever um código HTML para isso.

Os arquivos podem ser inseridos no botão **Inserir**, localizado na barra de ferramentas que é bastante similar a de outros programas, como o Microsoft word, e ao serem configurados no painel já estão exatamente como será mostrado no arquivo digital, o que é ótimo para a produção de e-books, pois se tem uma melhor noção de como está o trabalho, o que não é possível em um software de programação comum, como o notepad++, onde visualiza-se apenas o código HTML.

Caso o programador esteja interessado em alterar o arquivo diretamente no código, basta clicar no ícone <> (*Code View*), localizado na barra de ferramentas do *software*, e terá acesso direto ao código HTML do arquivo onde poderá efetuar as modificações desejadas.

A Figura 12 mostra a interface do SIGIL no ambiente de programação em linguagem HTML:

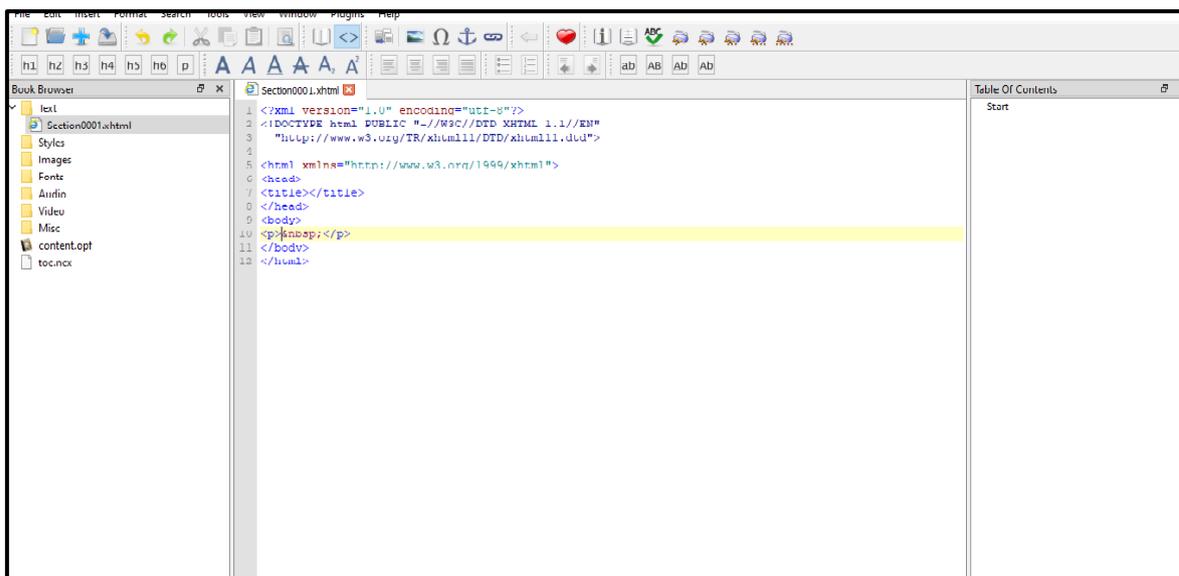


Figura 12: instantâneo do ambiente de programação do SIGIL.

Após inserir os códigos desejados, o programador pode retornar a interface inicial do SIGIL clicando no ícone do livro (*Book View*) e visualizar como as alterações feitas no código estão dispostas no *e-book*.

4.1 O DESENVOLVIMENTO DO PRODUTO EDUCACIONAL

O produto educacional descrito nessa dissertação, desenvolvido no âmbito do Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF), é composto por um *e-book* e uma sequência didática que utiliza como abordagem metodológica a sala de aula invertida. Esse produto objetiva auxiliar professores de física nos processos de ensino e aprendizagem do tema dualidade onda-partícula no ensino médio e promover uma construção de conhecimento pautada na incorporação das mídias digitais no ambiente escolar e extra sala de aula.

A Figura 13 mostra a capa do *e-book*:



Figura 13: Capa do *e-book*.
Fonte: elaborado pelo autor.

O *e-book* que compõe produto educacional intitulado de **A dualidade Onda – Partícula: das ideias de Newton ao postulado de De Broglie** aborda tópicos de Física Quântica com uma linguagem mediana e contém elementos que compõe a história e filosofia da física. O mesmo foi desenvolvido para ser utilizado preferencialmente nos últimos anos

do Ensino Médio, com turmas que já tenham estudado sobre ondas e fenômenos ondulatórios.

Na Figura 14 podemos visualizar o sumário do livro aberto em um aparelho de smartphone:

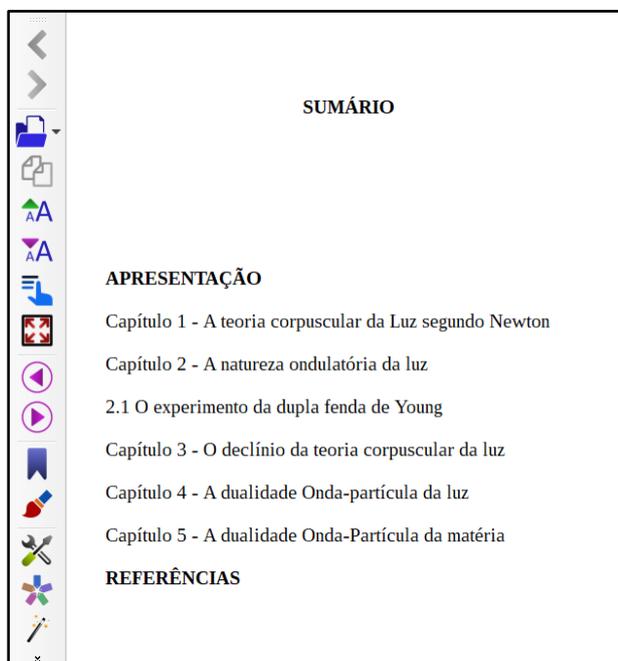


Figura 14: O *e-book* está organizado em cinco capítulos.
Fonte: elaborado pelo autor.

A escrita do *e-book* foi iniciada em um documento do Microsoft Word, onde o conteúdo textual foi digitado e revisado. Nesse documento também foram inseridas as imagens pré-selecionadas para ilustrar o livro. Após a conclusão do conteúdo textual que viria a compor o livro, o arquivo foi salvo em formato TXT, que é o formato que melhor se adequa às configurações do SIGIL.

Após a organização das aulas em uma sequência didática que buscou seguir a cronologia de desenvolvimento dos conhecimentos sobre a dualidade da luz e da matéria, iniciou-se a preparação dos questionários de teste de conhecimentos.

Com a conclusão da fase de escrita e a revisão do conteúdo conceitual, o arquivo de texto, junto com as imagens, foram inseridos do SIGIL, e deu-se início ao desenvolvimento do *e-book*. Para o acompanhamento do desenvolvimento do *e-book*, utilizou-se o *software* Calibre, que é um visualizador de *e-books*. No Calibre também é permitido efetuar algumas modificações no livro, como inserir uma capa ou um sumário, caso não se consiga fazer isso no SIGIL.

Paralelamente ao desenvolvimento do *e-book*, foi preparada a unidade didática composta por uma proposta de utilização desse material didático seguindo a abordagem metodológica conhecida como sala de aula invertida.

A Figura 15 mostra a interface inicial do Calibre com algumas versões do *e-book* em questão:

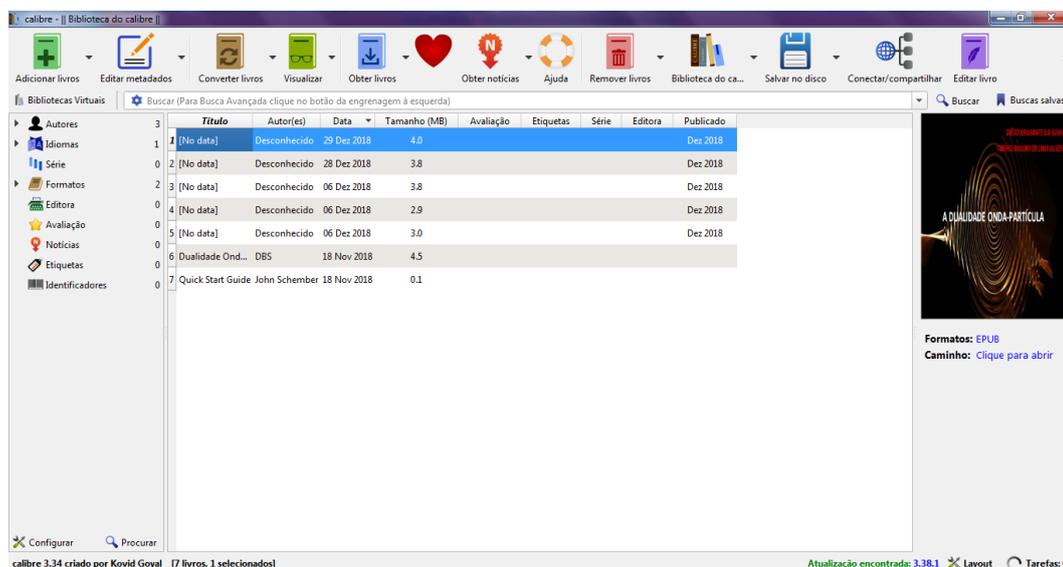


Figura 15: Interface do calibre com algumas versões do *e-book* no formato EPUB.
Fonte: Elaborado pelo autor.

Para visualizar um *e-book* utilizando o Calibre, basta clicar no botão **adicionar livros** e procurar o arquivo na pasta onde ele se encontra armazenado selecionando-o com dois cliques rápidos. O arquivo será introduzido no calibre ficando visível na interface do programa. Depois basta dar dois cliques rápidos sobre o arquivo e o programa abrirá uma nova aba mostrando como ficou o *e-book*.

O *e-book* foi desenvolvido para ser acessado de qualquer aparelho digital que tenha um leitor de EPUBs instalado, como smartfone, notebook, computador de mesa e tablet, pois é responsivo: o texto e as imagens se ajustam ao tamanho, ao formato e posição da tela do aparelho que está sendo utilizado. A Figura 16 mostra a visualização do *e-book* em um aparelho de smartfone:

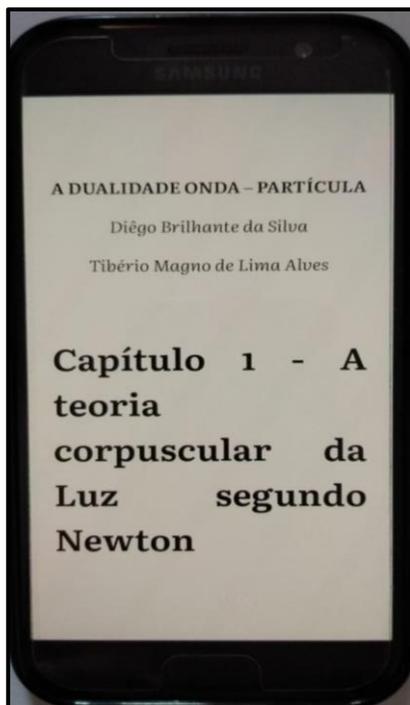


Figura 16: interface do *e-book* em um aparelho de smartfone.
Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1 QUESTIONÁRIOS DE AVALIAÇÃO

Com o objetivo de fornecer ao leitor um meio pelo qual ele possa testar seus conhecimentos acerca dos conteúdos abordados no *e-book*, foram criados questionários com questões optativas de múltipla escolha utilizando-se a plataforma do *google forms*. Os questionários foram disponibilizados ao final de cada capítulo, onde o leitor tem acesso clicando em um link que o direciona até o *google forms*. Para acessar os questionários, é preciso que o estudante esteja conectado à internet.

Os questionários criados na plataforma do *google forms* são uma ótima ferramenta para o professor que deseja avaliar a aprendizagem e o ganho de conhecimento dos seus alunos uma vez que essa ferramenta permite o acesso do professor as respostas dadas pelos discentes e gera, automaticamente, gráficos de desempenho individual e da turma em geral para cada questão aplicada e para o questionário como um todo.

Para a aplicação desse produto, foram criados cinco questionários avaliativos, cada um contendo cinco questões de múltipla escolha com quatro alternativas possíveis para cada questão. Cada questão possui apenas uma alternativa correta.

O aluno deve inserir o nome e o endereço de e-mail no questionário, obrigatoriamente, para posterior identificação do autor das respostas. Cada aluno pode editar e enviar as respostas ao questionário quantas vezes quiser, mas não é permitida a utilização de contas de *e-mail* de terceiros.

5 APLICAÇÃO DO PRODUTO EDUCACIONAL

O produto educacional foi aplicado em uma turma da 3ª série do Ensino Médio na Escola Estadual Professora Maria Arioene de Souza, localizada no município de Campo Redondo/ RN. A escolha da referida turma deveu-se ao fato de termos o conhecimento de que o professor já havia abordado nessa turma os conceitos básicos da física ondulatória que são necessários para o melhor entendimento da natureza dual da luz e da matéria.

Na referida turma, haviam um total de 23 alunos regularmente matriculados. Desses 23, apenas 17 discentes frequentavam assiduamente as aulas de física participando de todos os encontros da aplicação do produto educacional. Os dados coletados nos questionários respondidos pelos 17 alunos que frequentaram todas as aulas foram utilizados para avaliação final que gerou os resultados apresentados nessa dissertação.

A aplicação do produto ocorreu ao longo de sete encontros presenciais de 50 minutos cada. No primeiro encontro, foi informado o tema do conteúdo que seria abordado na unidade, a metodologia que seria utilizada nas aulas presenciais, como os alunos deveriam acessar o e-book, os questionários de avaliação e os simuladores. Na oportunidade, também se pediu que os alunos baixassem aplicativo um leitor de EPUBs no smartphone ou computador caso não tivessem e realizassem, em um momento posterior, a leitura do capítulo 1 do *e-book* para a problematização na aula seguinte.



Figura 47: Primeiro encontro da aplicação do produto educacional: apresentação do produto.

Valendo-se da metodologia da sala de aula invertida, o segundo encontro de aplicação do produto educacional iniciou com uma problematização considerando o pensamento prévio dos alunos sobre a leitura do primeiro Capítulo que trata da teoria de Newton sobre a natureza da luz. Após um debate a organização de ideias, realizou-se com os alunos o experimento de dispersão da luz branca com um prisma de Newton.



Figura 18: Professor realizando o experimento da dispersão da luz branca com um prisma de Newton.



Figura 19: Experimento de dispersão da luz branca com um prisma de Newton realizado após debate sobre a hipótese de Newton a respeito da natureza da luz

A terceira aula de aplicação do produto educacional iniciou com a realização de experimentos que destacassem o caráter ondulatório da luz, como a interferência e a difração. Considerando a teoria sociointeracionista de Vygotsky, foi solicitado que os alunos se reunissem em grupos para a realização da atividade prática. Os experimentos foram realizados pelos próprios alunos que mostraram bastante empolgação ao pôr em prática o que haviam estudado no Capítulo 2 do *e-book* que trata do experimento da dupla fenda de Young. Para que essa atividade pudesse ser realizada, foram disponibilizados alguns materiais aos alunos: LASER, pedaços de papelão com fendas duplas e simples, um recipiente com água e um pedaço de ferro para servir de obstáculo. O objetivo da atividade era que eles descobrissem uma forma de provar o caráter ondulatório com os meios disponíveis, mas que problematisassem a difração que ocorre tanto com as ondas de água, é formada por partículas, quanto com as ondas de luz.



Figura 20: Alunos investigando a passagem da luz LASER por uma fenda dupla de papelão.



Figura 71: Alunos investigando a difração de ondas na superfície da água.

Após a realização da atividade, os alunos desenharam em uma folha de papel os fenômenos observados nos experimentos e exploraram, em um debate entre os grupos, os seus aprendizados realinhando a atividade prática com o conteúdo estudado no *e-book*. A intenção dessa atividade foi promover um conflito cognitivo possibilitando a construção de novos conhecimentos pelos discentes.

A quarta aula de aplicação do produto consistiu essencialmente de um debate mediado pelo professor que foi iniciado a partir de uma tempestade de ideias dos alunos, mediante o estudo prévio do Capítulo 3 do *e-book*. Nessa oportunidade, os alunos puderam expor suas ideias sobre a contribuição dos trabalhos de Maxwell e de Hertz para

comprovação da natureza ondulatória da luz e confrontar essas ideias com as de seus colegas, favorecendo a construção coletiva do conhecimento mediante as atividades metacognitivas de avaliação do conteúdo estudado e construção de mapa conceitual na lousa.



Figura 102: Debate epistemológico sobre a aceitação do modelo ondulatório da luz mediante as contribuições de Maxwell e Hertz.

O quinto e o sexto encontro da aplicação do produto educacional consistiram essencialmente em momentos de utilização de simuladores de fenômenos físicos para a análise do comportamento corpuscular da luz e ondulatório da matéria, mediante a leitura prévia dos Capítulos 4 e 5 do *e-book*. Para essas atividades, utilizamos o simulador do efeito fotoelétrico e o simulador de interferência quântica, ambos do *PHET*, disponíveis através do link https://phet.colorado.edu/pt_BR/.

Devido ao espaço pequeno do laboratório de informática da escola e a quantidade de computadores funcionais que não comportava o número de alunos da turma, optou-se por desenvolver essa atividade na sala de mídias da escola. Na ocasião, adaptamos a proposta da atividade individual para atividade coletiva com a projeção dos simuladores na lousa. Dessa forma, os alunos puderam analisar os fenômenos coletivamente e socializar as questões levantadas durante a realização das atividades propostas. O único ponto negativo de projetar o simulador para toda turma foi que os alunos tinham que aguardar a vez para variar os parâmetros desejados enquanto outros utilizam o simulador.

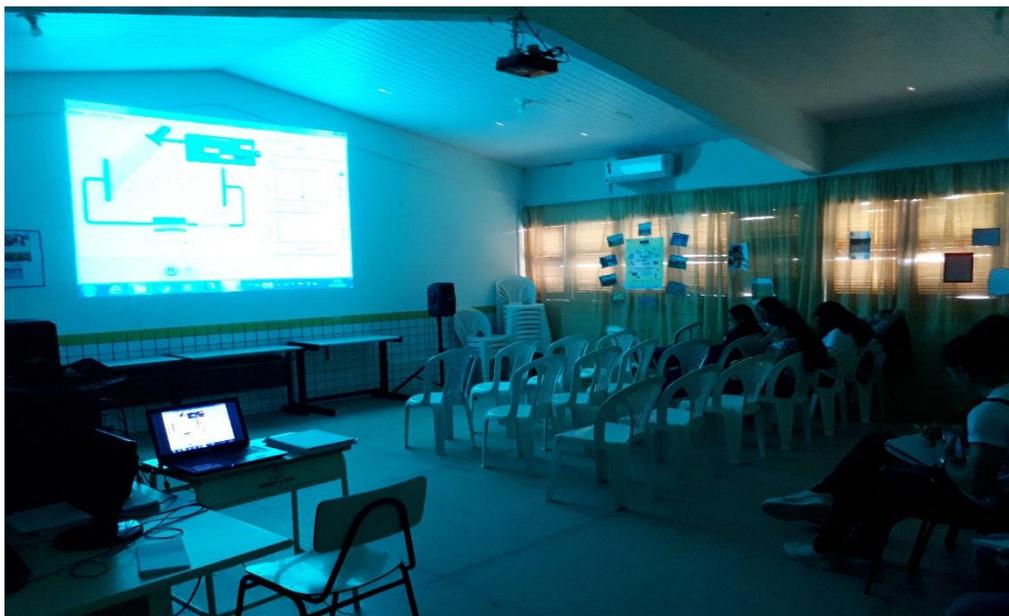


Figura 23: Utilização do simulador do efeito fotoelétrico.

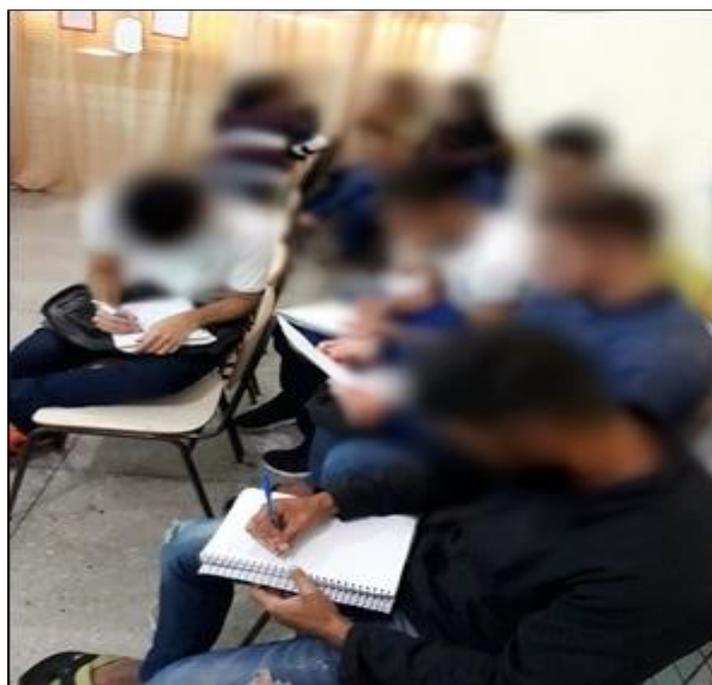


Figura 24: Alunos respondendo atividade com ajuda do simulador efeito fotoelétrico.

A aplicação do produto educacional foi finalizada no sétimo encontro, como havia sido planejado na unidade didática. Nessa aula, os alunos formaram duplas e utilizaram as relações de De Broglie para responder a um problema teórico, cujo objetivo era fazer com os estudantes identificassem em que situações as relações de De Broglie para a matéria são válidas e por quê não vemos a matéria ter comportamento de onda no mundo macroscópico.

A culminância da aula se deu com a avaliação dos objetivos do problema proposto e a socialização da aprendizagem.

5.1 RESULTADOS

5.1.1 Análise quantiquantitativa

Nesta seção, buscamos fazer uma análise detalhada das questões propostas no questionários avaliativos e das respostas dadas ao problema teórico proposto no final da unidade. Os resultados gerados pela aplicação do produto educacional buscam indicar a sua eficiência didático pedagógica no ensino e na aprendizagem do tema dualidade onda-partícula em uma turma da 3ª série do ensino médio na escola estadual Professora Maria Arioene de Souza, localizada no município de Campo Redondo/ RN.

Com a conclusão da aplicação do produto educacional, obtivemos as respostas dadas aos questionários desenvolvidos na plataforma do google formulários que estão disponíveis ao final de cada capítulo do *e-book* e do problema porposto no final da unidade. No que se segue, discutiremos o objetivo de cada questão proposta e o percentual de acerto de cada uma delas, capítulo a capítulo.

Questionário do capítulo 1:

Questão 01 - De acordo com o texto, qual era a hipótese levantada por Newton a respeito da constituição da luz branca?

- a) A luz branca é uma mistura homogenia de raios de luz de uma só cor.
- b) A luz branca altera a sua constituição ao passar pelo prisma e se dissolve em luz de diversas cores.
- c) A luz branca é uma mistura heterogenia de raios de luz de todas as cores.
- d) Newton não foi capaz de levantar nenhuma hipótese a respeito da constituição da luz branca.

Análise: O objetivo dessa questão foi examinar a compreensão dos alunos a respeito do experimento da dispersão da luz realizado por Newton. A alternativa **(a)** é **incorreta** pois

não considera o fenômeno da dispersão da luz em diversas cores, após a passagem pelo prisma. A alternativa (b) é **incorreta** uma vez que afirma que a luz muda de composição, presumindo-se ser uma substância, com a passagem pelo prisma. A alternativa (c) é a alternativa **correta**, pois foi exatamente essa a hipótese levantada por Newton a respeito da composição da luz branca. A alternativa (d) é incorreta, uma vez que Newton postulou que a luz branca era a composição de raios de luz de todas as outras cores.

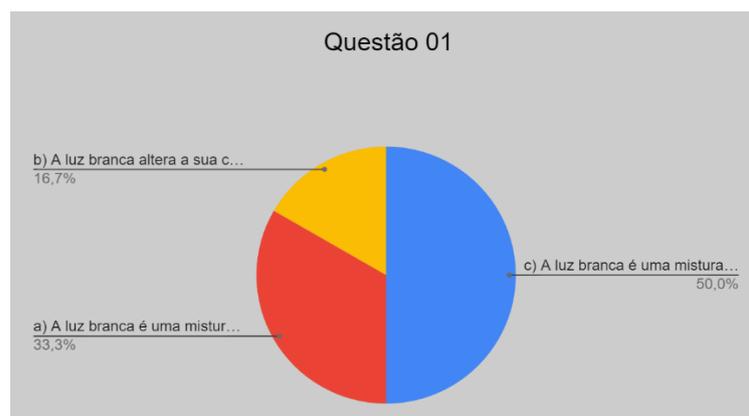


Gráfico 1: Resultado da questão 01.

Resultado: 50% dos alunos acertaram a questão 01 que tem como alternativa correta a opção (c).

Questão 02 - Para Newton, os raios de luz sofriam desvio ao passar pelo prisma por quê:

- a) possuíam natureza corpuscular e agiam conforme uma bola de tênis ao se chocar com um obstáculo, desviando em outra direção.
- b) possuíam natureza ondulatória e podiam contornar obstáculos.
- c) possuíam natureza corpuscular e eram desviados porque perdiam velocidade ao se chocarem com as partículas que constituem o prisma.
- d) não sofriam mais a ação do éter ao entrar no prisma.

Análise: Nessa questão buscou-se averiguar se os alunos compreenderam a posição de Newton a respeito da natureza da luz a partir da sua análise do experimento da dispersão da luz com um prisma. A alternativa (a) é a alternativa **correta**, pois Newton postulou que a luz deveria ter natureza corpuscular e que esses corpúsculos deveriam ricochetear nas paredes do prisma mudando de direção. Na alternativa (b), **incorreta**, o erro é evidente ao afirmar que Newton defendia uma natureza ondulatória para a luz. A alternativa (c) apesar

de defender a natureza de corpúsculo é **incorreta** ao afirmar que a explicação dada por Newton para o desvio dos raios de luz era a perda de velocidade dos corpúsculos. A alternativa **(d)** é **incorreta** ao afirmar que Newton desconsiderava a ação da substância hipotética éter nos raios de luz ao entrarem no prisma.

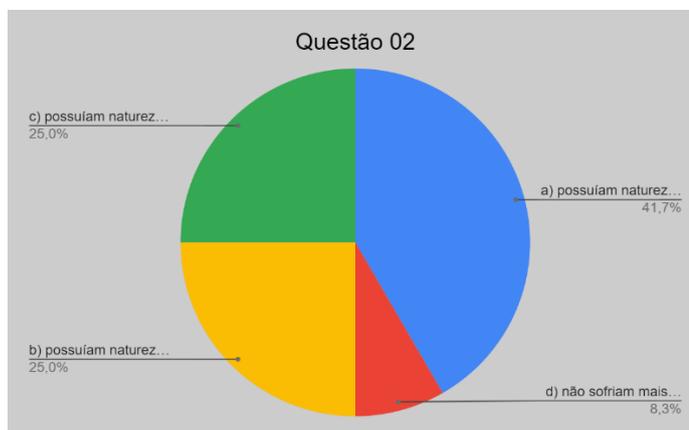


Gráfico 2: Resultado da questão 02.

Resultado: 41, 7% dos alunos acertaram a questão 02 que tem como alternativa correta a opção (a).

Questão 03 - De acordo com a hipótese levantada por Newton para a formação das diversas cores que surgiam quando a luz branca passa através de um prisma, qual era o fenômeno responsável pela formação dessas cores?

a) Os corpúsculos que formam o prisma misturam-se com os corpúsculos da luz dando origem às mais diversas cores.

b) As cores eram explicadas como o resultado da diferença de velocidade entre os corpúsculos.

c) O éter atrasa os corpúsculos e, por essa razão eles mantêm velocidades diferentes e formam as cores.

d) Os corpúsculos de luz são divididos em diversos tamanhos e, cada tamanho corresponde a uma cor.

Análise: A questão 3 averigua se os alunos compreenderam a explicação dada por Newton para a formação das cores a partir da dispersão da luz branca pelo prisma. A alternativa **(a)** é **incorreta** pois como o espectro pode ser projetado em qualquer distância do prisma, deveríamos considerar também que a luz carrega as partículas do prisma por longas distâncias. A alternativa **(b)** é a **correta**, pois para Newton as cores eram formadas graças a diferença de velocidade dos corpúsculos causada pela choque com as partículas do

prisma. A alternativa (c) é **incorreta** pois não leva o prisma nem a dispersão em consideração. O mesmo também ocorre na alternativa (d) **incorreta** que leva em consideração o tamanho dos corpúsculos ao invés de considerar a diferença de velocidade hipotetizada por Newton.

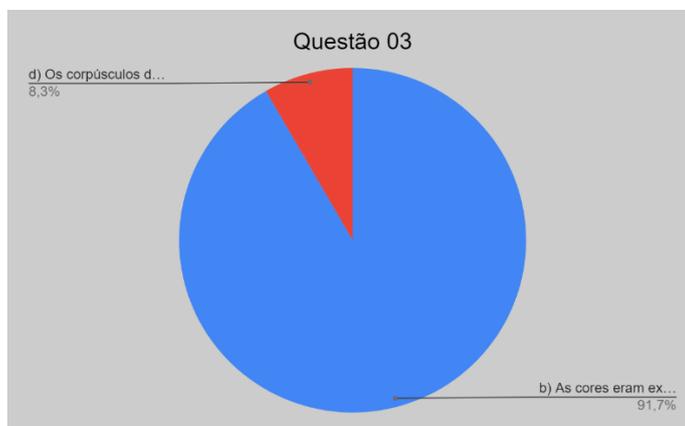


Gráfico 3: Resultado da questão 03.

Resultado: 91.7% dos alunos acertam a questão 03 que tem como alternativa a (b).

Questão 04 - Qual era a concepção do cientista Christiaan Huygens a respeito da natureza da luz?

- a) Para Huygens a luz possuía natureza granular.
- b) A luz era formada por cristais minúsculos, sendo de natureza corpuscular.
- c) A luz era possuía uma natureza desconhecida sendo formada pelo éter.
- d) Para Huygens, a luz possuía natureza ondulatória.

Análise: A questão 4 aborda um fato importante que não podia ser desconsiderado pelo estudante: Desde a época de Newton já havia cientistas que consideravam que a luz não possuía natureza corpuscular e sim ondulatória, apesar de carecer de provas experimentais que amparassem esse ponto de vista. A resposta **correta** dessa questão é a alternativa (d). (a) e (b) eram veemente rejeitadas por Huygens pois consideram que a luz é constituída por partículas. A alternativa (c) também está errada. No *e-book* deixa-se clara a preferência desse cientista pela hipótese que defendia a natureza ondulatória.

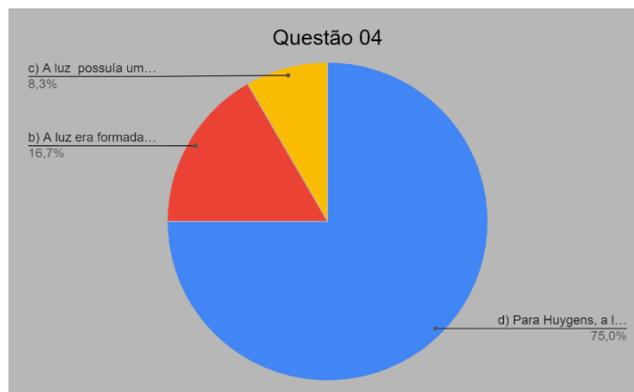


Gráfico 4: Resultado da questão 04.

Resultado: 75% dos estudantes acertaram a questão 4 que tem como alternativa correta a opção (d).

Questão 05 - A respeito das ideias de Newton e de Christiaan Huygens sobre a natureza da luz, pode-se afirmar que:

- a) Ambos concordavam que a luz possuía natureza corpuscular.
- b) Ambos concordavam que a luz possuía natureza ondulatória.
- c) As ideias de Newton eram baseadas em fatos experimentais enquanto as ideias de Huygens não foram baseadas em provas experimentais.
- d) As ideias de ambos os cientistas não se apoiavam em fatos experimentais.

Análise: A questão busca fazer com que os estudantes relembrem o embate teórico a respeito da natureza da luz que foi desdobrado entre Newton e Huygens. A alternativa **correta** é a opção (c). Apesar de defender arduamente que a luz possuía natureza ondulatória, Huygens não tinha qualquer prova experimental que substanciasse a sua tese. As demais alternativas (a) e (b) e (d) estão são incorretas pelos motivos elencados anteriormente.

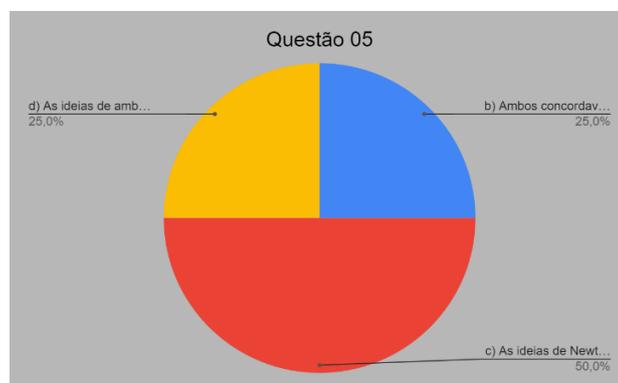


Gráfico 5: Resultado da questão 05.

Resultado: 50% dos alunos acertaram a questão 05 que tem como alternativa a opção (c).

Resultado geral: A média de acertos das questões desse questionário foi de 61,6%.

Questionário 2

Questão 01 - Qual caráter da luz é evidenciado no experimento da dupla fenda de Young?

a) corpuscular.

b) ondulatório.

c) granular.

d) O experimento de Young não foi decisivo na determinação da natureza da luz, pois os resultados não satisfaziam a nenhuma previsão teórica.

Análise: Nessa questão se faz necessário que o aluno tenha conhecimento dos fenômenos estritamente ondulatórios, como a interferência e a difração. A alternativa **correta** é a **(b)**, pois no experimento de Young são observados os fenômenos citados anteriormente. As alternativas **(a)** e **(c)** tratam da mesma coisa e estão **incorretas**, assim como a **(d)** que afirma que o experimento da dupla fenda não é capaz de satisfazer a nenhuma previsão teórica.

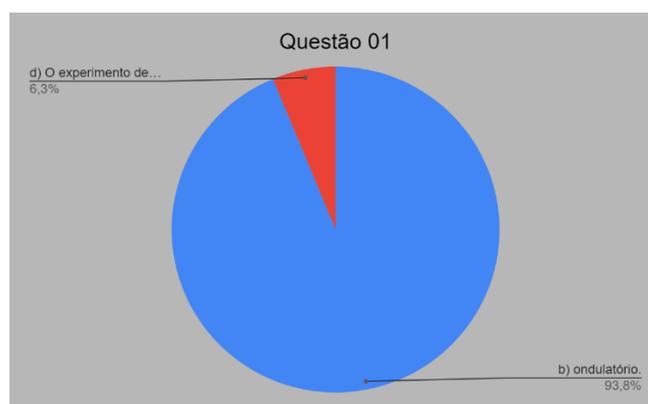


Gráfico 6: Resultado da questão 01 do questionário 02.

Resultado: 93,8% dos alunos acertaram a questão 01 que tinha como resposta correta a alternativa (b).

Questão 02 - considerando o experimento da dupla fenda de Young, indique qual dos fenômenos observados nesse experimento que são considerados exclusivamente ondulatórios.

- a) Reflexão e difração.
- b) Absorção e reflexão.
- c) Interferência e difração.
- d) Reflexão e polarização.

Análise: Para responder a essa questão, é preciso que o aluno possua os mesmos conhecimentos a certa dos fenômenos ondulatórios que embasam a questão 01. A alternativa **correta** dessa questão é a (c). A alternativa (a), (b) e (d) são incorretas. Basta que o aluno lembre que fenômeno da reflexão, que aparece nessas três alternativas também ocorre com partículas.

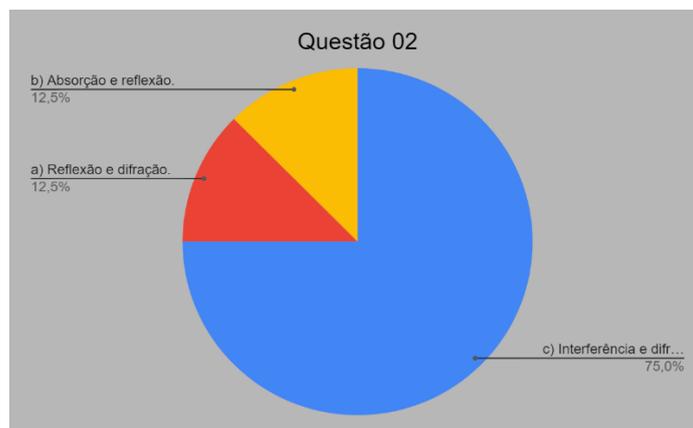


Gráfico 7: Resultado da questão 02 do questionário 02.

Resultado: 75% dos estudantes acertaram a questão 02 que teve como resposta correta a alternativa (c).

Questão 03 - A respeito da formação das franjas claras e escuras no anteparo onde a luz é projetada no experimento da dupla fenda de Young, indique a opção que explica a formação dessas franjas de acordo com a teoria ondulatória da luz.

a) As franjas luminosas se formam quando a crista de uma onda luminosa que veio de uma das fendas se encontra com a crista de outra onda luminosa proveniente da segunda fenda. Essas faixas luminosas são os pontos de interferência construtiva.

b) As franjas luminosas formam-se quando a crista de uma onda luminosa se encontra com o vale de outra onda luminosa.

c) As franjas escuras se formam quando a crista de uma onda luminosa que veio de uma das fendas se encontra com a crista de outra onda luminosa proveniente da segunda fenda. Essas faixas luminosas são os pontos de interferência destrutiva.

d) As franjas luminosas se formam quando a crista de uma onda luminosa que veio de uma das fendas se encontra com o vale de outra onda luminosa proveniente da segunda fenda. Essas faixas luminosas são os pontos de interferência destrutiva.

Análise: Essa questão buscou averiguar o conhecimento dos alunos acerca do fenômeno da interferência das ondas de luz. Para acertar a essa questão é necessário que o aluno saiba quais são as condições necessárias para que haja interferência construtiva e interferência destrutiva. A alternativa **correta** que explica corretamente a formação das franjas é a **(a)**.

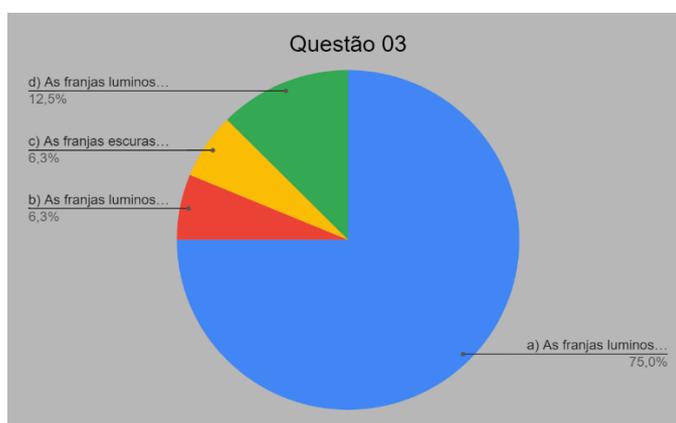


Gráfico 8: Resultado da questão 03 do questionário 02.

Resultado: 75% dos alunos acertaram essa questão que teve como resposta correta a alternativa (a).

Questão 04- A respeito do experimento da dupla fenda, assinale a alternativa que indica a explicação para a formação da franja central, de acordo com a teoria ondulatória da luz.

a) A franja central corresponde a pontos onde as ondas de luz interagem formando pontos de mínimo luminoso.

b) Na franja central, as ondas de luz emergem das duas fendas e percorrem caminhos de mesmo comprimento até a tela.

c) Na franja central, as ondas de luz interagem de forma destrutiva.

d) Na franja central, o caminho percorrido pela onda luminosa proveniente de uma das fendas é meio comprimento de onda maior que o caminho percorrido pela onda proveniente da outra fenda.

Análise: Essa questão exige do aluno o conhecimento da condição necessária para que haja interferência construtiva. A alternativa **correta** é a **(b)**. As situações elencadas nas alternativas **(a)**, **(c)** e **(d)** se referem a condições para que haja interferência destrutiva.

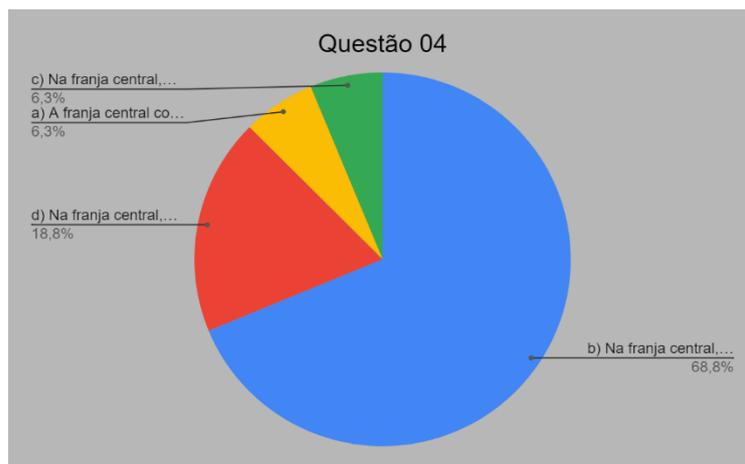


Gráfico 9: Resultado da questão 04 do questionário 02.

Resultado: 68,8% dos estudantes acertaram a questão 04 que teve como resposta correta a alternativa (b).

Questão 05 - De que forma a análise feita por Tomas Young a respeito do experimento da dupla fenda contribuiu para o desenvolvimento de uma teoria acerca da natureza da luz?

a) O experimento da dupla fenda de Young respondeu questões que não puderam ser respondidas pela teoria de Newton e fortaleceu essa teoria que afirma que a luz é formada por pequenas partículas.

b) O experimento da dupla fenda não foi capaz de fornecer nenhuma pista a respeito da natureza da luz.

c) A partir da análise do experimento da dupla fenda, ficou comprovado que a luz é formada por partículas.

d) A análise do experimento de Young forneceu uma base convincente para a sustentação da teoria ondulatória da luz.

Análise: A questão 05 busca averiguar se o estudante compreendeu o contexto no qual o experimento de Tomas Young foi realizado e a forma como esse experimento contribuiu para a reafirmação da teoria ondulatória da luz. A alternativa **correta** dessa questão é a opção **(d)**.

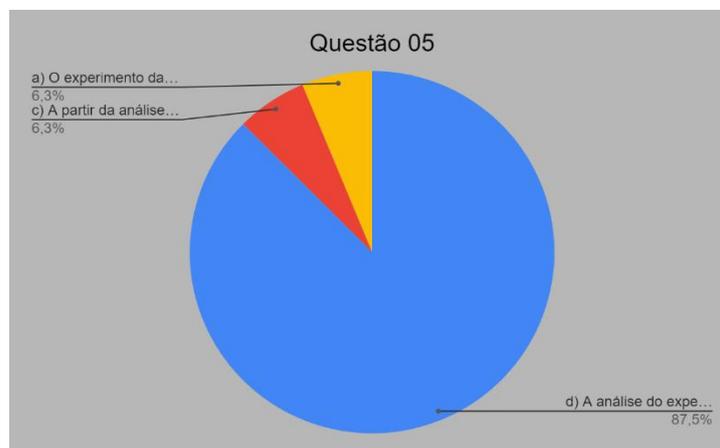


Gráfico 10: Resultado da questão 05 do questionário 02.

Resultado: 87,5% dos estudantes acertaram a questão 05 que teve como resposta correta a opção (d).

Resultado geral: A média de acertos das questões desse questionário foi de 80%.

Questionário 3

Questão 01 - O modelo ondulatório da luz, baseado na propagação de ondas longitudinais, não era capaz de explicar o fenômeno da polarização das ondas de luz. Nesse sentido, qual foi a explicação proposta por Young para esse fenômeno:

- Young propôs que a luz era um tipo de onda mista.
- A solução apresentada por Young foi considerar que a direção de oscilação das ondas de luz fosse transversal à direção de propagação.
- A explicação dada foi que a luz deveria ser formada por partículas que oscilavam na mesma direção em que se propagavam.
- Para Young, a polarização da luz não poderia ser explicada pelo modelo ondulatório.

Análise: Essa questão põe em conflito o conhecimento dos alunos sobre o modelo ondulatório da luz e busca verificar a compreensão acerca da explicação dada por Young para o fenômeno da polarização. A alternativa **correta** para essa questão é a **(b)**.

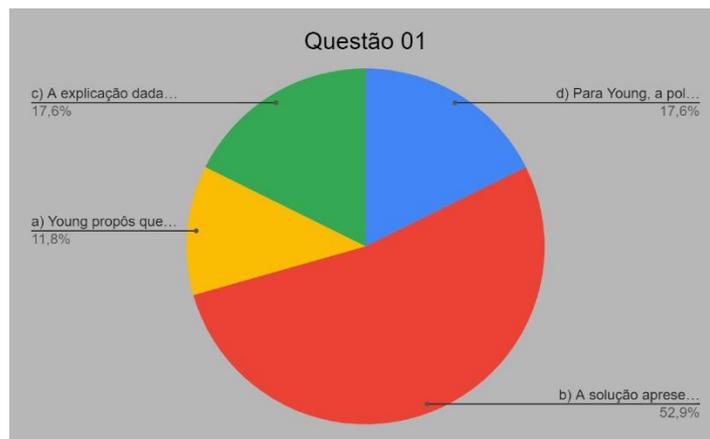


Gráfico 11: Resultado da questão 01 do questionário 03.

Resultado: 52,9% dos estudantes acertaram a questão 01 cuja alternativa correta é a (b).

Questão 02 - Que fato relacionado às ondas eletromagnéticas previstas nas equações de Maxwell permitiu a ele levantar a hipótese de que a luz era uma onda eletromagnética?

- a) Maxwell previu que as ondas eletromagnéticas deveriam propagar-se com a mesma velocidade da luz cerca de 300000 km/s.
- b) A previsão de que essas ondas poderiam propagar-se no vácuo.
- c) A inexistência de uma teoria para a luz que pudesse explicar todos os fenômenos óticos.
- d) Maxwell relacionou a luz com as ondas eletromagnéticas porque na sua época ainda não havia sido elaborada nenhuma teoria a respeito da natureza da luz.

Análise: Na questão 02 destaca-se a importância da previsão teórica de Maxwell para a reafirmação do modelo ondulatório da luz a partir da hipótese levantada de que a luz seria um tipo de onda eletromagnética. A alternativa (a) é a **correta**, uma vez que foi com a previsão teórica de que as ondas eletromagnéticas deveriam propagar-se na mesma velocidade que a luz que Maxwell levantou sua hipótese sobre a natureza da luz.

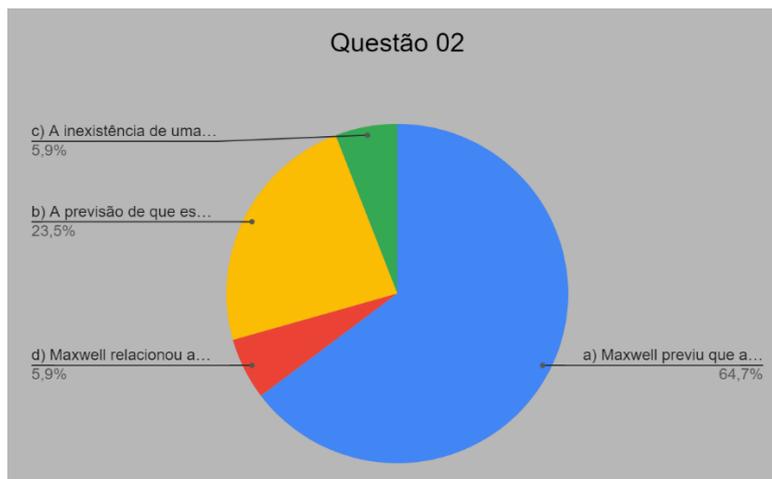


Gráfico 12: Resultado da questão 02 do questionário 03.

Resultado: 64,7% dos estudantes acertam a questão 02 que teve como resposta correta a alternativa (a).

Questão 03 - Maxwell previu em suas equações que os campos elétricos e magnéticos variam perpendicularmente entre si e que a direção dessa vibração era transversal a direção de propagação. Essa descoberta forneceu uma explicação para qual fenômeno ótico?

- a) reflexão
- b) difração
- c) refração
- d) polarização

Análise: Para responder a essa questão o aluno deve ter o conhecimento prévio sobre o fenômeno da polarização de uma onda. A alternativa **correta** dessa questão é a **(d)**.

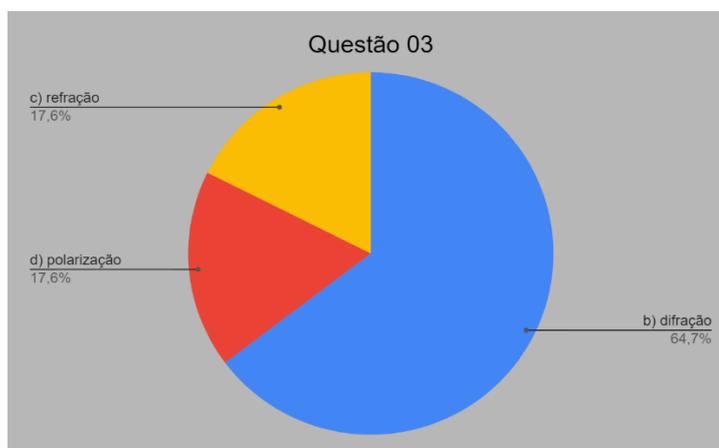


Gráfico 13: Resultado da questão 03 do questionário 03.

Resultado: 64,7% dos estudantes acertaram essa questão que tem como alternativa correta a (b).

Questão 04 - Henrique Rudolf Hertz produziu e detectou as ondas eletromagnéticas que foram previstas nas equações de Maxwell. Qual foi a importância desse fato para a compreensão da natureza da luz?

- a) os experimentos de Hertz comprovaram que a luz é formada por partículas.
- b) os experimentos de Hertz comprovaram que a luz é uma onda eletromagnética.
- c) constatou-se, por meio dos experimentos de Hertz, que não é possível explicar todos os fenômenos óticos ao se considerar a luz como uma onda.
- d) os experimentos de Hertz foram importantes porque por meio deles descobriu-se que a velocidade das ondas eletromagnéticas é diferente da velocidade da luz.

Análise: Essa questão com ênfase epistemológica destaca a importância do trabalho de Hertz para a comprovação do caráter ondulatório da luz tem como alternativa **correta a (b)**.

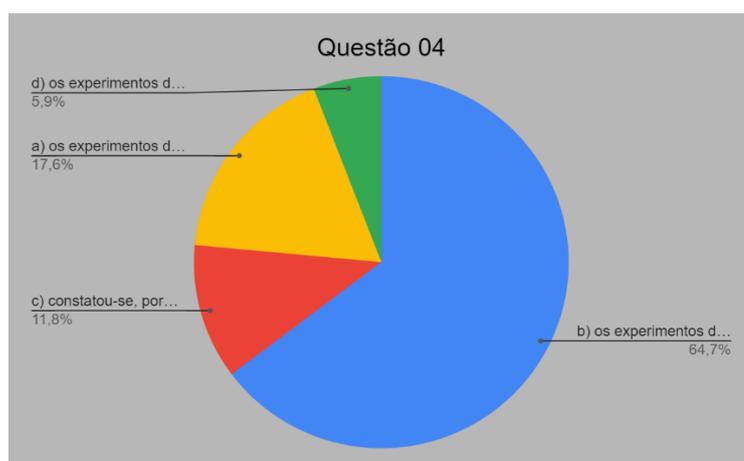


Gráfico 14: Resultado da questão 04 do questionário 03.

Resultado: 64,7% dos estudantes acertaram a questão 04 que a alternativa (b) como opção correta.

Questão 05 - A partir dos trabalhos de Maxwell e de Hertz, a comunidade científica conseguiu solucionar o mistério acerca da natureza da luz, uma vez que as equações de Maxwell permitiam prever praticamente todos os fenômenos óticos até então conhecidos. Que natureza da luz é comprovada pelos experimentos de Hertz?

- a) corpuscular.
- b) elétrica.

- c) ondulatória.
- d) eletromecânica.

Análise: O objetivo dessa questão foi averiguar se os alunos compreenderam que o trabalho de Hertz provou de forma definitiva a natureza ondulatória da luz e que a partir de então se teve certeza sobre a natureza ondulatória da luz. A alternativa **correta** dessa questão é a (c).

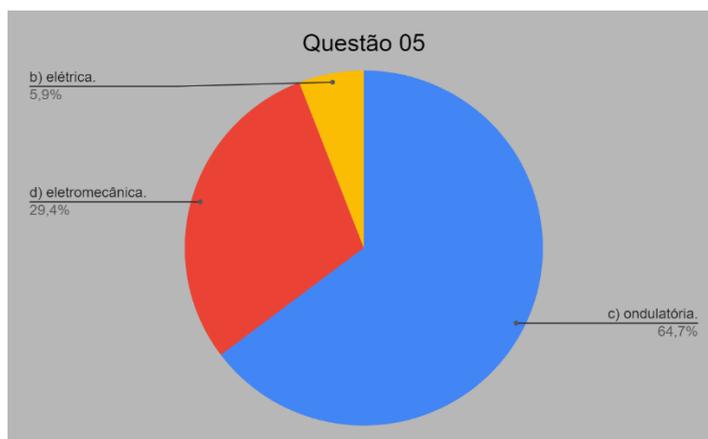


Gráfico 15: Resultado da questão 05 do questionário 03.

Resultado: 64,7% dos alunos acertaram a questão 05 que teve como alternativa correta a (c).

Resultado geral: A média de acertos das questões desse questionário foi de 62,34%.

Questionário 4

01) Qual hipótese foi levantada por Max Planck para explicar a forma da distribuição de energia no espectro da radiação emitida por um corpo negro?

a) Planck propôs que energia radiante de um corpo negro só podia ser emitida de forma contínua.

b) Planck propôs que a energia de um corpo negro é emitida na forma de pequenos pacotes, os quais ele chamou de “quanta”, cuja energia é proporcional frequência da radiação.

c) Planck supôs que um corpo negro não poderia ser um emissor ideal, dessa forma, o gráfico de sua distribuição de energia não poderia corresponder a nenhuma previsão teórica.

d) De acordo com Planck, a energia de um corpo negro é irradiada na forma de pequenos pacotes, cuja intensidade é proporcional à intensidade do campo elétrico.

Análise: O objetivo dessa questão é verificar a compreensão dos alunos a respeito da hipótese de quantização da energia irradiada por um corpo negro. A alternativa correta é a **(b)**, pois a hipótese de Planck leva em consideração que a energia é irradiada em pacotes que ele chamou de “quanta” cuja energia é proporcional a frequência da radiação.

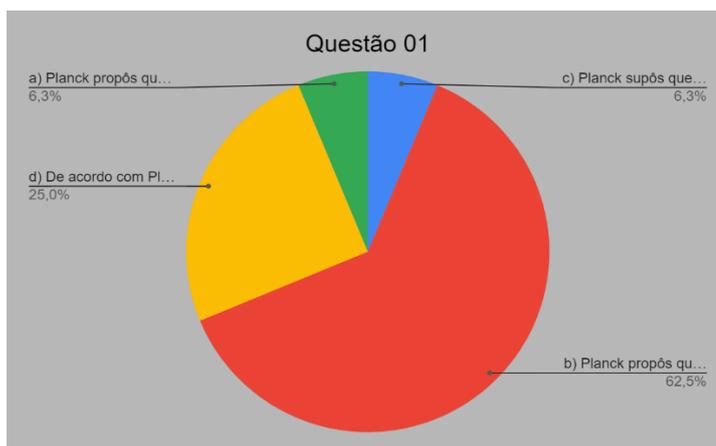


Gráfico 16: Resultado da questão 01 do questionário 04.

Resultado: 62,6% dos estudantes acertaram a questão 01 que teve como alternativa correta a (b).

Questão 02 - Em 1905, o físico alemão Albert Einstein publicou um artigo no qual sugere uma explicação para o fenômeno conhecido como efeito fotoelétrico. Em que consiste esse fenômeno?

- a) O efeito fotoelétrico consiste na absorção de um elétron por um núcleo atômico.
- b) O efeito fotoelétrico é um fenômeno no qual prótons e elétrons são emitidos por uma superfície metálica devido a incidência de luz.
- c) No efeito fotoelétrico, elétrons são absorvidos por uma superfície metálica devido à ausência de luz.
- d) O efeito fotoelétrico consiste na emissão de elétrons por uma superfície metálica devido a incidência de luz sobre essa superfície.

Análise: Essa questão teve como objetivo verificar a compreensão dos estudantes a respeito do efeito fotoelétrico. A alternativa **correta** é a **(d)**. Uma boa parcela dos estudantes, aproximadamente 25% marcou a alternativa incorreta **(c)**. Acredita-se que eles confundiram a absorção de fótons com a absorção de elétrons.

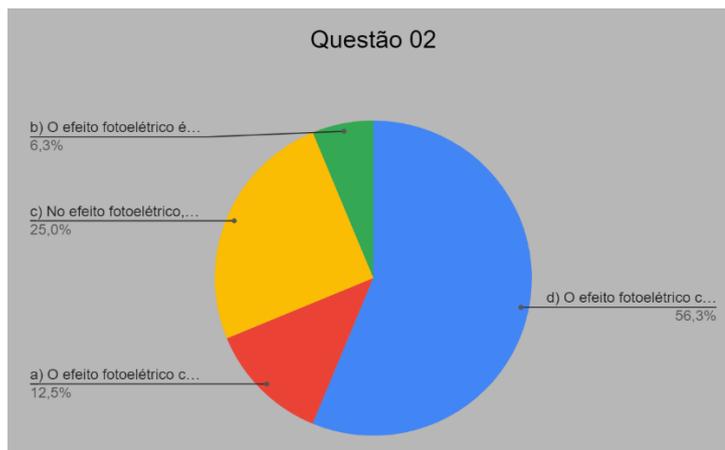


Gráfico 17: Resultado da questão 02 do questionário 04.

Resultado: 56,3% dos estudantes acertam a questão que teve como alternativa correta a (d).

Questão 03 - Quando se incide luz de determinadas frequências sobre uma superfície metálica, elétrons ganham energia suficiente e escapam dessa superfície em um fenômeno conhecido como efeito fotoelétrico. Qual foi a explicação dada por Einstein para esse fenômeno?

a) De acordo com Einstein, a luz é constituída por partículas energéticas, as quais ele chamou de fótons. Cada fóton possui uma energia que é proporcional a frequência da luz ($E = h \cdot f$). Quando um elétron absorve um fóton suficientemente energético ele ganha energia suficiente para escapar do material.

b) Para Einstein, a luz é constituída por pequenas ondas que ao incidirem sobre uma superfície metálica faz com os elétrons entrem em ressonância com sua frequência até que adquiram energia suficiente para escapar da superfície.

c) Segundo Einstein, cada elétron necessita absorver um ou mais fóton de luz para ter energia suficiente para escapar da superfície metálica.

d) Segundo Einstein, o efeito fotoelétrico ocorre porque os elétrons são carregados pelas ondas de luz ao colidirem com a superfície metálica.

Análise: A alternativa **correta** dessa questão é a (a). Nela, averiguamos se os estudantes compreenderam a explicação dada por Einstein para o efeito fotoelétrico. Para responder corretamente a essa questão, o aluno deveria compreender que os fótons são as partículas de luz e que só podem ser absorvidos se tiverem energia suficiente para ejetar os elétrons.

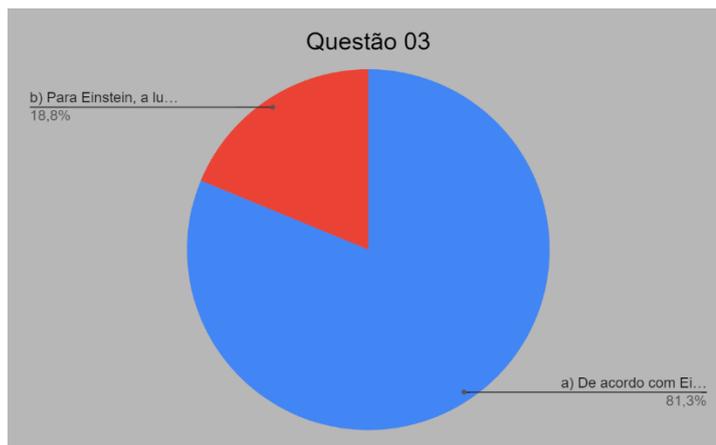


Gráfico 18: Resultado da questão 03 do questionário 04.

Resultado: 81,3% dos estudantes acertaram essa questão que teve como alternativa correta a (a).

Questão 04 - Por que o efeito fotoelétrico não pode ser explicado pelo modelo ondulatório da luz?

a) O modelo ondulatório da luz não explica o efeito fotoelétrico porque prevê que a energia é proporcional a frequência da radiação.

b) O modelo ondulatório da luz não é capaz de explicar satisfatoriamente o efeito fotoelétrico porque propõe que a energia das ondas eletromagnéticas está concentrada em um único ponto da frente de onda.

c) A teoria ondulatória da luz prevê que ao aumentarmos a intensidade do campo elétrico, os elétrons seriam ejetados com maior energia, o que não é observado experimentalmente.

d) De acordo com o modelo ondulatório da luz, os elétrons deveriam ser ejetados instantaneamente do metal, o que é observado na prática.

Análise: Essa questão requer do estudante o entendimento mais refinado a respeito do fenômeno discutido. Entender porquê a teoria ondulatória da luz não explica satisfatoriamente o efeito fotoelétrico requer o conhecimento dos três pontos que essa teoria não explica satisfatoriamente: energia cinética independente da intensidade, a frequência de corte e a inexistência de um tempo de retardamento para a emissão dos fotoelétrons. A alternativa **correta** dessa questão é a (c).

Curiosamente essa questão obteve o menor número de acertos, apesar termos explorado esse fenômeno com a ajuda do simulador do efeito fotoelétrico em uma atividade em que os próprios alunos que variavam os parâmetros do simulador conforme desejavam.

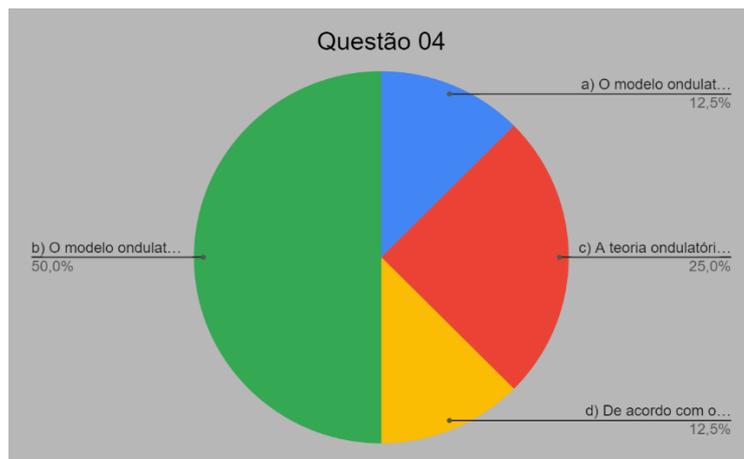


Gráfico 19: Resultado da questão 04 do questionário 04.

Resultado: 25% dos estudantes acertaram essa questão que teve como alternativa correta a (c).

Questão 05 - A explicação dada por Einstein para o efeito fotoelétrico reafirmou a necessidade de adoção de um modelo corpuscular para a luz, tendo em vista que a teoria ondulatória não é capaz de explicar todos os fenômenos observados. Contudo, alguns experimentos comprovaram de forma irrefutável o caráter ondulatório da luz, observado em diversos fenômenos. Nesse sentido, qual caráter da luz é adotado atualmente pela comunidade científica?

- a) Ondulatório
- b) corpuscular
- c) eletromecânico
- d) dual (onda-partícula)

Análise: Essa questão buscou verificar a compreensão dos alunos sobre o modelo de natureza da luz que foi adotado a partir da explicação dada por Einstein para o efeito fotoelétrico. A alternativa **correta** dessa questão é a (d).

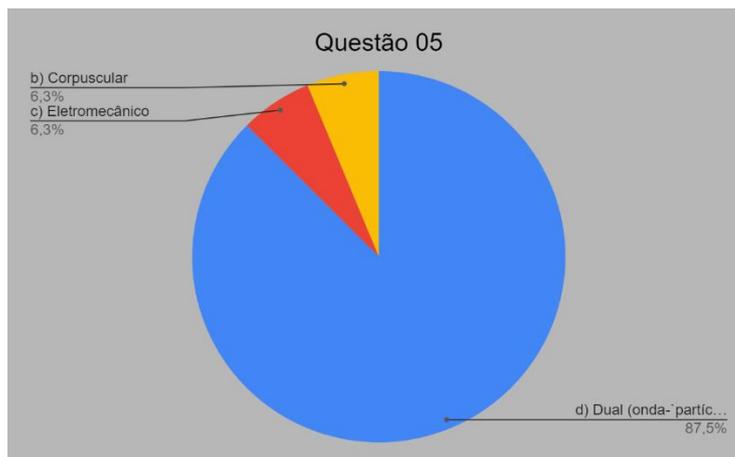


Gráfico 20: Resultado da questão 05 do questionário 04.

Resultado: 87,5% dos estudantes acertaram a questão 05 que teve como alternativa correta a (d).

Resultado geral: A média de acertos das questões desse questionário foi de 62,54%.

Questionário 5

Questão 01 - A respeito do princípio da complementaridade de Bohr, marque a alternativa correta.

a) O princípio da complementaridade de Bohr afirma que o modelo corpuscular da luz é suficiente para descrever a natureza da radiação.

b) De acordo com o princípio da complementaridade, é impossível observar em um mesmo fenômeno, a natureza corpuscular e ondulatória da luz, embora esses modelos sejam complementares e necessários para a perfeita descrição da natureza da radiação.

c) Segundo afirma o princípio da complementaridade de Bohr, o modelo ondulatório é suficiente para uma perfeita descrição da natureza da radiação.

d) De acordo com o princípio da complementaridade de Bohr, a natureza corpuscular e ondulatória da luz só se revela ao mesmo tempo em um experimento.

Análise: Essa questão buscou examinar a compreensão dos alunos a respeito do princípio da complementaridade de Bohr. A alternativa **correta** é dessa questão **(b)**.

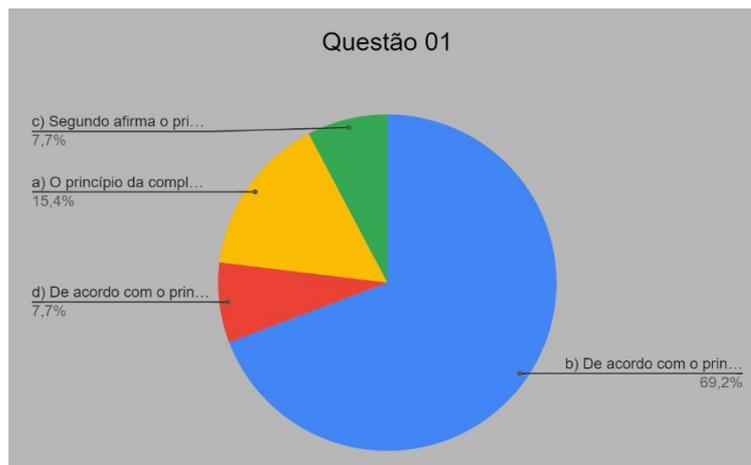


Gráfico 21: Resultado da questão 01 do questionário 05.

Resultado: 69,2% dos estudantes acertaram a questão 01 que teve como gabarito a opção (b).

Questão 02 - Marque a alternativa que corresponde à hipótese foi levantada por Louis De Broglie a respeito do comportamento das partículas:

a) De Broglie propôs que partículas também poderiam se comportar como ondas e exibir propriedades ondulatórias, como interferência e difração.

b) De Broglie propôs que, na presença de luz, partículas poderiam se transformar em ondas.

c) Segundo De Broglie, a luz, assim como as partículas de matéria, tem massa de repouso não nula, por isso possui momentum linear.

d) De Broglie propôs que o princípio da complementaridade não é válido para as partículas.

Análise: Nessa questão verificamos o nível de compressão dos alunos sobre a hipótese levantada por De Broglie sobre a natureza ondulatória das partículas. A alternativa **correta** dessa questão é a (a).

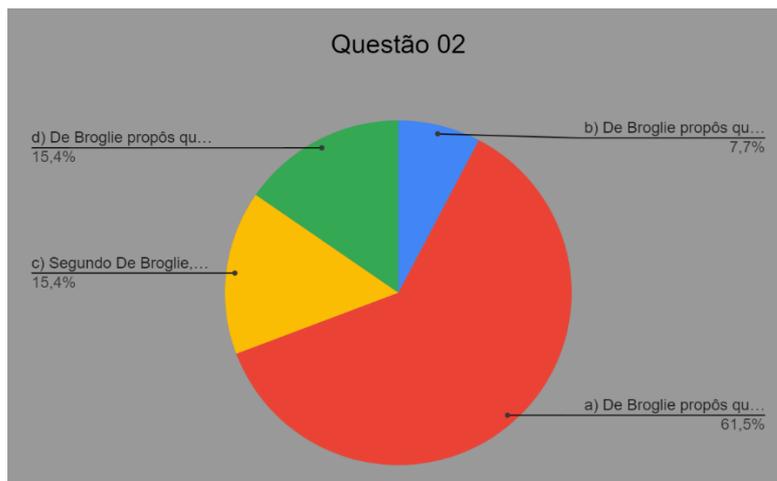


Gráfico 22: Resultado da questão 02 do questionário 05.

Resultado: 61,5% dos estudantes acertaram a questão 01, que teve como alternativa correta a (a).

Questão 03 - Qual das seguintes expressões matemáticas obtida por De Broglie evidencia a natureza dual (onda- partícula) da matéria?

a) $E = \frac{h}{\lambda}$

b) $E = h \cdot f$

c) $\lambda = \frac{h}{m \cdot v}$

d) $C = \lambda \cdot f$

Análise: Essa questão requer do estudante o conhecimento a certa de propriedades que sejam características das partículas e propriedades características das ondas, como o comprimento de onda e a quantidade de movimento. O objetivo é verificar se o aluno, após estudar sobre as relações de De Broglie, conseguiu identificar essas propriedades nos termos da equação exposta na alternativa (c) que é a opção **correta**, verificando que o comprimento de onda também é associado a partículas. As equações das opções (a), (b) e (d) que são **incorretas** relacionam-se por meio de grandezas que revelam apenas a natureza ondulatória do fenômeno em questão.

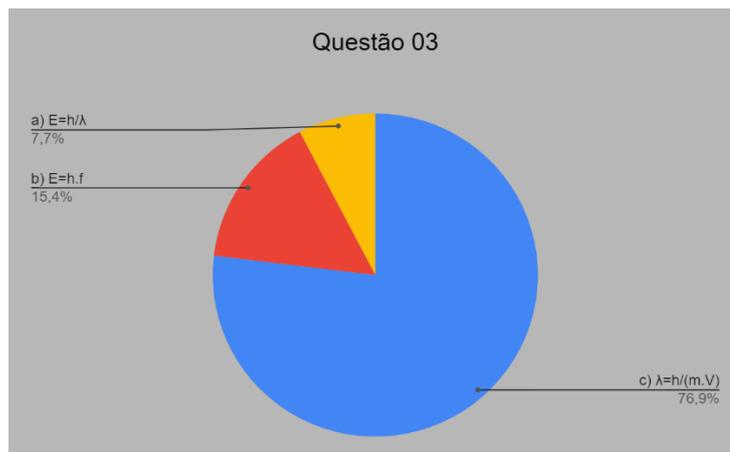


Gráfico 23: Resultado da questão 03 do questionário 05.

Resultado: 76,9% dos estudantes acertaram essa questão, que teve como alternativa correta a opção (c).

Questão 04 - Com a comprovação experimental da hipótese levantada por De Broglie de que o comportamento ondulatório dual da luz também poderia ser estendido para partículas, como prótons, elétrons, nêutrons etc., qual foi a novo modelo adotado pela comunidade científica para a natureza da matéria?

- a) Dual (onda – partícula)
- b) Continua adotando apenas o modelo corpuscular.
- c) Foi adotado o modelo ondulatório como único e capaz de descrever todos os fenômenos físicos.
- d) Os modelos ondulatório e corpuscular foram ambos adotados e sempre são observados ao mesmo tempo em um único fenômeno, como prevê o princípio da complementaridade de Bohr.

Análise: O objetivo dessa questão foi verificar se os alunos compreenderam que a partir do trabalho de De Broglie o entendimento da dualidade da natureza da luz foi estendido também às partículas. A alternativa **correta** dessa questão é opção (a).

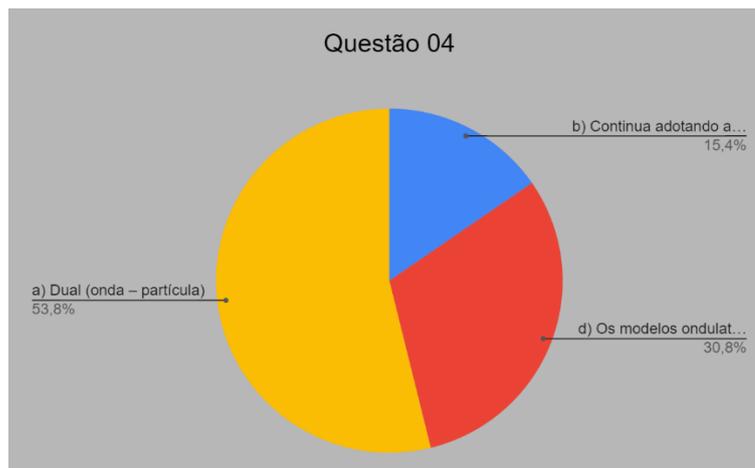


Gráfico 24: Resultado da questão 04 do questionário 05.

Resultado: 53,8% dos estudantes acertaram essa questão que teve como alternativa correta a opção (a).

Questão 05 - Por que não podemos ver ondas associadas a objetos que se movem em nosso cotidiano, como carros, aviões, bolas de futebol etc., conforme preveem as relações matemáticas de De Broglie?

a) Não observamos porque as relações de De Broglie só são válidas para velocidades próximas a da luz.

b) Propriedades ondulatórias em objetos do cotidiano não são observadas devido ao fato de que a massa desses objetos é pequena, o que faz com que seus comprimentos de onda sejam irrelevantes.

c) Porque o comprimento de onda é diretamente proporcional à quantidade de movimento da partícula ($P = m \cdot v$), dessa forma, quanto maior é a massa da partícula, menor é o comprimento de onda associado a ela.

d) Não observamos propriedades ondulatórias porque o comprimento de onda das partículas é inversamente proporcional à sua quantidade de movimento, dessa forma, quanto mais massiva for a partícula, menor é o comprimento de onda da onda que ela está associada.

Análise: Essa questão buscou verificar se os alunos compreenderam a relação de proporcionalidade entre o comprimento de onda associado a uma partícula e a sua massa. A alternativa **(d)** é a **correta**, pois conforme as relações de De Broglie, quando maior é a massa da partícula, menor o comprimento de onda da onda que está associada a ela.

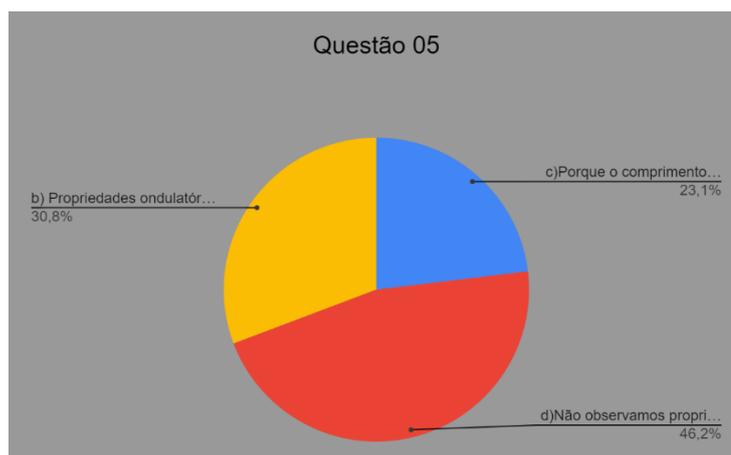


Gráfico 25: Resultado da questão 05 do questionário 05.

Resultado: 46,2% dos estudantes acertaram essa questão que teve como alternativa correta a (d).

Resultado geral: A média de acertos das questões desse questionário foi de 61,52%.

Quadro 03: Questão discursiva

| Problema proposto |
|---|
| <p>01) Calcule o comprimento de onda de um elétron que se desloca em um campo elétrico uniforme com velocidade de $5,97 \times 10^6$ m/s e compare o resultado com o comprimento de onda associado a um elefante de massa 5.500 kg caminhando em uma velocidade de 1 m/s. Dados: (massa do elétron: $9,11 \times 10^{-31}$ kg; constante de Planck: $6,63 \cdot 10^{-34}$ J.s).</p> |

Quadro 3: problema proposto para ser resolvido em sala com a utilização das equações de De Broglie.

Análise: Nesse problema o estudante deveria identificar as seguintes grandezas: velocidade do elétron, massa do elétron, velocidade do elefante e massa do elefante. Utilizando as relações de De Broglie, os estudantes iriam calcular o comprimento de onda associado a ambos objetos. Ao final, foi feita uma análise comparativa dos resultados onde eles deveriam observar que mesmo com o elétron movendo a uma velocidade bastante elevada, seu comprimento de onda ainda é significativamente grande, podendo ser medido experimentalmente. Já no caso do elefante, devido a sua massa elevada, o valor do momento linear é elevadíssimo, mesmo que ele se mova a uma velocidade pequena, o que pelas relações de De Broglie, fornece um comprimento de onda associado ao animal da ordem de 10^{-37} m, um valor insignificante, que não pode ser medido experimentalmente. Os estudantes

deveriam associar esse resultado ao fato de não visualizarmos ondas associadas a objetos macroscópicos.

Resultados: 100% dos estudantes que participaram da atividade, que teve a mediação do professor, conseguiram chegar aos resultados corretos para os comprimentos de onda do elétron e do elefante, comprovando que souberam identificar e manipular os dados apresentados no problema. Ao finalizarem o cálculo, eles puderam socializar os resultados teóricos alcançados e comparar os dados. Foi desdobrado um debate, com a mediação do professor, onde eles chegaram à conclusão de que não é possível medir valores significativos de comprimento de onda para partículas com alto valor de momento linear.

6 CONCLUSÃO E PERSPECTIVAS

No decorrer desse trabalho, desenvolvemos e aplicamos, na perspectiva metodológica da sala de aula invertida, um *e-book* que aborda tópicos de Física Quântica. O *e-book* buscou contemplar o tema Dualidade Onda-Partícula que é um assunto pouco abordado por professores do ensino médio, uma vez que os conceitos Física Quântica não são cobrados no ENEM e muito raramente em vestibulares. Na construção e aplicação desse produto, buscamos fazer uso das tecnologias da comunicação e informação hoje disponíveis entre os alunos, solicitando que a leitura do conteúdo fosse realizada em smartphones, tablets, notebook etc., e que a resolução de boa parte das atividades fosse feita online.

Diante dos resultados alcançados com a aplicação desse produto educacional, cujo desenvolvimento e aplicação foram descritos nessa dissertação, acreditamos que o referido produto alcançou o seu objetivo de favorecer o ensino e a aprendizagem do tema trabalhado. No quesito ensino, a metodologia de aula escolhida facilitou bastante o trabalho do professor na transmissão do conteúdo de aula, pois os alunos tiveram acesso ao conteúdo previamente, o que otimizou bastante o tempo de aula, permitindo a realização de atividades potencialmente construtivistas na aula presencial e veio a poupar o professor e os alunos de longas explanações do conteúdo.

No que diz respeito a aprendizagem do tema abordado, os resultados mostram que o percentual médio de respostas corretas em cada um dos questionários avaliativos foi superior a 60%, indicando ganhos significativos de aprendizagem sobre cada um dos tópicos abordados no *e-book*, ao se considerar que foi primeiro contato desses alunos um tema de física quântica.

A análise das respostas do problema teórico proposto, assim como a avaliação implícita do debate promovido sobre essas respostas, indicou que os alunos conseguiram interpretar e resolver a situação problema a partir dos conhecimentos recém construídos sobre o tema.

Nesse sentido, concluímos que o produto educacional composto pelo *e-book* intitulado de **A Dualidade Onda-Partícula: das ideias de Newton ao Postulado de De Broglie**, e pela sequência didática que foi desenvolvida como proposta à sua utilização, é adequado para ser utilizado no ensino do tema dualidade onda-partícula, seja na disciplina de Óptica Física, ou na disciplina de Física Quântica.

Pretendemos publicar o *e-book* e a sequência didática e disponibilizá-los gratuitamente para que esse produto possa ser usado por mais professores e alunos como uma ferramenta auxiliar no ensino e na aprendizagem de física quântica. Esperamos que a sua utilização favoreça uma aprendizagem pautada no uso das tecnologias da informação e da comunicação promovendo o desenvolvimento pleno do estudante e visando uma formação voltada para a realidade dos alunos.

REFERÊNCIAS

- ANTUNES, L. C. S. **Radiação de Corpo Negro; Lei de Stefan – Boltzmann; Lei do Deslocamento de Wien**. Covilhã, CB: Universidade da Beira Interior, 2012. 125 p. Originalmente apresentado como relatório de estágio.
- BEBER, B; SILVA, E; BONFIGLIO, S. U. Metacognição como processo da aprendizagem. **Revista de Psicopedagogia**, v. 31, n. 95, p. 144 – 151, 2014.
- BERGMANN, J; SAMS, A. **Sala de Aula Invertida: Uma Metodologia Ativa de Aprendizagem**. Tradução: Afonso Celso da Cunha Serra. 1 ed. Rio Janeiro: LTC, 2018.
- DAVIS, C; NUNES, M. M. R; NUNES, C. A. A. Metacognição e Sucesso Escolar: articulando teoria e prática. **Cadernos de Pesquisa**, v. 35, n. 125, p. 205-230, maio/ ago. 2005.
- DOCA, R. H; BISCUOLA, G. J; BÔAS, N. V. **Tópicos de Física: volume 3**. 21. ed. São Paulo: Saraiva, 2012.
- EBERHARDT, D; FILHO, J. B. R; LAHAM, R. A; BAITELLI, P. B. Experimentação no Ensino de Física Moderna: efeito fotoelétrico com lâmpada de néon e LEDs. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**. Porto Alegre, RS, v. 34, n. 3, p. 928-950, dez. 2017.
- EISBERG, R. M; RESNICK, R. **Física Quântica: átomos, moléculas, sólidos, núcleos e partículas**. Rio de Janeiro: Campus, 1979. 928 p.
- FIGUEIRA, A. P. C; Metacognição e seus contornos. **Revista Iberomerica de Educación**, v. 33, n. 1, 2003.
- FROTA, G. L. L. Sala de Aula Invertida: a metodologia *blended learning*. **Congresso Internacional de Educação e Tecnologias**. São Carlos, SP, 26 jun. 2018. Disponível em: <<https://cietenped.ufscar.br/submissao/index.php/2018/article/view/101>>. Acesso em: 23 ago. 2019.
- HALLYDAY, D; RESNICK, R; WALKER, J. **Óptica e Física Moderna**. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.
- IVAN, I; COELHO, E. P. **Lev Semionovich Vygotsky**. Tradução: José Eustáquio Romão. Recife, PE: Editora Massangana, 2010.
- JUNIOR, F. R; FERRARO, N. G; SOARES, P. A. T. **Os Fundamentos da Física: temas especiais. A radiação do corpo negro**. 9. ed. São Paulo: Moderna, 2007.
- MARTINS, R. A. A Física do Final do Século XIX: modelos em crise. **Revista ComCiência**, Campinas, SP, 10, maio, 2001. Disponível em: <<https://www.comciencia.br/dossies-1-72/reportagens/fisica/fisica05.htm>>. Acesso em: 06 mar. 2020.

- MARTINS, R. A; ROSA, P. S. **História da Teoria Quântica**: a dualidade onda-partícula, de Einstein a De Broglie. São Paulo: Livraria da Física, 2014.
- MELO, R. B. F. A utilização das TIC's no Ensino e na Aprendizagem da Física. In: Simpósio Hipertexto e Tecnologias da Educação, 3., 2010, Recife. **Anais Eletrônicos**...Recife: UFPE, 2010.
- MIZUKAMI, M. G. N. **Ensino**: As abordagens do processo. São Paulo: EPU, 1986.
- MOURA, B. A. Isaac Newton e a dupla refração da luz. **Revista brasileira de ensino de física**. Santo André SP, n.4, p. 4602 – 4615, out. 2014.
- MORAN, J. Mudando a Educação com Metodologias Ativas. **Mídias contemporâneas**, Ponta Grossa, PR, n. 2, jul. 2015. Disponível em: <http://www2.eca.usp.br/moran/wp-content/uploads/2013/12/mudando_moran.pdf>. Acesso em: 11 maio 2019.
- MOREIRA, M. A. **Teorias de Aprendizagem**. São Paulo: EPU, 1999.
- MUÑOZ, E. L. **Revisión Histórica del Concepto del Cuanto De Luz**. 2015. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/280042466>>. Acesso em: 10 out. 2019.
- NEUFELD, C. B; BRUST, P. G; STEIN, L. M. Bases Epistemológicas da Psicologia Cognitiva Experimental. **Psicologia: Teoria e Pesquisa**, v. 27, n. 1, p. 103 – 112, jan/mar. 2011.
- NUÑEZ, I. B; FARIA, T. C. L. **O Ensino Tradicional e o Condicionamento Operante**. Porto Alegre: Sulina, 2004.
- NUÑEZ, I. B; RAMALHO, B. **Fundamentos do Ensino-Aprendizagem das Ciências Naturais e Matemática**. Porto Alegre: Sulina; UFRN, 2004.
- NUÑEZ, I. B; RAMALHO, B. L. **Fundamentos do Ensino-Aprendizagem das Ciências Naturais e da Matemática**: o novo ensino médio. Porto Alegre: Sulina, 2004. 300 p.
- NUSSENZVEIG, H. M. **Curso de Física Básica 4**: ótica, relatividade, física quântica. 1. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1998, 437 p.
- ORTEGA, J. L. N. A; MENUZZI, M. B. G. A; KNITTEL, T. F; SILVA, E. R. R. Sala de Aula Invertida: avanços na aprendizagem na percepção do professor. In: Congresso Internacional de Educação à Distância, 23., 2017, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: ABED, 2017.
- OSTERMAN, F; CAVALCANTI, C. J. H. **Teorias de Aprendizagem**. Porto Alegre: Evangraf; UFRGS, 2011.
- PÁDUA, G. L. D. A Epistemologia Genética de Jean Piaget. **Revista FACEVV**, n. 2, p. 22-35, 1º semestre de 2009.

RIBEIRO, C. Metacognição: Um Apoio ao Processo de Aprendizagem. **Psicologia: Reflexão e Crítica**, n. 16, p. 109 -116, 2003.

ROSA, P. S. **Louis de Broglie e as Ondas de Matéria**. Campinas, SP: UNICAMP, 2004. Dissertação de mestrado, UNICAMP, 2004, 200 p.

SCHMITZ, E. X.S. **Sala de Aula Invertida**: uma abordagem para combinar metodologias ativas e engajar alunos no processo de ensino-aprendizagem. Santa Maria, RS: UFSM, 2016. Dissertação de mestrado, UFSM, 2016. 187, p.

SILVA, B. V. C. Young fez, realmente, o experimento da fenda dupla?. **Lat. Am. J. Phys. Educ.** Natal RN, n.2, p. 280 – 287, maio 2009.

SILVA, C. C; MARTINS, R. A. A “Nova Teoria Sobre Luz e Cores” de Isaac Newton: uma tradução comentada. **Revista brasileira de ensino de física**. Campinas, SP, n.18, p. 313 – 327, dez. 1996.

SILVA, E. A. P. **O Efeito Fotoelétrico**. Rio de Janeiro, RJ: UFRJ, 2000. Trabalho de Conclusão de Curso, UFRJ, 2000, 60 p.

SILVA, F. W.O. A evolução da teoria ondulatória da luz e os livros didáticos. **Revista brasileira de ensino de física**. Belo Horizonte, n.1, p. 149- 159, jan. 2007.

SILVA, F. W. O. A teoria da luz de Newton nos textos de Young. **Revista brasileira de ensino de física**. Belo Horizonte MG, n.1, p. 1601- 1608, abri. 2009.

SILVA, S. M. **Uma Experiência de Inserção de Astronomia e Física Moderna no Ensino Médio a Partir do Sol**. Natal, RN: UFRN, 2015. Dissertação de mestrado, UFRN, 2015, 222 p.

SOBRINHO, A. A; SOUZA, G. M.P. **Óptica Física e Geométrica**. 1. ed. Natal: IFRN, 2007.

SOUZA, C. E. **A Física Quântica no Ensino Médio**: o uso de TDICS como instrumentos de ensino-aprendizagem. Florianópolis, SC: UFSC, 2016. Trabalho de Conclusão de Curso, UFSC, 2016. 25 p.

VALENTE, J.A; ALMEIDA, M. E. B; GERALDINI, A. F. S. Metodologias Ativas: das concepções às práticas em distintos níveis de ensino. **Revista Diálogo Educacional**, Curitiba, v. 17, n. 52, p. 455-478, jun. 2017.

VALENTE, J. A. Blended learning e as mudanças no ensino superior: a proposta da sala de aula invertida. **Educar em Revista**. ed. especial. Curitiba, PR, n. 4, p. 79 – 97, 2014.

YOUNG, H. D; FREEDMAN, R. A: **Física IV**: ótica e física moderna. 12. ed. São Paulo: Addison Wesley, 2009.

YOSHIZAWA, E; PACHECO, C; CAMAS, N. P. V. Sala de aula invertida (flipped classroom) - desafios da formação de professores para as demandas possibilitadas pelas tic. In:

XII Congresso Nacional de Educação, 13, 2017. **Anais...** Curitiba, PR: PUC, 2017. p. 6881-6896.

APÊNDICE A

Sequência didática proposta para utilização do e-book

Aula I (45 min)

1º Momento (25 min)

No primeiro momento da aula, será comunicado aos alunos como ocorrerão as aulas no decorrer da unidade. Para isso, será informado que deverão acessar o conteúdo conceitual em um momento extraclasse em ambientes virtuais, por meio de smartphone, tablete ou computador junto ao *link web* [A Dualidade Onda-Partícula: Das Ideias de Newton ao Postulado de De Broglie](#) que dá acesso ao e-book **A Dualidade Onda-Partícula: Das Ideias de Newton ao Postulado de De Broglie**.

Dito de outra forma, a primeira aula servirá para orientar os alunos sobre a programação presencial da sequência didática e sobre a programação online desenvolvida no e-book. No primeiro contato com os alunos destacaremos que o conteúdo a ser estudado, as listas de exercícios e os encontros presenciais priorizarão sempre discussões, levantamento de hipóteses, debates, articulações de ideias e realização dos experimentos didáticos planejados para o bimestre, sendo fundamental a presença nessas ocasiões.

2º Momento (10 min)

No segundo momento, será apresentado o livro virtual, as disponibilidades das aulas e sobre o período de acesso ao e-book. Apresentaremos também, até quando os questionários online poderão ser respondidos e como poderão interagir com o ambiente onde estarão os questionários.

3º Momento (10 min)

Baseando-se na proposta metodológica conhecida como sala de aula invertida, será solicitado aos alunos que façam a leitura do texto introdutório do primeiro capítulo (capítulo 01, p.05) do e-book. Nesse trecho do livro intitulado **A teoria corpuscular de Newton para a luz** contém alguns questionamentos sobre a natureza da luz e da matéria. Nesse momento, também será orientado que cada aluno traga um questionamento ou problematização para discussão em sala de aula.

Aula II (45 min)

1º Momento (10 min):

Valendo-se da sala de aula invertida, considerando que os alunos realizaram a leitura do capítulo 01, p. 05 do *e-book*, antes da aula, para levantamento do pensamento prévio dos alunos perguntaremos: Qual é a natureza da luz segundo Newton? Quais argumentos Newton pondera para levantar suas hipóteses acerca da natureza da luz?

2º Momento (15 min):

Solicitaremos que os alunos socializem os questionamentos a respeito do conteúdo estudado no capítulo 01 na p. 05 e acompanharemos o debate promovido pelos mesmos, intervindo quando necessário para tirar as dúvidas, explorar ideias e conceitos.

3º Momento (15 min):

Realizaremos o experimento da dispersão da luz com um prisma e solicitaremos que os alunos tentem explicar o fenômeno com base na hipótese de Newton acerca da natureza da luz.

4º Momento (05 min):

Valendo-se da proposta metodológica da sala de aula invertida, solicitar aos alunos a leitura do capítulo 02 intitulado **A natureza ondulatória da luz; O experimento da dupla fenda de Young**, na p. 09 do *e-book*. Bem como que respondam ao questionário 01 na p. 08, (<https://goo.gl/forms/JEPipOKdjITOutBH3>) proposto ao final do capítulo.

Aula III (45 min)

1º Momento (5 min):

Considerando que os alunos realizaram a leitura em um ambiente extra sala de aula do capítulo 02 na p. 09 intitulado **A natureza ondulatória da luz; O experimento da dupla fenda de Young**, orientaremos que todos os integrantes da turma sejam divididos em dois grupos. Um grupo receberá duas travessas com água e dois pedaços de papelão contendo duas fendas cada um. O outro grupo receberá um canhão de luz e um conjunto de fendas duplas e simples.

2º Momento (10 min):

Os alunos serão instigados e produzir fenômenos ondulatórios com os materiais que tem à disposição. Será solicitado que eles anotem ou desenhem o que conseguiram produzir e identificar.

3º Momento (15 min):

Após a realização da atividade experimental, os grupos serão questionados sobre: 1) É possível afirmar que a luz possui natureza ondulatória uma vez que ela apresenta comportamentos ondulatórios, como interferência e difração?; 2) A água e outros meios, como o ar, também são formados por minúsculas partículas, mas apresenta comportamento ondulatório? 3) Como conciliar esses fatos a fim de defender posicionamentos acerca da natureza da luz?

4º Momento (15 min):

Discutiremos entre os grupos, com a mediação do professor, sobre as hipóteses baseadas em conceitos científicos ou senso comum. Durante esse momento, os alunos deverão expor seu aprendizado e relacionar o que foi lido na aula teórica (capítulo 02, p. 09) e sua conexão com a atividade prática sempre com a mediação do professor.

5º Momento (05 min):

Solicitaremos a leitura do capítulo 3 na p. 12 intitulado **O declínio da teoria corpuscular da luz**. Bem como, será recomendado que os alunos respondam ao questionário (<https://goo.gl/forms/tW6mv0eykC03vL083>) disposto na p. 11 do referido *e-book*. Cada aluno deverá escolher um ou mais pontos de interesse sobre o referido tema e realizar uma pesquisa exploratória para o debate que será proposto durante a próxima aula presencial.

Aula IV (45 min)

1º Momento (10 min):

Os alunos serão instigados por meio de perguntas, apontadas nas linhas abaixo, a comentar os pontos que mais lhe chamaram atenção sobre o capítulo 3 na p. 12 que trata do trabalho de Maxwell sobre a previsão teórica das ondas eletromagnéticas e da posterior comprovação experimental da existência das ondas que foi realizada por Hertz.

Tabela 1: Perguntas relativas ao capítulo 3 do e-book.

| Perguntas | |
|------------------|---|
| 01 | O trabalho de Maxwell foi importante para a determinação da natureza da luz? |
| 02 | Que fator foi determinante no trabalho de Maxwell para que ele pudesse levantar sua hipótese a respeito da natureza da luz? |
| 03 | O trabalho de Hertz foi importante para a sustentação da teoria eletromagnética da luz? |
| 04 | O que mais chama a atenção (desperta interesse) no trabalho desses cientistas? |

2º Momento (30 min):

Com o objetivo de promover uma atitude crítica-reflexiva sobre o contexto no qual os trabalhos de Maxwell e Hertz foram realizados, utilizaremos a técnica conhecida como Tempestade de Ideias. Iniciaremos anotando na lousa os pontos de interesse pesquisados e mencionados pelos alunos sobre o tema da aula. Essas ideias serão utilizadas como ponto de partida para iniciar um discurso de natureza epistemológica a respeito da aceitação do modelo ondulatório da luz mediante os estudos teóricos e experimentais realizados a esse respeito.

Os pontos a serem debatidos pontuados na lousa comporão um mapa conceitual, que guiará a o potencial pedagógico do tema com o objetivo de ampliar a construção do conhecimento.

3º Momento (05 min):

Para finalizar a aula, será solicitado que os alunos respondam ao questionário 3 disponível no link <https://goo.gl/forms/zhFoBbyWOL03TpaM2> presente no capítulo 3, p. 15. Também será solicitado que os discentes realizem, em um momento extraclasse, a leitura do capítulo 4 na p. 16.

Aula V (45 min)

1º Momento (10 min):

No primeiro momento da aula os alunos serão levados até ao laboratório de informática para que acessem o *e-book* dessa vez em um computador de mesa. Na ocasião, os alunos deverão ir até o capítulo 4, na página 20, onde encontrarão o *link* do simulador *PHET*

https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/legacy/photoelectric. Será solicitado que os discentes acessem o simulador do efeito fotoelétrico por meio desse *link*.

2° Momento (25 min):

Com o simulador aberto, os discentes irão investigar o efeito fotoelétrico variando os parâmetros do simulador e observando o que ocorre com os elétrons ejetados. Nesse momento, será solicitado que eles utilizem o simulador e a equação de Einstein do efeito fotoelétrico (*e-book*, p. 23) para que calculem: 1) a energia cinética máxima dos elétrons ejetados sob luz de comprimento de onda de 270 nanômetros (nm), 2) o potencial de frenamento, 3) e a frequência de corte do efeito.

O professor mediará essa atividade ajudando os alunos com a manipulação dos parâmetros no simulador e com a interpretação dos dados numéricos obtidos com a aplicação da equação.

3° Momento (10 min):

Será promovida uma discussão entre os alunos e professor sobre os resultados alcançados com a atividade e as propriedades do efeito fotoelétrico que não podem ser explicadas pela teoria ondulatória da luz, como: 1) a frequência de corte e 2) a emissão de elétrons energéticos mesmo sob a luz de baixa intensidade. Esses pontos a serem discutidos poderão ser propostos pelo professor ou poderão ser destacados pelos próprios alunos de acordo com o interesse dos mesmos.

4° Momento (05 min):

Para finalizar a aula, será solicitado que os discentes respondam ao questionário 4 acessível por meio do *link*: <https://goo.gl/forms/Gh6FMVAdIKhUNSR2> presente na p. 20 e que realizem a leitura extraclasse do capítulo 5 na p. 21 cujo título é **A dualidade Onda-partícula da matéria**.

Aula VI (45 min)

1° Momento (05 min):

No primeiro momento dessa aula será feito um exercício de metacognição explorando os conceitos espontâneos e científicos dos alunos a partir de uma pergunta problematizadora

relacionada ao capítulo 5, p. 21, do *e-book A Dualidade Onda- Partícula: Das ideias de Newton ao postulado de De Broglie*.

Tabela 2: pergunta problematizadora para iniciar a aula.

| Pergunta | |
|-----------------|--|
| 01 | Qual é a natureza da matéria? Baseando-se em que você defende esse ponto de vista? |

2º Momento (15 min):

Será proposta uma atividade lúdica na qual o professor irá transformar a sala de aula em um júri simulado. A turma será dividida em três grupos. Um grupo irá defender a natureza corpuscular da matéria, o outro a natureza ondulatória e o outro grupo defenderá que a matéria possui uma natureza diferente da corpuscular e ondulatória.

Na metodologia do Júri, os alunos terão a liberdade para escolher em qual grupo querem ficar para defenderem seus pontos de vista. Com a mediação do professor, os alunos irão expor seus argumentos em defesa do modelo da natureza escolhido. Vencerá o grupo que expor o maior número de argumentos e justificá-los com base em conceitos científicos.

3º Momento (15 min):

Será proposta uma situação problema com o uso do simulador PHET. Para isso, os alunos serão novamente levados até a sala de informática onde acessarão ao simulador de interferência quântica do PHET por meio do *link* https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/legacy/quantum-wave-interference disponível no *e-book* na p. 27. Nessa atividade, os alunos serão desafiados a descobrir o que ocorrerá se lançarmos elétrons contra um anteparo do mesmo modo que lançarmos fótons de luz.

4º Momento (10 min):

Verificaremos as hipóteses dos alunos sobre a natureza dos elétrons por meio de questionamentos sobre o comportamento dos elétrons no experimento, utilizando o simulador, para mostrar que mesmo lançando um elétron por vez um padrão de interferência ainda é formado.

Tabela 3: Questionamentos sobre o comportamento dos elétrons no simulador.

| Questionamentos | |
|-----------------|--|
| 01 | O que ocorre com os elétrons quando eles são lançados contra um anteparo? |
| 02 | Observando o comportamento dos elétrons no experimento é possível questionar a sua natureza? |
| 03 | A natureza dual dos elétrons pôde ser observada no experimento? |

5° Momento (05 min):

Para finalizar a aula, será solicitado que os alunos respondam ao questionário 5, por meio do *link* <https://goo.gl/forms/tkJTHdI0tKDrX4Fl1> disponível na página 27 do *e-book A Dualidade Onda- Partícula: Das ideias de Newton ao postulado de De Broglie*.

Aula VII (45 min)

1° Momento (10 min):

No primeiro momento da aula, serão abordadas as relações de De Broglie discutidas no e-book nas p. 22 e 23. Nesse momento, serão escritas as equações na lousa.

2° Momento (10 min):

O professor irá explicar a maneira como as relações de De Broglie englobam a natureza dual da matéria por meio da exploração do significado de cada termo das equações.

3° Momento (10 min):

Será solicitada a formação de duplas para a análise de um problema teórico proposto à turma. Na sequência, será recomendado que utilizem as relações de De Broglie para solucioná-lo.

Tabela 4: Problema proposto aos alunos.

| Problema | |
|----------|--|
| 01 | a) Calcule o comprimento de onda de um elétron que se desloca em um campo elétrico uniforme com velocidade de $5,97 \times 10^6$ m/s e compare o resultado com o comprimento de onda associado a um elefante de massa 5.500 kg caminhando em uma velocidade de 1 m/s. Dado: (massa do elétron: $9,11 \times 10^{-31}$ kg). |

4° Momento (15 min):

A aula será finalizada com a avaliação dos objetivos do problema proposto e a socialização da aprendizagem. Deverá ser perguntado aos discentes:

Tabela 5: Questionamentos para a avaliação da aprendizagem dos alunos.

| | |
|----|---|
| 01 | Em que situações podemos utilizar as relações de De Broglie? |
| 02 | Por que a natureza ondulatória e a corpuscular da matéria não podem ser observadas simultaneamente? |
| 03 | No mundo macroscópico, por que não vemos a matéria se comportar como onda? |