

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

ELIANE KOVALEK SCHEIFER

UMA PROPOSTA DIDÁTICA PARA O ENSINO DA NATUREZA DUAL DA LUZ

CAMPO MOURÃO

2022

ELIANE KOVALEK SCHEIFER

UMA PROPOSTA DIDÁTICA PARA O ENSINO DA NATUREZA DUAL DA LUZ

A didactic proposal for teaching the dual nature of light

Dissertação apresentada como requisito para obtenção do título de Mestre em Ensino de Física do Programa de Mestrado Profissional de Ensino de Física – Polo 32 (MNPEF) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).
Orientador: Dr. Oscar Rodrigues dos Santos.
Coorientadora: Dr^a. Débora Ferreira da Silva.

CAMPO MOURÃO

2022



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



**Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Campo Mourão**



ELIANE KOVALEK SCHEIFER

UMA PROPOSTA DIDÁTICA PARA O ENSINO DA NATUREZA DUAL DA LUZ

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestra Em Ensino De Física da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Física Na Educação Básica.

Data de aprovação: 11 de Fevereiro de 2022

Prof Oscar Rodrigues Dos Santos, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof Cesar Vanderlei Deimling, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof Luciano Gonsalves Costa, Doutorado - Universidade Estadual de Maringá (Uem)

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 11/02/2022.

Dedico este trabalho aos meus amados, esposo e filhos, que sempre me apoiaram e compreenderam meus momentos de ausência.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me abençoar e iluminar minha inteligência, possibilitando que eu vencesse os desafios encontrados ao longo da realização deste trabalho.

Ao meu esposo Luismar Scheifer, que sempre me apoia e incentiva nos meus projetos pessoais, e aos meus filhos Otho Eduardo Scheifer e Hendrick Felipe Scheifer, principalmente a você Hendrick que foi o primeiro a acreditar que eu era capaz de vencer esse desafio, insistindo para que eu fizesse a inscrição para a seleção do Mestrado.

Ao meu querido orientador, professor Dr. Oscar Rodrigues dos Santos, por sua paciência, correções e apontamentos que enriqueceram nosso trabalho, e seus retornos sempre tão imediatos, que me surpreenderam e tornaram nossa produção mais rápida.

A professora Dr^a Débora Ferreira da Silva, que me cativou em suas aulas e abraçou nossa proposta aceitando ser coorientadora, contribuindo imensamente na construção deste trabalho.

Ao diretor da escola que atuo profissionalmente, Edvaldo Lucas de Figueiredo, que me incentivou e comemorou junto comigo, a minha classificação no Programa, e sempre fez o que estava ao seu alcance para que eu pudesse participar das atividades e disciplinas do Mestrado.

Aos colegas de turma, em especial, aquelas que se tornaram amigas para a vida, de uma amizade que nasceu e cresceu remotamente, me deram apoio nos momentos em que achava que não ia conseguir, me motivando a seguir em frente. Obrigada meninas: Denise Lughy Medeiros Braga, Josiane Cristina Peres, Maria dos Anjos de Oliveira e Viviane Dziubate Pittner.

Agradeço a colaboração da minha ex aluna, Jessica Rafaela Vaz de Oliveira, na elaboração dos personagens utilizados na produção do vídeo.

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

Enfim, agradeço a todos e convivem comigo diariamente, colegas de trabalho e familiares, que muitas vezes apenas com um sorriso ou uma palavra de motivação tornaram minha caminhada mais serena.

Muito obrigada a todos.

RESUMO

As conclusões sobre o comportamento onda-partícula da luz deram início a Física Quântica, partindo da ideia de quantização da energia, sugerida por Max Planck. Assim, é importante que os estudantes compreendam que a luz tem comportamento ondulatório ao se propagar e comportamento corpuscular ao interagir com a matéria e o quanto essas conclusões foram importantes para o desenvolvimento tecnológico. Essa pesquisa teve como objetivo verificar a potencialidade de uma proposta didática para o ensino da natureza dual da luz, numa turma da 2ª série do Ensino Médio, de uma escola pública da rede estadual paranaense. Para tanto, a proposta em análise foi elaborada a luz da teoria da Aprendizagem Significativa, promovendo também, uma valorização da História da Ciência nas aulas de Física, como ferramenta metodológica. E ainda, traz dois experimentos para promover uma melhor compreensão da dualidade da luz. A pesquisa caracteriza-se como qualitativa, os dados foram coletados durante todas as ações da mesma, constituída de questionários, falas transcritas, mapas conceituais e diário de campo. Foram utilizadas oito aulas de Física, para a implementação da proposta didática que resulta no produto educacional do Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física. Constatou-se que, os alunos tiveram uma boa receptividade às atividades propostas, apresentando ao final, relações importantes sobre a dualidade da luz, remetendo a uma nova significação de conceitos a partir de seus conhecimentos prévios. Verificou-se ainda, que a utilização da História da Ciência promove um maior interesse e compreensão do conteúdo abordado, caracterizando-se como uma ferramenta metodológica complementar.

Palavras-chave: dualidade da luz; aprendizagem significativa; história da ciência; ensino de física.

ABSTRACT

The conclusions about behavior wave-particle of light began the Quantum Physics, starting from the idea of quantization of energy, suggested by Max Planck. Thus, it is important for students to understand that light has wave movement behavior when it spreads itself and it has a corpuscular behavior when interacts with matter and how much these conclusions were important for technological development. This research aimed to verify the potential of a didactic proposal for teaching about the dual nature of light, in a 2nd grade high school class, from a public network school in Paraná state. Therefore, the proposal in analysis was drawn up in the light of the Meaningful Learning theory, which also improves, an appreciation of the History of Science in Physics classes, as a methodological tool. Furthermore, it features two experiments to promote a better understanding of the duality of light. This study is characterized as a qualitative research, the data were collected during all the process, which was established by questionnaires, speeches transcripts, concept maps and field diary. Eight Physics classes were used, for the implementation of the didactic proposal that results in the educational product of the National Professional Master's Degree in Physics Teaching. It was found that students had a good reception to the proposed activities. They presented, at the end of this study, important relations about the duality of light, wich has sent them to new meaning of concepts basing on their previous knowledge. It was also found that the use of the History of Science promotes greater interest and understanding of the content covered, characterizing itself as a complementary methodological tool.

Keywords: light duality; meaningful learning; history of sciency; physics teaching.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação de uma onda.....	33
Figura 2 - Representação do espectro eletromagnético.....	34
Figura 3 - Representação dos campos elétrico e magnético	35
Figura 4 - Representação das ondas secundárias a partir dos pontos de uma frente de onda.....	36
Figura 5 - Representação de ocorrência e não ocorrência de difração.....	37
Figura 6 - Representação do experimento de Young.....	38
Figura 7 - Representação dos máximos e mínimos e a variação da intensidade da luz	38
Figura 8 – Raios luminosos difratam em S_1 e S_2	39
Figura 9 - Raios paralelos.....	40
Figura 10 - Representação do efeito fotoelétrico	42
Figura 11 - Fótons com energia insuficiente	44
Figura 12 - Fótons com energia suficiente.....	44
Figura 13 – Personagens presentes no vídeo: a) Aristóteles, b) Pitágoras, c) Isaac Newton, d) Thomas Young, e) Christian Huygens e f) Albert Einstein.....	64
Figura 14 - Mapa conceitual coletivo.....	69
Figura 15 - Alunos realizando o experimento com o pente e o laser.....	78
Figura 16 - Alunos observando a figura de difração formada no quadro	78
Figura 17 – Difração da luz formada no quadro	78
Figura 18 – Sem incidência de luz no LDR.....	80
Figura 19 – Com incidência de luz no LDR	80
Figura 20 - Alunos tentando apagar a luz utilizando o laser	80
Figura 21 - Alunos apagando a luz utilizando o laser	81
Figura 22 - Alunos assistindo o vídeo “O julgamento da luz”	83
Figura 23 - Mapa conceitual da aluna A11	86
Figura 24 - Mapa conceitual do aluno A23.....	87
Figura 25 - Mapa conceitual do aluno A24	88

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Distribuição de frequência e comprimento de onda das cores.....	34
Quadro 2 - Função trabalho de alguns elementos	44
Quadro 3 - Pesquisas encontradas sobre o ensino da dualidade da luz	55
Quadro 4 - Organização da proposta didática	61
Quadro 5 - Respostas para as questões sobre o comportamento da luz no arco-íris e no periscópio.....	77
Quadro 6 – Avaliação do produto educacional	89
Quadro 7 – Auto avaliação dos alunos.....	89

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	10
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	14
2.1	Aspecto histórico da natureza da luz	14
2.1.1	A luz segundo os Gregos	14
2.1.2	Contribuições de Al Hazen	18
2.1.3	Natureza da luz nos séculos XVII e XVIII	19
2.1.4	Discussões sobre a luz nos séculos XIX e XX	23
2.2	Luz: Uma introdução a dualidade onda - partícula.....	30
2.2.1	Comportamento ondulatório da luz.....	32
2.2.2	Comportamento corpuscular da luz.....	40
2.3	Aprendizagem Significativa.....	45
2.3.1	Mapas conceituais.....	50
2.4	Abordagem histórica no ensino da ciência	51
2.5	Abordagem da dualidade da luz no Ensino Médio	55
3	ENCAMINHAMENTO METODOLÓGICO.....	59
3.1	Coleta de dados.....	59
3.2	O produto educacional	61
4	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS DADOS	66
4.1	Análise do mapa conceitual inicial	67
4.2	Análise das questões iniciais.....	70
4.3	Utilizando organizadores prévios	73
4.4	Materiais potencialmente significativos.....	77
4.5	Análise dos mapas conceituais finais	85
4.6	Análise das fichas de avaliação do produto educacional	88
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	91
	REFERÊNCIAS	93
	APÊNDICE A - ROTEIRO PARA O VÍDEO “O JULGAMENTO DA LUZ”	98
	APÊNDICE B – FICHA DE AVALIAÇÃO DO PRODUTO EDUCACIONAL	109
	APÊNDICE C – PRODUTO EDUCACIONAL	111

1 INTRODUÇÃO

Ensinar Física não é somente abordar os fenômenos com base na racionalidade, mas sim, pensar em metodologias que sejam capazes de levar o aluno a refletir sobre o mundo da ciência, sobre as coisas e fenômenos que o cercam, fazendo-o capaz de entender que a Física não é somente racionalidade e números, mas também a compreensão dos fenômenos e princípios inerentes aos saberes científicos. Da mesma forma que as demais disciplinas, a Física como componente curricular deve formar cidadãos capazes de compreender o mundo que o cerca, considerando a dimensão científica dos fenômenos. Conforme preconizam as Diretrizes Curriculares da Educação Básica do estado do Paraná (DCE's), a disciplina de Física, no Ensino Médio, forma para a cidadania, para a vida, envolvendo os conhecimentos científicos com os aspectos sociais, econômicos, políticos e culturais que envolvem o universo do aluno.

Dentre os diversos conteúdos a serem explorados na disciplina de Física, destacamos neste trabalho a dualidade da luz. O ensino sobre a luz normalmente ocorre de maneira a se explorar o comportamento da luz enfatizando principalmente suas características geométricas, com informações não aprofundadas sobre sua natureza e o contexto histórico que envolve as discussões e conclusões de seu caráter dual.

Segundo Gircoreano e Pacca (2006), é recorrente no Ensino Médio uma abordagem tradicional ao se ensinar Óptica, restringindo-se apenas aos aspectos geométricos, analisando características e elementos específicos. Os autores complementam dizendo que,

Todos esses elementos sempre são indicados por retas e pontos num plano, sem ficar evidente que a luz se propaga num espaço tridimensional, que há uma fonte de luz e que existem obstáculos para a propagação. Os aspectos concernentes à natureza da luz, sua interação com a matéria e sua ligação com o processo de visão, também, são, em geral, desconsiderados. (GIRCOREANO; PACCA, 2006, p. 60).

Visto que a luz é um ente presente em nossa vida desde nosso primeiro instante, fazendo com que todos formem concepções intuitivas sobre o que é a luz, é importante uma discussão mais apropriada sobre as perspectivas científicas e as implicações das mesmas no cotidiano do aluno, uma vez que o ensino de Física deve formar o cidadão para que o mesmo compreenda os fenômenos do universo que o cerca e o desenvolvimento dos conhecimentos científicos e sua não-neutralidade. De acordo com Batista *et al.* (2009, p.44), “A escola tem a responsabilidade de formar cidadãos conscientes, críticos e ativos na sociedade”, enfatizando os aspectos sociais, culturais, políticos e econômicos dos conhecimentos científicos.

Ao ensinar a dualidade onda-partícula da luz é necessário adentrar na Física Quântica e essa abordagem é muito valiosa no Ensino Médio, pois os alunos demonstram curiosidade sobre assuntos modernos encontrados em vídeos, reportagens, postagens, entre outros presentes na internet. Muitas vezes, por diferentes fatores, o ensino de Física nas escolas públicas acaba contemplando em sua grande maioria ou, em alguns casos, na sua totalidade, apenas a Física Clássica. Obviamente, a Física Clássica deve estar presente no currículo e é fundamental para a compreensão de inúmeros fenômenos. O que destacamos aqui é a importância do ensino de alguns conceitos que só podem ser explicados dentro da Física Quântica e que são importantes para a compreensão de diversos equipamentos presentes na vida do aluno.

A influência crescente dos conteúdos de Física Moderna e Contemporânea para o entendimento do mundo criado pelo homem atual, bem como a inserção consciente, participativa e modificadora do cidadão neste mesmo mundo, define, por si só, a necessidade de debatermos e estabelecermos as formas de abordar tais conteúdos na escola de 2º grau. (TERRAZZAN, 1992, p.210).

A abordagem dos conteúdos da disciplina de Física em sala de aula requer, além do conhecimento do professor, estratégias que vão de encontro com as expectativas dos alunos e esse “público alvo” da educação, que em sua grande maioria são adolescentes e jovens, inseridos numa sociedade em constante evolução. Sabemos que nos últimos anos houve um acelerado desenvolvimento nos recursos tecnológicos e é característico dos jovens estar sempre a frente, sabendo das novidades e lançamentos nesse segmento. Nesse cenário, a escola e educadores precisam tentar se adaptar e acompanhar essa evolução tecnológica; é perceptível que entre tantas informações e tecnologias, fica cada vez mais difícil despertar a atenção dos educandos em nossas aulas.

Nosso trabalho surge da reflexão sobre como ensinar o caráter dual da luz para alunos do Ensino Médio, destacando o contexto histórico, que é muito importante na construção do conhecimento científico, e experimentos que possam facilitar a compreensão da natureza dual da luz através da observação de seu comportamento ondulatório ao se propagar e seu comportamento corpuscular ao interagir com a matéria.

Assim, o objetivo desse trabalho é investigar o potencial pedagógico de uma proposta didática elaborada com o intuito de auxiliar no ensino da natureza dual da luz, pautada na Aprendizagem Significativa, buscando despertar o interesse do aluno em conhecer o contexto histórico por trás dos conceitos apresentados na disciplina de Física e contribuir para que o mesmo compreenda a dualidade da luz, utilizando um vídeo e experimentos de baixo custo.

Para tanto estabelecemos os seguintes objetivos específicos:

- Identificar os conhecimentos prévios sobre a natureza da luz apresentados pelos alunos;
- Auxiliar o aluno a reconhecer que a luz tem comportamento ondulatório quando se propaga;
- Auxiliar o aluno a reconhecer que a luz tem comportamento corpuscular quando interage com a matéria;
- Contribuir para que o aluno identifique como as pesquisas e descobertas acerca da natureza da luz auxiliaram no desenvolvimento da sociedade;
- Investigar por meio de questionários e mapas conceituais, indícios de diferenciação progressiva e reconciliação integradora na estrutura cognitiva dos participantes.

Esse trabalho contém cinco capítulos: o capítulo 1 contempla a presente introdução, o capítulo 2 é a fundamentação teórica que serve de base para essa pesquisa, trazendo o conteúdo de Física, objeto de aprendizagem, que é a natureza dual da luz, fazendo uma abordagem histórica e uma conceituação, posteriormente apresenta a teoria da Aprendizagem Significativa de David Ausubel, que dará suporte à proposta didática implementada como produto educacional. Ausubel acredita que a aprendizagem significativa necessita de um material potencialmente significativo, a partir do qual, o aprendiz fará a construção de novos significados. O autor fala também sobre a importância do conhecimento prévio do aprendiz, que é compreendido como “âncora” para novos aprendizados.

Exige quer um mecanismo de aprendizagem significativa, quer a apresentação de material *potencialmente* significativo para o aprendiz. Por sua vez, a última condição pressupõe (1) que o próprio material de aprendizagem possa estar relacionado de forma *não arbitrária* (plausível, sensível e não aleatória) e *não literal* com *qualquer* estrutura cognitiva apropriada e relevante (i.e., que possui significado ‘lógico’) e (2) que a estrutura cognitiva *particular* do aprendiz contenha ideias *ancoradas* relevantes, com as quais se possa relacionar o novo material. A interação entre novos significados potenciais e ideias relevantes na estrutura cognitiva do aprendiz dá origem a significados verdadeiros ou psicológicos. (AUSUBEL, 2003, p.1).

O capítulo 2 fala ainda, sobre a pertinência da História da Ciência nas aulas de Física, tornando-se um apoio metodológico para o processo de ensino e aprendizagem da disciplina, possibilitando uma melhor compreensão e principalmente uma humanização da ciência. Manoel Robilotta (1988) escreve sobre a importância da História da Ciência no Ensino de Física.

Existem tarefas urgentes que precisam ser enfrentadas para que o ensino da Física possa ser melhorado. Entre elas, e ao nosso alcance, está a necessidade de se recuperar a noção de que a Física é um processo onde o confronto de idéias está sempre presente. É nesse sentido que o estudo da história da Física e da sua epistemologia são mais do que prementes; no estudo combinado dessas duas disciplinas repousa a possibilidade de se compreender o processo de construção do conhecimento. (ROBILOTTA, 1988, p.17).

O capítulo é finalizado com uma discussão sobre trabalhos realizados, que objetivaram ensinar a dualidade da luz no Ensino Médio. O capítulo 3 descreve o encaminhamento metodológico, caracterizando a pesquisa e o processo de coleta de dados, nesse capítulo consta ainda uma breve apresentação do produto educacional, dando destaque a algumas das atividades desenvolvidas. O quarto capítulo é constituído da análise e discussão dos dados coletados durante a pesquisa, que foi efetivada na aplicação do produto educacional. No capítulo 5, trazemos as considerações finais sobre a pesquisa realizada e finalizamos com as referências e apêndices, em que, um desses é o produto educacional na íntegra, e de forma detalhada, para que possa servir de material didático para colegas professores.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Aspecto histórico da natureza da luz

A luz é um fenômeno da natureza ao mesmo tempo empírico e abstrato, é o primeiro contato com a experimentação ao meio externo que um ser humano tem, ao “dar à luz” a uma criança dá-se a ela, a vida. Logo, para um indutivista ingênuo, luz é vida. Por ser um ente da natureza imediatamente requisitado, logo após nosso nascimento, e constantemente necessário, não é de se estranhar que os primeiros conceitos e hipóteses sobre a natureza da luz estejam presentes nos mais antigos registros da história, a partir da necessidade de compreender o dia e a noite.

O que torna o ensino sobre a luz atraente, é que apesar de se terem iniciado as observações, definições e conclusões a seu respeito desde a antiguidade em que já deixava a humanidade intrigada, ainda há o que se descobrir sobre tal fenômeno.

As primeiras observações sobre a natureza da luz surgiram da intenção de compreender e explicar como acontecia a visão humana; quanto mais se investigava sobre o sentido da visão, mais se aprofundava no conhecimento sobre a luz. Vários povos de diferentes crenças, na tentativa de explicar como era possível a formação das imagens, perceberam a relação da visão com a luz – sem luz não é possível enxergar – e atribuíram a diferentes deuses os fenômenos relativos à luz. Porém, os primeiros registros que apresentam busca por explicações e definições sobre a natureza da luz, sendo compreendidos como estudos do campo da Física, foram encontrados na Grécia, divergindo de todo o momento histórico e cultural da época.

2.1.1 A luz segundo os Gregos

As definições sobre o comportamento da luz relacionados à visão seguiam por três vertentes idealizadas por diferentes pensadores da antiga Grécia. De acordo com Bassalo (1986), aproximadamente no século VIII a. C., Homero afirmava que a luz era formada por raios visuais que saíam dos olhos do observador em direção ao objeto observado; para Pitágoras (580 a. C. – 500 a. C.), a luz era emitida pelo objeto observado, atingindo os olhos do observador; e a terceira hipótese, proposta por Platão (428 a. C. – 348 a. C.), definia que a visão de um objeto era possível devido a combinação de três jatos de partículas, em que a luz é emitida pelos olhos do observador, pelo objeto observado e pelas fontes iluminadoras, como o Sol, por exemplo.

Ao combinar o jato de luz emitido pelos olhos com o jato de luz vindo da fonte iluminadora, ambos em direção ao objeto observado, ocasionam o terceiro jato de luz que segue em direção aos olhos do observador, dando-lhe a sensação de visão.

Pensadores e filósofos que viveram nesses diferentes períodos e séculos depois continuavam a tentar compreender e explicar a visão e sua relação com a luz, dividindo-se nessas três linhas de pensamentos, que apesar de divergirem sobre o comportamento do raio luminoso, concordavam na natureza corpuscular da luz. Notoriamente, a definição de luz como partículas emitidas pelos olhos, apesar de ter sido aceita por um longo período, causava desconforto em diversos filósofos da época, por ainda não explicar por que essa luz não emana dos olhos a noite, permitindo a visão nesse período do dia.

O filósofo grego Empédocles (495 a.C. - 430 a.C.) compreendia a luz de acordo com Homero, sendo “algo” que saía dos olhos, tocava os objetos e retornava para o ponto de partida trazendo informações. Para ele, tudo o que existia na natureza era composto por quatro elementos (água, fogo, terra e ar) e a luz emitida pelos olhos tinha origem no elemento fogo acendido pela deusa da beleza e do amor. Apoiando-se na teoria da luz que emana dos olhos em direção ao objeto observado, Empédocles foi o primeiro a defender que a velocidade da luz é limitada. “Apesar deste filósofo ser partidário da teoria corpuscular da luz, pois considerava o fluxo luminoso como o fluxo contínuo de um rio, parece que ele era uma das únicas vozes da antiguidade a defender a finitude da velocidade da luz” (BASSALO, 1986, p. 139-140).

Quanto à natureza da luz, na antiguidade prevalecia o modelo corpuscular, defendido também pelos atomistas. “Nas visões atomistas gregas, destacavam-se as ideias de Leucipo (480-420 a. C.) e Demócrito (460-370 a. C.), os quais entendiam a luz como sendo composta por átomos arredondados e velozes que se deslocavam no vazio” (SILVA, 2010, p. 47).

O primeiro a apresentar ideias que contrariavam o modelo de corpúsculos, podendo ser considerado o pioneiro nas teorias da natureza ondulatória da luz, foi Aristóteles (384 a.C. - 322 a.C.).

“Segundo ele, um objeto luminoso vibra e, desta forma, coloca em vibração um meio indefinido, que o filósofo chamou de “diáfano”, o qual, por sua vez, provoca o movimento de “humores” que entram na composição do olho. Este modelo não era baseado em nenhuma observação do fenômeno, fato que seria muito difícil para época. Era uma analogia baseada apenas em associações” (BARTHEM, 2005, p. 20).

Segundo Bassalo (1986), apesar de Aristóteles defender ideias caracterizadas como antecessoras da teoria ondulatória da luz, o filósofo grego defendia que a velocidade da luz era infinita.

As dúvidas quanto à natureza corpuscular ou ondulatória da luz manifestadas na Grécia seguiram dividindo os filósofos, sendo a teoria corpuscular a de maior aceitabilidade. A partir dela muitos estudos sobre o comportamento da luz foram desenvolvidos, já que se pensava na luz como raios.

Saindo do campo filosófico de discussões sobre sua natureza e adentrando o campo da geometria, surgiram as explicações referentes ao comportamento geométrico da luz. O matemático Euclides (323 a. C – 285 a. C.) desenvolveu estudos importantes no campo da óptica geométrica. Adepto da teoria de que a luz segue dos olhos em direção ao objeto, utilizando-se da definição de raios visuais de Homero, relacionou-os aos seus conhecimentos geométricos.

Ele postulou que os raios visuais eram emitidos pelos olhos na forma de um cone, cujo ápice estaria no olho e a base, na extremidade do objeto observado, e que estes raios propagavam-se em linha reta com velocidade constante. Criou, ainda, o conceito de raio, que permitia tratar o problema da retilinearidade da propagação da luz de um ponto de vista puramente geométrico, exercendo, assim, uma influência decisiva na construção das teorias sobre a luz e visão. (BARROS; CARVALHO, 1998, p.87).

Os raios visuais de propagação retilínea utilizados por Euclides eram indispensáveis nas demonstrações geométricas apresentadas em suas obras que exploravam a reflexão da luz, porém, ele não se ocupava em descrever ou defender o princípio do raio visual e seus fundamentos. De acordo com Bassalo (1986), Euclides apresentou a Lei de Reflexão, em que os ângulos de incidência e de reflexão são iguais, em seu tratado denominado *Catóptrica*, usando seus *Elementos de Geometria* para explicar o comportamento de raios de luz em espelhos.

Os conceitos no campo da óptica evoluíram muito pouco ao longo de séculos. Posterior a Euclides, três séculos depois, destaca-se Heron de Alexandria (10 – 70), que também desenvolveu seus estudos na óptica geométrica.

Como Euclides, ele aceitava que a visão era produzida por raios visuais; portanto, ele não descreveu o movimento e a reflexão da luz nos espelhos, e sim o movimento e a reflexão dos raios visuais. Apesar dos pressupostos iniciais de Heron não corresponderem ao que entendemos hoje sobre o processo de visão e de luz, essas diferenças não serão relevantes para a discussão do princípio e sua aplicabilidade. Embora não aceitemos tal hipótese, ela não torna esses trabalhos antigos inválidos, pois ao pensarmos sobre raios visuais saindo dos olhos para os objetos, ou raios luminosos indo dos objetos para os olhos, os caminhos são idênticos, mudando apenas o sentido do movimento. (MARTINS; SILVA, 2013, p. 1605-2).

Heron contribuiu no campo da óptica geométrica defendendo, também, a propagação retilínea da luz, por meio de seu princípio do caminho mais curto – em que os “raios visuais” tendem a percorrer a menor distância, resultando em trajeto retilíneo. Em sua obra *Catóptrica* explorou os espelhos planos e não planos, estudando a reflexão dos “raios visuais”. Afirmava ainda que a velocidade da luz era infinita.

Quanto à refração da luz, esta já era conhecida e estudada na antiguidade. Cláudio Ptolomeu (85-165 d.C.), de Alexandria, que era adepto da teoria do raio visual, provavelmente foi um dos primeiros pensadores a coletar dados ao perceber o desvio sofrido por um feixe de luz ao passar do ar para a água.

[...] [Ptolomeu] construiu tabelas dos ângulos de incidência e refração. Seu trabalho é um dos poucos exemplos de experimentos daquela época, mas suas medidas estavam apenas aproximadamente corretas. (BARTHEM, 2005, p. 7).

É importante observar que todas as contribuições ao longo da história da ciência, mesmo sendo refutadas ou sendo comprovado que não são válidas para explicar determinados fenômenos naturais, não devem ser menosprezadas, pois servem de base para o avanço da ciência. E ainda em muitos casos, como o aqui descrito, o comportamento de propagação retilínea da luz apoiado na geometria foi validado posteriormente, mesmo que a teoria do raio visual tenha sido definitivamente excluída.

Não foram mencionados inúmeros filósofos e matemáticos que também apresentaram e defenderam suas concepções sobre a natureza da luz; na Grécia nos séculos citados, de um modo geral, nos registros históricos as teorias e explicações eram concebidas nas linhas de pensamentos até aqui descritas. A evolução e o surgimento de ideias contrárias às propostas pelos gregos foi muito lenta e ocorreu muitos séculos depois. Em resumo, sobre a natureza da luz, prevalece a noção de modelo corpuscular, havendo uma leve menção do comportamento ondulatório indicado por Aristóteles. A propriedade de propagação retilínea da luz é comum entre os filósofos da época, ainda que tenham posicionamentos diferentes em relação ao sentido de propagação, sendo identificadas três definições: (1) luz que emana dos olhos do observador em direção ao objeto observado, (2) luz que emana do objeto observado em direção aos olhos do observador, e (3) a combinação de “jatos” de luz, em que dois “jatos” incidem no objeto observado, vindos da fonte luminosa e dos olhos do observador, formando um terceiro “jato” que segue do objeto observado aos olhos do observador. Sobre a velocidade da luz, os pensadores estavam divididos entre os que acreditavam que esta teria valor finito, de grande rapidez, porém sem menção de valores, e os que defendiam que a luz teria velocidade infinita, sendo a segunda a de maior credibilidade na época.

2.1.2 Contribuições de Al Hazen

Após os estudos apresentados por Ptolomeu, no século I d. C., sobre a refração da luz, não houve avanço nas teorias sobre a natureza da luz e nem quanto às suas propriedades; foi um longo período de praticamente mil anos sem novas discussões – ao menos não foram encontrados registros que apontem contribuições significativas sobre o estudo da luz neste período.

No século X, o árabe Abu Alí al Hasan ibn Al Haitam (965 - 1038), conhecido no Ocidente por Al Hazen, pôs fim às discussões a respeito da propriedade de propagação da luz. A explicação de que a luz saía dos olhos também não foi aceita por Al Hazen, matemático e astrônomo, precursor do método experimental que também definiu a luz como minúsculas partículas dotadas de grande, porém finita, velocidade.

Al Hazen deu um golpe mortal na teoria dos raios visuais, após considerar que mesmo depois de olhar para o Sol e, então, fechar os olhos, uma pessoa continuava a ver o disco solar por algum tempo. Além disso, observou que enquanto permanecia olhando fixamente para o Sol, um observador sentia um efeito fisiológico associado com ofuscamento ou dor. (BARROS; CARVALHO, 1998, p.87).

Para o árabe, era impossível que o raio visual, saindo dos olhos do observador, gerasse dor e desconforto em algumas situações, então ficava claro que o responsável pela visão seria um agente externo. Concluiu ainda que se esse agente externo, como no caso do Sol, fosse muito forte, poderia deixar o efeito de visão posterior à observação, explicando o fato de a pessoa ver o disco solar ao fechar os olhos.

Al Hazen destacou-se utilizando a câmara escura como método experimental. Em sua obra “Livro de Óptica” conseguiu comprovar duas teorias: a de que a luz era emitida pelo objeto e a de que ela se propagava em linha reta, afirmando ainda que a visão:

[...]consistia na formação de uma imagem óptica no interior do olho, que funcionava como uma máscara escura, onde os raios de luz emitidos por cada ponto do corpo atravessaria a pupila e formaria um ponto correspondente à imagem no espelho da câmara. (SILVA, 2010, p. 49).

Al Hazen estudou não só a reflexão da luz, mas também a refração da mesma, e é tido como o primeiro cientista, por desenvolver o método experimental. Barthem (2005) afirma que Al Hazen corrigiu as tabelas de ângulos de incidência e refração, aperfeiçoou as leis desenvolvidas por Ptolomeu e introduziu o conceito de que os raios incidentes, refletidos e refratados estão todos no mesmo plano, denominado incidente.

As contribuições de Al Hazen foram primordiais para os estudos da óptica geométrica, exercendo influência nos estudos dos filósofos ocidentais, constituindo-se como um passo importante para a compreensão da visão, na idade média, apesar de não ter desenvolvido teorias relacionadas à natureza da luz. Por ter sido um período de pouca evolução nos conceitos sobre a luz, Al Hazen ganhou grande destaque no contexto histórico no campo da óptica.

Ribeiro *et al.* (2016) ressaltam que Al Hazen foi, indiscutivelmente, a pessoa mais importante na história da óptica e da luz, desde os tempos antigos até o século XVII, e que o Ano Internacional da Luz (2005) marca várias efemérides, entre elas o milésimo aniversário de seu Tratado de Kitab al-Manazir (Livro de Óptica).

2.1.3 Natureza da luz nos séculos XVII e XVIII

Foi no séc. XVII que as discussões sobre a natureza da luz ganharam espaço de fato; alguns estudiosos concentraram esforços em explicar e defender seus posicionamentos com relação ao que acreditavam, deixando o campo filosófico, que era predominante até então, e adentrando o campo científico.

Quanto à natureza da luz, predominava o modelo de partículas que se propagavam em linha reta, sendo explicado com o auxílio da óptica geométrica, mas alguns fenômenos não podiam ser explicados por meio dela.

Pelo modelo de propagação retilínea da luz, um obstáculo deveria proporcionar uma região de sombra de contornos nítidos. A projeção desta sombra em uma parede, pelas previsões do modelo geométrico, seria caracterizada por uma região escura claramente separada da região iluminada pela fonte luminosa. É claro que, para isso, dever-se-ia levar em consideração a região de penumbra, gerada pelo tamanho físico da fonte de luz, e que deveria ser a menor possível para se fazer uma observação apurada. Contudo, as primeiras experiências logo mostraram a existência de faixas claras, onde devia haver sombra, e de faixas escuras, onde devia estar bem iluminado. (BARTHEM, 2005, p. 21).

Francesco Maria Grimaldi (1618 - 1663), professor da Universidade de Bolonha, realizou um experimento simples no qual verificava-se essas faixas claras e escuras, e provavelmente foi o primeiro a identificar um quarto comportamento da luz, o qual ele denominou de difração, até então eram conhecidos os fenômenos de reflexão, refração e difusão, mas a publicação de seus estudos só ocorreu após sua morte, em seu livro *Physico-Mathesis de Lumine, Coloribus et Iride*, publicado em 1665. Segundo Barthem (2005), para explicar o desvio da luz de sua trajetória em linha reta, Grimaldi usou a experiência comum sobre ondas sonoras ou ondas que se propagam na água,

direcionando, assim, para um estudo de comportamento ondulatório da luz. Bassalo apresenta uma descrição, feita por Grimaldi, de uma de suas experiências:

[...] Grimaldi demonstrou que se um feixe de luz branca passar através de dois estreitos orifícios, situados um atrás do outro, e em seguida atingir um anteparo branco, haverá neste uma região iluminada além da que deveria existir se a luz se propagasse em linha reta. É como se a luz se "encurvasse" ao passar pelos orifícios, afirmou Grimaldi. (BASSALO, p.141).

Cabe ressaltar que, logo a frente, veremos esse experimento sendo retomado por Thomas Young, e utilizado para comprovar o comportamento ondulatório da luz no séc. XIX.

Percebe-se que, nesse período, as observações e desenvolvimento de conceitos estavam sempre mais voltadas ao estudo sobre as propriedades da luz e as conjecturas referentes à sua natureza eram determinadas de forma a justificarem as propriedades enunciadas. Novamente os estudos norteiam para a óptica geométrica, mais precisamente na refração da luz, em que damos destaque a Willebrord Snell (1591-1626), professor de matemática na Universidade de Leiden, Holanda, que em 1621 desenvolveu uma relação entre os ângulos de incidência e de refração da luz ao mudar de meio de propagação. Porém, Snell não publicou seus estudos, mas, mesmo assim, teve posterior reconhecimento, pois sua relação matemática entre os ângulos incidentes e refratados recebe seu nome: Lei de Snell. A lei da refração foi de fato enunciada e publicada por René Descartes (1596-1650), em 1634, que não citou Snell, mas, diante dos fatos, essa lei também é denominada Descartes-Snell.

“Ao estudar a refração da luz através de meios transparentes, Descartes utiliza a teoria corpuscular da luz e conclui que a velocidade da mesma é maior nos meios mais refringentes, isto é, mais densos” (BASSALO, 1986, p. 151). Por outro lado, o matemático francês Pierre Fermat (1601-1665) realizou uma nova demonstração da lei da refração da luz em 1661. Segundo Rocha *et al.* (2011, p. 310), “para demonstrar a lei da refração, ele se apoia no seu postulado do *tempo mínimo*, e usa uma hipótese que exigia ter a luz uma velocidade menor nos meios mais densos, a qual era frontalmente contrária ao resultado de Descartes”. Ainda de acordo com Rocha *et al.* (2011), este foi o fator que formalizou as controvérsias entre as duas concepções sobre a natureza da luz.

Em 1678, o físico e astrônomo holandês Christian Huygens (1629-1695) propõe a teoria ondulatória para a luz no livro “Tratado sobre a luz”. Huygens não foi o primeiro a defender a natureza ondulatória da luz, já haviam conjecturas sobre essa concepção ondulatória, uma delas, proposta em 1665, por Robert Hooke (1635-1703), físico inglês

que descreveu muitos experimentos ópticos em seu livro *Micrographia*, e também menciona sua compreensão sobre a natureza da luz.

[...]Hooke concluiu que ela é produzida pelo movimento muito rápido de partículas dos corpos e que a própria luz é um movimento vibratório que se espalha em superfícies esféricas a partir da origem, como as ondas que se formam na superfície na água quando se joga uma pedra nela; e os raios luminosos são como os raios geométricos que vão do centro de uma esfera ou círculo para sua superfície. (MARTINS e SILVA, 2015, p. 4202-12).

O fato é que as pesquisas e publicações de Huygens ganharam grande espaço no cenário científico do séc. XVII, obtendo maior destaque na disputa entre as duas concepções, a natureza ondulatória, defendida por ele, e a natureza corpuscular, defendida por Newton, como veremos mais à frente.

Huygens também realizou estudos referentes à refração da luz, concluindo que a velocidade de propagação da luz em um meio determina o índice de refração e essa velocidade se altera quando a luz passa de um meio para o outro. Ele reconhecia a luz como ondas longitudinais assim como o som, o que posteriormente foi verificado ser incorreto, tendo a luz o comportamento de ondas transversais. Barthem (2005) descreve a teoria ondulatória de Christian Huygens:

No modelo de Huygens, cada ponto em uma frente de onda é tratado como uma fonte de uma ondícula esférica denominada *ondícula secundária* ou ondícula de Huygens. O envoltório destas ondículas, em um instante posterior, é determinado pela tangente a estas superfícies. O envoltório é assumido como sendo a nova posição da frente de onda. (BARTHEM, 2005, p. 22).

É importante mencionar que apesar de Huygens ser reconhecido como o primeiro a sistematizar a teoria ondulatória da luz, em sua obra não há menções de diversos elementos dos estudos de ondulatória que temos conhecimento hoje, como frequência, amplitude e comprimento de onda, que foram desenvolvidos muito tempo depois. O que tínhamos era um reconhecimento da luz como algo que causa uma perturbação em um meio. De acordo com Ribeiro *et al.* (2016),

O mais surpreendente é que o modelo de Huygens não é uma verdadeira teoria ondulatória; as suas ondas elementares são de facto mais comparáveis a frentes de onda ou ondas de choque e não estão relacionadas com nenhuma noção de movimento periódico. Com a sua teoria, Huygens consegue explicar a velocidade reduzida da luz num meio mais denso, a refração, a polarização e a birrefringência. (RIBEIRO *et al.*, 2016, p. 7).

E como Huygens fazia analogia ao som e às ondas sonoras, as ondas de luz precisariam de um meio material para se propagarem. Ele propôs que o meio pelo qual a luz se propagaria seria o éter, “um *meio luminoso*, que penetrava os poros de todos os corpos e enchia todo o espaço, meio este com características tais que explicassem a

grande velocidade da luz, este meio seria para ele um fluido, batizado de éter *luminífero* (ROCHA *et al.*, 2011, p. 297).

Sobre a relação da velocidade de propagação da luz com a densidade do meio em que se propaga, Huygens estava em concordância como Fermat, afirmando que em meios mais densos a velocidade é menor, e contraria as ideias de Newton, também nessa conjectura.

O físico e matemático inglês Sir Isaac Newton (1642-1727) foi opositor da teoria ondulatória de Huygens, e que, por ser reconhecido da comunidade científica contemporânea, conseguiu ancorar a teoria corpuscular da luz nos séculos XVII e XVIII.

Para Newton, como já foi mencionado, a velocidade da luz era maior quanto mais denso o meio em que se propaga, teoria essa que sabemos não foi bem sucedida. Uma importante descoberta realizada por Newton é que o índice de refração depende não apenas das propriedades do meio, mas também da cor da própria luz.

Ribeiro *et al.* (2016) falam sobre a teoria corpuscular defendida por Isaac Newton,

Na sua obra *Opticks* (1704), Newton apresentou a ideia que a luz é corpuscular, é formada por raios que viajam em linha recta e não como ondas. Para Newton a propagação em linha recta da luz não era compatível com uma teoria ondulatória. Newton explicou muitos fenómenos com a sua teoria corpuscular e, devido ao peso das suas opiniões, levou a que esta fosse a mais aceite durante cem anos. (RIBEIRO *et al.*, 2016, p. 7).

De acordo com Salvetti (2008, p. 47), “Newton considerou a luz como formada por corpúsculos, entidades microscópicas com características semelhantes a pequenas ‘bolinhas’ com posições e velocidades bem definidas em cada instante de tempo” e cada grupo desses corpúsculos correspondia a uma cor. Newton verificou a decomposição da luz branca em diferentes cores fazendo uma experiência de refração da luz do Sol em um prisma triangular de vidro.

Assim, as duas teorias dividiram espaço no meio científico, ambas tinham adeptos e defensores, porém, como já mencionamos, a teoria corpuscular defendida por Newton acabou prevalecendo devido ao seu grande prestígio científico, e assim aceitava-se que a natureza da luz era de carácter corpuscular. Evidentemente, nenhuma das duas teorias era completamente satisfatória, pois haviam questões a serem respondidas.

Se, por um lado, Newton não podia explicar as franjas de difração observadas por Grimaldi, por outro o modelo ondulatório de Huygens não era completo o suficiente para demonstrar, de forma cabal, a propagação retilínea da luz. Nem ao menos eram conhecidos os valores aproximados dos comprimentos de onda associados ao espectro luminoso. (BARTHEM, 2005, p. 23).

2.1.4 Discussões sobre a luz nos séculos XIX e XX

Somente no início do séc. XIX a teoria ondulatória conseguiu ganhar espaço no cenário científico. O mérito para esse feito é dado ao médico e físico britânico Thomas Young (1773-1829), que em 1801 retomou a discussão sobre as faixas claras e escuras observadas na sombra, denominadas difração, por Grimaldi que não podiam ser explicadas pela teoria de corpúsculos da luz. De acordo com Barthem (2005), Young conseguiu apresentar provas mais eficazes para a difração.

Young, estabeleceu, então, um paralelismo entre a interferência entre ondas sonoras e a luz. Poderiam duas ondas luminosas adicionar-se para produzir a escuridão? Se fossem compostas de partículas a resposta seria não. Por outro lado, se tivessem uma natureza ondulatória a resposta seria sim. (BARTHEM, 2005, p. 31).

Com essa observação, Young colocava em dúvida o modelo corpuscular defendido por Newton e seus seguidores, um questionamento simples que não podia ser explicado, afinal a soma de raios luminosos não poderia gerar algo escuro, pensando-se em junção de partículas. Para Thomas Young, “a luz é propagada em linha reta, porque todos os movimentos não perturbados são retilíneos, ou porque, em um meio homogêneo e altamente elástico, todas as ondulações são transmitidas retilineamente” (YOUNG, 1802, p. 116 apud SILVA, 2010, p. 78). Esse meio homogêneo e altamente elástico a que se refere Young é o éter, fluido que preenche todo espaço vazio, e que não causa resistência à propagação da luz.

Young consagrou-se na defesa da teoria ondulatória por meio de um experimento que ficou muito famoso, o experimento da fenda dupla.

Para realizar sua experiência, Young observou, através de um anteparo no qual havia feito dois furos pequenos e próximos, a luz proveniente de uma fonte pequena e suficientemente distante, para que pudesse ser considerada como praticamente pontual. A figura que observou [...] era composta por uma série de franjas, com regiões claras e escuras, - um efeito parecido como batimento nas ondas sonoras. (BARTHEM, 2005, p. 32).

Silva (2007) também descreve o experimento realizado por Young e ainda destaca que tal experimento tornou possível os primeiros cálculos do comprimento de onda da luz.

A luz emergente dispersa-se por difração e incide em dois novos orifícios, ocorrendo nova difração. A superposição entre as ondas provenientes desses orifícios gera um padrão de interferência em um anteparo. A análise dos máximos e mínimos, além de estabelecer uma base material convincente para sustentar a teoria ondulatória, permitiu-lhe medir o comprimento de onda da luz solar, estimada em 570 nm (em unidades atuais), bem próximo do valor atual de 555 nm. (SILVA, 2007, p.155).

O modelo ondulatório foi formalizado a partir do aperfeiçoamento no modelo de Huygens e Young, de ondículas, proposto pelo engenheiro civil francês Augustin Jean Fresnel (1788-1827), que foi o primeiro a desenvolver um modelo matemático para a teoria ondulatória da luz, que até então era de caráter qualitativo.

Segundo Rocha *et al.* (2011), Fresnel conseguiu, através de seu modelo matemático, chegar a uma explicação convincente para a propagação retilínea da luz.

Ele esclareceu, por exemplo, que a difração da luz se torna cada vez menos pronunciada à medida que as dimensões da abertura (diâmetro de um orifício circular, largura de uma fenda retangular, etc.) se tornam progressivamente maiores que o seu comprimento de onda. Para aberturas suficientemente grandes, os efeitos de difração são desprezíveis. (ROCHA *et al.*, 2011, p. 291-292).

O que significa que a propagação retilínea da luz, mesmo sendo onda, é possível por que seu comprimento de onda tem medidas muito pequenas. De acordo com Rocha *et al.* (2011), Fresnel também propôs mudanças na concepção que se tinha sobre o éter, o meio elástico em que se propagava a luz. Para que a propagação transversal da onda luminosa fosse possível, o meio de propagação (o éter) deveria ter comportamento de sólido elástico e não de fluido, como previa Huygens.

Em 1818, Augustin Fresnel participou de uma competição proposta pela Academia de Ciências de Paris, que era muito influenciada pelo modelo corpuscular de Newton, com o intuito de desafiar os defensores da teoria ondulatória da luz diante das recentes polêmicas geradas por Young e seus seguidores. Nesta competição, os competidores deveriam apresentar e defender suas teorias sobre a difração da luz. O matemático francês Simèon Denis Poisson (1781-1840) foi um dos juízes da competição. De acordo com Barthem (2005), após ver a teoria proposta por Fresnel, que foi submetida baseada apenas em observações, Poisson determinou-se a mostrar que Fresnel estava errado e propôs um argumento através da teoria do absurdo: “Tomando o inverso de um orifício, ele mostrou que, pela teoria de Fresnel deveria aparecer um ponto brilhante no centro da sombra de um objeto circular, o que, logicamente, seria impossível” (BARTHEM, 2005, p. 32). O astrônomo e físico François Arago (1786-1853), que também era juiz da competição e tinha conhecimento das teorias de Fresnel, sugeriu montar a experiência proposta por Poisson; Barthem (2005, p.32) descreve que “o ponto luminoso foi observado e passou a ser conhecido como a *mancha de Poisson*”. Diante da confirmação através do experimento, Fresnel foi inevitavelmente o vencedor da competição e a teoria ondulatória da luz ganhou ainda mais atenção.

O modelo ondulatório da luz só foi reconhecido em 1850, quando o físico e astrônomo francês Jean Bertrand Léon Foucault (1819-1868) conseguiu medir com

precisão a velocidade da luz. Entre os dois modelos defendidos (ondulatório e corpuscular), enfatizava-se como característica determinante a velocidade da luz em diferentes meios. Newton, principal defensor do modelo corpuscular, afirmava que a velocidade da luz seria maior na água do que no ar, enquanto Huygens, defensor do modelo ondulatório, afirmava que a luz se deslocaria com maior velocidade no ar do que na água.

Rosa (2012) menciona que Arago havia sugerido, em 1838, que o cálculo da velocidade da luz na água e no ar seria o fator decisivo entre as duas teorias.

Foucault utilizaria a mesma técnica de roda dentada com espelho, utilizada por Fizeau, para detectar as velocidades da luz no ar e na água. Ao comprovar uma velocidade superior no ar que na água, a experiência de Foucault é considerada como marco comprobatório, aparentemente definitivo, da Teoria ondulatória da luz. (ROSA, 2012, p. 135).

E na segunda metade do séc. XIX a teoria ondulatória da luz passou a ser aceita e reconhecida pela comunidade científica. Este século trouxe ainda a fusão da óptica ondulatória com o eletromagnetismo, que propunha uma grande mudança na concepção ondulatória da luz, pois as teorias apresentadas até então consideravam as ondas mecânicas como base de estudo. Em 1845, os estudos propostos pelo físico e químico britânico Michael Faraday (1791-1867) apresentam os primeiros indícios dessa relação. Conforme descreve Barthem (2005), Faraday associou a luz com a radiação eletromagnética após observar que o campo magnético rotacionava o plano de polarização das ondas luminosas quando estas passavam por uma região magnetizada.

Posteriormente, o físico e matemático escocês James Clerk Maxwell (1831-1879) conseguiu efetivar e comprovar a natureza eletromagnética da luz, apoiado em formulações matemáticas, dando sequência e utilizando como base as pesquisas realizadas por Faraday. De acordo com Rocha *et al.* (2011), “Maxwell demonstrou que a velocidade de suas ondas eletromagnéticas - ondas essas desconhecidas até então - coincidiam com a velocidade da luz, a qual já era conhecida na época, o que lhe indicou que a luz era de natureza eletromagnética” (ROCHA *et al.*, 2011, p. 345-346).

Como diversos cientistas já haviam medido a velocidade da luz, “Maxwell pôde afirmar que a luz era um distúrbio eletromagnético, e também que deveria haver radiações eletromagnéticas para além da região do visível” (ROCHA *et al.*, 2011, p. 345). Assim, com as equações formuladas por ele, foi possível deduzir a velocidade da luz partindo-se de constantes já concebidas no eletromagnetismo.

Em 1886 as pesquisas do físico alemão Heinrich Rudolf Hertz (1857-1894) definem um importante momento para a atual concepção sobre a natureza da luz. O mais

impressionante fato presente nos estudos de Hertz é que em uma única experiência ele consolida a natureza eletromagnética das ondas da luz e aponta novamente para a natureza corpuscular da luz.

Rosa (2012) descreve o experimento de Hertz,

[...]utilizando um detector e um oscilador que construía, [Hertz] foi capaz de produzir ondas eletromagnéticas de comprimento suficientemente curtas para estudá-las em laboratório. Sua conclusão seria a de que as propriedades das ondas eram similares às da luz, o que o levou a concluir que as ondas de luz eram radiações eletromagnéticas, segundo as equações de Maxwell. Estava dado o primeiro passo para o conhecimento do efeito fotoelétrico. (ROSA, 2012. p. 137).

Para Barthem (2005), “Hertz deparou-se com aquilo que viria a ser o segundo tempo da teoria corpuscular. Ele notou que, quando a luz ultravioleta iluminava o terminal negativo, as faíscas surgiam mais facilmente” (BARTHEM, 2005, p. 38).

Hertz confirmou a natureza eletromagnética da luz e verificou um novo comportamento da luz, em que ao incidir raios de luz ultravioleta sobre uma chapa metálica percebeu que essa emitia faíscas, retomando a possibilidade de natureza corpuscular da luz.

Mais tarde esse fenômeno foi denominado efeito fotoelétrico, que acontece quando uma placa de metal é atingida por radiações eletromagnéticas e tem elétrons retirados da superfície. Rocha *et al.* (2011) descrevem ainda como o efeito fotoelétrico não era explicável no modelo ondulatório da luz, abalando toda a estrutura da física clássica.

Este fenômeno tinha uma estranha particularidade: a energia máxima dos elétrons emitidos não era determinada pela intensidade da luz, como era de se esperar pela teoria ondulatória de Maxwell, e sim, pela frequência da onda incidente. Por volta de 1900, esse efeito (junto como o chamado problema do corpo negro) tinha posto em xeque novamente os fundamentos da teoria ondulatória da luz, pois essa teoria não era capaz de explicar tais efeitos, levando a Física, chamada clássica, a uma profunda crise. (ROCHA *et al.*, 2011, p. 313-314).

A partir dessa observação deu-se início às novas concepções e modelos para a luz, que não podia ser explicada dentro dos conceitos clássicos da Física, sendo necessário novo olhar e novas perspectivas, originando outro modelo para a Física, denominado Física Quântica.

Foram nos campos do eletromagnetismo e da termodinâmica que surgiram novas possibilidades para a natureza da luz. Um dos primeiros indícios da retomada do modelo corpuscular, mas sob concepções completamente diferentes das já mencionadas, foi o surgimento de questões sobre a radiação emitida por um corpo negro, dentro da termodinâmica.

Um corpo negro (ideal) absorve completamente a radiação que incide sobre ele, não refletindo nenhuma onda eletromagnética (luz), porém toda a radiação absorvida é convertida em energia térmica, fazendo com que o corpo aumente sua temperatura e essa elevação de temperatura faz com que o corpo passe a emitir ondas eletromagnéticas. Barthem (2005) explica esse fato, tomando como exemplo o carvão:

Carvão em pó, por exemplo, que reflete menos de 2% da radiação incidente, se aproxima bastante daquilo que se idealiza como um corpo negro. Mas, ao absorver toda a radiação incidente, um corpo negro se aquece. Isto significa que toda a energia interna do corpo é distribuída termicamente, o que envolve uma distribuição de energias definida pelas leis da termodinâmica, dependendo apenas da temperatura absoluta.

Esta distribuição térmica de energias pode ser investigada através do espectro de emissão do corpo negro. Note que um corpo negro pode emitir luz, só não pode refleti-la em sua superfície. Voltando ao carvão, que é um bom exemplo de corpo negro, quando aquecido fica em brasa. A distribuição espectral - ou distribuição segundo as *cores* - do Sol também pode ser compreendida como a de um corpo negro a cerca de 6000K. (BARTHEM, 2005, p. 42).

Assim, considerando a luz emitida como onda e utilizando as teorias de Maxwell, compreendendo que as diferentes radiações visíveis ou invisíveis eram definidas de acordo com as medidas dos comprimentos de onda e frequências que as caracterizavam, inclusive definindo a cor emitida (radiações visíveis), e que quanto menor é o comprimento de onda maior é a frequência e, conseqüentemente, a energia da radiação, em 1859 Gustav Kirchhoff (1824-1887) afirmou que a radiação de um corpo negro depende apenas da sua temperatura e não do material que é composto.

O modelo utilizado para representar um corpo negro consistia em um bloco com cavidade espelhada no seu interior e termicamente isolada do meio externo. Salvetti (2008) descreve a incompatibilidade com a teoria ondulatória proposta no eletromagnetismo a partir das observações da radiação emitida por um corpo negro, que se tornou uma grande limitação para o comportamento ondulatório da luz.

Os resultados obtidos e os cálculos teóricos se ajustavam bem para frequências baixas (altos comprimentos de onda), mas divergiam, de forma significativa, para frequências altas (baixos comprimentos de onda) e por isso essa discrepância ficou conhecida como catástrofe do ultravioleta. (SALVETTI, 2008, p. 157-158).

A catástrofe do ultravioleta deve-se ao fato de que ao elevar a temperatura do corpo negro, esse emitiria radiação com maior frequência e energia, e teria seu comprimento de onda diminuído, o que no espectro eletromagnético passaria do vermelho para o violeta, de forma que a teoria falhava para comprimentos de onda muito curtos, levando à hipótese absurda de que qualquer corpo superaquecido emitiria radiação com frequência elevada e conseqüentemente, emitiria energia tendendo ao infinito conforme fosse aquecido.

O físico e matemático alemão Max Karl Ernest Ludwig Planck (1858-1947), em 1900, após dedicar-se em equacionar os resultados obtidos experimentalmente para a radiação do corpo negro, chegou a uma conclusão que lhe causou surpresa; essa solução teórica evitava o resultado absurdo anteriormente apresentado: “Ele observou que o resultado experimental poderia ser ajustado, a partir das equações clássicas, desde que uma ‘pequena’ alteração fosse realizada” (SALVETTI, 2008, p. 158).

Planck concluiu que a energia não poderia ser contínua, como se acreditava; então elaborou a hipótese que seria o início da teoria quântica, enunciada alguns anos depois.

A fim de evitar esse resultado obviamente absurdo, o cientista alemão Max Planck sugeriu, em 1900, que a luz, os raios X e outras ondas não podiam ser emitidos a uma taxa arbitrária, mas apenas em certos pacotes, que ele chamou de quanta. Além do mais, cada quantum tinha um montante de energia que aumentava quanto maior fosse a frequência das ondas, de modo que, a uma frequência elevada o bastante, a emissão de um único quantum emitiria mais energia do que havia disponível. Desse modo, a radiação em altas frequências seria reduzida e a taxa em que o corpo perde energia seria finita. (HAWKING, 2015, p. 76).

Mas as conclusões de Planck só tiveram efeitos sobre a concepção da natureza da luz com a retomada do efeito fotoelétrico identificado por Hertz, já mencionado; o mesmo experimento que comprovou que a luz era uma onda eletromagnética, vem agora provar que a luz também é partícula. O físico Philipp Eduard Anton Von Lenard (1862-1947) retomou os trabalhos de Hertz, do qual foi assistente, na intenção de medir a energia dos elétrons retirados de uma placa metálica ao incidir luz sobre a mesma. De acordo com Barthem (2005), Lenard observou que a energia máxima com que um elétron podia ser ejetado era constante. Ele observou ainda que se se dobrasse a intensidade da luz, o número de elétrons emitidos também dobrava, porém a energia dos elétrons emitidos não mudava. Notou ainda que, mesmo em uma intensidade muito pequena, a energia máxima que um elétron pode emitir é a mesma. “Ele observou que a energia máxima dos elétrons ejetados dependia da cor - quanto menor o comprimento de onda, maior a frequência da luz, e maior a energia com que os elétrons eram arrancados” (BARTHEM, 2005, p.49).

E foi em 1905, tido como o “ano miraculoso”, que surgiu um dos mais brilhantes físicos do século XX, o alemão de origem judia Albert Einstein (1879-1955), que acreditava na teoria de Planck, a qual já havia sido deixada de lado. De acordo com Rocha *et al.* (2011), Einstein foi ainda mais ousado que Planck e abordou o caráter da luz propondo que seria partículas luminosas, mais tarde denominadas *fótons*. Rocha *et al.* (2011) descrevem as observações feitas por Einstein referentes ao efeito fotoelétrico.

[...] Einstein utilizou-se das ideias de Planck para interpretar aqueles aspectos, que se revelavam classicamente inexplicáveis dentro do citado efeito: (a) a maneira como os elétrons eram ejetados das superfícies metálicas, quando sobre elas incidia um raio de luz, (b) a importante dependência da frequência, ou seja, abaixo de certas frequências críticas não havia ejeção de elétrons, qualquer que fosse a intensidade da radiação. (ROCHA *et al.*, 2011, p. 400-401).

Assim, Einstein retoma o modelo corpuscular, com um aspecto totalmente diferente do que já havia sido proposto, atingindo conjecturas não imaginadas até então, dando origem à Física Quântica. Rocha *et al.* (2011, p. 401) descrevem que “Einstein explicou o efeito fotoelétrico, partindo da hipótese de Planck, e afirmando que, ao invés de imaginar a luz como uma onda de energia discreta, era mais conveniente imaginá-la como formada por partículas”.

O modelo proposto por Einstein apresenta a quantização da luz, em que a luz é composta por fótons (quanta de energia). Cada fóton é um conjunto de determinada quantidade de energia definida, comumente chamado de “pacote”, que tem a velocidade da luz; o fóton é formado por quantum de luz e a sua energia é proporcional à sua frequência. Segundo Salvetti (2008), a luz pode ser compreendida como um conjunto de fótons comportando-se como onda eletromagnética, ou seja, um “pacote de energia” que apresenta características e comportamento ondulatório, com comprimento de onda e frequência quando analisados de forma coletiva; mas, observado individualmente, o fóton apresenta características de partículas, tendo energia, velocidade e podendo colidir-se com elétrons. De acordo com Rocha *et al.* (2011), a comprovação realizada por Einstein evidenciava este caráter dual da luz, e por esse motivo tornou-se dramática.

Esta observação o levou, em 1924, a afirmar que havia duas teorias para a luz, ambas indispensáveis, porém sem qualquer conexão lógica. O que aquele célebre físico imaginava é que não se poderia abandonar o caráter “ondulatório” da luz (e de todas as radiações eletromagnéticas) consagrado no século anterior. Por isso mesmo, estabeleceu-se um dos mais sérios dilemas entre os cientistas àquela época - que era a compreensão do caráter dual (onda-partícula) da luz. Apesar de tal dificuldade, nada poderia evitar que a luz se comportasse de tal maneira. (ROCHA *et al.*, 2011, p. 403).

A partir do modelo apresentado por Einstein, no séc. XX, a natureza da luz passou a ser compreendida como de caráter ondulatório e corpuscular, ou seja, obteve o caráter dual onda-partícula. Como vimos no decorrer deste capítulo, desde a antiguidade buscava-se a compreensão e explicação da natureza e fenômenos da luz. Foram milênios de histórias, contradições, contribuições e refutações, que transitavam entre um modelo corpuscular e um modelo ondulatório, para obter-se a atual conjectura, que contempla as duas teorias. Vale ressaltar que não são nem de longe as mesmas características e propriedades definidas anteriormente por filósofos e cientistas, porém

toda concepção deixada no passado teve fundamental importância para as conclusões presentes, e merecem seu reconhecimento histórico. Rocha *et al.* (2011) descrevem a compreensão sobre a natureza da luz em 1920:

Por volta de 1920, a situação poderia ser resumida da seguinte maneira: Por um lado, a luz se comporta como onda, quando se trata, por exemplo, da experiência da dupla fenda de Young, produzindo um fenômeno de interferência. Por outro lado, a luz se comporta como corpúsculo, quando se trata, por exemplo, do efeito fotoelétrico, explicado por Einstein. Sendo assim, seria natural se pensar que a natureza pudesse ser melhor compreendida considerando a luz como tendo não uma natureza, corpuscular ou ondulatória, mas sim como tendo uma natureza dual, isto é, uma onda-partícula (uma partícula quântica), em determinados experimentos a luz se comporta como partícula (efeito fotoelétrico) e em outros, a luz se comporta como onda (experiência da fenda dupla de Young). (ROCHA *et al.*, 2011, p. 314).

Essa concepção sobre a natureza da luz foi melhor compreendida com o avanço da teoria quântica, à qual a quantização de energia com o modelo dos quanta de luz (fóton) foi o primeiro passo, dando origem inclusive ao nome “quântica”. Conforme Rocha *et al.* (2011), “Com a mecânica dos quanta ficou estabelecido que a forma de energia chamada luz - aquela pequena região visível do espectro eletromagnético - é uma onda-partícula e estas duas qualidades são aspectos complementares de uma única realidade” (ROCHA *et al.*, 2011, p. 316).

2.2 Luz: Uma introdução a dualidade onda - partícula

Nessa seção vamos conceituar a luz dentro do estudo da Física, apresentando a concepção atual reconhecida no meio científico. Cabe ressaltar ao leitor, que esse trabalho aborda mais especificamente a luz visível a olho nu, e que em muitos momentos será utilizado apenas o termo luz, ao referir-se a luz visível.

- O QUE É A LUZ, AFINAL?

De acordo com Ben-Dov (1996, p.86), “[...] a luz é uma entidade física, uma forma de energia que é emitida por certos corpos e que se propaga livremente no espaço até se chocar com o objeto observado, que a envia então para o olho”.

Entre diversas definições, encontramos também:

[...] Luz, com a qual enxergamos, é apenas uma pequena parte do vasto espectro de um mesmo tipo de coisa, as várias partes deste espectro sendo distinguidas pelos diferentes valores de uma mesma grandeza a qual varia. Esta grandeza variável poderia ser chamada de “comprimento de onda”. Conforme esta varia na faixa do espectro do visível, a luz aparentemente muda de cor do vermelho para o violeta [...] (FEYNMAN; LEIGHTON; SANDS, 2008, p. 26-1).

A luz é uma **forma de radiação eletromagnética que transporta energia**, e, de acordo com sua frequência, é visível ao olho humano; a intensidade de energia está diretamente relacionada à frequência: quanto maior a frequência, maior a energia.

A radiação eletromagnética é uma oscilação nos campos elétrico e magnético simultaneamente, ou seja, apresenta comportamento ondulatório. A energia transportada por ondas de luz (radiação eletromagnética visível) ocorre de forma concentrada em pacotes, denominados fótons; essa quantização da luz só é possível se um raio de luz for caracterizado como um feixe de partículas materiais. Essa é a dualidade onda - partícula da luz, na qual duas propriedades distintas tornam-se complementares para o estudo a respeito da natureza da luz.

Os aspectos ondulatórios e corpusculares da luz aparentemente contraditórios foram conciliados em 1930, com o desenvolvimento da eletrodinâmica quântica, uma teoria abrangente que explica *simultaneamente* essas duas propriedades. A *propagação* da luz pode ser mais bem descrita usando-se um modelo ondulatório; porém, para explicar a emissão e a absorção da luz, é necessário considerar sua natureza corpuscular. (YOUNG; FREEDMAN, 2016, p. 2).

Mais à frente veremos as principais características e elementos da luz, estudando de forma separada seu comportamento ondulatório e corpuscular.

Como a luz é energia em movimento, possui velocidade determinada, e essa velocidade é variável de acordo com o meio em que se propaga: quanto mais denso o meio de propagação, menor será sua velocidade. Não há conhecimento de nada que se desloque com velocidade superior à velocidade da luz no vácuo.

O desafio de medir a velocidade da luz passou a ser fundamental para determinar o caráter da mesma. Diversos filósofos e físicos dedicaram-se em diferentes experimentos para atingir esse objetivo; destacamos alguns notáveis que obtiveram resultados próximos dos valores atuais: o astrônomo dinamarquês Ole Römer, em 1675, obteve a velocidade de $2,15 \cdot 10^5$ km/s, o astrônomo inglês James Bradley, em 1727, determinou o valor da velocidade da luz em 299.714 km/s, o físico francês Armand Hippolyte Luis Fizeau, em 1849, encontrou o valor de $3,15 \cdot 10^5$ km/s, o físico francês Jean Bernard Léon Foucault, em 1862, obteve o valor de $2,98 \cdot 10^5$ km/s. Destacamos ainda Albert Abraham Michelson e Edward Williams Morley que, realizaram um experimento para detectar e comprovar a existência do éter (meio que se acredita preencher todo o espaço, bem como admitia-se ser uma substância na qual se propagavam as ondas eletromagnéticas) e calcular a velocidade da luz em tal meio, tiveram suas experiências frustradas, pois o experimento de Michelson-Morley provou que não existia o éter. Porém, tratava-se de um grande avanço para a física: a constatação da existência do vácuo.

Entre 1887 e 1905, muitos tentaram explicar o resultado do experimento Michelson-Morley em termos de objetos se contraindo e relógios andando mais devagar ao se moverem pelo éter, em especial o físico holandês Hendrik Lorentz. Entretanto, em um famoso artigo científico de 1905, um até então desconhecido funcionário do escritório de patentes suíço, Albert Einstein, afirmou que toda a ideia de éter era desnecessária, contanto que abandonássemos a ideia de tempo absoluto. (HAWKING, 2015, p.33).

A velocidade da luz no vácuo atualmente é uma constante universal e, de acordo com Barthem (2005), com o avanço de tecnologias como lasers e diodos metal-isolante-metal passou a ser comprovada. Afirma ainda que “[...]em 1983, a velocidade da luz passou a ser considerada como um padrão primário de velocidade e o metro, uma grandeza a ser medida” (BARTHEM, 2005, p. 29).

Portanto essa constante universal assume o valor:

$$c = 299.792.458 \text{ m/s}$$

A letra c escolhida para representar a velocidade da luz no vácuo tem origem na palavra *celerita* que, do latim, significa celeridade, o mesmo que rapidez.

2.2.1 Comportamento ondulatório da luz

Onda é uma perturbação causada no meio, que realiza o transporte de energia sem transportar matéria.

As ondas são classificadas em **mecânicas**, quando necessitam de um meio material para se propagar, e **eletromagnéticas**, quando não necessitam de um meio material para a sua propagação, ou seja, se propagam também no vácuo. A **luz é uma onda eletromagnética** que tem como fonte fundamental cargas elétricas aceleradas.

James Clerk Maxwell constatou que a luz é uma onda eletromagnética quando verificou que a velocidade de qualquer onda eletromagnética no vácuo é aproximadamente igual à velocidade da luz no vácuo.

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}} = \frac{1}{\sqrt{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 8,85 \cdot 10^{-12}}} = 2,999 \cdot 10^8 \text{ m/s} \quad (1)$$

Em que, μ_0 é a permeabilidade magnética do vácuo, que vale $4\pi \cdot 10^{-7}$ T.m/A e ε_0 é a permissividade elétrica no vácuo que vale $8,854 \cdot 10^{-12}$ C².N/m².

- **Elementos de uma onda**

As ondas possuem algumas grandezas que são necessárias para caracterizá-las, que serão apresentadas na sequência.

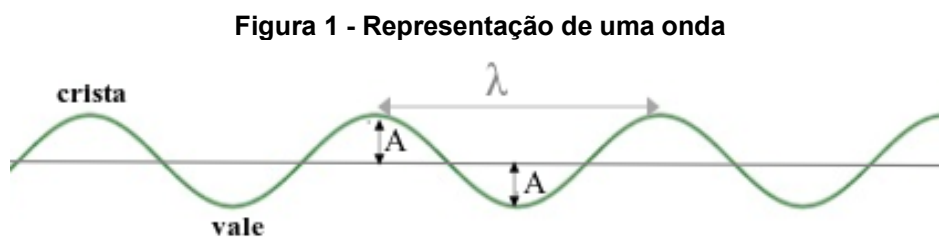
Comprimento de onda (λ): Trata-se do tamanho da onda, que pode ser medido de um vale a outro vale, de uma crista a outra crista ou do início ao final de um período (uma oscilação completa) (Figura 1). No SI esse comprimento é medido em metros (m).

Frequência (f): Número de oscilações de uma onda, num intervalo de tempo. No SI esse intervalo vale 1s.

Período (T): Tempo gasto por uma onda para realizar uma oscilação completa (um comprimento de onda). Medido em segundos (s) no SI.

Velocidade (v): A velocidade com que a onda se propaga no meio; a velocidade de uma onda depende do meio no qual ela se propaga, e sua unidade de medida no SI é o m/s.

Amplitude (A): Altura da onda, que corresponde à distância do eixo central à crista, ou do eixo central ao vale, cuja unidade de medida no SI é o metro(m); determina a intensidade da onda: quanto maior a amplitude, maior a energia transportada (Figura 1).



Fonte: Autoria própria (2021).

Algumas equações que relacionam os elementos de uma onda:

$$T = \frac{1}{f} \quad (2)$$

$$v = \frac{\lambda}{T} \quad (3)$$

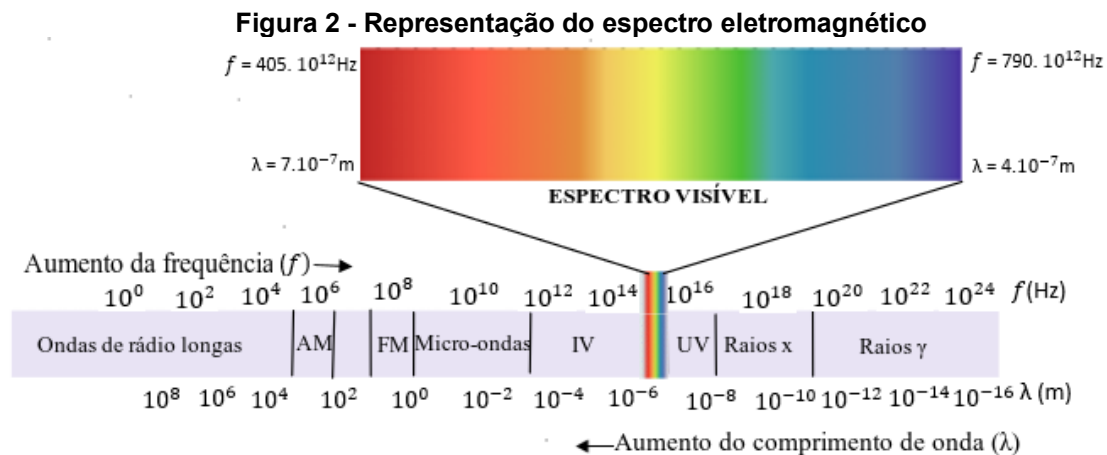
$$v = \lambda \cdot f \quad (4)$$

A velocidade de qualquer onda eletromagnética no vácuo é c .

Então tem-se:

$$c = \lambda \cdot f \quad (5)$$

Na sequência, apresentamos a representação do **espectro eletromagnético** (Figura 2). Nesse esquema é possível visualizar e comparar os comprimentos de onda e frequências das distintas radiações eletromagnéticas, que são divididas em sete faixas: ondas de rádio, micro-ondas, infravermelho, luz visível, ultravioleta, raios x e raios gama.



Fonte: Autoria própria (2021).

Como podemos observar, a luz visível ocupa uma pequena fração desse espectro e corresponde à única faixa visível de radiações eletromagnéticas, perceptíveis a olho nu. Sua variação de cores corresponde a diferentes comprimentos de onda com capacidade de sensibilizar a visão humana. As cores variam do vermelho, que possui a menor frequência, ao violeta, que apresenta maior frequência.

Quadro 1 - Distribuição de frequência e comprimento de onda das cores

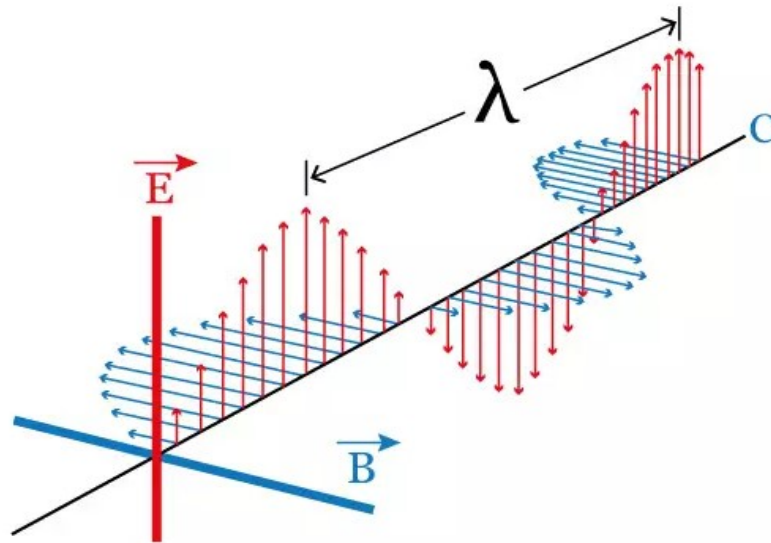
Cor	Frequência (10 ¹⁴ Hz)	Comprimento de onda (10 ⁻⁷ m)
Vermelho	4,05 – 4,80	7,40 – 6,25
Alaranjado	4,80 – 5,10	6,25 – 5,90
Amarelo	5,10 – 5,30	5,90 – 5,65
Verde	5,30 – 6,00	5,65 – 5,00
Ciano	6,00 – 6,20	5,00 – 4,85
Azul	6,20 – 6,80	4,85 – 4,40
Violeta	6,80 – 7,90	4,40 – 3,80

Fonte: Autoria própria (2021).

Quanto a sua energia, pode ser calculada em função de sua frequência; como já sabemos, a radiação violeta, de maior frequência, é a de maior energia.

A radiação eletromagnética propaga-se nos campos elétrico e magnético perpendicularmente a eles e utiliza-se funções trigonométricas (seno e cosseno) para demonstrar as oscilações de onda (Figura 3).

Figura 3 - Representação dos campos elétrico e magnético



Fonte: EDUCA MAIS BRASIL (2021) ¹.

Para ondas eletromagnéticas, as funções senoidais que descrevem a oscilação dos campos Elétrico e Magnético podem ser escritas como:

$$E = E_m \text{sen}(kx - \omega t) \quad (6)$$

$$B = B_m \text{sen}(kx - \omega t) \quad (7)$$

Em que:

E_m = amplitude do campo elétrico, cuja unidade de medida no SI é o Tesla (T)

B_m = amplitude do campo magnético, a unidade de medida no SI é o Tesla (T)

k = número de onda

ω = frequência angular, sua unidade de medida no SI é rad/s

O número de onda e a frequência angular podem ser escritos como:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (8)$$

$$\omega = 2\pi f \quad (9)$$

Há algumas características presentes nas ondas eletromagnéticas, que são importantes ressaltar, como:

1. Os campos elétrico e magnético \vec{E} e \vec{B} são perpendiculares à direção de propagação da onda. [...] Isto significa que a onda é uma *onda transversal*.

¹ **Fonte:** Ondas Eletromagnéticas: **Educa mais Brasil**. Disponível em: <https://www.educamaisbrasil.com.br/enem/fisica/ondas-eletromagneticas>. Acesso: 03 nov 2021.

2. O campo elétrico é perpendicular ao campo magnético.
3. O produto vetorial $\vec{E} \times \vec{B}$ aponta no sentido de propagação da onda.
4. Os campos variam senoidalmente, como as ondas transversais [...]. Além disso, variam com a mesma frequência e estão em fase (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2012, p. 3).

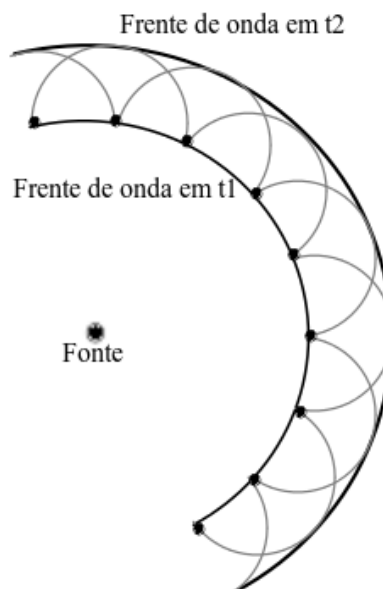
A fase de onda está relacionada a uma função senoidal e, quando duas ondas sobrepostas possuem mesma amplitude (A), mesma frequência (f) e iniciam seus ciclos em pontos simétricos, dizemos que estão em fase, resultando em uma onda com a frequência (f) e amplitude ($2A$).

• Princípio de Huygens e a difração da luz

O princípio enunciado por Christian Huygens em 1678 serve de base para a teoria ondulatória da luz. A partir deste enunciado tornou-se possível compreender o fenômeno da difração da luz.

“Todos os pontos de uma frente de onda se comportam como fontes pontuais de ondas secundárias. Depois de um intervalo de tempo t , a nova posição da frente de onda é dada por uma superfície tangente a estas ondas secundárias” (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2012, p. 72). Essas ondas secundárias (Figura 4) se propagam em todas as direções e possuem mesma velocidade e frequência das ondas primárias.

Figura 4 - Representação das ondas secundárias a partir dos pontos de uma frente de onda



Fonte: Autoria própria (2021).

A **difração** é um fenômeno atribuído às ondas, em que a onda contorna um determinado obstáculo ou atravessa a abertura de um obstáculo e se espalha no lado oposto a ele. Assim, um pequeno ponto da onda primária atinge e atravessa o obstáculo, originando a sua onda secundária, usualmente denominada onda de Huygens.

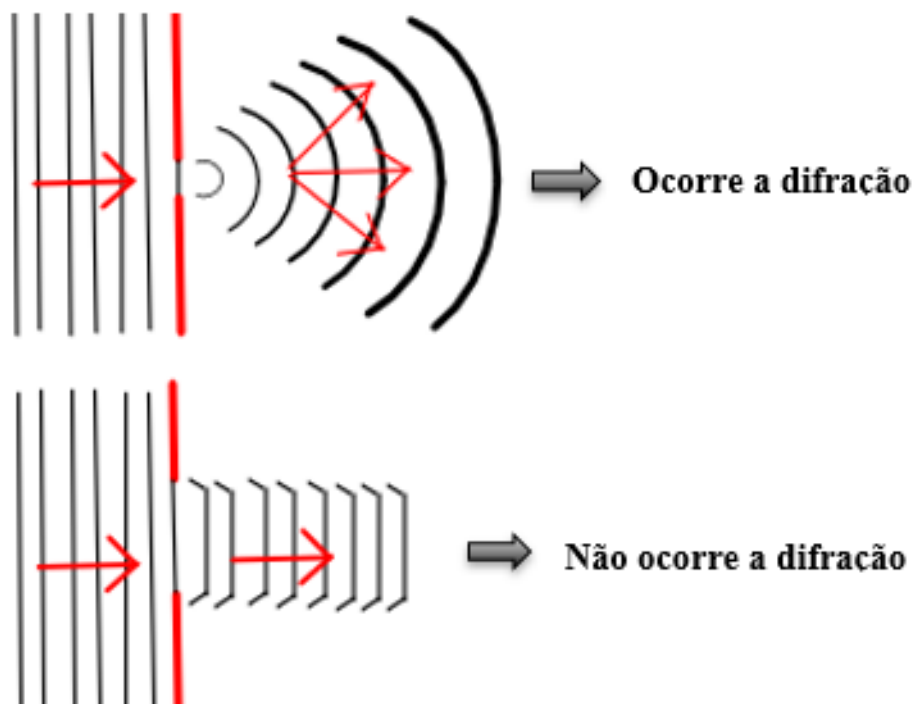
É importante destacar que: a difração será mais perceptível se o tamanho da abertura no obstáculo e o comprimento da onda forem de dimensões próximas, e ainda mais acentuada para comprimentos de onda maiores que a abertura.

A difração da luz é um fenômeno pouco observado no dia a dia, pois a faixa de comprimento da radiação visível está na ordem de 10^{-7}m . Na figura 5, observa-se uma representação esquemática de situações em que ocorre e não ocorre a difração, relacionadas com a abertura da fenda.

Quando ocorre a difração: dá-se origem à onda de Huygens a partir do ponto que atravessou o obstáculo, com direção de propagação diferente da primeira onda.

Quando não ocorre a difração: a abertura no obstáculo é maior do que o comprimento de onda; assim, atravessa-se a abertura, mantendo sua direção de propagação.

Figura 5 - Representação de ocorrência e não ocorrência de difração



Fonte: Autoria própria (2021).

- **A dupla fenda de Young**

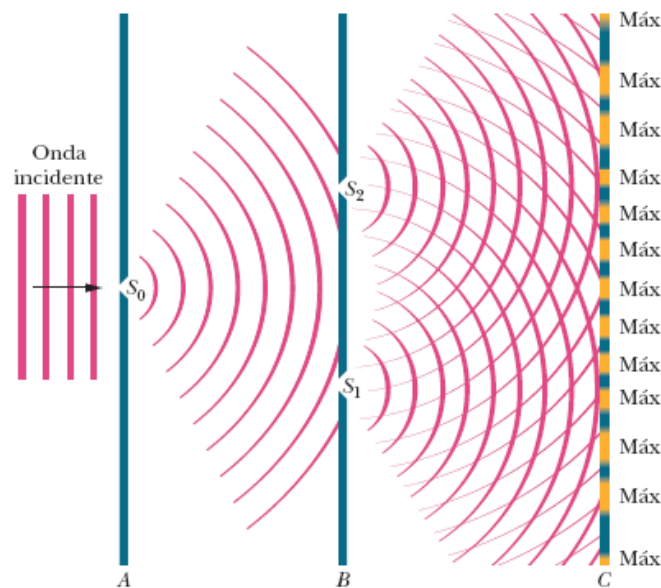
A partir do princípio de Huygens, Thomas Young realizou um experimento que provou a natureza ondulatória da luz; ele foi capaz de demonstrar que a luz sofre interferência tal qual as ondas mecânicas.

Quando duas ondas se encontram ocorre o que chamamos de **interferência**, que pode ser **destrutiva**, quando ocorre a superposição de ondas simetricamente

opostas (diferença de fase de 180° ou $\pi \text{ rad}$), ou **construtiva**, quando ocorre a superposição de duas ondas em fase.

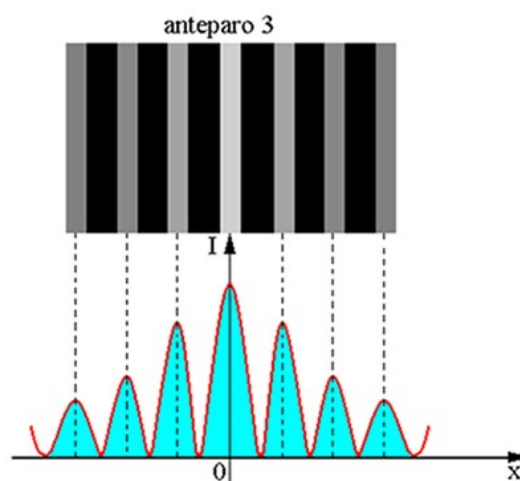
Em seu experimento, Young utilizou uma fonte de luz monocromática e três anteparos: o primeiro a receber a luz, com uma pequena fenda que a difrata, a tornando uma fonte pontual; no segundo anteparo havia dois pequenos orifícios, nos quais a luz também era refratada, projetando as franjas claras e escuras no terceiro anteparo (Figura 6).

Figura 6 - Representação do experimento de Young



Fonte: Halliday; Resnick; Walker (2012, p.78).

Figura 7 - Representação dos máximos e mínimos e a variação da intensidade da luz



Fonte: BRASIL ESCOLA (2021)².

² Fonte: Experimento das duas fendas. Brasil Escola. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/fisica/experimento-das-duas-fendas.htm>. Acesso: 03 nov 2021.

O princípio de Huygens fica evidente nesse experimento, comprovando que cada ponto de uma frente de onda dá origem a uma nova onda, e assim sucessivamente. As franjas claras são regiões em que as fases das ondas, que se interferem, são iguais e são denominadas **máximos**, ocorrendo a interferência construtiva; as franjas escuras são as regiões de interferência em que as fases são opostas, denominadas de **mínimos**, ocorrendo a interferência destrutiva (Figura 7).

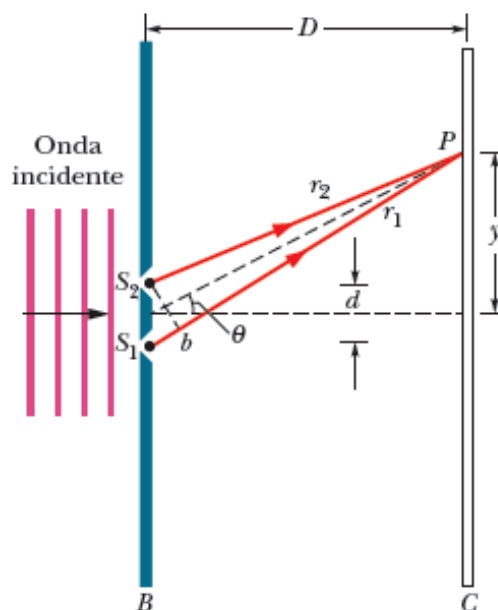
Ocorrerá interferência construtiva quando a distância percorrida pelos raios $\Delta L = r_1 - r_2$ (Figura 8) for zero ou um número inteiro de comprimento de onda (λ), porém, quando ΔL for múltiplo ímpar de $\frac{\lambda}{2}$ (metade do comprimento de onda), a interferência entre as ondas será destrutiva, e haverá situações intermediárias com iluminações de intensidade menor, quando as distâncias percorridas forem diferentes das mencionadas.

Interferência construtiva: $\Delta L = 0$ ou um número inteiro de λ .

As ondas secundárias, que se interferem, possuem fases diferentes em alguns pontos devido a distância percorrida por cada onda. “Em um experimento de interferência de dupla fenda de Young, a intensidade luminosa em cada ponto da tela de observação depende da diferença ΔL entre as distâncias percorridas pelos dois raios que chegam ao ponto” (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2012, p. 79).

Interferência destrutiva: ΔL múltiplo ímpar de $\frac{\lambda}{2}$

Figura 8 – Raios luminosos difratam em S_1 e S_2



Fonte: Halliday; Resnick; Walker (2012, p.79).

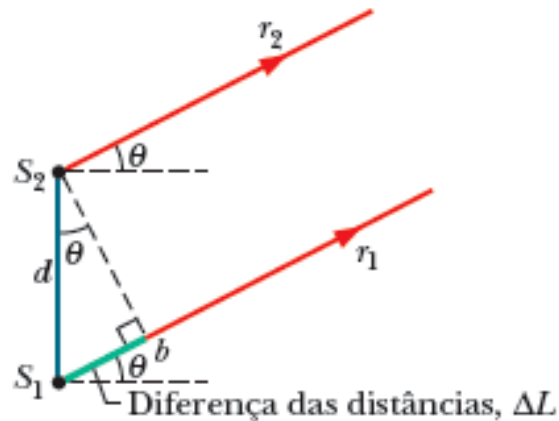
Vamos agora determinar uma expressão matemática para a posição P da interferência.

Inicialmente, determinamos ΔL , de forma que o restante de r_1 e r_2 tenham a mesma medida (Figura 9). Assim, é possível determinar o ângulo θ , formado entre as retas e b , o que resulta em um triângulo retângulo.

Por relação trigonométrica do triângulo retângulo, temos:

$$\Delta L = d \cdot \text{sen}\theta \quad (10)$$

Figura 9 - Raios paralelos



Fonte: Halliday; Resnick; Walker (2012, p. 79).

Localizando máximos e mínimos:

Como a localização das franjas claras e escuras depende da variável ΔL e sua relação com o comprimento de onda (λ), temos,

$$\text{Máximos} \leftrightarrow d \cdot \text{sen}\theta = m \cdot \lambda, \text{ com } m \in \mathbb{Z} \quad (11)$$

$$\text{Mínimos} \leftrightarrow d \cdot \text{sen}\theta = \left(m + \frac{1}{2}\right) \cdot \lambda, \text{ com } m \in \mathbb{Z} \quad (12)$$

2.2.2 Comportamento corpuscular da luz

Certamente essa foi a concepção mais aceita na antiguidade, em que a luz é composta por partículas que se deslocam com grande velocidade, em movimento retilíneo. Tal entendimento facilmente explica fenômenos da luz como a reflexão e refração, que são representadas por raios incidentes e refletidos ou refratados, com ângulos e trajetórias calculados a partir de conceitos geométricos, como se fossem minúsculas bolas maciças com comportamento e deslocamento previsíveis.

Assim, a luz como onda tem como característica principal o fato de se propagar por todo o espaço, já a luz como partículas ocupa um lugar determinado no espaço. Apesar de ser facilmente observado, o modelo corpuscular foi de fato consagrado no

advento da Física Quântica, quando em uma concepção moderna foi o único modelo satisfatório para explicar o efeito fotoelétrico.

- **A partícula de luz**

A luz é constituída por pequenos pacotes de energia, uma forma quantizada elementar, que são responsáveis pelo transporte de energia da radiação eletromagnética. Esses pacotes são denominados **fótons**, ou quanta de luz. Apesar de ser usualmente denominado como partícula, o fóton tem características bem singulares; sua velocidade é igual a velocidade da luz, sua massa de repouso é nula e tem características de onda, tais como frequência e comprimento de onda.

A quantização da energia pode ser comparada ao nosso sistema monetário: o menor valor é de R\$ 0,01, portanto só poderemos obter quantidades que sejam múltiplos inteiros deste valor; por exemplo, $15 \times \text{R\$ } 0,01 = \text{R\$ } 0,15$. Não é possível admitir valores como R\$ 0,155; para isso seria necessário multiplicar o valor R\$ 0,01 por um número não inteiro (15,5). Assim, o fóton é quantizado, como nosso sistema monetário; define-se como um pacote de energia para o qual devemos considerar como um todo, e quantidades discretas e múltiplas inteiras desse.

Albert Einstein, em 1905, postulou sobre a quantização da radiação eletromagnética, mas o primeiro a pensar na quantização de energia foi Max Planck, em 1900, procurando descrever a radiação do corpo negro.

Energia do Fóton:

$$E = hf \quad (13)$$

Em que:

E = energia do fóton (utiliza-se usualmente, J ou eV, como unidade de medida);

$h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ (constante de Planck);

“A menor energia que uma onda luminosa de frequência f pode possuir é hf , a energia de um único fóton. Se a onda possui uma energia maior, esta deve ser múltiplo inteiro de hf [...]” (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2012, p. 179).

Emissão de fótons: quando um átomo emite um fóton de frequência f , transfere uma energia hf para a luz, e um fóton é criado.

Absorção de fótons: quando um fóton de frequência f transfere sua energia hf da luz para um átomo, esse fóton é extinto.

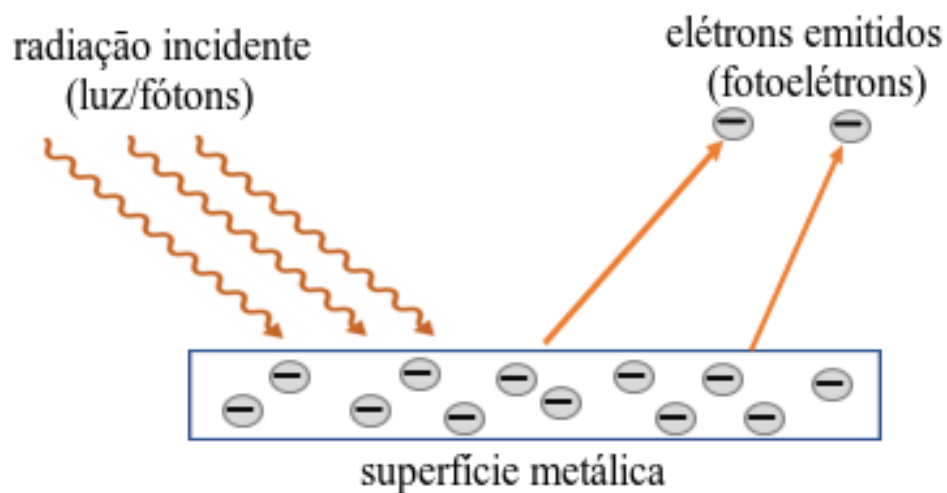
- **Efeito Fotoelétrico**

O efeito fotoelétrico não é explicável no domínio da Física Clássica; surge, então, a Física Quântica (com a proposta de quantização da luz), em que é necessário considerar a luz como partícula, o fóton.

Esse fenômeno é verificado quando uma **placa de metal é atingida por luz de determinada frequência e tem elétrons emitidos da sua superfície** (Figura 10), porém, verifica-se que não é em todos os casos que o elétron é desprendido do metal. A energia do fóton (E) depende de sua frequência (quanto maior a frequência, maior será a energia do fóton) e, para que ocorra o efeito fotoelétrico, a energia do mesmo precisa ser igual ou maior do que a energia de interação do elétron com a placa. Observou-se que mesmo aumentando-se a intensidade da luz incidente não ocorria o desprendimento dos elétrons, ou seja, mesmo aumentando-se a quantidade de fóton o fenômeno não ocorria.

O primeiro a observar o efeito fotoelétrico foi Heinrich Rudolf Hertz, em 1886. Um fato curioso é que foi nesse experimento que Hertz comprovou a natureza de onda eletromagnética da luz, mas observou também que a incidência de raios ultravioleta gerava faíscas na placa coletora.

Figura 10 - Representação do efeito fotoelétrico



Fonte: A autoria própria (2021).

É dada a **função trabalho (ϕ)** como sendo a energia mínima necessária para a emissão do fotoelétron. Essa é uma característica que é determinada pelo material da placa metálica; quanto maior for a função trabalho, maior será a dificuldade de desprender elétrons da superfície metálica. Vale ressaltar que só ocorrerá o efeito fotoelétrico se $E > \phi$.

Lembrando que a energia do fóton depende da frequência do mesmo, é estabelecida uma energia mínima, correspondente a uma frequência mínima, denominado **potencial de corte (V_0)**. Ou seja, o fóton deverá conter essa energia mínima para que o elétron a absorva e se desprenda do metal (figura 11). No caso de o fóton conter energia maior do que a energia de corte, o fotoelétron será desprendido e a diferença de energia será absorvida pelo fotoelétron, o que corresponderá à sua energia cinética ($K_{m\acute{a}x}$) (Figura 12).

Para determinar a energia cinética de um elétron, temos:

$$K_{m\acute{a}x} = eV_0 \quad (14)$$

Em que:

$K_{m\acute{a}x}$ = energia cinética do elétron – a unidade de medida de energia no SI é o Joule (J), porém convenientemente utiliza-se o Elétron-Volt (eV);

e = valor absoluto da carga do elétron ($1,6 \cdot 10^{-19}\text{C}$);

V_0 = potencial de corte – a unidade de medida é o Volt (V).

Matematicamente, a equação do Efeito Fotoelétrico é a seguinte:

$$hf = K_{m\acute{a}x} + \phi \quad (15)$$

Em que:

$hf = E$ (Energia do fóton);

$K_{m\acute{a}x} = eV_0$ (Energia cinética do elétron);

ϕ = Função trabalho (característica do metal da placa metálica).

A unidade de medida utilizada é o Joule (J) ou Elétron-Volt (eV).

É importante enfatizar que fótons com uma baixa frequência não são capazes de desprender elétrons da placa metálica; se aumentarmos a intensidade da luz, a qual ficará mais brilhante, isso só faz aumentar o número de fótons que atingem a placa, mas nenhum desses fótons tem energia suficiente para desprender um elétron.

Muitos fótons, porém, com energia insuficiente para o efeito fotoelétrico.

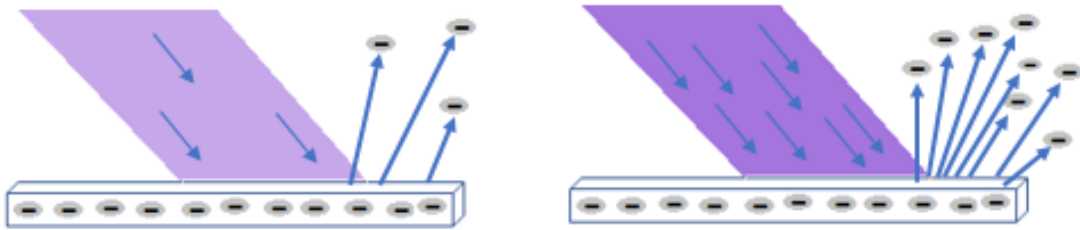
Figura 11 - Fótons com energia insuficiente



Fonte: Autoria própria (2021).

Fótons com energia suficiente para o efeito fotoelétrico, um elétron para cada fóton.

Figura 12 - Fótons com energia suficiente



Fonte: Autoria própria (2021).

A função trabalho dos elétrons é usualmente expressa em elétron-volt (eV), que tem a seguinte relação com o joule:

$$1eV = 1,602 \cdot 10^{-19}J \quad (16)$$

Assim, a constante de Plank assume o seguinte valor:

$$h = 6,626 \cdot 10^{-34}J \cdot s = 4,136 \cdot 10^{-15}eV \cdot s$$

No Quadro 2, expressamos alguns valores da função trabalho (ϕ) e alguns elementos químicos.

Quadro 2 - Função trabalho de alguns elementos

Elemento	Função trabalho (eV)
Alumínio	4,3
Carbono	5,0
Cobre	4,7
Ouro	5,1
Níquel	5,1
Silício	4,8
Prata	4,3
Sódio	2,7

Fonte: Adaptado de Young; Freedman (2016, p. 206).

“Esses valores são aproximados porque são muito sensíveis às impurezas da superfície. Quanto maior for a força de trabalho, maior será a frequência mínima necessária para a emissão de fotoelétrons” (YOUNG, FREEDMAN, 2016, p. 206).

O efeito fotoelétrico é muito utilizado atualmente e comumente nem nos damos conta do fenômeno, que é fundamental no funcionamento de dispositivos presentes no nosso dia a dia, como portas que abrem e fecham automaticamente, luzes que acendem ao anoitecer, fotômetro de máquinas fotográficas que controlam o tempo de exposição do filme, painéis solares, entre vários outros aparatos modernos, um experimento que pode ser aplicado em sala de aula pode ser encontrado em Batista *et al.* (2021).

2.3 Aprendizagem Significativa

Muitas são as teorias de aprendizagem, no entanto, aqui será abordada a aprendizagem significativa, preconizada por Ausubel (1982), Novak (1996) e Moreira (1998). Conforme propõe Ausubel (1982), a aprendizagem torna-se significativa quando o conhecimento prévio do aluno é valorizado, e a partir disso, é possível ao discente construir estruturas mentais, por meio de mapas conceituais, que irão proporcionar uma aprendizagem eficaz, pois o aluno consegue descobrir e redescobrir por meio deste tipo de aprendizagem.

A aprendizagem perpassa a dinâmica de reproduzir aquilo que lhe foi dito, e, para que ela tenha um significado, é preciso que o aluno faça uso dos conhecimentos que aprendeu. A aprendizagem significativa “[...] se caracteriza pela *interação* entre os conhecimentos prévios e os conhecimentos novos, e que essa interação é *não-litera*l e *não-arbitrária*” (MOREIRA, 2011, p. 14). De acordo Ausubel (1982 apud MOREIRA, 2019, p. 161), a aprendizagem significativa “[...] é um processo por meio do qual uma nova informação relaciona-se com um aspecto especificamente relevante da estrutura de conhecimento do indivíduo”, e para que ela ocorra, precisa partir de duas condições básicas: a disposição do aluno em aprender e o material a ser aprendido precisa ser potencialmente significativo. Se o aluno quiser apenas memorizar o conteúdo de forma literal e arbitrária, a aprendizagem não será significativa, mas sim mecânica. Já o conteúdo aprendido precisa ter significado lógico (natureza do conteúdo) e psicológico (experiência individual). Dessa forma, cada aluno irá filtrar os conteúdos que terão maior significado para si.

A teoria de Ausubel, que teve seus primeiros conceitos divulgados por volta da década de 60, aponta como o principal fator de aprendizagem a valorização do

conhecimento prévio do aluno. Ao identificar e valorizar o conhecimento que o aluno já tem sobre o assunto, o professor estará acrescentando informações ao conhecimento já adquirido, àquele conhecimento que já tem um certo valor para o aluno. Dessa forma, a aprendizagem irá ter significado para o aluno, evitando as memorizações de conceitos que não trazem significado algum para o mesmo. Essa interação entre a nova informação e o conteúdo prévio possui um termo na língua inglesa, *subsumir*, que em sua tradução para o português passou a chamar-se de subsunçor.

Esse subsunçor, presente na estrutura cognitiva do aprendiz, é uma base que já está solidificada, possibilitando uma interação com novas informações, que acabam ampliando o conceito pré-existente, assim, o novo conhecimento será significativo ao aprendiz. De acordo com Moreira (1979), “A medida que a aprendizagem começa a ser significativa esses subsunçores vão ficando cada vez mais elaborados e mais capazes de ancorar novas informações.”

Moreira (2011), fala que, esse conhecimento prévio do aprendiz, pode ter natureza conceitual, procedimental ou atitudinal, mencionando que para Ausubel, subsunçor refere-se mais ao conhecimento declarativo (conceitual), tanto que muitas vezes ele fala menciona *conceito subsunçor*, termo que parece não nos caber hoje, pois limita muito o significado de subsunçor, fazendo com que seja tomado como um conceito específico, “é melhor considerar o subsunçor como um conhecimento prévio especificamente relevante para uma nova aprendizagem, não necessariamente um conceito” (MOREIRA, 2011, p. 19).

Ausubel (1982) preconiza que quando o conteúdo escolar a ser aprendido não estabelece co-relações com os conteúdos prévios, a aprendizagem torna-se mecânica, o que faz com que o aluno decore leis, fórmulas, conceitos, mas, após a avaliação estes sejam esquecidos. Esses conceitos dialogam com os ensinamentos de Paulo Freire (2008, p. 22), que dizia que “[...] ensinar não é transferir conhecimento, mas criar possibilidades para sua produção ou construção”. Quando o conteúdo não faz ligações com os conhecimentos prévios, ele passa a ser repetitivo, armazenado de forma isolada ou com associações que se tornam arbitrárias dentro da estrutura cognitiva.

Freire (2008) postulava que a aprendizagem precisa ter sentido para o aluno, valorizando o saber prévio, assim como Ausubel (1982). Essa teoria centra-se no aluno como principal fundamento do processo educativo, e não no professor ou no processo de ensino. O papel do professor, a partir desta perspectiva, é de facilitador, aquele que irá dialogar com o educando e criar possibilidades de aprendizagem a partir das

conversas feitas e das construções já estabelecidas. Ao fazer isso, o professor está possibilitando ao aluno ser protagonista de sua própria aprendizagem.

Moreira (2019), ao abordar a teoria de Ausubel, postula que a aprendizagem para ser significativa deve organizar e incluir o material na estrutura cognitiva do aluno, essa teoria parte da “[...] premissa que existe uma estrutura na qual essa organização e integração se processam” (MOREIRA, 2019, p. 160). Sobre estruturas cognitivas, Moreira (2019, p. 161) observa:

[...] o armazenamento de informações no cérebro humano como sendo organizado, formando uma hierarquia conceitual, na qual elementos mais específicos de conhecimento são ligados (e assimilados) a conceitos mais gerais, mais inclusivos. *Estrutura cognitiva* significa, portanto, uma estrutura hierárquica de conceitos que são representações das experiências sensoriais do indivíduo.

A relação entre os novos conteúdos e os conteúdos prévios não pode ser arbitrária e nem substantiva, ou seja, os conteúdos novos devem interagir “[...] com as ideias relevantes existentes na estrutura cognitiva do aprendiz” (AUSUBEL, 2003, p. 2). O princípio da não arbitrariedade quer dizer que o conteúdo com potencial significativo estabeleça conexões com conhecimentos que sejam relevantes para o aluno; e a substantividade diz respeito à substância, ao significado que as novas informações terão.

A Aprendizagem Significativa é portanto, oposta a aprendizagem mecânica, em que o aluno apenas memoriza conceitos e fórmulas, impossibilitando que esse novo conhecimento se integre com o que já havia na sua estrutura cognitiva, logo, é arbitrário e acaba sendo deixado de lado, esquecido.

Assim, a *aprendizagem significativa* ocorre quando novos conceitos, ideias, proposições interagem com outros conhecimentos relevantes e inclusivos, claros e disponíveis na estrutura cognitiva, sendo por eles assimilados, contribuindo para sua diferenciação, elaboração e estabilidade. (MOREIRA, 2011, p. 104).

As vezes o aprendiz não dispõe do conhecimento prévio adequado e necessário para que determinado conteúdo lhe seja ensinado, ou ainda, o possui, mas não é capaz de perceber a relação com esse novo conhecimento. “Muitas vezes, o aluno tem conhecimentos prévios adequados, mas não percebe a relacionabilidade e a discriminabilidade entre esses conhecimentos e os novos que lhe estão sendo apresentados nas aulas e nos materiais educativos” (MOREIRA, 2011, p. 46).

Então podemos tentar facilitar a identificação e relação ou promover a construção desse subsunçor, antes de dar sequência às novas informações. Para tanto é possível utilizar um organizador prévio.

O Organizador prévio é uma estratégia didática, utilizada para facilitar a aprendizagem significativa. Trata-se de um material utilizado para a introdução, que destaca aspectos que sejam relevantes para a abordagem dos novos conhecimentos, sendo apresentado antes do material do novo conteúdo em si. Esse material deve abordar o conhecimento prévio que deve servir como uma “âncora” provisória para o que se pretende ensinar ao aprendiz. Um material organizador prévio pode ser compreendido como uma ponte cognitiva, que liga o que o indivíduo já sabe ao novo conhecimento.

De acordo com Moreira (2011, p. 120), “Podem ser um enunciado, um parágrafo, uma pergunta, uma demonstração, um filme, uma simulação[...]. Não é a forma que importa, mas sim a função dessa estratégia instrucional chamada organizador prévio”.

Os organizadores prévios são divididos em dois tipos: comparativo e expositivo. Quando o material de aprendizagem é familiar ao aprendiz, e a intenção é que o mesmo perceba a relacionabilidade com o novo conhecimento utiliza-se um organizador prévio do **tipo comparativo**.

No caso da aprendizagem de material relativamente familiar, um organizador “comparativo” deve ser usado para integrar e discriminar as novas informações e conceitos, ideias ou proposições, basicamente similares, já existentes na estrutura cognitiva. (MOREIRA, 2011, p. 106).

Se o novo conceito a ser ensinado, não é familiar ao aprendiz, ou seja, ele não tem o conhecimento prévio necessário, em sua estrutura de conhecimento, utiliza-se um organizador prévio do **tipo expositivo**.

No caso de material totalmente não familiar, um organizador “expositivo”, formulados em termos daquilo que o aprendiz já sabe em outras áreas de conhecimento, deve ser usado para suprir a falta de conceitos, ideias ou proposições relevantes à aprendizagem desse material e servir de ‘ponto de ancoragem inicial. (MOREIRA, 2011, p. 105-106).

Os Organizadores prévios, precisam ser pensados de forma que sejam capazes de ativar informações que o aluno já tenha sobre o novo conteúdo, em nível mais inferior ao que se deseja chegar, ou que sejam subsunçores para essa nova informação.

Os organizadores prévios podem tanto fornecer “ideias-âncora” relevantes para a aprendizagem significativa do novo material, quanto estabelecer relações entre ideias, proposições e conceitos já existentes na estrutura cognitiva e aqueles contidos no material de aprendizagem, ou seja, para explicitar a relacionabilidade entre os novos conhecimentos e aqueles que o aprendiz já tem, mas não percebe que são relacionáveis aos novos. (MOREIRA, 2011, p. 105).

A teoria ausubeliana parte da premissa de que, para que a aprendizagem significativa ocorra de fato, ela precisa elencar duas condições: o material e a intenção (não literária e não arbitrária) do aluno em estabelecer relações entre este material e os seus conhecimentos pré-estabelecidos.

A pré-disposição do aluno em tecer relações entre suas estruturas cognitivas e os novos conteúdos é primordial para que a aprendizagem significativa aconteça. Se os novos conteúdos forem apenas incorporados e armazenados às estruturas cognitivas do aluno, de forma literal e arbitrária, a aprendizagem será mecânica, automática.

[...] associações puramente arbitrárias, como na associação de pares, quebra-cabeça, labirinto, ou aprendizagem de séries e quando falta ao aluno o conhecimento prévio relevante necessário para tornar a tarefa potencialmente significativa, e também (independentemente do potencial significativo contido na tarefa) se o aluno adota uma estratégia apenas para internalizá-la de uma forma arbitrária, literal (por exemplo, como uma série arbitrária de palavras). (AUSUBEL, 2003, p. 23).

Quanto ao material, deve ser relacionado à cultura do aluno, para que teça ligações cognitivas com os conhecimentos do aluno, que podem ser histórias de vida, relatos, textos, aspectos históricos, imagens, entre outros. A responsabilidade de preparar e organizar esse material é do educador. Tal material capaz de dialogar com os conhecimentos prévios do aluno de forma adequada e relevante é denominado **potencialmente significativo**.

É o aprendiz que atribui significados aos materiais, e as vezes pode não ser o significado esperado pelo professor, aceito naquele conteúdo, o significado a ser atribuído depende do intercâmbio de significados realizado, que pode ser um processo demorado. Moreira (2011), enfatiza ainda que, “o material só pode ser *potencialmente significativo*, não *significativo*: não existe livro significativo, nem aula significativa, nem problema significativo, ..., pois o significado está nas pessoas, não nos materiais” (MOREIRA, 2011, p. 25).

O material que será utilizado pelo professor precisa ser coerente e se relacionar com o conteúdo e com os conhecimentos prévios que foram inicialmente ativados ou inseridos na estrutura cognitiva.

Qualquer indivíduo é dotado de diferentes subsunçores em sua estrutura cognitiva, que acabam se inter-relacionando hierarquicamente, essa estrutura é dinâmica, recebendo e interagindo com novos conhecimentos, reorganizando e acomodando subsunçores. E essa constante atualização é caracterizada por dois principais processos denominados diferenciação progressiva e reconciliação integradora ou integrativa.

De acordo com Moreira (2011), “A *diferenciação progressiva* é o processo de atribuição de novos significados a um dado subsunçor (um conceito ou uma proposição, por exemplo) resultante da sucessiva utilização desse subsunçor para dar significado a novos conhecimentos” (MOREIRA, 2011, p. 20).

O mesmo autor defini ainda a reconciliação integradora como: “um processo da dinâmica da estrutura cognitiva, simultâneo ao da diferenciação progressiva, que consiste em eliminar diferenças aparentes, resolver inconsistências, integrar significados, fazer superordenações (MOREIRA. 2011. p. 22).

Assim, Aprendizagem Significativa contempla esses dois processos, que ocorrem simultaneamente, atribuindo novos significados a conceitos pré-existentes, os fazendo interagir (conhecimento prévio e novo conhecimento), ampliando a estrutura cognitiva do aprendiz, de forma não-arbitrária e não-literal.

Como em todo processo de ensino aprendizagem, deve-se pensar no processo avaliativo, em que o objetivo não deve ser mensurar o conhecimento adquirido pelo aprendiz, é necessário que a avaliação seja um instrumento positivo que permita ao educador analisar e avaliar seus encaminhamentos metodológicos, se esses permitem auxiliar o aluno na construção de seu conhecimento.

A avaliação da Aprendizagem Significativa não pode ser simplesmente uma constatação de certo ou errado, exige uma nova postura do docente, pois trata-se de uma avaliação progressiva.

“É necessário buscar evidências de aprendizagem significativa, ao invés de querer determinar se ocorreu ou não” (MOREIRA, 2011, p. 52).

O professor deve estar atento à necessidade de retomada, mesmo que seja dos subsunçores necessários e não disponíveis pelos alunos, e permitir que o aluno refaça suas atividades formativas mais de uma vez se for o caso, assim, a avaliação deve ser formativa e recursiva. “É importante que ele externalize os significados que está captando, que explique, justifique, as suas respostas” (MOREIRA, 2011, p. 52).

Nesse contexto, visto que a aprendizagem significativa é trazer novos significados aos conteúdos prévios (subsunçores), Joseph Novak propõe uma metodologia que visa auxiliar a aprendizagem, em uma técnica que envolve diagramas, relacionando os conceitos mais importantes do assunto, em um layout gráfico organizado: são os mapas conceituais.

2.3.1 Mapas conceituais

Criados nos anos 70 por Joseph Novak, os mapas conceituais são uma técnica de aprendizagem significativa que se baseia na teoria de Ausubel. São representações gráficas, assim como diagramas e esquemas, que estabelecem relações que partem dos conceitos mais importantes para os conceitos menos inclusivos, e são usados para

ordenar os conteúdos e conhecimentos de forma hierárquica, oferecendo assim ao aluno estímulos que facilitam o seu aprendizado. Essa sistematização do conteúdo de forma gráfica surgiu com Novak, que aliou seus estudos à Gowin. Essa teoria dos mapas conceituais parte diretamente da teoria ausubeliana, e é uma ferramenta muito prática e útil que facilita a aprendizagem significativa.

Essa ferramenta metodológica proposta por Novak, com base na teoria de Ausubel, tem como finalidade a representação de conceitos de forma gráfica, esquematizada e hierárquica. Essa construção parte dois ou mais conceitos, interligados por palavras que tragam unidade semântica à ideia a ser transmitida pelo mapa conceitual (NOVAK; GOWIN, 1996)

Deve-se elencar no mapa conceitual 3 elementos básicos: conceitos, relações e questão focal. Os conceitos são as palavras-chave, que mantem [...] regularidade nos acontecimentos ou nos objetos, que se designa mediante algum termo” (NOVAK; GOWIN, 1996, p. 22). As relações são palavras (ligadas por verbo) que formam proposições; e a questão focal é a pergunta norteadora do mapa conceitual.

Os benefícios da utilização dos mapas conceituais incluem a integração e racionalização de informações dos conteúdos estudados. Por usar uma forma dinâmica e gráfica, em forma de diagramas hierárquicos, os mapas conceituais mostram, de forma organizada, conceitos e suas correspondências de forma progressiva. Com essa ferramenta, o aluno pode organizar o seu processo de aprendizagem de forma autônoma, colocando os conteúdos aprendidos na escola de forma a relacioná-los com os conteúdos prévios (NOVAK; GOWIN, 1996).

O mapa conceitual pode ainda, ser um instrumento avaliativo, permitindo que o aluno se expresse de uma forma mais natural, sendo uma alternativa aos modelos avaliativos com questões que podem limitar a resposta do aluno, ou ainda fortalecer uma aprendizagem mecânica e não significativa. “Trata-se, basicamente, de uma técnica não tradicional de avaliação que busca informações sobre os significados e relações significativas entre conceitos-chave da matéria de ensino segundo o ponto de vista do aluno” (MOREIRA, 2011, p. 129).

Tal ferramenta avaliativa, permite que o professor observe quais conceitos foram significativos para o aluno, possibilitando analisar indícios de uma Aprendizagem Significativa.

2.4 Abordagem histórica no ensino da ciência

No contexto escolar, são várias as metodologias que auxiliam no processo de ensino aprendizagem, certamente todo recurso que tenha a intenção de facilitar o aprendizado é fundamental. Assim, a História da Ciência apresenta-se como um instrumento de grande importância para as aulas de Física.

É importante que os alunos compreendam que grandes teorias passaram por um lento processo. Muitas vezes, as primeiras ideias que pareciam absurdas na época, foram rejeitadas, mas com o decorrer da história foram aceitas, como, por exemplo, o modelo heliocêntrico. Entretanto, para além desse exemplo, é provável que a grande maioria das leis, teorias e definições aceitas cientificamente hoje, tenham suas histórias de erros e acertos, rejeição e aceitação, e, muitas vezes, o professor acaba passando aos alunos a ideia de que aquele determinado conhecimento surgiu do nada, pronto e acabado, certo daquele jeito, e que não há a possibilidade de que futuramente ele seja abandonado ou aperfeiçoado.

A postura de transmitir ao estudante essa impressão de ciência pronta e acabada torna-se prejudicial no processo de ensino/aprendizagem de diferentes formas, como, por exemplo, limitar o crescimento intelectual e a criticidade do aluno, pois ao ver uma ciência tão perfeita e não ver todo o processo de construção por trás da mesma, o aluno sente-se incapaz de tal feito, acredita não ser capaz de construir ciência, que não se pode questionar o que os cientistas disseram. Nessa perspectiva, Hülsendeger (2007) acredita que trabalhar a História da Ciência pode ser favorável para que o aluno compreenda os fenômenos estudados em Física. A autora afirma:

[...] se houver uma preocupação em lançar um olhar, mesmo breve, sobre a História da Ciência, seria possível perceber o quanto a compreensão da história das ideias pode auxiliar a entender como a construção do conhecimento é complexa e não livre das mais diferentes interferências. Do mesmo modo, esse olhar permitiria ver a Física não como um amontoado de equações ou fórmulas, mas como uma fração do conhecimento humano que, fazendo parte do nosso dia-a-dia, tem importância relevante para a forma como percebemos e compreendemos o mundo à nossa volta. (HÜLSENDEGER, 2007, p. 225).

É importante que nossos alunos percebam que o conhecimento científico não está finalizado, que continua em construção e que ele pode ser um agente do desenvolvimento científico; é necessário que o aluno sinta confiança em si e acredite ser capaz. O fato de lhe mostrarmos o processo de construção de conceitos científicos pode contribuir para que entenda que a ciência é para todos e, tendo contato com o contexto histórico, perceberá a interação do desenvolvimento científico com o desenvolvimento social, o que poderá promover maior interesse nas aulas de Física e melhor compreensão dos conceitos ensinados.

De nada adianta apresentar a ciência como um produto a ser venerado, admirado à distância, de modo a fazer com que os estudantes adquiram um sentimento de inferioridade. Quando se promove desse modo o triunfo da ciência, a nossa humanidade sai perdendo. (ROBILOTTA, 1988, p.18).

Em especial, o contexto histórico sobre a dualidade da luz é muito rico para que o aluno entenda que a concepção aceita pode ser mudada, o que pode ser determinado por algum novo fator ou experimento que antes não podia ser notado ou realizado. Assim, conhecer a história da natureza da luz pode auxiliar não só na valorização dos erros e acertos ocorridos na construção científica, mas na própria história em si, possibilitando que o aluno compreenda o caráter dual da luz.

A História da Ciência não deve ser tomada como principal metodologia de ensino, mas como um complemento, um material que tende a enriquecer o ensino dos conteúdos. Matthews (1995) menciona uma crise na educação contemporânea, comprovada pela evasão de alunos e professores que vem ocorrendo no ambiente escolar; destaca também o crescente índice de analfabetismo científico. O autor amplia o termo História da Ciência para História, Filosofia e Sociologia da Ciência e descreve sobre sua pertinência:

A história, a filosofia e a sociologia da ciência não têm todas as respostas para essa crise, porém possuem algumas delas: podem humanizar as ciências e aproximá-las dos interesses pessoais, éticos, culturais e políticos da comunidade; podem tornar as aulas de ciências mais desafiadoras e reflexivas, permitindo, deste modo, o desenvolvimento do pensamento crítico; podem contribuir para um entendimento mais integral de matéria científica, isto é, podem contribuir para a superação do mar de falta de significação que se diz ter inundado as salas de aula de ciências, onde fórmulas e equações são recitadas sem que muitos cheguem a saber o que significam; podem melhorar a formação do professor auxiliando o desenvolvimento de uma epistemologia da ciência mais rica e mais autêntica, ou seja, de uma maior compreensão da estrutura das ciências bem como do espaço que ocupam no sistema intelectual das coisas. (MATTHEWS, 1995, p. 165).

Pensando na História da Ciência como fomentadora da compreensão do fazer científico, auxiliando na percepção de como importantes conceitos chegaram ao nível atual de entendimento, Martins (2006) enfatiza que uma análise apropriada de alguns momentos da história pode possibilitar uma visualização do desenvolvimento social e gradual da construção do conhecimento, favorecendo ainda, uma observação mais coerente sobre a natureza da ciência, percebendo suas limitações e processos, promovendo uma formação crítica e ao mesmo tempo mantendo o valor da ciência e a desmistificando. Nesse sentido de desmistificar a ciência, o autor destaca ainda:

A ciência não brota pronta, na cabeça de “grandes gênios”. Muitas vezes, as teorias que aceitamos hoje foram propostas de forma confusa, com muitas falhas, sem possuir uma base observacional e experimental. Apenas

gradualmente as ideias vão sendo aperfeiçoadas, através de debates e críticas, que muitas vezes transformam totalmente os conceitos iniciais. (MARTINS, 2006, p. XXII).

Assim, destaca-se como uma das finalidades de se abordar a História da Ciência na educação básica a humanização da ciência, também mencionada por Matthews (1995), levando os jovens a perceberem o caminho de erros e acertos traçados por grandes personalidades da história, de uma certa forma tirando essas personalidades do pedestal em que muitas vezes são colocados, como pessoas que não erram. Assim, todos podem sentir-se próximos e capazes de fazer ciência, possibilitando a formação de um pensamento crítico por parte dos estudantes.

A Base Nacional Comum Curricular (BNCC) (2018) para o Ensino Médio, propõe que a área de Ciências da Natureza e suas Tecnologias deve aprofundar e reorganizar os conhecimentos adquiridos pelos alunos no 9º ano do Ensino Fundamental, afirmando que isso significa, entre outras coisas:

[...]criar condições para que eles possam explorar os diferentes modos de pensar e de falar da cultura científica, situando-a como uma das formas de organização do conhecimento produzido em diferentes contextos históricos e sociais, possibilitando-lhes apropriar-se dessas linguagens específicas. (BRASIL, 2018, p.537).

Ainda na BNCC (2018), em seu capítulo direcionado a área de Ciências da Natureza e suas Tecnologias, na descrição da competência específica 2, encontramos novamente menção à importância da abordagem histórica:

Ao reconhecerem que os processos de transformação e evolução permeiam a natureza e ocorrem das moléculas às estrelas em diferentes escalas de tempo, os estudantes têm a oportunidade de elaborar reflexões que situem a humanidade e o planeta Terra na história do Universo, bem como inteirar-se da evolução histórica dos conceitos e das diferentes interpretações e controvérsias envolvidas nessa construção. (BRASIL, 2018, p.542).

Portanto, a abordagem do contexto histórico como recurso para que o aluno compreenda o processo da produção do conhecimento também está contemplada em documento que norteia o trabalho pedagógico na educação brasileira.

Apesar de a perspectiva da História da Ciência já ter sido reconhecida como importante há muito tempo, ainda existem obstáculos para sua utilização. Um deles é a resistência por parte até mesmo dos alunos, como mencionado por Hülsendeger (2007):

Contudo, mesmo parecendo uma tarefa simples, sua aplicação não é destituída de dificuldades, pois, para muitos alunos, História e Física são duas coisas totalmente diferentes, não guardando entre si qualquer tipo de relação. O conhecimento, para eles, é compartimentado, dividido, e a resistência em juntar as partes e enxergar o todo é muito grande: História é História, Física é Física, tudo em gavetas incomunicáveis. (HÜLSENDEGER, 2007, p. 223).

O ensino tradicional deixa esses traços da separabilidade do conhecimento aos alunos, que só conhecem esse formato de disciplinas separadas e por isso uma abordagem histórica ou interdisciplinar de alguma outra forma acaba causando estranheza. Mas, quanto mais se trabalhar com a História da Ciência nas aulas de Física, mais os alunos vão se adaptar e perceber sua pertinência.

2.5 Abordagem da dualidade da luz no Ensino Médio

A fim de investigar outros aportes teóricos e metodológicos sobre o ensino da dualidade da luz no Ensino Médio, foi feita uma pesquisa bibliográfica com base em dissertações que tratassem do ensino deste conteúdo no Ensino Médio, em forma de estudo de caso e vivência. A pesquisa foi feita na Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD) e no banco de teses do Programa Nacional de Mestrado Profissional em Ensino de Física (MNPEF). Foram encontradas, ao todo, 3 dissertações que tratavam da dualidade da luz especificamente (quadro 3).

Quadro 3 - Pesquisas encontradas sobre o ensino da dualidade da luz

BASE DE DADOS	TÍTULO	AUTOR/ANO	OBJETIVO	RESULTADOS
MNPEF	Concepções da dualidade da luz onda-partícula para estudantes da 3ª série do Ensino Médio: uma abordagem com “microcontroladores”	Leonardo Pereira Monteiro (2017)	Apresentar uma reflexão acerca da prática experimental como uma proposta pedagógica no Ensino Médio.	O estudo demonstrou que os alunos explicaram a natureza da luz por meio de um modelo eletromagnético corpuscular ou de um modelo eletromagnético dual.
BDTD	Estratégias de ensino/aprendizagem na compreensão da dualidade da luz.	Rosemeri Ines Kunrath (2018)	Elaborar, aplicar e analisar uma Sequência Didática para o estudo da Natureza da Luz, com alunos do Ensino Médio como forma concreta de introduzir o conteúdo da Física Moderna na Educação básica.	A autora concluiu ser viável a ampliação dessa prática para todos os assuntos para o Ensino de Física no Ensino Médio.
BDTD	Pensamento transdisciplinar: uma abordagem para compreensão do princípio da dualidade da luz	Paulo Fernando Lima de Souza (2009)	Investigar, numa turma de alunos de Licenciatura em Física, se o Pensamento	O autor concluiu que as concepções prévias dos estudantes da

			Transdisciplinar contribui para a compreensão do princípio da dualidade da luz.	Licenciatura em Física acerca da Dualidade da Luz eram desprovidas de uma concepção teórica que respaldasse o princípio, e que os experimentos propostos contribuíram para a melhor compreensão dos discentes sobre o conteúdo
--	--	--	---	---

Fonte: Autoria própria (2021).

Após a leitura dos objetivos e resultados das pesquisas acima relacionadas, foram selecionados os trabalhos de Kunrath (2018) e de Monteiro (2017); já o estudo de Souza (2009), apesar de propor uma metodologia de estudos acerca do princípio da Dualidade da Luz, focava apenas em alunos de graduação, o que destoou do público alvo do produto da presente dissertação que é o Ensino Médio.

Inicialmente, Kunrath (2018) trata de quatro teorias de aprendizagem: cognitiva, comportamental, sociointeracionista e aprendizagem significativa. Conforme a autora, a teoria cognitiva preconiza que o aluno aprende à medida que estabelece relações, lembranças e experiências sensoriais com o conteúdo que está aprendendo. Piaget parte do princípio da assimilação (que coloca o aluno como protagonista de sua aprendizagem) e acomodação (quando o aluno transforma os seus conhecimentos por meio da aprendizagem). A teoria cognitivista enfatiza os processos de apropriação da linguagem, onde “o desenvolvimento cognitivo é a conversão de relações sociais em funções mentais. Nesse processo, toda relação/função aparece duas vezes, primeiro em nível social e depois em nível individual” (MOREIRA *et al.*, 1997, p. 25 apud KUNRATH, 2018, p. 5).

A autora ainda versa sobre a teoria comportamental, que parte do princípio de que a aprendizagem ocorre a partir da mudança comportamental do aluno, com base em reforço positivo e reforço negativo, e tem Leo Skinner como seu grande teórico. Já a teoria sociointeracionista tem base nos estudos de Vygotsky, preconizando que a aprendizagem parte de dois princípios: processo histórico e origem social dos comportamentos psicológicos. Por fim, a autora aborda a teoria da aprendizagem significativa de Ausubel, Novak e Moreira. Kunrath (2018) ressalta que no ensino da Física no Ensino Médio é de suma importância que o professor tenha conhecimento de

todas as estratégias de aprendizagem e saiba adaptá-las aos seus conteúdos, a fim de que a aprendizagem dos alunos seja efetiva.

Após abordar as correntes teóricas, Kunrath (2018) versa acerca do princípio da dualidade da luz, fazendo uma explanação história do fenômeno citando estudiosos como Galileu Galilei, René Descartes, Isaac Newton, entre outros. O produto educacional elencado na dissertação em análise, elaborou uma sequência didática, como foco na 3^o série do Ensino Médio, que partiu inicialmente da discussão acerca da natureza da luz, retomando conceitos sobre óptica geométrica e natureza ondulatória da luz, abordados na 2^a série do Ensino Médio. A sequência didática elaborada por Kunrath (2018) é dividida em 4 etapas, que abarcaram 4 aulas: pré-teste e aula expositiva, simulação, experimento demonstrativo e pós-teste. A autora conclui a pesquisa elucidando que a utilização de diferentes teorias de aprendizagem colaborou muito para a apropriação do conhecimento por parte dos alunos, e que a aprendizagem significativa (que parte dos conceitos prévios do aluno para a inserção de novos conhecimentos) é uma estratégia que visa mudar a qualidade do ensino, pois torna o aluno protagonista de seu próprio conhecimento.

O estudo feito por Monteiro (2017) iniciou abordando o contexto educacional, com foco na teoria da aprendizagem significativa proposta por Ausubel e corroborada com os mapas conceituais de Novak. Essa metodologia de aprendizagem parte dos conhecimentos prévios trazidos pelos alunos, para complementá-los com os conhecimentos escolares. Novak (2000) complementou a teoria da aprendizagem significativa por meio dos mapas conceituais, que são estruturas gráficas que permitem ao aluno a construção de estruturas mentais, relacionando os conteúdos e aprendendo de forma eficaz. A teoria de Ausubel, segundo o autor, pode ser sustentada pela teoria vygostkyana acerca dos conhecimentos prévios.

O autor também faz uma abordagem acerca da aprendizagem por investigação, proposta por Hodson. A aprendizagem por investigação parte do princípio de que o aluno aprende de forma mais efetiva quando realiza, em ambiente escolar, experiências de investigação científica similares a experiências realizadas em laboratórios. Dessa forma, este tipo de metodologia é propício par a área das Ciências da Natureza, mais especificamente à Física (MONTEIRO, 2017).

O produto apresentado por Monteiro (2017) diz respeito a uma sequência didática, com foco na 3^a série do Ensino Médio, com base na dualidade da luz onda-partícula. Para isso, o autor realizou com a sua turma de estudo uma atividade de Laboratório Aberto, com a finalidade de medir a velocidade da luz partindo da radiação de micro-

ondas. A segunda atividade desempenhada foi, também em Laboratório Aberto, com o objetivo de “[...] estudar a absorção e emissão de radiação por um corpo negro com o uso de microcontrolador de baixo custo” (MONTEIRO, 2017, p. 38). Por fim, o autor realizou com seus alunos uma atividade para “[...] obter o valor da constante de Planck a partir da luz emitida por um LED (Light Emitting Diode) com uso de microcontrolador de baixo custo” (MONTEIRO, 2017, p. 38).

3 ENCAMINHAMENTO METODOLÓGICO

Ao escolher a metodologia a ser utilizada, o pesquisador estará norteando o seu estudo, e para isso, deve alinhar as suas metodologias com o tema a ser utilizado. Conforme postula Mattar (2021) “As metodologias utilizadas em uma pesquisa devem estar alinhadas com o tema, o referencial teórico, o problema, os objetivos e as questões e/ou hipóteses definidas no seu planejamento. Por sua vez, determinarão as estratégias de coleta e análise de dados”. Sendo assim, o presente estudo é caracterizado como de natureza qualitativa que parte das vivências experienciadas pelos indivíduos, bem como suas percepções acerca das situações vividas.

Conforme versam Dourado e Ribeiro (2021, p. 20), na pesquisa de cunho qualitativo “[...] a realidade é construída em conjunto entre pesquisador/a e pesquisado/a por meio das experiências individuais de cada sujeito”. Por se tratar de uma pesquisa onde o resultado é um produto aplicado com alunos do Ensino Médio, isso a caracteriza como qualitativa, pois teve como fonte as experiências vivenciadas pelos alunos

De acordo com Patias e Hohendorff (2019, p. 2. apud DOURADO e RIBEIRO, 2021, p. 20),

[...] na pesquisa qualitativa, a realidade é múltipla e subjetiva (Ontologia), sendo que as experiências dos indivíduos e suas percepções são aspectos úteis e importantes para a pesquisa. A realidade é construída em conjunto entre pesquisador/a e pesquisado/a por meio das experiências individuais de cada sujeito (Epistemologia). Sendo assim, os pesquisadores entendem que não há neutralidade e que estão, no processo da pesquisa, influenciando e sendo influenciados pelo que está sendo pesquisado (Axiologia). O raciocínio ou a lógica da pesquisa qualitativa é a indutiva, partindo do específico para o geral. Não se parte de uma teoria específica, mas ela é produzida a partir das percepções dos sujeitos que participam da pesquisa.

O método de abordagem escolhido foi uma pesquisa bibliográfica e, posteriormente, foi elaborado um produto, fruto da pesquisa prática realizada durante as experiências vividas com os alunos. A pesquisa bibliográfica é aquela oriunda de estudos já publicados sobre a temática. A pesquisa de cunho bibliográfico parte da análise de documentos científicos que versem acerca do tema estudado, e visam estabelecer um aporte teórico para as experiências práticas (FONTANA; PEREIRA, 2021).

3.1 Coleta de dados

A coleta de dados para a pesquisa ocorreu por meio de questionários, confecção de mapas conceituais, observação participante, diário de campo dos pesquisadores e todos os documentos produzidos pelos sujeitos durante a pesquisa, que teve caráter

qualitativo. O produto educacional em análise tinha o objetivo de ensinar a dualidade da luz a partir de uma abordagem significativa do conteúdo. As atividades foram desenvolvidas no segundo semestre de 2021, durante as aulas de Física em uma turma de segunda série do Ensino Médio, do turno matutino, de um colégio estadual, localizado num município que fica na região Centro – Oeste do Paraná. A grade curricular para essa turma contempla duas aulas semanais da disciplina.

O colégio é o único que oferta Ensino Médio regular na área urbana dessa cidade, essa escola conta ainda com as séries finais do Ensino Fundamental e Educação de Jovens e Adultos. No ano de 2021 a escola de implementação do produto educacional ofereceu à comunidade, a 1^a, 2^a e 3^a séries do E.M., nos três turnos, sendo uma turma de cada série em cada turno, e 6^o, 7^o, 8^o e 9^o anos do E.F. nos turnos da manhã e tarde, também uma turma de cada ano para o turno ofertado. As turmas de EJA são ofertadas apenas no período noturno.

O roteiro das atividades foi dividido em seis módulos, que foram desenvolvidos durante oito aulas. O produto educacional apresenta uma proposta didática com textos e questões a serem discutidos nas aulas, traz um roteiro para produção e aplicação de dois experimentos feitos com materiais de baixo custo; o primeiro com o objetivo de demonstrar o comportamento ondulatório da luz, lembrando o experimento da dupla fenda realizado por Young, e o segundo com a finalidade de simular o comportamento corpuscular da luz constatado no efeito fotoelétrico, dando destaque à situação que ocorre com a iluminação pública, ao acender e apagar as luzes sem interferência humana.

Essas atividades experimentais foram propostas com a intenção de tornar os conhecimentos apresentados mais concretos, possibilitando ao aluno compreender as conclusões obtidas por físicos e seus impactos na sociedade, percebendo que os fenômenos estudados estão presentes no seu cotidiano.

Ainda como recurso didático, a proposta, sugere a exibição de um vídeo intitulado “O Julgamento da Luz”, em que os personagens são os principais filósofos e físicos que contribuíram para os estudos sobre a natureza da luz ao longo dos anos. No roteiro desse julgamento os personagens descrevem seus pensamentos e sua compreensão acerca do que é a luz. O vídeo exibido foi produzido pelos autores da proposta e para a produção do mesmo foi necessária a criação inédita desses personagens de forma digital, a construção de frames (cenas) com movimento dos mesmos e a elaboração de um roteiro que resgatasse os principais momentos da história. Para tanto, o filme foi produzido com a utilização de *software* para a criação de vídeos (*Open Shot* e *Affter*

Effects), sendo necessária, também, a gravação dos áudios por diferentes vozes a fim de interpretar os diferentes personagens, para a gravação dos áudios foi utilizado o *software Audacity*.

A proposta do vídeo que foi exibido aos alunos tinha a intenção de atrair a atenção dos alunos para a história da ciência, mostrando que todo conhecimento científico é solidificado a partir de hipóteses e comprovações, que mesmo as hipóteses já refutadas são de grande importância para a construção do conhecimento e devem ser apreciadas e valorizadas, não como anedotas, mas sim como importante passo para a construção do conhecimento.

As atividades propostas no roteiro das aulas foram embasadas na Teoria de Aprendizagem Significativa de David Ausubel, que focaliza principalmente a aprendizagem cognitiva. Utilizou-se também os argumentos de Joseph Novak e Marco Antônio Moreira, que são sucessores de Ausubel e seguiram divulgando e aprimorando a Teoria de Aprendizagem Significativa.

A avaliação é fundamental em todo o processo educativo, afinal é necessário observar se os objetivos propostos foram atingidos parcialmente, totalmente ou não foram atingidos. Os resultados da avaliação refletem a prática pedagógica do professor; além de avaliar o conhecimento obtido pelo aluno, permite ao professor refletir sobre sua prática docente, a aprimorando constantemente. Assim, a avaliação ocorreu de forma contínua em todas as etapas das atividades, ao final, os alunos produziram um mapa conceitual a fim de demonstrar sua compreensão sobre a luz.

3.2 O produto educacional

A organização das atividades propostas e o desenvolvimento das aulas constam, de forma resumida, no Quadro 4.

Quadro 4 - Organização da proposta didática

MÓDULO 1	IDENTIFICANDO OS SUBSUÇORES	✓ Mapa conceitual e questões sobre a luz, para identificar os conhecimentos prévios presentes na estrutura de conhecimentos dos alunos.
MÓDULO 2	ORGANIZADOR PRÉVIO DO TIPO COMPARATIVO – I	✓ Leitura e discussão do texto “A carta e o e mail” em que é feita uma analogia com partícula e onda respectivamente, com objetivo de estabelecer uma “âncora” para o novo conhecimento. Nessa aula o professor deve relembrar principais características e comportamento de ondas e partículas.
MÓDULO 3	ORGANIZADOR PRÉVIO DO TIPO COMPARATIVO – II	✓ Leitura e discussão dos textos “Arco-íris” e “Periscópio”, o primeiro aborda a formação do

		arco-íris e o segundo fala sobre o instrumento óptico denominado periscópio. A intenção de se explorar esses textos é levar o aluno a perceber que ambos são possíveis devido a presença de luz. Espera-se que o aluno já conheça o fenômeno do arco-íris e já tenha visto em filmes ou outros recursos, o periscópio, assim são objetos de estudo familiares ao aluno, possibilitando a integração e discriminação de novas informações e conceitos.
MÓDULO 4	MATERIAL POTENCIALMENTE SIGNIFICATIVO – I	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Experimento 1: Dupla fenda. ✓ Experimento 2: Simulando a iluminação pública. ✓ Explicação sobre a difração da luz e sobre o Efeito fotoelétrico.
MÓDULO 5	MATERIAL POTENCIALMENTE SIGNIFICATIVO – II	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Apreciação do vídeo “O julgamento da luz”. ✓ Socialização oral sobre o vídeo. ✓ Questões para verificar a compreensão dos alunos sobre o exposto no vídeo
MÓDULO 6	AVALIAÇÃO	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Elaboração de mapa conceitual individual pelos alunos, questões sobre a dualidade da luz, avaliação da proposta didática.

Fonte: Autoria própria (2021).

Inicialmente é necessário identificar os conhecimentos prévios dos estudantes, a fim de direcionar o trabalho, é importante saber o que o aluno já sabe, quais pontos requerem uma retomada ou são desconhecidos, para isso, foi utilizado um questionário e solicitado aos alunos a confecção de um mapa conceitual.

A utilização de textos como organizadores prévios também foi utilizada com a finalidade de estabelecer uma conexão do que o aluno já sabe com o novo conteúdo.

➤ Experimentos

Os experimentos que foram realizados são de fácil confecção e aplicação, visando sempre a elaboração de um material didático de baixo custo e de fácil acesso, podendo ser utilizado por qualquer professor. Apresentamos a seguir uma breve descrição e a intencionalidade na utilização de cada experimento.

➤ Experimento 1: Dupla fenda

Com esse experimento pretendia-se demonstrar ao aluno, de forma simples, o comportamento ondulatório da luz ao propagar-se, levando-o a perceber que, se a luz for compreendida apenas como partícula, o resultado esperado seria somente a projeção dos dois furos ou fendas, e que o fenômeno de interferência é um comportamento próprio de ondas. Esperava-se ainda que o aluno percebesse a importância de se conhecer a história e os fatos importantes para a ciência que se tem hoje.

O experimento é realizado com a utilização de um pente, com espaço muito pequeno entre os dentes, um apontador laser e fita isolante. A fita isolante é utilizada para cobrir os dentes do pente deixando apenas dois espaços entre eles, que serão as duas fendas. Aponta-se o laser na direção das fendas do pente e observa-se o resultado em uma parede ou quadro da sala de aula; tal resultado é a visualização dos efeitos da difração e da interferência entre as ondas de luz.

Antes da efetivação do experimento, questionou-se os alunos sobre a propagação retilínea da luz e o que esperavam que iria acontecer quando a luz atravessasse as duas fendas.

➤ **Experimento 2: Simulando a iluminação pública**

Não é tão simples reproduzir o efeito fotoelétrico e torná-lo perceptível aos alunos, com uma intenção didática de demonstrar a interação da luz com a matéria num comportamento de partícula. Foi realizado um experimento que simula o funcionamento de um poste de iluminação pública; nesse caso não há a emissão de elétrons, mas sim a passagem de uma corrente elétrica.

O experimento proposto aos alunos objetivou abordar o fenômeno do efeito fotoelétrico destacando a interação da luz com a matéria e sua aplicação no dia a dia. Após explicar como ocorre tal fenômeno, foi demonstrado, com a montagem de um circuito simples, como funciona a iluminação pública, que acende e apaga as luzes dos postes de forma automática, sem a interferência de uma pessoa.

Para isso, foi utilizado um dispositivo chamado LDR (*Light Dependent Resistor*) que ao ser incidido por luz tem o número de elétrons livres aumentado, o que faz a resistência elétrica diminuir, permitindo a existência de uma corrente elétrica que aciona o relé fotoeletrônico (um dispositivo que apaga a lâmpada), e quando a intensidade da luz à qual o LDR está exposto é diminuída e ocorre o contrário, há uma diminuição dos elétrons livres, que faz aumentar a resistência e dificulta a passagem da corrente elétrica, fazendo com que o relé acenda a luz.

Com essa atividade pretendia-se mostrar ao aluno o comportamento corpuscular da luz ao interagir com a matéria, bem como evidenciar a importância de tal desenvolvimento científico para nossas vidas, apresentando diferentes situações em que o efeito fotoelétrico está presente, como portas que abrem e fecham automaticamente, diversas situações em que luzes acendem ao anoitecer, fotômetro de máquinas fotográficas que controlam o tempo de exposição do filme, entre vários outros aparatos modernos.

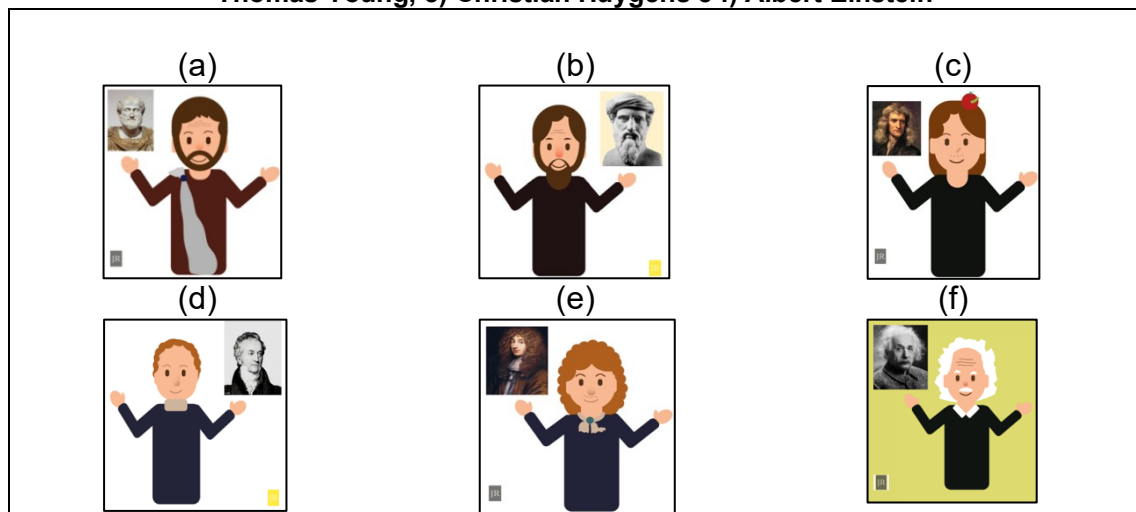
Esse experimento foi montado a partir do circuito, e posteriormente acomodado dentro de uma caixa, que deixava expostos: a lâmpada, o interruptor e o LDR. Foi solicitado que os alunos tentassem propor formas de apagar a luz que estava acesa, mas eles não podiam tocar com as mãos no aparato, posteriormente a professora/pesquisadora demonstrou como apagar a luz, incidindo luz de laser sobre o LDR, e explicou que o funcionamento dos postes de iluminação pública tem o mesmo princípio.

➤ **Vídeo “O julgamento da luz”**

O objetivo da exibição desse vídeo era despertar o interesse do aluno em conhecer o contexto histórico por trás dos conceitos apresentados na disciplina de Física e contribuir para que o mesmo compreenda a dualidade da luz.

O roteiro para o vídeo que foi utilizado na abordagem sobre a história da evolução das concepções sobre a natureza da luz foi elaborado a partir de revisão bibliográfica, objetivando contemplar as principais contribuições e seus defensores desde a antiguidade para chegarmos ao que se sabe nos dias atuais sobre a luz (Apêndice A).

Figura 13 – Personagens presentes no vídeo: a) Aristóteles, b) Pitágoras, c) Isaac Newton, d) Thomas Young, e) Christian Huygens e f) Albert Einstein



Fonte: Autoria própria (2020).

Trata-se de um julgamento fictício em que o personagem de Pitágoras defende a natureza corpuscular da luz e o personagem de Aristóteles defende a natureza ondulatória da luz. No decorrer desse julgamento são convocadas algumas testemunhas: Newton, Huygens, Young e Einstein; estes falam de seus feitos bem como narram algumas hipóteses e contribuições de grandes personalidades como Homero, Platão, Robert Hooke, Grimaldi, Foucault, Maxwell, Hertz, Kirchhoff e Planck. E, como já sabemos, esse julgamento terminará empatado, uma vez que a conclusão científica atual

é de que a luz tem caráter dual: comportamento ondulatório ao se propagar e corpuscular ao interagir com a matéria.

A produção do vídeo foi realizada no *software OpenShot* (disponível em www.openshot.org) e *After Effects* (disponível em www.adobe.com); as imagens e frames (cenas) dos personagens foram criados exclusivamente para esse trabalho (Figura 13), procurando trazer traços dos personagens reais; os áudios foram gravados separadamente por diferentes vozes, utilizando o *software Audacity* (disponível em www.audacityteam.org), posteriormente, os áudios foram enquadrados com as cenas. O vídeo está disponível em:

<https://www.youtube.com/watch?v=mDygrmcTiBk>

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS DADOS

Ainda em um cenário de pandemia (COVID-19), que afetou o mundo todo, tendo as aulas presenciais suspensas, no Estado do Paraná, desde 20 de março de 2020, assumindo caráter remoto até julho de 2021, quando as escolas paranaenses procuram retomar a sua normalidade, seguindo as medidas de prevenção recomendadas pela Secretaria de Estado da Saúde. Nesse retorno o novo formato de ensino foi denominado híbrido, em que parte dos alunos participavam das aulas de forma remota e síncrona por vídeo chamada, utilizando o *Google Meet*, enquanto os demais alunos acompanhavam as aulas presencialmente, e esses grupos faziam revezamentos organizados pela orientação escolar, não sendo obrigatória a participação presencial. Gradativamente novas resoluções foram alterando esse sistema, aumentando o número de alunos a participarem presencialmente. No mês de outubro tornou-se obrigatória a presença de todos, exceto alunos e professores com atestado de comorbidade.

Assim a proposta didática foi implementada inicialmente no sistema híbrido de ensino, mas finalizada com todos os alunos frequentando as aulas presenciais. Iniciando em 27 de setembro e finalizando em 9 de novembro, foram um total de oito aulas de implementação, das quais, três foram abordadas na forma híbrida, o que promoveu a ausência de um número considerável de alunos, pois alguns alunos que estavam escalados, naquela semana, para ficar em casa e participar remotamente das aulas, acabavam não assistindo a aula. Como a maior parte das aulas de aplicação do produto educacional foram a partir da determinação do retorno de todos, não houve um número muito alto de faltas nas aulas, o que favoreceu a observação dos resultados.

A proposta didática para o ensino da natureza dual da luz foi efetivada em uma turma de 2ª série do Ensino Médio, do turno da manhã, de um colégio estadual, situado no município de Iretama - Pr. As atividades foram desenvolvidas durante as aulas de física da referida turma que é formada por 27 (vinte e sete) alunos matriculados. Cada aula tem duração de 50 minutos.

O trabalho foi organizado pautando-se na aprendizagem significativa, assim, inicialmente é necessário que se identifique os conhecimentos prévios dos alunos, que são denominados subsunçores, por David Ausubel o criador dessa teoria de aprendizagem. O autor afirma que “[...] o fator isolado mais importante que influencia a aprendizagem é aquilo que o aluno já sabe; descubra isso e ensine-o de acordo” (MOREIRA, 2019, p. 171).

4.1 Análise do mapa conceitual inicial

Como instrumento, para se fazer a identificação dos conhecimentos prévios dos estudantes, foi utilizado inicialmente a construção de um mapa conceitual, assim os alunos elaboraram individualmente um mapa conceitual sobre luz. Além disso, os estudantes responderam algumas questões, que contemplavam informações consideradas como subsunçores importantes para dar sequência a abordagem do conteúdo.

Sobre o mapa conceitual, acreditava-se que os alunos já tivessem uma boa compreensão de como estruturar um, pois alguns conteúdos anteriores a aplicação desse produto educacional haviam sido finalizados com a utilização desse instrumento didático e também o professor da disciplina de educação financeira relatou ter trabalhado com essa turma, e solicitado como avaliação um mapa conceitual e julgou que os alunos já estavam familiarizados. No entanto, logo após a primeira aula de aplicação do produto, ao analisar os mapas conceituais produzidos, foi constatado que vários alunos ainda não conseguiam distinguir mapa conceitual de mapa mental, o que é perfeitamente compreensivo, pois realmente trata-se de um recurso que ainda não é muito utilizado no ambiente escolar.

Porém, de acordo com Moreira (2011, p.1123-124) “Mapas conceituais [...] não devem ser confundidos com mapas mentais que são livres, associacionistas, não se ocupam de relações entre conceitos, incluem coisas que não são conceitos e não estão organizados hierarquicamente.” Notou-se, a ausência de hierarquia nos mapas conceituais analisados, e seu aspecto visual remetia a uma estrutura feita de forma mais livre, que é característica de mapa mental.

Outro ponto que atraiu a atenção é que usualmente muitos alunos colocaram o conceito inicial solicitado: “luz”, no centro, procurando o cercar com ligações. Para Peña *et al.* (2005), os conceitos ficam dispostos em ordem de importância, ou de inclusão, ficando na parte superior da estrutura do mapa, os conceitos mais abrangentes, Moreira (2011) também sugere essa forma de estrutura com conceitos mais abrangentes no topo e menos abrangentes na base, o autor ressalta que esse é apenas um modelo e que mapas conceituais não precisam ter necessariamente esse tipo de hierarquia, destacando que “[...] sempre deve ficar claro no mapa quais os conceitos contextualmente mais importantes e quais os secundários ou específicos” (MOREIRA, 2011, p.126). Apesar de não ser uma falha, colocar o conceito mais inclusivo no centro,

não ficava clara a hierarquia com conceitos menos inclusivos, quando havia hierarquia no mapa conceitual apresentado.

Dos vinte e um mapas conceituais entregues pelos alunos, apenas três apresentaram palavras-chave que ligam conceitos, formando uma proposição. Tais palavras, que podem ser uma ou duas, servem para conectar os conceitos dando mais sentido a relação proposta pelo autor do mapa conceitual, essas palavras-chave também não são elementos obrigatórios, porém de acordo com Moreira (2011) a proposição formada entre conceitos e palavras-chaves torna mais evidente a compreensão da relação e por isso o uso dessas conexões deve ser incentivado na elaboração de mapas conceituais.

Diante das constatações feitas, e por considerar o mapa conceitual um bom instrumento educacional, decidiu-se retomar a confecção do mapa conceitual inicial, com a finalidade de identificar os conhecimentos prévios existentes na estrutura cognitiva dos alunos, assim ao mesmo tempo que se faz essa investigação é possível contribuir para que os estudantes aprimorem suas técnicas de elaboração de mapas conceituais.

Para tanto, a aula seguinte foi destinada a essa atividade; elaboração de um mapa conceitual coletivo sobre a luz. A elaboração colaborativa de um mapa conceitual pode favorecer uma troca de significados, de acordo com Peña *et al.* (2005, p. 43) “[...] os significados podem ser compartilhados, discutidos, negociados e coincidentes. Inicialmente foi realizada uma análise nos mapas entregues pelos alunos, e elencados os conceitos mais frequentes e/ou interessantes que estavam presentes nos trabalhos deles.

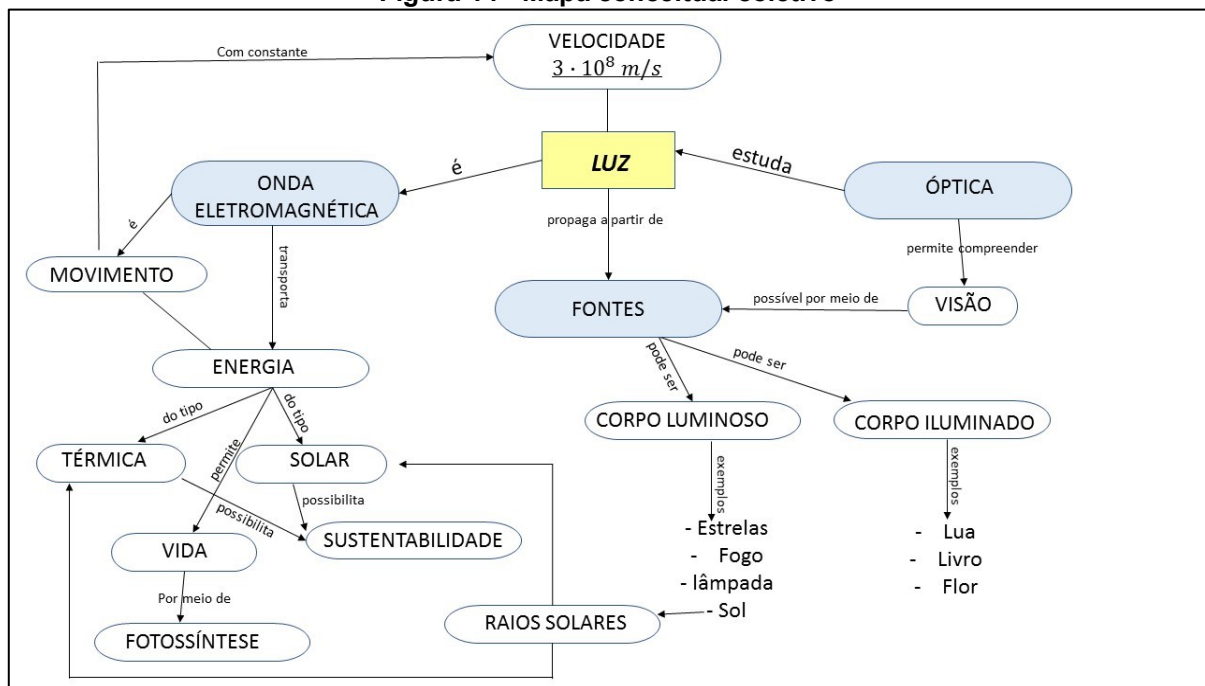
Posteriormente, esses conceitos/palavras, foram listados no quadro, assim solicitou-se que eles fossem falando quais deles eram mais inclusivos, e deviam ser colocados primeiramente na hierarquia, a turma foi bem participativa, assim indicavam quais conceitos e onde deviam ser colocados, aproveitou-se esse momento para incentivar a utilização de palavras-chave entre os conceitos, sempre solicitando: “o que poderia ser usado aqui?”, “pensem em um verbo que conecta esses conceitos” e assim os alunos sugeriram conectivos onde julgaram pertinente.

Os conceitos elencados para relacionarem a luz, foram os seguintes:

- ✓ Ilumina
- ✓ Sol – estrelas
- ✓ Lâmpada
- ✓ Calor
- ✓ Visão

- ✓ Velocidade (maior que existe)
- ✓ Sombra
- ✓ Raios solares
- ✓ Corpo luminoso
- ✓ Corpo iluminado
- ✓ Onda eletromagnética
- ✓ Energia
- ✓ Fotossíntese
- ✓ Vida
- ✓ Movimento
- ✓ Fogo
- ✓ Lua
- ✓ Sustentabilidade
- ✓ Óptica

Figura 14 - Mapa conceitual coletivo



Fonte: Autoria própria (2021).

Elaborado o mapa conceitual no quadro (Figura 14), todos o copiaram, e foram orientados que poderiam melhorar alguma ordem/hierarquia ou conceito que julgassem necessário, para Peña *et al.* (2005) não é aconselhável considerar o primeiro mapa traçado como definitivo, deve-se utilizar como modelo, o repetindo e melhorando sua apresentação.

Dentro dos conceitos utilizados pelos alunos e elencados posteriormente, para a construção do mapa conceitual coletivo, percebe-se que os alunos identificam a luz como algo essencial para a vida, mas não conseguem apresentar uma conceituação científica para a natureza da luz, dos mapas inicialmente confeccionados de forma individual, apenas cinco relacionam a luz com onda eletromagnética e nenhum apresenta relação com partículas.

4.2 Análise das questões iniciais

É natural que os alunos tenham diversas ideias e relações sobre a luz, pois é um ente presente na vida de todos, mas para o estudo em questão procura-se na estrutura do conhecimento do estudante informações sobre como é o comportamento da luz. Assim, foi aplicado um questionário, para que também auxiliasse no reconhecimento de subsunçores que, de acordo com Moreira (2011, p. 19), deve ser considerado “[...]como um conhecimento prévio especificamente relevante para uma nova aprendizagem”, e para tanto considerou-se que é importante que os alunos definam e compreendam o comportamento de partícula e onda.

Primeira questão

“Descreva, de acordo com seu conhecimento, o que é uma partícula.”

Partícula, segundo o Minidicionário da Língua Portuguesa (2000, p. 516), é “**1.** Parte pequeníssima. **2. Fís.** Nome genérico dum sistema a que se podem atribuir as propriedades dum corpo de dimensões diminutas e massa significativa.”

Dentro dos estudos da Física, ainda há que se considerar algumas características como: ocupam uma posição no espaço, são dotadas de massa, têm forma definida, são bem localizadas, esses elementos são os pontos principais que diferenciam uma partícula de uma onda.

Nas respostas dos alunos observou-se que, 20 dos 21 alunos que responderam, utilizaram o termo pequeno ou sinônimos, ficando claro que os estudantes tem uma concepção sólida de que partícula é algo pequeno, não se observou nas respostas outras características das partículas como as mencionadas no parágrafo anterior.

Um aluno relacionou partículas com a luz:

“[...]Tipo a luz, ela tem várias partículas”. (A15)

Percebe-se aqui que o aluno utiliza a luz como exemplo, ao descrever partícula, talvez ele o faz apenas pelo fato de saber que estamos estudando a natureza da luz. Ao

observar o mapa conceitual individual feito inicialmente por esse mesmo aluno foi constatado que ele não utilizou conceitos relacionados a partícula para conceituar a luz, na verdade ele usou termos como: *ondulatórias, são ondas, eletromagnéticas*.

Duas alunas remetem, em suas respostas, à posição de partículas:

“Ela faz parte da formação de tudo, pois todos os lugares tem partículas”. (A6)

“Partícula é um corpo pequeno, no universo.” (A7)

Apesar de as alunas darem indícios de que sabem que as partículas ocupam espaço, não ficou claro nessas respostas se elas compreendem que as partículas têm posições bem definidas.

Assim, a partir da análise das repostas dadas à primeira questão, ficou evidente a necessidade de retomar, com a turma, as características e comportamento de partículas, resgatando o que eles já sabem e reestruturando as suas concepções, para dar continuidade ao estudo da dualidade da luz.

Segunda questão

“Descreva, de acordo com seu conhecimento, o que é uma onda.”

De acordo com o Minidicionário da Língua Portuguesa (2000, p. 498), onda é, entre outras coisas **“6. Fís.** Perturbação periódica mediante a qual pode haver transporte de energia dum ponto a outro de um material ou espaço vazio”.

Os alunos haviam estudado recentemente o conteúdo de ondulatória, nas respostas dessa questão, foi observado que quatorze alunos usaram os termos perturbação ou oscilação, os estudantes que não utilizaram esses termos demonstraram saber do que se trata, pois citaram exemplos de ondas. Quatro alunos mencionaram a classificação das ondas em mecânicas e eletromagnéticas.

Para destacar a diferença entre onda e partícula, fortalecendo o estudo da natureza dual da luz, espera-se que os alunos também atribuam as seguintes características à ondas: não têm posição definida, não têm massa, são fenômenos que transportam energia, estão sujeitas aos fenômenos de reflexão, refração, difração, interferência etc. Esses são elementos que diferenciam onda de partícula.

Terceira questão

“Descreva, de acordo com seu conhecimento, o que é a luz.”

O interessante nessa questão, é que, ela é a mesma proposta no mapa conceitual (MC) inicial, uma vez que a proposta era fazer um mapa sobre a luz, solicitando que os alunos colocassem todas as relações que julgassem pertinente, e quando apresentado na forma de uma questão, aparentemente deixou os alunos mais limitados, os MCs promoveram mais relações conceituais à luz. Então é possível notar que a utilização de MC em qualquer etapa do processo de aprendizagem significativa é válida, por permitir identificar conceitos presentes na estrutura de conhecimento do estudante.

Dentre as respostas para essa questão, onze foram vagas, sem apresentar o conhecimento científico esperado no ambiente escolar, algumas respostas:

“Luz é tudo aquilo que ilumina” (A15)

“A luz é algo que os humanos não vivem sem, a luz promove tudo” (A22)

“luz é o oposto de escuridão, é presente frequentemente no nosso cotidiano[...].” (A25)

Um terço dos alunos afirmaram que luz é onda eletromagnética, o que é condizente com a definição de luz constante no Minidicionário da Língua Portuguesa (2000, p. 434), “1.Fís. Radiação eletromagnética, capaz de provocar a sensação visual num observador normal”, que também não faz menção a luz ser composta por partículas (fótons).

Durante a realização da atividade, foi interessante perceber a frustração dos alunos ao se depararem com essa questão, pois eles ficaram incomodados por não saberem responder, dentro de conceitos científicos, sobre algo tão presente em suas vidas. Uma aluna manifestou oralmente essa frustração para a professora/pesquisadora:

“Nossa! Estou triste porque não sei nada sobre a luz e estou no 2º ano.” (A6)

Esse tipo de afirmação fortalece a preocupação sobre o ensino de Física, que deve promover ao aluno a compreensão de fenômenos naturais que o cercam permitindo que o mesmo consiga contextualizar o conhecimento científico adquirido na escola, o ensino de Física, de acordo com Menezes (2003, p.19 apud GOMES, 2017, p. 24) “deve buscar a formação do cidadão, conectar o conhecimento à vida, dar ao aluno condições para entender o mundo a sua volta”.

Quarta questão

“Você já ouviu falar de fóton? Comente.”

Para essa questão, vinte alunos afirmaram que não sabiam o que era fóton. Dois alunos tentaram comentar algo:

“Não, mas me vem a cabeça que está relacionado a partícula.” (A17)

“Não, já vi falarem em filmes mas não sei o que é.” (A22)

É extremamente normal na segunda série do Ensino Médio, os alunos não saberem o que é o fóton, pois dentro do currículo proposto para o Estado do Paraná, há a proposta da abordagem de tal conceito apenas na terceira série, ao iniciar o ensino de Física Moderna.

A partir da análise feita nas questões iniciais, foi considerada a necessidade de reativar os conhecimentos prévios dos alunos com relação a esses aspectos. Nesse sentido o material proposto como organizador prévio, previsto para o módulo 2, mostrou-se importante como uma atividade introdutória.

O Organizador prévio é uma estratégia didática utilizada para facilitar a aprendizagem significativa. Trata-se de um material utilizado para a introdução, sendo apresentado antes do material do novo conteúdo em si. Moreira (2011, p.46) diz que “Muitas vezes, o aluno tem conhecimentos prévios adequados, mas não percebe a relacionabilidade e a discriminabilidade entre esses conhecimentos e os novos que lhe estão sendo apresentados nas aulas e nos materiais educativos”.

4.3 Utilizando organizadores prévios

Na terceira aula de implementação do produto educacional foi a exploração do material proposto no módulo dois, que tem como objetivos: Apresentar organizadores prévios para o ensino da natureza corpuscular e a natureza ondulatória da luz, realizar uma revisão conceituando e definindo partículas e ondas eletromagnéticas e reforçar a compreensão sobre o comportamento das partículas e das ondas.

Os alunos realizaram a leitura do texto “A carta e o e-mail”, adaptado de Laboratório de Pesquisa em Ensino de Física da Faculdade de Educação da USP, que faz uma analogia entre carta e partícula e e-mail com onda, ao mencionar que a carta é um meio material possuidor de massa que transporta a informação, assim como a partícula transporta energia por meio da matéria, e o e-mail realiza o transporte de informação, sem a necessidade de que massa nenhuma o carregue, bem como uma onda, que transmite energia pelo espaço sem o transporte da matéria.

A utilização de analogias está muito presente nas aulas de física, os professores sempre buscam algo conhecido pelo aluno para lhe apresentar algo novo, de acordo com Francisco Junior *et al.* (2011, p.86) “As analogias, em geral, configuram-se numa comparação entre dois eventos: um que se pretende explicar e, portanto, desconhecido, e o já conhecido e que servirá de referência”, os autores afirmam ainda que, a utilização de analogias está enraizada no cotidiano das pessoas.

Foi realizada uma discussão para que os alunos falassem o que compreenderam, e posteriormente houve uma explicação sobre as principais características de partícula e onda, destacando suas diferenças.

O texto proposto aos alunos foi pensado para agir como um organizador prévio do tipo comparativo, um material que contemple o conhecimento prévio, necessário para uma aprendizagem significativa do conteúdo a ser ensinado, atuando como um ancoradouro provisório para a nova aprendizagem ou estabelecendo uma relação entre o que o aprendiz já sabe e o novo conceito a ser ensinado. De acordo com Moreira:

Quando o novo material é relativamente familiar, o recomendado é o uso de um *organizador comparativo* que ajudará o aprendiz a integrar novos conhecimentos à estrutura cognitiva e, ao mesmo tempo, a discriminá-los de outros conhecimentos já existentes nessa estrutura que são essencialmente diferentes, mas que podem ser confundidos. (MOREIRA, 2011, p.30).

Ao final da aula foi solicitado aos alunos que respondessem duas questões, possibilitando o registro da compreensão dos mesmos sobre os aspectos que diferenciam o comportamento entre partícula e onda. Nessa aula houve a participação presencial de dezoito alunos, e um aluno de forma remota.

Quanto a questão: “*Escreva quais são as principais diferenças que existem entre as ondas e as partículas*”, foi possível observar que todos os alunos que responderam os questionários mencionam o fato de partícula ter massa e onda não, treze alunos destacam também, como diferença, que a partícula realiza transporte de energia por meio da matéria, enquanto onda realiza o transporte de energia sem transporte de matéria. Verificou-se em todos os questionários que, os alunos perceberam diferenças bem pontuais entre partículas e ondas, o que sugere que algo deve ser classificado como partícula ou como onda, mas não as duas coisas, pois são características opostas.

A intenção dessa atividade é realmente destacar essas características divergentes, para que posteriormente os alunos compreendam os dilemas presentes na história da dualidade da luz, e entendam o quanto foi difícil, mesmo para a comunidade científica aceitar que a luz é as duas coisas.

Outra questão proposta para o módulo 2 foi a seguinte:

“Vimos que a carta pode ser representada por uma partícula e o e-mail por uma onda. Descreva outras situações que possam ser representadas por: partículas e ondas”

O objetivo dessa questão era analisar se os alunos conseguiriam fazer outras analogias a partículas e ondas, nas respostas obtidas, os alunos seguiam a linha do que foi proposto no texto, relacionando a partícula ao transporte de informação por meio do deslocamento da matéria e onda ao transporte de informação sem transporte de matéria. Segue algumas situações propostas pelos alunos:

Partículas: *flechas, garrafas, papel, uma bola de futebol, jornal, bolas de bilhar.*

Ondas: *som, luz, wifi, internet, bluetooth, sinal de tv, sites de notícias.*

Conforme Francisco Junior (2009; 2010 apud FRANCISCO JUNIOR *et al.* 2011, p. 87) “O uso de analogias está relacionado às diversas competências cognitivas tais como percepção, imaginação, criatividade, memória, resolução de problemas além do desenvolvimento conceitual” o que a torna uma ferramenta de aproximação entre o que já se sabe e o novo conhecimento.

Para o módulo três a proposta pedagógica implementada aborda mais um material com a intenção de atuar como organizador prévio do tipo comparativo. Os objetivos desse módulo são: Apresentar outro organizador prévio, para o ensino da natureza corpuscular e a natureza ondulatória da luz e levar o aluno a observar que, tanto no fenômeno do arco íris como no funcionamento do periscópio há a presença da luz, comportando-se de diferentes formas.

Assim, foram disponibilizados para os alunos os textos: “Arco-íris” e “Periscópio” elaborados pelos autores, após a leitura e reflexão sobre os textos, a professora/pesquisadora falou mais sobre como ocorre o arco-íris e também explicou como funciona o periscópio, essa atividade possibilitou o início de uma diferenciação progressiva em que o novo conteúdo ou conceito, é apresentado partindo dos aspectos mais gerais para os mais específicos.

Para que ocorra uma aprendizagem significativa o ensino deve começar com aspectos mais gerais, mais amplos e inclusivos, e então de forma progressiva deve-se diferenciá-los. Dar uma ideia geral do todo e logo partir para aspectos mais específicos.

Moreira (2011, p.43) afirma que “Não seria, no entanto, uma abordagem dedutiva. Uma vez introduzidos os conceitos e proposições mais gerais e inclusivos, eles devem, imediatamente, serem exemplificados, trabalhados em situações de ensino”.

Os textos explorados possibilitam que o aluno perceba a luz em duas diferentes situações familiares (arco-íris) ou não (periscópio) e compreendam o seu comportamento em cada uma. A intenção é levar o aluno a perceber que tanto no arco-íris que é um

fenômeno natural quanto no periscópio que é um instrumento óptico, há a presença da luz, porém com algum comportamento comum e outros distintos, e solicitar se o aluno caracteriza o comportamento da luz como ondulatório, corpuscular ou dual.

Para analisar a compreensão dos alunos com relação ao que foi discutido e explicado, foram propostas as seguintes questões:

“O arco-íris é um fenômeno natural e o periscópio é um instrumento óptico, o que há em comum entre os dois?”

Foram entregues dezessete questionários respondidos, dos quais apenas um aluno respondeu: *“não sei”* (A3). Quinze alunos mencionaram que os dois eventos precisam de luz, destes quinze, cinco mencionaram que o arco-íris e o periscópio apresentam a reflexão da luz. Ficando evidente que, a maioria dos alunos percebem a presença da luz nos eventos citados, possibilitando uma compreensão da natureza da luz a partir de aspectos mais abrangentes e gerais para posteriormente diferenciá-los.

O aluno A22, não mencionou a luz como fator comum, mas respondeu corretamente, pois lembrou-se que os dois precisam de um ângulo específico, pois havia sido falado sobre isso no momento da explicação.

“Os dois se precisa de uma certa angulação para ver, não adianta tentar visualizar sem ver a angulação”. (A22)

Apesar de não apresentar uma resposta muito clara, foi perceptível que ele identificou que tanto para ocorrer o fenômeno do arco-íris como para que um periscópio funcione adequadamente é necessário um ângulo específico. Em um periscópio; um instrumento óptico que utiliza dois espelhos planos que ficam a uma certa distância um do outro e paralelos entre si, devem estar com uma inclinação de 45° para que a imagem fique perfeita. Um arco-íris só pode ser visto se o observador estiver em uma posição que os raios solares formam 42° em relação aos raios incidentes, Menezes *et al* (2019).

Então esse aluno surpreendeu, ao notar que, a necessidade de ângulos específicos também é algo comum aos dois eventos abordados, muito provavelmente porque o foco de estudo é sobre a luz, mas é animador perceber o aluno usando sua capacidade e indo além do esperado, se permitindo analisar pontos diferentes e se expressar.

Na sequência vieram as questões sobre qual o comportamento da luz nas situações apresentadas (Quadro 5).

“Observando o fenômeno do arco-íris, você acredita que a luz se comporta como onda ou partícula? Justifique sua resposta.”

“Observando o funcionamento do periscópio, você acredita que a luz se comporta como onda ou partícula? Justifique sua resposta.”

Quadro 5 - Respostas para as questões sobre o comportamento da luz no arco-íris e no periscópio

Evento/comportamento	Onda	Partícula	Onda partícula ^e
Arco-íris	10	6	1
Periscópio	13	4	0

Fonte: Autoria própria (2021).

Analisando as respostas para as duas questões, foi possível perceber que alguns alunos já começam a perceber a luz como partícula, mas a concepção ondulatória ainda prevalece. Nas justificativas, vários alunos mencionaram que é onda por não haver o transporte de matéria. No caso do periscópio um dos alunos que afirmou que a luz estava se comportando como partícula, respondeu da seguinte forma:

“Como partícula, pois ela tem uma trajetória definida” (A6).

É válido notar que os alunos se apoiaram nos conceitos e comportamentos de onda e partícula para responderem a essas questões, mas mesmo assim ficaram confusos. Novamente essas dúvidas geradas pelos alunos são importantes para a valorização das dúvidas existentes no processo histórico da construção científica. Com as respostas dadas pelos alunos, foi possível notar indícios de que os alunos estão em um processo de diferenciação progressiva, em que o aluno vai diferenciando progressivamente a partir de aspectos mais amplos e gerais.

4.4 Materiais potencialmente significativos

Um material potencialmente significativo deve ser um facilitador da aprendizagem.

“[...] o material deve ser relacionável a determinados conhecimentos e o aprendiz deve ter esses conhecimentos prévios necessários para fazer esse relacionamento de forma não-arbitrária e não-literal” (MOREIRA, 2011, p. 25).

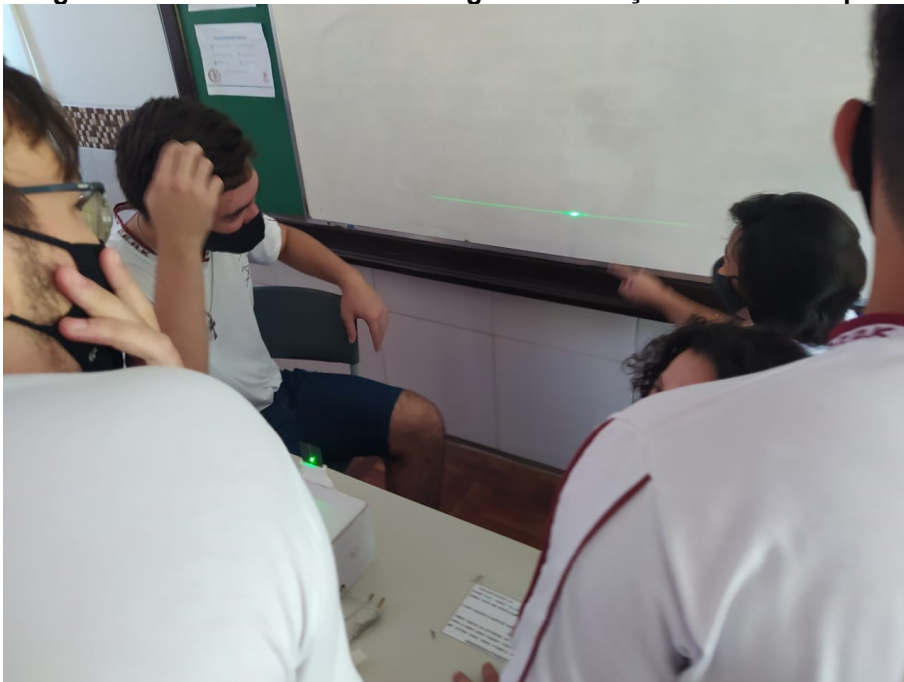
No módulo 4, foi realizada a demonstração de dois experimentos, na intenção de que estes proporcionassem uma melhor compreensão sobre a dualidade da luz, a partir do conhecimento que os estudantes já possuíam sobre o comportamento de partículas e ondas. Assim durante o experimento a professora/pesquisadora explicou sobre o comportamento da luz nas duas situações: experimento 1 – dupla fenda – comprova o comportamento ondulatório da luz, experimento 2 – simulando a iluminação pública – comprova o comportamento corpuscular da luz.

Figura 15 - Alunos realizando o experimento com o pente e o laser



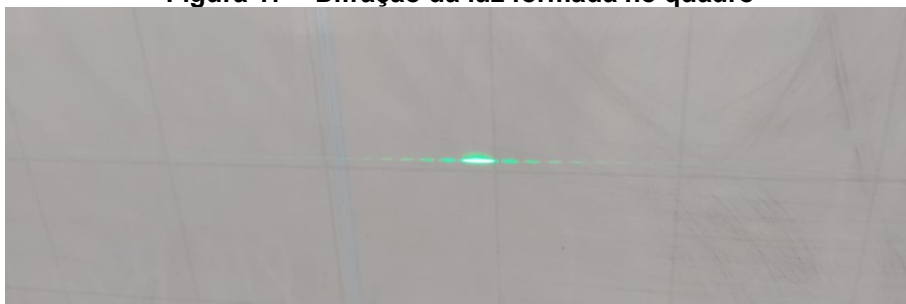
Fonte: Autoria própria (2021).

Figura 16 - Alunos observando a figura de difração formada no quadro



Fonte: Autoria própria (2021).

Figura 17 – Difração da luz formada no quadro



Fonte: Autoria própria (2021).

Antes de realizar o experimento da dupla fenda (Figura 15), os alunos foram questionados sobre o que acreditavam que iria acontecer quando incidisse luz do laser nas duas fendas. Os alunos que se sentiram à vontade para responder, disseram que iria formar dois pontos ou duas faixas no quadro, alguns acharam que poderia ser apenas uma porque o raio de luz do laser era muito fino, mas ficou claro que o esperado pelos alunos era que a luz demonstrasse seu princípio de propagação retilínea. Ao observar a rede de difração formada no quadro branco, os alunos ficaram surpresos, e muitos aproximaram-se para ver (Figura 16 e 17). A partir daí a professora/pesquisadora explicou o que estava acontecendo e que isso comprovava o comportamento ondulatório da luz.

Nos relatos escritos, quando solicitado para comentar sobre o experimento feito com o pente e o laser, os resultados foram muito satisfatórios, dezoito dos vinte e cinco relatos entregues apresentam explicações sobre o fenômeno que ocorreu, utilizando termos como: difração da luz, interferência e comportamento de onda para a luz, e muitos mencionam o quanto ficaram surpresos como o que observaram, que foi muito diferente de suas expectativas.

Alguns comentários sobre o experimento da dupla fenda:

“Foi um experimento muito interessante de ser observado. Todos da sala ficaram muito surpresos com ele, já que jurávamos que só ia aparecer um ou dois risquinhos de luz. Foi um experimento que nos fez aprender com mais facilidade os fenômenos de difração e interferência (construtiva e destrutiva).” (A12)

“O experimento de dupla fenda, que envolve a difração e a interferência é muito interessante. Provando que a luz é uma onda, ao vê-la difratando pelo pente e somando luz com luz dando escuridão, é possível ver o quão confuso é o conceito “luz”.” (A23)

“O experimento do pente com o laser é muito interessante pois, todos os alunos da sala inclusive eu estava esperando uma ou duas fendas, mas quando o laser entrou em contato com o pente ocorreu uma difração e teve a interferência construtiva e a interferência destrutiva. Gostei e achei interessante.” (A18)

O segundo experimento, foi demonstrado na sequência, para iniciar a demonstração e discussão, a professora/pesquisadora mostrou o aparato (caixa com lâmpada acesa) (Figura 18), disponibilizou os objetos: bola de borracha, régua de madeira, laser e mola e questionou aos alunos se eles eram capazes de apagar a luz que estava acesa (Figura 19), sem colocar a mão no interruptor, utilizando algum dos objetos disponíveis, prontamente alguns alunos iniciaram suas sugestões, sempre pensando no objetivo de mover a tecla do interruptor, nem perceberam que ao lado dele

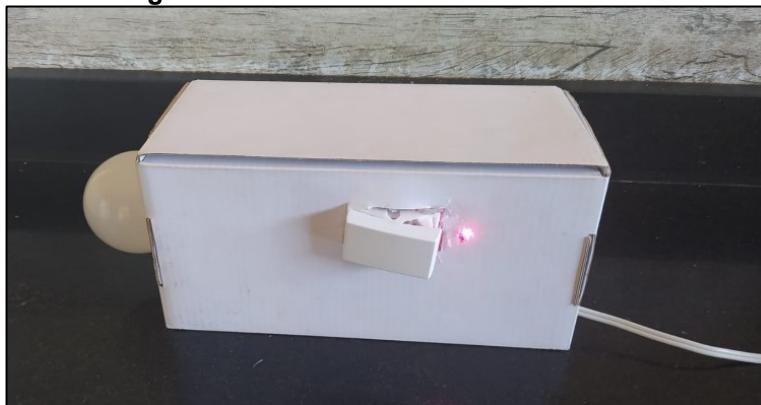
havia o LDR. Na sequência a professora/pesquisadora demonstrou como apagar a luz usando o laser, logo, muitos alunos quiseram tentar também e se divertiram ao testar sua firmeza na mão, já que o LDR é muito pequeno e o feixe de luz do laser precisava atingir esse componente e ser mantido incidindo luz sobre ele para que a lâmpada ficasse apagada (Figuras 20 e 21) .

Figura 18 – Sem incidência de luz no LDR



Fonte: Autoria própria (2021).

Figura 19 – Com incidência de luz no LDR



Fonte: Autoria própria (2021).

Figura 20 - Alunos tentando apagar a luz utilizando o laser



Fonte: Autoria própria (2021).

Figura 21 - Alunos apagando a luz utilizando o laser



Fonte: Autoria própria (2021).

Seguiu-se com a explicação do que estava acontecendo, e falando sobre o funcionamento das luzes de iluminação pública que se apagam ao amanhecer, ou seja, ao receber a luz solar. Os alunos ficaram surpresos, muitos afirmaram acreditar que alguém apagava em uma central, outros achavam que tinha um timer com horário programado, esse resultado também foi constatado na pesquisa realizada por Batista (2016), em que os estudantes dividiam suas respostas em acendimento mecânico e acendimento eletrônico. Essa discussão foi muito pertinente pois fortaleceu a compreensão de que os conceitos estudados em Física estão presentes no dia a dia do aluno. Falou-se também de outras aplicações desse fenômeno em aparatos do cotidiano, e explicou-se que isso só é possível a partir do comportamento corpuscular da luz, explicando na sequência o efeito fotoelétrico e a quantização da luz.

Os alunos gostaram muito do experimento, e descreveram em seus relatos que não imaginavam que as luzes públicas eram apagadas dessa forma, a maioria dos alunos mencionou a comprovação do comportamento corpuscular da luz presente no efeito fotoelétrico.

Alguns relatos dos alunos obre o experimento que simula a iluminação pública:

“Com o fenômeno de fotoelétron é perceptível quão diferente são as formas com que a luz pode interferir com o meio ao que se encontra, permitindo até mesmo a ativação de certos mecanismos e sensores, o que prova que ela também é partícula.” (A23)

“Neste experimento ocorre o efeito fotoelétrico, onde a luz se comporta como partícula. Esse experimento foi explicado pelo físico Albert Einstein. A luz é como pacotinhos com uma certa frequência necessária para que o mecanismo elétrico possa

apagar a lâmpada. No experimento realizado na sala foi utilizado um laser para mirar no alvo fazendo a lâmpada apagar.” (A24)

“No experimento da iluminação pública podemos ver que a luz também se comporta como partícula. A luz tem o fenômeno do efeito fotoelétrico, que só ocorre com partículas, e então vemos que a luz se comporta tanto como partícula como onda.” (A22)

Esse experimento possibilitou aproximar o conhecimento adquirido no ambiente escolar de situações presentes na vida das pessoas, o que comprova que esse recurso metodológico é muito viável pois, muitas vezes, os alunos não conseguem atribuir significados aos conteúdos estudados, os resultados obtidos por Moraes e Moraes (2000) também apontam para uma melhoria da aprendizagem a partir de “exemplo que simulem a realidade cotidiana observada pelos alunos” (MORAES; MORAES, 2000, p. 242).

A utilização de experimentos nas aulas de Física permite uma melhor compreensão do que está sendo ensinado, de acordo com Domingui (2016, p. 25-26), “O uso de atividades experimentais como estratégia de ensino de Física tem sido apontado por professores e alunos como uma das maneiras mais significativas de se minimizar as dificuldades de se aprender e de se ensinar Física”.

Também foi possível verificar um processo de diferenciação progressiva, pois essa atividade permitiu que os alunos percebessem a luz em outro contexto, diferente do apresentado até então, favorecendo ainda uma reconciliação integradora das novas informações com o que já havia sido lhes falado.

A diferenciação progressiva e a reconciliação integradora são processos que ocorrem simultaneamente, assim o aprendiz organiza hierarquicamente sua estrutura cognitiva em determinado campo do conhecimento.

“Ao longo de todo o curso de uma disciplina, por exemplo, os conteúdos gerais e específicos devem ser trabalhados em uma perspectiva de diferenciação e integração de descer e subir, várias vezes, nas hierarquias conceituais” (MOREIRA, 2011, p. 43).

E com essa mesma perspectiva, no módulo 5, o material utilizado foi um vídeo, que descrevia a história da natureza da luz, e em seu contexto narrava os experimentos já vistos no módulo anterior; dupla fenda e efeito fotoelétrico, mas agora sob um outro olhar, descrito dentro da história cronologicamente e por personagens desse contexto histórico.

Pretendia-se com esse vídeo, além de apresentar a dualidade da luz de uma nova forma, levar o aluno a perceber as implicações das discussões sobre a natureza da luz ao longo de séculos, chamar a atenção do estudante para o número de pessoas

que se envolveram e contribuíram para as conclusões atuais e que a ciência é construída dessa forma, com muitas pessoas, erros e acertos, e quem sabe, aproximar mais o aluno da ciência, despertando seu interesse e afeto pela ciência. Pereira *et al.* (2017) também falam sobre a importância de uma abordagem da História da Ciência nas aulas de Física.

Buscar um equilíbrio entre o ensino de História da Física e o ensino da Física curricular, é uma tentativa tornar essa componente curricular mais humanizada, tornando seu ensino mais agradável, voltado a todos, criando condições para que o aluno possa ter a oportunidade, o estímulo para o entendimento da Física, mas também colocando em cheque suas limitações, além de trabalhar as relações sociais dentro do ambiente escolar. (PEREIRA *et al.*, 2017, p. 267).

Após a exibição do vídeo (Figura 22), foi realizada uma conversa com os alunos e os mesmos apontaram o que lhes chamou a atenção no vídeo, também responderam algumas questões relacionadas ao vídeo, o que comprovou que os alunos prestaram atenção e compreenderam.

Figura 22 - Alunos assistindo o vídeo “O julgamento da luz”



Fonte: Autoria própria (2021).

As questões pediam que os alunos descrevessem como Newton definia a luz e o experimento realizado por ele com o prisma e a decomposição da luz branca, descrevessem o experimento de Young da dupla fenda e o efeito fotoelétrico explicado por Einstein. Analisando essas questões foi possível concluir que os alunos compreenderam os experimentos discutidos, bem como são capazes de relacioná-lo com as pessoas que os discutiram ao explicar o comportamento da luz. Promovendo novamente uma reconciliação integradora entre o que já havia sido estudado e uma nova apresentação de forma diferente.

Destacando, ainda, uma questão que intencionava analisar a opinião dos alunos sobre os erros que acontecem ao longo da história e da construção do conhecimento científico. A questão abordava, mais especificamente, o erro cometido por Isaac Newton quando afirmou que a velocidade da luz era maior em meios mais densos. Todos os alunos descreveram que errar faz parte do processo, entre outras, repetiam a frase: “errar é humano”, essa era realmente a intenção da pergunta, instigar o aluno a perceber uma humanização da ciência, que não é feita por pessoas perfeitas que nunca erram, como as vezes os professores acabam dando a entender durante as aulas, apresentando só as concepções assertivas dos físicos e filósofos.

Algumas respostas dos alunos para essa questão:

“Para mim esse erro não tem grande importância, afinal estamos falando de Newton, que trouxe muitos avanços para a humanidade e um erro não vai mudar tudo que ele fez para nós com suas pesquisas.” (A24)

Esse aluno ainda demonstra a supervalorização feita especificamente a alguns cientistas, muitas vezes o próprio professor leva o aluno a perceber certas personalidades como “Deuses”, pessoas com genialidade superior, impossível de serem alcançados ou superados. De acordo com Hülsedegger (2001), há uma tendência de propor os conteúdos não considerando o seu desenvolvimento histórico e isso acaba favorecendo essa ideia de pessoas que não cometem erros. “Apresenta-se a Ciência como se fosse algo pronto, acabado, em que o cientista surge como uma figura quase mitológica, com respostas para todas as dúvidas, sem incorrer em erros ou passar por dificuldades” (HÜLSENDEGER, 2007, p. 224).

Nas afirmações seguintes, é possível notar que os alunos começam a compreender que o erro faz parte do processo de construção do conhecimento, e que conclusões científicas podem ser revistas e mudadas, permitindo o avanço da humanidade. E essa é uma característica importante da abordagem da História da Ciência nas aulas de Física.

“Ele confiou que a luz teria um comportamento exclusivo de partícula e achou que a luz “passaria” mais rápido pelo meio mais denso; gerou muitas dúvidas que contribuíram para um maior avanço talvez.” (A17)

“Mesmo que errado, devemos ter noção que errar é algo natural humano, da mesma forma que por anos acreditava-se na Terra como centro do Universo, em algum momento, mesmo que leve centena de anos, alguém irá descobrir a verdade por trás daquilo que buscamos entender.” (A23)

Como pergunta final desse módulo, e com a intenção de verificar se os alunos apresentam indícios de compreenderem que a luz tem comportamento dual, os mesmos foram questionados sobre qual foi o desfecho final do vídeo “O julgamento da luz”.

Todos os alunos afirmaram que a luz é as duas coisas; onda e partícula, alguns explicavam com mais detalhes o que levou a essa conclusão dentro do contexto histórico. O que indica que está ocorrendo uma reconciliação integradora, com o auxílio de mais esse recurso metodológico, que foi o vídeo com a história da ciência. De acordo com Moreira (2011, p. 42) “[...] o sujeito que aprende vai diferenciando progressivamente e, ao mesmo tempo, reconciliando integrativamente, os novos conhecimentos em interação com aqueles já existentes”.

4.5 Análise dos mapas conceituais finais

O módulo 6 propôs a elaboração de um mapa conceitual individual sobre a luz, abordando de uma forma diferente, os aspectos da dualidade da luz. Moreira (2019) fala sobre a evidência da aprendizagem significativa, o autor descreve que, para Ausubel, os estudantes acabam se habituando a memorizar: proposições, fórmulas, causas, exemplos, explicações e maneiras de resolver problemas tradicionais, devido a experiência que adquirem fazendo esses tipos de exames, por esses fatores a utilização de MC caracteriza-se como um bom instrumento de avaliação, permitindo que o aluno demonstre as concepções e respectivas relações que lhes foram mais significativas durante o aprendizado.

De acordo com Moreira (2011, p. 129) “Como instrumento de avaliação da aprendizagem, mapas conceituais podem ser usados para se obter uma visualização da organização conceitual que o aprendiz atribui a um dado conhecimento”. Com essa finalidade, os alunos realizaram os MCs de forma individual, iniciaram a construção dos mesmos em sala de aula, mas não conseguiram concluir durante uma aula, então terminaram essa proposta em casa, e os entregaram na aula seguinte, nem todos os alunos entregaram o seu MC, foram entregues 24 (vinte e quatro) MCs no total.

Um MC é muito individual, representa as relações e compreensões conceituais de cada um, mesmo os alunos tendo assistido exatamente as mesmas aulas e explicações, certamente vão expressar seus significados atribuídos de forma diferente, portanto, não existe o mapa certo ou errado, para Moreira (2011) o professor não deve esperar que o aluno apresente o mapa conceitual “correto”. “O que o aluno apresenta é o seu mapa e o importante não é se esse mapa está certo ou não, mas sim se ele dá

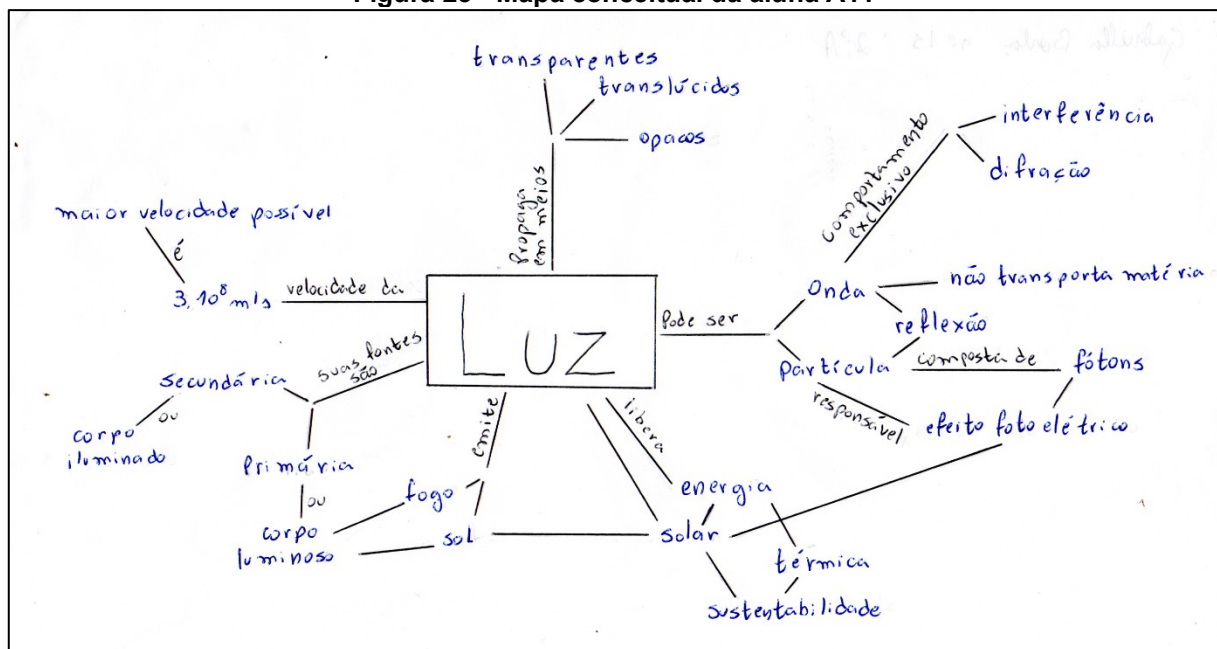
evidências de que o aluno está aprendendo significativamente” (MOREIRA, 2011, p. 133).

Nessa perspectiva, foram analisados os mapas conceituais entregues, constatou-se que apenas um aluno não utiliza os conceitos; partícula e onda em seu MC, os demais utilizaram, em sua primeira hierarquia após a palavra luz, os termos partícula e onda para explicar o que é a luz, dando indícios de uma aprendizagem significativa, ao compreender que a luz tem caráter dual.

Além dos termos que remetem a dualidade da luz, os alunos utilizaram diferentes conceitos, e muitas relações cruzadas utilizando linhas e palavras para conectá-los, formando proposições. Alguns alunos mencionavam aspectos históricos, outros utilizavam como base o primeiro MC feito coletivamente. Alguns conceitos que foram evidenciados nos MCs: Energia, onda eletromagnética, movimento, velocidade, efeito fotoelétrico, experimento da dupla fenda, fótons, sustentabilidade.

Na sequência, alguns MCs feitos pelos alunos, serão discutidos apenas alguns pontos de cada um.

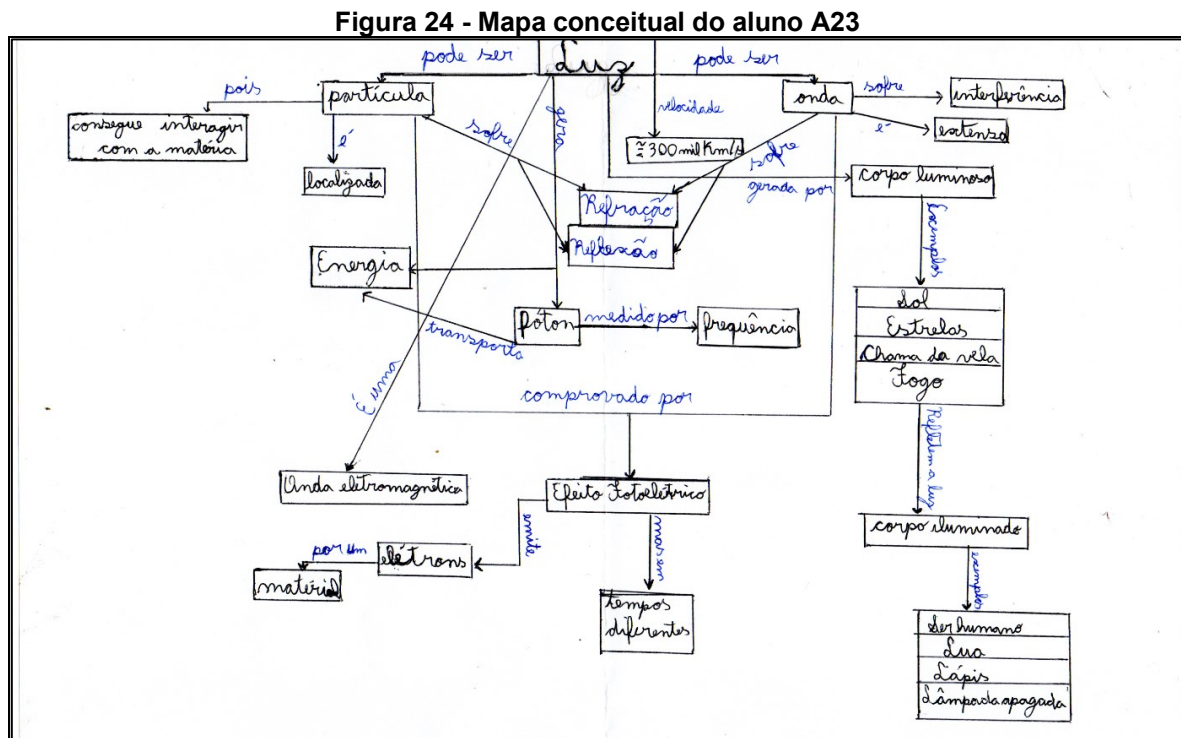
Figura 23 - Mapa conceitual da aluna A11



Fonte: Autoria própria (2021).

O aluno A23 utiliza palavras “*pode ser*” para relacionar onda e partícula com o conceito de luz, para essas ele coloca características de cada uma e relaciona ambas com os fenômenos de reflexão e refração, apresentando relações cruzadas, observou-se que o aluno havia utilizado as palavras “*comprovado por*” e ligou com “*efeito fotoelétrico*”, formando uma proposição tanto com partícula como com onda (Figura 24). Ao ser convidado a explicar seu mapa conceitual, o aluno disse que lembrou-se que Hertz havia feito esse experimento e comprovou que a luz é onda, depois Einstein usou

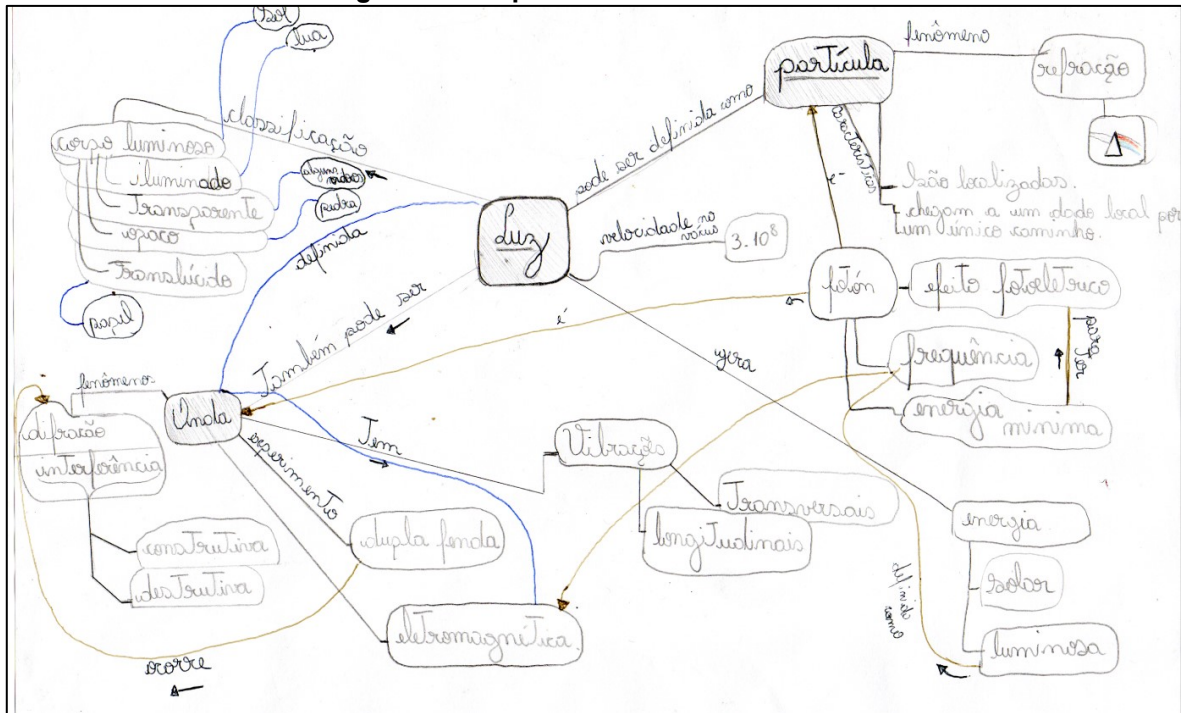
esse experimento para comprovar que a luz é partícula. E nesse ponto o aluno está certo, ocorre que quando Hertz realizou seu experimento, o fenômeno observado de faíscas saindo da placa de metal não foi explicado e nem denominado de efeito fotoelétrico, por isso o aluno forma uma última proposição: “mas em – tempos diferentes”. Esse aluno também relaciona a luz com fóton, que transporta energia, e é medido por sua frequência.



Fonte: Autoria própria (2021).

Além de vários conceitos, as relações cruzadas apresentam indícios de que o aluno A24 compreende que a luz é onda e partícula ao mesmo tempo. Ele relaciona partícula com fóton, que está ligado, com frequência, e essa também se liga com eletromagnética que havia sido conectada a onda, ou seja, o aluno demonstra ter compreendido que o fóton é a partícula que compõem a luz, mas que o mesmo possui frequência que é elemento de onda, e que a luz é uma onda eletromagnética. Outro ponto que atrai a atenção é, a ligação feita entre o fóton, efeito fotoelétrico e energia mínima, formando a proposição: fóton – energia mínima- para ter – efeito fotoelétrico, levando a conclusão de que o fóton necessita de uma energia mínima para promover o efeito fotoelétrico (Figura 25).

Figura 25 - Mapa conceitual do aluno A24



Fonte: Autoria própria (2021).

Notou-se que os alunos conseguiram estruturar melhor o seu mapa conceitual final, pois a partir da construção coletiva feita inicialmente a turma teve uma melhor compreensão de como produzir um MC, a maioria dos alunos fizeram inicialmente uma lista com os conceitos que pretendiam utilizar.

O mapa conceitual é uma ferramenta muito interessante para avaliar o aprendizado dos alunos, uma vez que, os mesmos se expressam de uma forma mais livre, mas ainda é um instrumento pouco utilizado em sala de aula. É necessário que sejam desenvolvidas mais abordagens de conteúdos e avaliações com a utilização desse instrumento para que os alunos se familiarizem com sua elaboração, o que irá enriquecer o processo de ensino e aprendizagem.

4.6 Análise das fichas de avaliação do produto educacional

Ao término da implementação do produto educacional, solicitou-se aos participantes da pesquisa, que respondessem a uma ficha de avaliação do produto educacional (Apêndice B), sem se identificarem, com a finalidade de observar qual foi o nível de aceitação e de aprovação, por parte dos mesmos, à proposta didática para o ensino da natureza dual da luz.

Para cada questão (critério avaliado), os alunos podiam avaliar por meio dos conceitos: péssimo, ruim, bom, ótimo e excelente. Segue dados coletados nas fichas de

avaliação, para que o leitor observe quais foram as impressões dos sujeitos da pesquisa, sobre o material proposto.

Quadro 6 – Avaliação do produto educacional

CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO	péssimo	ruim	bom	ótimo	excelente
Os materiais didáticos utilizados tornaram as aulas mais interessantes?	1	0	5	7	13
Os materiais didáticos utilizados despertaram sua curiosidade pelo conteúdo abordado?	0	0	6	6	14
Os textos utilizados estavam claros, servindo de apoio ao aprendizado?	0	1	6	8	11
Os experimentos demonstrados nas aulas chamaram sua atenção?	0	1	5	3	17
Você conseguiu compreender o funcionamento dos experimentos utilizados?	0	1	6	12	7
A utilização da História da Ciência ajudou a compreender melhor o conteúdo?	0	1	7	7	11
Você considera o vídeo “O julgamento da luz” como um material didático que auxilia no aprendizado do conteúdo?	0	0	9	5	12
Saber como determinado conceito da Física foi desenvolvido dentro do contexto histórico é importante para sua formação?	2	0	4	11	9
Os materiais didáticos utilizados atraíram sua atenção para as explicações sobre o comportamento dual da luz?	0	4	5	6	11
A proposta didática utilizada possibilitou sua compreensão sobre a dualidade da luz?	0	0	9	9	8
Você acha que a utilização de mapa conceitual é uma ferramenta que auxilia no processo de ensino/aprendizagem?	0	3	11	1	11

Fonte: Autoria própria (2021).

É importante que o estudante faça uma auto avaliação de como foi seu comprometimento nas aulas, Moreira (2011) aponta como uma das condições para a aprendizagem significativa, a predisposição do aprendiz para aprender. Assim foram propostas algumas questões para os alunos sobre sua participação na implementação do produto educacional. Segue auto avaliação dos alunos.

Quadro 7 – Auto avaliação dos alunos

AUTO AVALIAÇÃO	péssimo	ruim	bom	ótimo	excelente
Fiz as atividades propostas dentro dos prazos?	2	2	9	7	6
Realizei pesquisas e leituras além do que foi solicitado em sala de aula?	2	6	11	4	3
Fiz anotações das aulas?	3	2	8	4	9
Questionei sempre que tive dúvidas?	2	7	6	3	8

Fonte: Autoria própria (2021).

Além dos conhecimentos prévios e de materiais potencialmente significativos, é necessário também, uma iniciativa por parte de quem deseja adquirir novos

conhecimentos para que estes ganhem significados na estrutura de conhecimento, por isso, essa análise foi importante para que os alunos observassem e avaliassem seu papel e participação nesse processo.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo desse trabalho foi investigar o potencial pedagógico de uma proposta didática para o ensino da dualidade da luz, apoiando-se em materiais que consideramos potencialmente significativos, a fim de percorrer os pressupostos da teoria de Aprendizagem Significativa.

A proposta foi implementada nas aulas de Física em horário normal de aula da turma que compôs os sujeitos da nossa pesquisa, iniciou-se em formato híbrido (*google meet*/presencial) e foi finalizada no formato normal, ou seja, com a participação presencial de todos os alunos. Apesar de as resoluções da SEED (Secretaria Estadual de Educação) exigirem a frequência de todos os alunos, em todas as aulas foram registradas ausências o que é considerado normal em ambiente escolar.

Nesse cenário ocorreu a pesquisa, que teve uma boa aceitação e participação dos estudantes, o que possibilitou verificar a satisfação por parte dos mesmos no questionário aplicado ao fim da implementação do produto educacional.

No processo de coleta de dados, a partir da identificação dos conhecimentos prévios, também denominados subsunçores por Ausubel, foi possível iniciar uma organização desses, utilizando textos considerados organizadores prévios. Assim, esses conhecimentos já existentes na estrutura cognitiva dos alunos serviram de “âncora” para novos conhecimentos.

A utilização de experimentos possibilitou uma abordagem mais dinâmica da dualidade da luz, o que permitiu demonstrar aos alunos, de forma mais concreta, situações em que a luz se comporta como onda e situações que se comporta como partícula. Também foi possível contextualizar a importância da compreensão do efeito fotoelétrico, não só para comprovar o comportamento dual da luz, mas também para o avanço de tecnologias, como o desligamento automático de iluminação pública ao receber luz, entre outros sistemas do dia a dia. Isso permitiu ao aluno identificar e relacionar os conceitos estudados na escola com situações que estão presentes em seu cotidiano. Essas atividades promoveram diferenciação progressiva e reconciliação integradora.

A proposta didática investigada, contemplou ainda, a produção e exibição de um vídeo animado, que abordou a história da dualidade da luz, a partir de um roteiro que trouxe os principais físicos e filósofos e suas concepções a cerca da natureza da luz, permitindo que o aluno percebesse que, para chegarmos aos conceitos estudados em sala de aula, há muita história de erros e acertos, muito tempo de pesquisas,

observações, experimentações e discussões, que nenhum conhecimento é concebido da noite para o dia. Os alunos foram bastante receptivos a essa metodologia e demonstraram curiosidade em conhecer essa retrospectiva histórica. No vídeo novamente ocorreu a explicação da dualidade da luz, por meio das comprovações feitas por Young que descreveu seu experimento, o mesmo que os alunos haviam realizado experimentalmente no módulo anterior, e a explicação do efeito foto elétrico por Einstein que também havia sido demonstrado aos alunos. Dessa forma, os discentes puderam ver a mesma conceituação de uma forma diferente, o que promoveu uma reconciliação integradora.

É possível concluir por meio da pesquisa realizada em diferentes fontes, e pela implementação do nosso produto educacional que, o uso da história da ciência constitui numa metodologia importante para o ensino de Física, tornando-se um facilitador do aprendizado, promovendo uma melhor compreensão do conteúdo ensinado. Mas é preciso manter a atenção, pois essa metodologia não deve ser tomada como única estratégia para ensinar e, sim, como uma ferramenta de apoio na abordagem dos diferentes conteúdos propostos.

E por fim, após análise dos dados coletados por meio de questionários, diário do pesquisador e comparação do mapa conceitual inicial com o mapa conceitual final, realizado individualmente, foi possível observar a presença de conceitos e termos que antes não haviam sido apresentados pelos alunos, bem como trocas de significados e ligações feitas entre diferentes conceitos, o que leva a identificar diferenciação progressiva e reconciliação integradora, dando indícios de uma possível aprendizagem significativa. Com isso, reiteramos que a proposta didática em discussão é considerada um material potencialmente significativo para o ensino da natureza dual da luz, no Ensino Médio.

REFERÊNCIAS

AUSUBEL, D. P. **A aprendizagem significativa: a teoria de David Ausubel**. São Paulo: Moraes, 1982.

AUSUBEL, D. P. **Aquisição e retenção dos conhecimentos: uma perspectiva cognitiva**. Tradução: Lígia Teopisto. Lisboa: Plátano Edições Técnicas, 2003.

BARROS, M. A.; CARVALHO, A. M. P. A História da ciência iluminando o ensino de visão. **Revista Ciência & Educação**, v. 5, n.1, p. 83–94, 1998.

BASSALO, J. M. F. A Crônica da ótica clássica. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**. Florianópolis, v. 3, p. 138-159, 1986.

BASSALO, J. M. F. A Crônica da ótica clássica. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**. Florianópolis, v. 4, n. 3, p. 140-150, 1987

BARTHEM, R. **A Luz: Temas atuais de física**. 1. ed. São Paulo: Editora livraria da física: Sociedade Brasileira de Física, 2005.

BATISTA, M. C.; FUSINATO, P. A.; BLINI, R. B. Reflexões sobre a importância da experimentação no ensino de física. **Acta Scientiarum. Human and Social Sciences**. vol. 1, n.1, p. 43-49. Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2009. Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=307325328006>. Acesso em: 15 nov. 2021.

BATISTA, D. C. **Uma proposta para se ensinar efeito fotoelétrico no ensino médio**. 2016. Dissertação (Mestrado em Ensino de Física) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2016.

BATISTA D. C.; BATISTA, M. C.; FUSINATO, P. A.; SANTOS, O. R. Atividade Experimental para o ensino de física: Efeito fotoelétrico. **Caderno de Física da UEFS**, v. 19, n. 01, p. 1-15, 2021.

BEN-DOV, Y. **Convite à física**. Tradução: Maria Luiza X. de A. Borges. Revisão técnica: Henrique Lins de Barros. Rio de Janeiro: Jorge Zahar Ed., 1996.

BRASIL. **Base Nacional Comum Curricular: Ensino Médio**. Brasília: MEC/Secretaria de Educação Básica, 2018. Disponível em: http://basenacionalcomum.mec.gov.br/images/historico/BNCC_EnsinoMedio_emaiba_site_110518.pdf . Acesso em: 5 mai. 2021.

DOMINGUINI, F. **Experimentos de física em sala de aula com o enfoque na produção e execução autônoma por parte dos alunos**. 2016. Dissertação (Mestrado em Física) - Universidade Federal de Santa Catarina: Araranguá, 2016.

DOURADO, S; RIBEIRO, E. Metodologia qualitativa e quantitativa. *In*: MAGALHÃES JR., C. A. O; BATISTA, M. C. **Metodologia da pesquisa em educação e ensino de ciências**. Maringá: Massoni, 2021.

FEYNMAN, R. P.; LEIGHTON, R. B.; SANDS, M. **Lições de física de Feynman: volume I** [recurso eletrônico]: edição definitiva. Tradução: Adriana Válio Roque da Silva, Kaline Rabelo Coutinho. Dados eletrônicos. Porto Alegre: Bookman, 2008.

FREIRE, P. **Pedagogia da Autonomia: saberes necessários à prática educativa**. 37. Ed. São Paulo: Paz e Terra, 2008.

FONTANA, F.; PEREIRA, A. C. T. Pesquisa Documental. *In*: MAGALHÃES JR., C. A. O.; BATISTA, M. C. **Metodologia da pesquisa em educação e ensino de ciências**. Maringá: Massoni, 2021.

FRANCISCO JR., W. E.; BARROS, A. A. D.; GARCIA, V. M.; OLIVEIRA, C. G. de. Um estudo das analogias sobre o equilíbrio químico nos livros aprovados pelo PNLEM 2007. **Rev. Ensaio**, Belo Horizonte, v.13, n.02, p.85-100, 2011. Disponível em: <https://periodicos.ufmg.br/index.php/ensaio/article/view/34744>. Acesso em: 15 nov. 2021.

GIRCOREANO, J. P.; PACCA, J. L. A. O Ensino da Óptica na Perspectiva de Compreender a Luz e a Visão. *In*: STUDART, Nelson (Org.) **Coleção Explorando o Ensino – Física**. Seleção e Organização, ZYLBERSZTAJN, Arden *et al*, v.7. Brasília: Ministério da Educação, Secretaria da Educação Básica, 2006. p. 59-69.

GOMES, E. C. **Ondas eletromagnéticas: possibilidades da aplicação no ensino médio a partir das relações CTS**. 2017. Dissertação (Mestrado em Educação para a Ciência e a Matemática) - Universidade Estadual de Maringá, Centro de Ciências Exatas, Maringá, 2017.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de física: Volume 4**. Tradução Ronaldo Sérgio de Biasi. 9.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

HAWKING, S. W. **Uma Breve História do Tempo**. Ilustração Ron Miller, tradução Cássio de Arantes Leite. 1. ed. Rio de Janeiro: Intrínseca, 2015.

HOLANDA, A. B. de. **Miniaurélio século XXI escolar: O minidicionário da língua portuguesa**. Coordenação de edição: Margarida dos Anjos, Marina Baird Ferreira; lexicografia: Margarida dos Anjos *et al*. 4. ed. ver. Ampliada. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 2000.

HÜLSENDEGER, M. J. V. C. A História da Ciência no ensino da Termodinâmica: um outro olhar sobre o ensino de Física. **Revista Ensaio Pesquisa em Educação em ciências**, Belo Horizonte. v. 9, n. 2, p. 222-237. jul-dez, 2007. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/epec/a/tXFvMP9zch3M5478fWL4vJM/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 27 ago. 2021.

KUNRATH, R. I. **Estratégias de ensino-aprendizagem na compreensão da dualidade da luz**. 2018. Dissertação (Mestrado em Ensino de Física) - Universidade Tecnológica do Paraná. Medianeira: 2018.

MAGALHÃES JR, C. A. de O.; BATISTA, M. C. (Org.). **Metodologia da pesquisa em educação e ensino de ciência**. 1. ed. Maringá: Massoni, 2021.

MARTINS, R. de A. Introdução: a história das ciências e seus usos na educação. *In book: Estudos de História e Filosofia das Ciências: subsídios para aplicação no*

ensino. Editora Livraria da Física, jan/2006. p.xxi-xxxiv. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/275832971_Introducao_a_historia_das_ciencias_e_seus_usos_na_educacao. Acesso em: 28 ago. 2021.

MARTINS, R. de A.; SILVA, A. P. B. da. Princípios da óptica geométrica e suas exceções: Heron e a reflexão em espelhos. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 35, n. 1, p.1605/1-1605/9, 2013.

MARTINS, R. A.; SILVA, C. C. As pesquisas de Newton sobre a Luz: Uma visão histórica. **Revista Brasileira em Ensino de Física**, v. 37, n. 4, p.4202/1-4202/32, 2015.

MATTAR, J. **Metodologia da pesquisa em educação: abordagens qualitativas, quantitativas e mistas**. São Paulo: Almedina Brasil, 2021. ISBN 9786586618440.

Disponível em:

<https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=edsmib&AN=edsmib.000022112&lang=pt-br&site=eds-live&scope=site>. Acesso em: 18 nov. 2021.

MATTHEWS, M. R. História, Filosofia e Ensino de Ciências: A tendência atual de reaproximação. In: **Caderno Catarinense do Ensino da Física**, Florianópolis, v.12, n.3, p.164-214, 1995. Disponível em:

<https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/7084/6555>. Acesso em: 27 ago. 2021.

MENEZES, L. P. G. de; FELTRIN, B. C.; MARQUEZIN, V. A. N.; BATISTA, M. C. Um olhar científico para o arco-íris. **Revista Pontes**, Paranavaí, v. 6, p. 96-110, 2019.

MONTEIRO, L. P. **Concepções da dualidade da luz onda-partícula para estudantes da 3ª série do Ensino Médio: uma abordagem com “microcontroladores”**. 2017.

Dissertação (Mestrado em Ensino de Física) - Instituto Federal do Espírito Santo: Cariacica, 2017.

MORAES, A. M.; MORAES, I. J. A avaliação conceitual de força e movimento. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, vol. 22, n. 2, Junho, 2000. Disponível em:

http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/v22_232.pdf. Acesso em: 19 nov. 2021.

MOREIRA, M. A. A Teoria de aprendizagem de David Ausubel como sistema de referência para a organização de conteúdo de física. **Revista Brasileira de Física**, vol. 9, n. 1, 1979.

MOREIRA, M. A. **Aprendizagem significativa**. Brasília: Ed. da UnB, 1998.

MOREIRA, M. A. Mapas conceituais e aprendizagem significativa. **Revista Galáico Portuguesa de Sócio-Pedagogia e Sociolinguística**, Pontevedra/Galícia/Espanha e Braga/Portugal, N° 23 a 28: 87-95, 1988. Publicado também em Cadernos do Aplicação, 11(2): 143-156, 1998. Revisado e publicado em espanhol, em 2005, na Revista Chilena de Educação Científica, 4(2): 38-44. Revisado novamente em 2012. Disponível em: <http://moreira.if.ufrgs.br/mapasport.pdf>. Acesso em: 6 nov. 2021.

MOREIRA, M. A. **Aprendizagem significativa: a teoria e textos complementares**. 1. ed. São Paulo: Livraria da Física, 2011.

MOREIRA, M. A. **Teorias de aprendizagem**. 2. Ed. Ampl. – [Reimp.]. São Paulo: E.P.U., 2019.

NOVAK, J. D; GOWIN, B. **Aprender a aprender**. Lisboa: Plátano Edições Técnicas, 1996.

NOVAK, J.D. **Aprender, criar e utilizar o conhecimento. Mapas conceituais como ferramentas de facilitação nas escolas e empresas**. Lisboa, Plátano Edições Técnicas, 2000.

OLIVEIRA, I. S. **Física Moderna** – para iniciados, interessados e aficionados. v.1. São Paulo: Livraria da Física, 2005.

PEÑA, A. O. *et al.* **Mapas conceituais: uma técnica para aprender**. São Paulo: Edições Loyola Jesuítas, 2005.

PARANÁ. Secretaria do Estado da Educação. **Diretrizes Curriculares Estaduais da Educação Básica: Física**. Curitiba, 2008.

PEREIRA, N. V. *et al.* História da física: uma proposta de ensino a partir da evolução de suas ideias. **Research, Society and Development**, v. 4, n. 4, p. 251-269, abr. 2017. Disponível em:
https://www.researchgate.net/publication/327294022_Historia_da_fisica_uma_proposta_de_ensino_a_partir_da_evolucao_de_suas_ideias. Acesso em: 19 nov. 2021.

RIBEIRO, A. R *et al.* Luz: História, Natureza e Aplicações. **Gazeta de Física**, Lisboa, v. 39, n.1/2, p.6-13, jun. 2016. Edição Especial. Disponível em:
<https://www.spf.pt/magazines/GFIS/119>. Acesso em: 28 set. 2020.

ROBILOTTA, M. R. O cinza, o branco e o preto – da relevância da história da ciência no ensino da física. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, v. 5, n. especial, p. 7-22, 1988. Disponível em:
<https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/10071/14902>. Acesso em: 5 dez. 2021.

ROCHA, J. F. M. (Org.) *et al.* **Origens e evolução das idéias da física** [livro eletrônico]. Salvador: EDUFBA, 2011.

ROSA, C. A. P. **História da ciência: o pensamento científico e a ciência no século XIX**. volume II. 2. ed. Brasília: FUNAG, 2012.

ROSA, J. Ondas eletromagnéticas. **Educa mais Brasil**. Disponível em:
<https://www.educamaisbrasil.com.br/enem/fisica/ondas-eletromagneticas>. Acesso em: 3 nov. 2021.

SALVETTI, A. R. **A História da Luz**. 2. ed. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2008.

SILVA, B. V. C. **Controvérsias sobre a natureza da luz: uma aplicação didática**. 2010. Dissertação (Mestrado em Ensino de Ciências Naturais e Matemática) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2010.

SILVA, F. W. O. História da física e ciências afins: A evolução da teoria ondulatória da luz e os livros didáticos. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 29, n. 1, p. 149-159, 2007.

SILVA, M. F. F. S. Esclarecendo o significado de “cor” em física. **Física na Escola**. v. 8, n. 1, 2007. Disponível em: <http://www.sbfisica.org.br/fne/Vol8/Num1/v08n01a06.pdf>. Acesso em: 18 out. 2020.

SILVA, D. C. M. "**Experimento das duas fendas**"; Brasil Escola. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/fisica/experimento-das-duas-fendas.htm>. Acesso em: 3 nov. 2021.

SOUZA, P. F. L. **Pensamento transdisciplinar: uma abordagem para compreensão do princípio da dualidade da luz**. 2009. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências. Universidade Federal Rural de Pernambuco: Recife, 2009. Disponível em: <http://www.tede2.ufrpe.br:8080/tede/handle/tede2/5947>. Acesso em: 20 nov. 2021.

TERRAZZAN, E. A. A inserção da física moderna e contemporânea no ensino de física na escola de 2º grau. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 9, n. 3, p. 209-214, dez. 1992. Disponível em: <https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/7392>. Acesso em: 24 set. 2021.

YOUNG, H. D.; FREEDMAN, R.A. **Física IV**: Sears e Zemansky: ótica e física moderna. Colaborador: A. Lewis Ford. Tradução: Daniel Vieira. Revisão técnica: Adir Moisés Luiz. 14. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2016.

APÊNDICE A - Roteiro para o vídeo “O julgamento da luz”

ROTEIRO PARA O VÍDEO “O JULGAMENTO DA LUZ”

Juiz: - Dou início à sessão de julgamento da Luz, cuja natureza é indefinida, e na presente data vamos levá-la a julgamento popular, para que seja determinada sua natureza de forma definitiva. Que entre a ré. Convido o defensor da natureza ondulatória da Luz, sr. Aristóteles de Estagira, filósofo grego, que viveu entre os anos de 384 a 322 a.C.

Vozes:- (óóóóó)

Juiz:- E o defensor da natureza corpuscular da Luz, sr. Pitágoras, filósofo, astrônomo, matemático e músico grego, viveu em torno dos anos de 580 a 500 a.C.

Vozes: óóóóó

Juiz: - Sr. Aristóteles, pronuncie sua defesa.

Aristóteles: - Afirmo que a luz é um fluido imaterial, que causa vibração em um determinado meio transparente, de forma análoga ao som.

Juiz: - Sr. Pitágoras, pronuncie sua defesa.

Pitágoras: - Afirmo que a luz é um fluxo de corpúsculos que saem do objeto, se propagam em linha reta e bombardeiam os olhos, fazendo com que o objeto seja visto.

Juiz: - Sr. Pitágoras, o senhor defende que a luz é composta por partículas, fale mais a respeito dessa conjectura.

Pitágoras: - Estou aqui para defender a posição na qual fui um dos predecessores, porém, ao decorrer deste julgamento pretendo expor um novo conceito, muito mais interessante e convincente, mas é necessário que eu refaça toda a trajetória histórica até chegar a essa conclusão, que foi proposta muito depois de minha morte. Na antiguidade, não tínhamos a visão que se tem hoje, muito menos todo esse conhecimento. Então quando tentamos definir a natureza da luz, nem se quer sabíamos o que era o átomo ao certo, não como vocês o conhecem hoje com toda a sua composição. Busquei explicar a luz porque queria explicar a visão, como acontece, por que conseguimos ver. Então naquele período me parecia natural que a luz fosse um fluxo de partículas que bombardeavam nossos olhos nos fazendo ver, cheguei a sugerir que esses raios de luz agem como tateadores que propagam em linha reta. Naquela época os filósofos, ocupavam-se em compreender em que sentido tais raios de luz se propagavam, e havia muitas divisões sobre isso, a grande maioria concordava que a luz viajava em linha reta. Mas para o colega Homero, que viveu muito antes de mim, por volta do século VIII a.C., a luz era composta por corpúsculos que iam da direção dos olhos ao objeto, era algo que saía da pessoa, (risos) parecido com o super man (risos) e

chamavam de raio visual, tinha os que pensavam que a luz ia do objeto em direção aos olhos, e Platão, ainda não falei dele, também era filósofo grego, viveu entre os anos de 428 a 348 a.C., eu já havia partido dessa. Esse foi mais engenhoso, ele acreditava que a visão se dava pela combinação de três jatos de luz, um que vai do olho da pessoa ao objeto, outro que vai de uma fonte iluminadora ao objeto, e o terceiro jato que segue do objeto ao olho da pessoa.

Juiz: - Senhor Aristóteles, o que tem a falar sobre o que o senhor Pitágoras acabou de dizer, já que o senhor é inimigo e quis derrubar essas teorias.

Aristóteles: - Meritíssimo, o senhor está muito equivocado, inimigos? derrubar? muitas vezes a história da Ciência acaba trazendo essa impressão, de que vivíamos na guerra do saber, nem todos os episódios da história foram assim. Por exemplo, eu fui discípulo de Platão, que compreendia a luz como partículas, concordava com muitas de suas teorias, porém não achava que a luz fosse como ele descrevia, e isso não me faz inimigo nem dele, nem de Pitágoras, a ciência foi feita através de pensamentos diferentes, um acrescentando à teoria do outro, ou a refutando, mas não vivíamos como se fosse uma guerra tentando derrubar o outro, apenas queríamos provar o que acreditávamos que era o certo. Nem sequer existia o prêmio Nobel da física.

Juiz: - Então fale da sua teoria ondulatória da luz.

Aristóteles: - (risos) Bom se fosse, realmente parece que fui um dos primeiros a pensar que a luz se comportava como o som, vamos concordar que a teoria de minúsculos corpúsculos, é bem estranha né. Eu lhes pergunto: Se a visão fosse como uma luminária, que sai dos olhos por que não é possível ver no escuro? Como um raio visual vai chegar até as estrelas e fundir a luz dos olhos com a luz das estrelas? Os senhores jurados devem concordar que não faz sentido. Portanto afirmo que um objeto que é luminoso, faz vibrar um meio transparente, que chamei de diáfano, e esse provoca os humores que entram nos olhos das pessoas.

Juiz: Então essa é a famosa teoria ondulatória da luz?

Aristóteles: - Claro que não, como vos falei, quem me dera, eu apenas tive ideias diferentes, relacionando a luz ao que hoje é chamado onda, mas naquele tempo, nem se quer conhecia os gases, para dizer que ela propagava no ar, no vácuo então? ainda tinha muito por vir... E vou lhe mostrar nesse julgamento. Eu ainda acreditava que a velocidade da luz era infinita, vejam os senhores!

Juiz: - Sr. Aristóteles pode convocar sua primeira testemunha, vamos chamar as testemunhas de acordo com a cronologia histórica.

Aristóteles: - Então vou convidar o físico e astrônomo holandês Christian Huygens, que em 1678 defendeu a teoria ondulatória da luz em seu livro “Tratado sobre a luz”.

Juiz: - Muito bem senhor Huygens o que tem a dizer sobre a natureza da luz? ou melhor, o que o senhor disse lá pelo ano de 1678.

Huygens: - Bem, eu analisei muito para chegar às minhas conclusões, e tenho certeza que a luz consiste no movimento de uma espécie de matéria. É muito fácil de perceber como a luz comporta-se de forma análoga ao som, não há dúvidas de que a luz chega até nossos olhos por causa do movimento causado no meio presente entre nós e o objeto que olhamos.

Juiz: - Pitágoras, o senhor quer fazer algum questionamento?

Pitágoras: - Gostaria que o sr. Huygens explicasse melhor como essas ondas de luz chegam aos olhos, se é que o sr. tem uma explicação para isso!

Huygens: - Muito simples, colega, na minha teoria, o meio pelo qual a luz se propaga seria o éter, “um meio luminoso, que penetrava os poros de todos os corpos e enchia todo o espaço, meio este com características tais que explicassem a grande velocidade da luz” [3]. Vou explicar como acontece essa propagação de ondas, que antes eu pensava que era longitudinal. “Os pontos de uma frente de onda devem ser considerados como fontes para novas ondas.”

Juiz: - Sr. Pitágoras, pode chamar sua testemunha.

Pitágoras: - Convido minha testemunha, que também defende que a luz é formada por corpúsculos, e como ele sempre teve grande prestígio na comunidade científica, e já conseguiu convencer os pensadores e estudiosos dos séculos XVII e XVIII, então vai convencer o júri aqui presente também. Minha testemunha, o físico e matemático inglês Sir Isaac Newton que viveu entre os anos de 1642 e 1727.

Juiz: - Sir Isaac Newton, o que tem a dizer sobre a natureza da luz?

Newton: - Afirmando aqui que luz é formada por corpúsculos que vamos comparar com pequenas bolinhas, e essas bolinhas tem velocidade e posições bem definidas, eu fiz um experimento com um prisma triangular de vidro e mostrei que a luz branca que incide no prisma ao refratar é dividida em cores e cada grupo desses corpúsculos corresponde a uma cor. Portanto a luz é formada por raios, compostos por corpúsculos que viajam em linha reta e não como ondas. Para mim a propagação em linha reta da luz não era compatível com uma teoria ondulatória. Antes mesmo do senhor Huygens sair em defesa da teoria ondulatória da luz, eu já havia me deparado com as ideias de Robert Hooke, que estava a me contrariar sobre a luz ser corpuscular.

³ ROCHA, *et al.*, 2011, p.297.

Huygens: - É verdade sir Isaac Newton, a história conta que o senhor se escapava dos conflitos com Hooke pois ele tinha um cargo de presidente da Royal Society. Não o afrontava em suas obras, mas no seu livro III de Óptica, que foi publicado após a morte de Hooke, o senhor o fez.

Juiz: - O que constava nessa obra, senhor Newton?

Newton: - Ora, nessa obra propus algumas questões. Uma delas é: “Se a luz consiste apenas em pressão propagada sem movimento real, ela não seria capaz de agitar e aquecer os corpos que a refratam e refletem”.^[4]

Juiz: - Então vamos entender melhor, Huygens criou o modelo ondulatório da luz e Newton o modelo corpuscular, que serão postos em julgamento.

Pitágoras: - Vamos tomar cuidado com os termos. Estamos atravessando uma revisão de como as teorias chegaram até o presente momento, porém muitos estudiosos contribuíram para a definição dos modelos atuais, então o sr. Huygens defendia o comportamento da luz como onda, porém não se tinha sequer os elementos atuais do estudo de ondulatória, como comprimento de ondas, frequência e outros. Já meu colega Newton concebia a luz como pequenos corpúsculos, mas nem imaginava a composição atômica atual. Então vamos imaginar que tanto esses dois como Aristóteles e eu, fomos predecessores, mas a teoria ainda estava a engatinhar dentro das nossas concepções.

Juiz: - Entendi. Então vamos prosseguir. Consta aqui nos autos do processo, que o astrônomo e físico François Arago, disse em 1838, que a determinação da velocidade de propagação da luz na água e no ar seria um fator determinante para o impasse entre as teorias defendidas por Huygens e por Newton. Qual sua posição referente a essa velocidade, senhor Huygens?

Huygens: - Eu afirmo que em meios mais densos a velocidade é menor, ou seja, na água a velocidade da luz é menor do que no ar.

Juiz: - E o senhor, o que me diz, Newton?

Newton: - Digo que a velocidade da luz é maior quanto mais denso o meio em que se propaga, ou seja, na água a velocidade da luz é maior do que no ar.

Juiz: - Senhor Aristóteles formule sua defesa para a natureza da luz, de acordo com os estudos propostos até o fim do século XVII.

Aristóteles: - Não é possível explicar as faixas claras e escuras de difração com a teoria corpuscular de Newton.

Juiz: - Fale mais sobre essas faixas, senhor Aristóteles.

⁴ NEWTON, 2002, p. 271 apud SILVA, 2010, p. 53

Aristóteles: - Na propagação retilínea da luz, um obstáculo entre uma fonte luminosa e uma parede, por exemplo, deveria ocasionar uma sombra com contornos bem nítidos, mas, logo nas primeiras experiências verificou-se a ocorrência de faixas claras e faixas escuras na região que devia estar iluminada, como o previsto. E Francesco Maria Grimaldi, denominou essas falhas, referente às faixas claras e escuras observadas na sombra, de difração. E isso é um fenômeno comum nas ondas.

Pitágoras: - Ora senhores! e como podem explicar que a luz se propague em linha reta, sendo uma onda?

Juiz: - Me parece que até o fim do século XVIII, as duas teorias tinham defesas consistentes, mas também apresentavam algumas questões sem solução, que é o caso das franjas de difração para a teoria corpuscular e a propagação retilínea para a teoria ondulatória. Assim ao fim do século XVIII vence o modelo corpuscular, defendido aqui por Newton, em parte, devido a influência que ele tinha no meio científico. Vamos passar para a segunda etapa desse julgamento, utilizando nas suas defesas, os estudos do século XIX.

Huygens: - Agora que esse julgamento vai começar a ficar bom...

Aristóteles: - Vou convidar o físico britânico Thomas Young, esse cara vai provar de vez que a luz é uma onda.

Young: - Já nos primeiros anos do século XIX eu realizei o experimento da fenda dupla, para não deixar dúvidas aos senhores, de que ocorriam as franjas de difração, aquelas faixas claras e escuras, que só podiam ser explicadas pelo comportamento ondulatório da luz. Assim comprovei o comportamento ondulatório da luz, pois difração é comportamento de onda. E ainda, deixo-lhes uma pergunta, como poderíamos somar luz em forma de partículas e obter escuridão?

Aristóteles: - É bem verdade, com esse experimento nosso amigo Young, colocou em dúvida o modelo defendido por Newton.

Juiz: - Vamos retomar as discussões sobre a velocidade da luz, parece que ocorreram novidades sobre essa característica, no século XIX.

Huygens: - Sim, no século XIX, conseguiram medir a velocidade da luz, este feito deve-se a Bertrand Léon Foucault, que em 1850, verificou que a luz se propaga com velocidade maior no ar do que na água.

Aristóteles: - Comprovou-se o que afirmavam os defensores do modelo ondulatório. Ficou provado que Newton estava errado, pois pensava o contrário sobre a velocidade de propagação da luz. Vitória do modelo ondulatório!

Juiz: - Realmente me parece que na segunda metade do século XIX o modelo ondulatório prevaleceu. Mas ainda não é o fim desse julgamento. Parece que houve uma grande mudança no conceito ondulatório da luz, já na segunda metade do século XIX. Um as afirmações feitas pelo escocês James Clerk Maxwell balançaram o meio científico. O que os senhores podem dizer a respeito disso?

Huygens: - Ah é verdade, o senhor Maxwell verificou que a velocidade das ondas eletromagnéticas coincidia com a velocidade da luz, logo a luz também deveria ser uma onda eletromagnética, até então os defensores da teoria ondulatória viam a luz como uma onda mecânica, a onda eletromagnética é uma combinação de campo elétrico e campo magnético, mas não vou detalhar aqui.

Aristóteles: - Acrescento a descoberta do senhor Maxwell na minha defesa da teoria ondulatória.

Juiz: - E as descobertas feitas pelo físico alemão Heinrich Rudolf Hertz em 1886, também fazem parte da defesa da teoria ondulatória?

Aristóteles: - Sim meritíssimo. Hertz “[...]utilizando um detector e um oscilador que construíra, foi capaz de produzir ondas eletromagnéticas de comprimento suficientemente curtas para estudá-las em laboratório. Sua conclusão seria a de que as propriedades das ondas eram similares às da luz, o que o levou a concluir que as ondas de luz eram radiações eletromagnéticas, segundo as equações de Maxwell^[5]. E assim confirmamos a natureza ondulatória da luz, nessa nova concepção de ondas eletromagnéticas.

Pitágoras: - Protesto! A defesa da natureza corpuscular acrescenta a teoria do senhor Hertz nos autos. Ele realizou o efeito fotoelétrico nesse experimento, o sr. Aristóteles não mencionou essa parte, ora, bem oportuno né?

Juiz: - Vocês estão me confundindo, como assim o experimento do senhor Hertz será utilizado pelas duas teorias?

Pitágoras: - Calma meritíssimo, vou pedir que o senhor Newton explique como esse experimento comprova o modelo corpuscular da luz, mesmo que o senhor Hertz não tenha se dado conta disso no momento.

Newton: - “Hertz deparou-se com aquilo que viria a ser o segundo tempo da teoria corpuscular. Ele notou que, quando a luz ultravioleta iluminava o terminal negativo, as faíscas surgiam mais facilmente” ^[6]. Hertz confirmou a natureza eletromagnética da luz, e verificou um novo comportamento da luz, em que ao incidir raios de luz ultravioleta

⁵ ROSA, 2012. p. 137

⁶ BARTHEM, 2005, p. 38

sobre uma chapa metálica percebeu que essa emitia faíscas, retomando a possibilidade de natureza corpuscular da luz. Mais tarde esse fenômeno foi denominado efeito fotoelétrico, que acontece quando uma placa de metal é atingida por radiações eletromagnéticas e tem elétrons retirados da superfície, esse efeito não era explicável no modelo ondulatório da luz abalando toda a estrutura da física clássica.

Pitágoras: - Exatamente! e é aí que a teoria corpuscular do nosso amigo Newton e anteriormente minha, renasce das cinzas... Bem repaginada, é claro!

Juiz: - Como assim, bem repaginada? Seja claro, senhor.

Newton: - Vou explicar. Já adentrávamos o século XX, a teoria ondulatória parecia ser a melhor explicação para a natureza da luz. Mas vejam só, a física não caminhava a desenvolver-se apenas na ótica e na natureza da luz, surgiam muitos outros estudos, ramos e grandes personalidades iam destacando-se, já pensavam até que tudo havia sido explicado na natureza, que havia apenas algumas “nuvens” como a explicação da radiação do corpo escuro, ora e o que isso tem a ver? Bem, vou ser breve, um corpo escuro ideal é desprovido de cores e, portanto, absorve toda a luz que recebe, então lá no campo da termodinâmica, estudavam que este corpo absorvia a irradiação, a convertia em energia térmica, se aquecia, e passava a emitir radiação, então ele não refletia, mas emitia. E em 1859, Gustav Kirchhoff afirmou que a radiação de um corpo negro depende apenas da sua temperatura e não do material que é composto. Bem, se essas ondas eletromagnéticas da radiação dependem da temperatura, logo quanto mais se elevar a temperatura do corpo negro, qualquer corpo superaquecido emitiria radiação com frequência elevada, e conseqüentemente emitiria energia tendendo ao infinito, conforme fosse aquecido.

Pitágoras: - Sim, sim, é a catástrofe do ultravioleta.

Juiz: - Catástrofe do ultravioleta? Me explique isso.

Pitágoras: É que no espectro eletromagnético existem regiões invisíveis e visíveis, de acordo com o comprimento de onda e frequência correspondente, as medidas localizadas na região do visível correspondem às cores, assim relacionando ao comprimento de onda vamos da cor vermelha ao violeta conforme diminui o comprimento de onda, e se o corpo negro tem temperatura elevada, seu comprimento de onda fica menor, sua frequência e energia radiante ficam maiores, ou seja tendem ao infinito, o que é um absurdo. Então, aplicando a teoria clássica do eletromagnetismo, isso era inexplicável.

Juiz: - Nossa! Isso é realmente inexplicável.

Newton: - Só é inexplicável dentro da física clássica, mas é possível compreender e impedir a catástrofe dentro da física quântica. Vou citar o físico que deu início à essas novas ideias, Max Karl Ernest Ludwig Planck, este alemão, tentava resolver o problema da radiação dos corpos negros, eis que ele fez uns arranjos matemáticos a fim de evitar a tal “catástrofe”. Planck concluiu que a energia não poderia ser contínua, como se acreditava, então elaborou a hipótese, que seria o início da teoria quântica, enunciada alguns anos depois. Ele “sugeriu, em 1900, que a luz, os raios X e outras ondas não podiam ser emitidos a uma taxa arbitrária, mas apenas em certos pacotes, que ele chamou de quanta. Além do mais, cada quantum tinha um montante de energia que aumentava quanto maior fosse a frequência das ondas, de modo que, a uma frequência elevada o bastante, a emissão de um único quantum emitiria mais energia do que havia disponível. Desse modo, a radiação em altas frequências seria reduzida e a taxa em que o corpo perde energia seria finita” [7].

Pitágoras: - Quero convidar agora para o grande desfecho da teoria corpuscular, nosso querido amigo o físico Albert Einstein.

Juiz: - Sr. Einstein, o que nos diz sobre esses tais pacotes?

Einstein: - Bem, por volta de 1905, na época eu ainda não era conhecido, trabalhava num escritório de patentes, retomei a teoria de Planck, que havia sido deixada de lado, e abordou o caráter da luz propondo que seria partículas luminosas, mais tarde denominadas fótons. O modelo que propus apresenta a quantização da luz, em que a luz é composta por fótons (quanta de energia), cada fóton é um conjunto de determinada quantidade de energia definida, comumente chamado de “pacote” que tem a velocidade da luz, o fóton é formado por quantum de luz e a sua energia é proporcional a sua frequência. Enfim, eu consegui explicar “o efeito fotoelétrico, partindo da hipótese de Planck, e afirmando que, ao invés de imaginar a luz como uma onda de energia discreta, era mais conveniente imaginá-la como formada por partículas” [8].

Pitágoras: - E assim, consagramos o modelo corpuscular novamente. E aí está o porquê de eu dizer o modelo bem repaginado!!! Apesar de reconhecer a luz como partículas, é algo totalmente diferente do que tínhamos imaginado.

Juiz: - Deixa eu ver se entendi. Então o sr. Einstein juntou aquelas faíscas observadas por Hertz, chamado atualmente de efeito fotoelétrico, com a explicação de Planck para a radiação do corpo negro, e determinou a natureza da luz?

⁷ HAWKING, 2015, p. 76

⁸ ROCHA *et al.*, 2011, p. 401

Einstein: - Não foi só isso, dei início à física quântica, um grande avanço na física e nas tecnologias, influenciando diversos ramos, mas nem vou começar a detalhar, senão vamos perder o foco aqui.

Pitágoras: - Então senhor juiz, é óbvio que depois desse ano de 1905, o “ano miraculoso”, a teoria corpuscular da luz se consagrou. Pode encerrar o caso, a luz é corpúsculo, mesmo que em pacotes, os fótons, kkkkk.

Huygens: - Vamos com calma aí senhores...Tenho certeza que ela é onda, e a explicação e cálculos feitos por Maxwell? Vocês vão ignorar? E a dupla fenda de Young? Não ficou claro as franjas de interferência, que é próprio do comportamento ondulatório?

Juiz: - Bem... Está difícil mesmo me posicionar...

Einstein: - Esperem, quero deixara minha conclusão. Estive pensando, essa comprovação feita por mim, acaba levando a uma nova possibilidade, porque não, o caráter dual da luz? Afirmei em 1924, “que havia duas teorias para a luz, ambas indispensáveis, porém sem qualquer conexão lógica” ^[9]. Não é possível abandonar o caráter ondulatório da luz, ficou comprovado que a luz é uma radiação eletromagnética e se comporta como onda e também só podemos explicar a radiação do corpo negro pensando na luz como partícula. Assim ficamos diante de um sério dilema, mas por que limitar algo tão grandioso em uma coisa ou outra? Por que não aceitamos que ela é, e sempre foi as duas coisas? Por que não onda-partícula? Nada podemos fazer para que a luz não se comporte das duas maneiras.

Juiz: - O que me dizem?

Aristóteles: - Bem, se ainda considera o aspecto ondulatório, por mim tudo bem.

Pitágoras: - Me parece justo também, já que não consigo provar que ela não é onda, mas aceitam que tem comportamento de partículas, está ótimo.

Juiz: - Então declaro que, diante do advento da física quântica, a luz assume natureza dual. Podendo comportar-se como onda e partícula ao mesmo tempo. Ficando assim encerrado definitivamente esse caso sobre a natureza da luz, reconhecida nesse júri como onda-partícula.

Luz: - Talvez ainda não tenha acabado!

⁹ ROCHA *et al.*, 2011, p. 403

REFERÊNCIAS

BARTHEM, R. **A Luz: Temas Atuais de Física**. 1. ed. São Paulo: Editora Livraria da Física: Sociedade Brasileira de Física, 2005.

HAWKING, S. W. **Uma Breve História do Tempo**. Ilustração Ron Miller, tradução Cássio de Arantes Leite. 1. ed. Rio de Janeiro: Intrínseca, 2015.

ROSA, C. A. P. **História da ciência: o pensamento científico e a ciência no século XIX**. volume II. 2. ed. Brasília: FUNAG, 2012.

ROCHA, J. F. M. (Org.), *et al.* **Origens e evolução das idéias da física** [livro eletrônico]. Salvador: EDUFBA, 2011.

SILVA, B. V. C. **Controvérsias sobre a natureza da luz: uma aplicação didática**. 2010. Dissertação (Mestrado em Ensino de Ciências Naturais e Matemática) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2010.

APÊNDICE B – Ficha de avaliação do produto educacional

FICHA DE AVALIAÇÃO DO PRODUTO EDUCACIONAL
UMA PROPOSTA DIDÁTICA PARA O ENSINO DA NATUREZA DUAL DA LUZ

Caro/cara estudante, solicitamos que responda com sinceridade às questões a seguir; é muito importante para nossa pesquisa que você leia atentamente e reflita sobre cada ponto questionado. Não se preocupe, esse formulário não será utilizado para sua avaliação trimestral e por isso não é necessário que você se identifique.

CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO		péssimo	ruim	bom	ótimo	excelente
1	Os materiais didáticos utilizados tornaram as aulas mais interessantes?					
2	Os materiais didáticos utilizados despertaram sua curiosidade pelo conteúdo abordado?					
3	Os textos utilizados estavam claros, servindo de apoio ao aprendizado?					
4	Os experimentos demonstrados nas aulas chamaram sua atenção?					
5	Você conseguiu compreender o funcionamento dos experimentos utilizados?					
6	A utilização da História da Ciência ajudou a compreender melhor o conteúdo?					
7	Você considera o vídeo "O julgamento da luz" como um material didático que auxilia no aprendizado do conteúdo?					
8	Saber como determinado conceito da Física foi desenvolvido dentro do contexto histórico é importante para sua formação?					
9	Os materiais didáticos utilizados atraíram sua atenção para as explicações sobre o comportamento dual da luz?					
10	A proposta didática utilizada possibilitou sua compreensão sobre a dualidade da luz?					
11	Você acha que a utilização de mapa conceitual é uma ferramenta que auxilia no processo de ensino/aprendizagem?					
AUTO AVALIAÇÃO						
1	Fiz as atividades propostas dentro dos prazos?					
2	Realizei pesquisas e leituras além do que foi solicitado em sala de aula?					
3	Fiz anotações das aulas?					
4	Questionei sempre que tive dúvidas?					

Espaço reservado para sugestões, críticas e/ou elogios:

APÊNDICE C – Produto Educacional

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

ELIANE KOVALEK SCHEIFER

UMA PROPOSTA DIDÁTICA PARA O ENSINO DA NATUREZA DUAL DA LUZ

CAMPO MOURÃO

2022

ELIANE KOVALEK SCHEIFER

PRODUTO EDUCACIONAL

UMA PROPOSTA DIDÁTICA PARA O ENSINO DA NATUREZA DUAL DA LUZ

Dissertação apresentada como requisito para obtenção do título de Mestre em Ensino de Física do Programa de Mestrado Profissional de Ensino de Física – Polo 32 (MNPEF) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Dr. Oscar Rodrigues dos Santos.

Coorientadora: Dr^a. Débora Ferreira da Silva

CAMPO MOURÃO

2022



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

APRESENTAÇÃO

Caro Professor,

A luz é um ente presente em nossa vida desde nosso primeiro instante de vida, fazendo com que todos formem concepções intuitivas sobre o que é a luz, é importante uma discussão apropriada sobre as perspectivas científicas e as implicações das mesmas no cotidiano do aluno, uma vez que o ensino de Física deve formar o cidadão para que o mesmo compreenda os fenômenos do universo que o cerca e o desenvolvimento dos conhecimentos científicos bem como sua não-neutralidade.

A compreensão do comportamento dual da luz é um marco para a Física Moderna, e pensamos que seja possível realizar uma abordagem mais envolvente ao ensinar sobre a luz aos alunos da segunda série do Ensino Médio.

Apresentamos aqui, uma proposta didática para o ensino da natureza dual da luz, o roteiro a seguir conta com textos que vão auxiliar o aluno a ativar seus conhecimentos prévios sobre a natureza da luz, a produção e aplicação de dois experimentos feitos com materiais de baixo custo, o primeiro com o objetivo de demonstrar o comportamento ondulatório da luz, lembrando o experimento da dupla fenda realizado por Young, e o segundo com a finalidade de simular o comportamento corpuscular da luz constatado no efeito fotoelétrico, dando destaque à situação que ocorre com a iluminação pública, ao acender e apagar as luzes sem interferência humana. Essas atividades experimentais serão propostas com a intenção de tornar os conhecimentos apresentados mais concretos, possibilitando ao aluno compreender as conclusões obtidas por físicos e seus impactos na sociedade, percebendo que os fenômenos estudados estão presentes no seu cotidiano.

A proposta contempla ainda, o link de acesso a um vídeo, intitulado “O Julgamento da Luz”, em que os personagens são os principais filósofos e físicos que contribuíram para os estudos sobre a natureza da luz ao longo dos anos. No roteiro desse julgamento os personagens descrevem seus pensamentos e sua compreensão acerca do que é a luz. A proposta do vídeo a ser exibido aos alunos tem a intenção de atrair a atenção dos mesmos para a história da ciência, mostrando que todo conhecimento científico é solidificado a partir de hipóteses e comprovações, que mesmo as teorias já refutadas são de grande importância para a construção do conhecimento e devem ser apreciadas e valorizadas, não como anedotas, mas sim como importante passo para a construção do conhecimento.

A elaboração das atividades foi pautada na Aprendizagem Significativa, que possui termos e concepções que serão explicitados módulo a módulo dentro do roteiro, auxiliando o professor a compreender a estratégia metodológica utilizada. A presente proposta foi organizada estimando uma duração de seis aulas, mas naturalmente, cada professor deve fazer as adequações que julgar necessárias para a utilização da mesma.

Organização da Proposta Didática

MÓDULO 1	IDENTIFICANDO OS SUBSUÇORES	✓ Mapa conceitual e questões sobre a luz, para identificar os conhecimentos prévios presentes na estrutura de conhecimentos dos alunos.
MÓDULO 2	ORGANIZADOR PRÉVIO DO TIPO COMPARATIVO - I	✓ Leitura e discussão do texto “A carta e o e mail” em que é feita uma analogia com partícula e onda respectivamente, com objetivo de estabelecer uma “âncora” para o novo conhecimento. Nessa aula o professor deve relembrar principais características e comportamento de ondas e partículas.
MÓDULO 3	ORGANIZADOR PRÉVIO DO TIPO COMPARATIVO - II	✓ Leitura e discussão dos textos “Arco-íris” e “Periscópio”, o primeiro aborda a formação do arco-íris e o segundo fala sobre o instrumento óptico denominado periscópio. A intenção de se explorar esses textos é levar o aluno a perceber que ambos são possíveis devido a presença de luz. Espera-se que o aluno já conheça o fenômeno do arco-íris e já tenha visto em filmes ou outros recursos, o periscópio, assim são objetos de estudo familiares ao aluno, possibilitando a integração e discriminação de novas informações e conceitos.
MÓDULO 4	MATERIAL POTENCIALMENTE SIGNIFICATIVO - I	✓ Experimento 1: Dupla fenda. ✓ Experimento 2: Simulando a iluminação pública. ✓ Explicação sobre a difração da luz e sobre o Efeito fotoelétrico.
MÓDULO 5	MATERIAL POTENCIALMENTE SIGNIFICATIVO - II	✓ Apreciação do vídeo “O julgamento da luz”. ✓ Socialização oral sobre o vídeo. ✓ Questões para verificar a compreensão dos alunos sobre o exposto no vídeo
MÓDULO 6	AVALIAÇÃO	✓ Elaboração de mapa conceitual individual pelos alunos.

Fonte: Autoria própria (2021)

MÓDULO 1

IDENTIFICANDO OS SUBSUNÇORES

OBJETIVOS

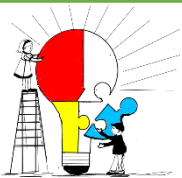
- ✓ Utilizar mapa conceitual para identificar os subsunçores presentes na estrutura de conhecimentos dos alunos.
- ✓ Aplicar questionário introdutório para diagnosticar conhecimentos prévios.

ENCAMINHAMENTO METODOLÓGICO

Solicitar aos alunos a realização individual de um mapa conceitual sobre a **LUZ**. Disponibilizar o tempo necessário para que realizem a atividade, e na sequência, pedir que respondam o questionário introdutório.

AVALIAÇÃO

Com essa atividade é possível verificar qual a compreensão que os alunos têm sobre a luz, todos devem ter algum conceito que lhe seja significativo sobre a luz, uma vez que é um ente presente no dia a dia de todos. O professor deve analisar os mapas traçados pelos alunos, solicitando que os mesmos descrevam os significados das relações entre os conceitos, quando julgar necessário, e por meio do questionário será possível, observar o que o aluno sabe sobre: luz, partículas, ondas e fótons.



SAIBA MAIS...

Sobre Aprendizagem Significativa

SUBSUNÇOR

O subsunçor é o conhecimento base, necessário para que o aluno consiga compreender um novo conteúdo, é importante que o professor saiba quais subsunçores são essenciais para que ocorra o conhecimento que está propondo e verifique em qual grau eles estão presentes na estrutura cognitiva do aluno.

“Subsunçores seriam, então, conhecimentos prévios especificamente relevantes para a aprendizagem de outros conhecimentos” (MOREIRA, 2011, p. 28).

“... o fator isolado mais importante que influencia a aprendizagem é aquilo que o aluno já sabe; descubra isso e ensine-o de acordo” (AUSUBEL, 1968, 1978, 1980, 2000 apud MOREIRA, 2019, p. 171).

MAPA CONCEITUAL

O mapa conceitual é um diagrama que propõe relações entre conceitos ou palavras que representam um conceito, e de uma forma muito simples consegue contemplar as principais informações sobre determinado assunto/conteúdo, sendo traçado de forma a relacionar significados utilizando linhas ou setas, com uma ou duas palavras-chave escrita(s) sobre a linha ou seta, tornando clara, a relação entre os conceitos/palavras.

“O importante é que o mapa seja um instrumento capaz de evidenciar significados atribuídos a conceitos e relações entre conceitos no contexto de um corpo de conhecimentos, de uma disciplina, de uma matéria de ensino” (MOREIRA, 2011, p. 126-127).

MÓDULO 1

MATERIAL PARA O PROFESSOR

Como elaborar um mapa conceitual

1- Identifique o conceito-chave do conteúdo que vai mapear. Coloque-o em uma forma na parte superior do mapa.

2 - Faça uma lista de conceitos relacionados ao tópico principal. Limite entre 6 e 10 o número de conceitos.

3 - Vá adicionando ao mapa os conceitos da lista, os mais gerais ficam no topo do mapa. Adicione os conceitos de forma gradual até completá-lo.

4 - Conecte os conceitos com setas ou com linhas e preposições, mostrando o sentido da relação. No entanto, o uso de muitas setas acaba por transformar o mapa conceitual em um diagrama de fluxo.

5 - Nem toda ligação precisa ser de cima para baixo, você pode criar conexões cruzadas, com setas ou linhas em todas as direções.

6 - Sobre as setas ou linhas utilize uma palavra, de preferência um verbo, que conecte os termos e forme uma frase simples, para que seja possível realizar a leitura do mapa de cima para baixo.

7 - Não se preocupe com “começo, meio e fim”, o mapa conceitual é estrutural, não sequencial. O mapa deve refletir a estrutura conceitual hierárquica do que está mapeado.

Texto retirado de: MAGRON, p. 137, 2021.

MÓDULO 1
MATERIAL PARA O ALUNO

QUESTÕES INICIAIS

Aluno/Aluna: _____

1. Descreva, de acordo com seu conhecimento, o que é uma partícula?

.....
.....
.....
.....

2. Descreva, de acordo com seu conhecimento, o que é uma onda?

.....
.....
.....
.....
.....

3. Descreva, de acordo com seu conhecimento, o que é a luz?

.....
.....
.....
.....
.....

4. Você já ouviu falar de fóton? Comente

.....
.....
.....

MÓDULO 2

ORGANIZADOR PRÉVIO DO TIPO COMPARATIVO -I

OBJETIVOS

- ✓ Apresentar organizadores prévios, para o ensino da natureza corpuscular e a natureza ondulatória da luz.
- ✓ Realizar uma revisão, conceituando e definindo, partículas e ondas eletromagnéticas.
- ✓ Reforçar a compreensão sobre o comportamento das partículas e das ondas.

ENCAMINHAMENTO METODOLÓGICO

Para que o aluno aprenda sobre a natureza dual da Luz, que, comporta-se como **partícula** ao interagir com a matéria e como **onda** ao se propagar, indicamos dois subsunçores;

1- Conhecimento sobre partículas.

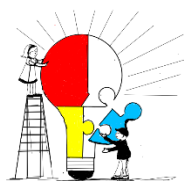
2- Conhecimento sobre ondas.

Como organizador prévio, é proposto o texto a seguir que apresenta um diálogo entre a carta e o e-mail, fazendo uma analogia com partícula e onda respectivamente.

O professor deve encaminhar a leitura e discutir com os alunos as principais características de partícula e onda. Nesse momento o professor pode fazer uma breve revisão sobre difração e interferência de ondas.

AVALIAÇÃO

Solicitar que, os alunos respondam as questões propostas e analisar a compreensão que apresentam sobre características e comportamento de partícula e onda.



SAIBA MAIS...

Sobre Aprendizagem Significativa

ORGANIZADOR PRÉVIO

O Organizador prévio é uma estratégia didática utilizada para facilitar a aprendizagem significativa.

Trata-se de um material utilizado para a introdução, sendo apresentado antes do material do novo conteúdo em si.

De acordo com Moreira (2011, p. 120), “Podem ser um enunciado, um parágrafo, uma pergunta, uma demonstração, um filme, uma simulação[...]. Não é a forma que importa, mas sim a função dessa estratégia instrucional chamada organizador prévio”.

“Muitas vezes, o aluno tem conhecimentos prévios adequados, mas não percebe a relacionabilidade e a discriminabilidade entre esses conhecimentos e os novos que lhe estão sendo apresentados nas aulas e nos materiais educativos” (MOREIRA, 2011, p. 46).

ORGANIZADOR PRÉVIO DO TIPO COMPARATIVO

Um material que contemple o conhecimento prévio, necessário para uma aprendizagem significativa do conteúdo a ser ensinado, atuando como um ancoradouro provisório para a nova aprendizagem ou estabelecendo uma relação entre o que o aprendiz já sabe e o novo conceito a ser ensinado.

“No caso da aprendizagem de material relativamente familiar, um organizador “comparativo” deve ser usado para integrar e discriminar as novas informações e conceitos, ideias ou proposições, basicamente similares, já existentes na estrutura cognitiva” (MOREIRA, 2011, p. 106).

MÓDULO 2

MATERIAL PARA O ALUNO

A CARTA E O E-MAIL

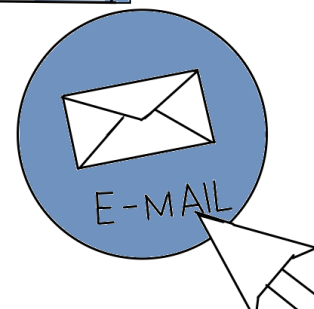
Em uma conversa a carta disse ao e-mail:

- Eu sou utilizada para transmitir informação, por exemplo, quando alguém quer contar algo que aconteceu a um amigo que mora distante.



O e-mail disse:

- Também faço essa função cara amiga carta, porém, você é um objeto material que possui massa, inclusive para lhe enviar pelos Correios é necessário verificar sua massa em gramas para pagar o envio, logo a sua informação é transmitida pelo espaço através da matéria e assim é enviada de um ponto a outro. Enquanto eu transmito a informação pelo espaço sem que massa alguma a carregue, não há transporte de matéria.



Fonte: Autoria própria

Ao ouvir atentamente o que o amigo e-mail dizia, a carta fez uma analogia:

- Olha só que interessante, então eu sou como uma partícula que carrega energia, uma partícula é “algo material” que possui certa quantidade de massa bem localizada, concentrada, como se fosse uma bolinha. Ela tem posição bem definida e podemos medir sua velocidade. Assim com o passar do tempo podemos conhecer sua trajetória, essas são as características mais importantes de uma partícula. Claro que não devemos imaginar a partícula com o formato exato de uma bolinha, não é a forma que importa, mas sim saber como as partículas se comportam.

Assim, essa porção bem localizada de matéria se desloca de um ponto a outro do espaço carregando energia e informação e interagindo com a matéria como se fosse um objeto qualquer. O e-mail ficou empolgado com a comparação feita pela carta e como um bom conhecedor de física também fez uma analogia para si.

- Nossa!!! Então eu sou como a onda! O transporte da minha informação é como a energia transportada em uma onda de um ponto a outro no espaço, fazendo isso sem transportar a matéria. Mas a energia se desloca mesmo assim, a onda se espalha no espaço, sem se localizar em um ponto bem definido, carrega a informação por onde passa, e esse transporte acontece sem levar consigo nenhum objeto material, uma onda não transporta matéria.

Texto adaptado de: Laboratório de Pesquisa em Ensino de Física da Faculdade de Educação da USP- Transposição das Teorias Modernas e Contemporâneas para a Sala de Aula. Disponível em: <https://sites.usp.br/nupic/wp-content/uploads/sites/293/2016/05/aluno-Blocoll-Particula-e-onda.pdf>

MÓDULO 2

MATERIAL PARA O PROFESSOR

Na Física Clássica, os conceitos de onda e de partícula, são muito bem definidos:

ONDA: Perturbação que se propagam no espaço transportando energia, sem o transporte de matéria.

PARTÍCULA: Ente que possui massa com velocidade e posição definidos.

Ondas e partículas são facilmente diferenciadas; uma única onda pode atingir diferentes pontos em um mesmo instante, e apresentam fenômenos particulares como difração e interferência, enquanto as partículas tendo suas posições definidas, têm comportamento que muitas vezes é comparado a uma bola de bilhar.

Diferença entre onda e partícula

PARTÍCULAS

- ✓ ocupam uma posição no espaço,
- ✓ são dotadas de massa,
- ✓ têm forma definida,
- ✓ são bem localizadas, isto é, pode-se determinar facilmente sua posição.

ONDAS

- ✓ são perturbações no espaço,
- ✓ não têm posição definida,
- ✓ não têm massa,
- ✓ são fenômenos que transportam energia,
- ✓ estão sujeitas aos fenômenos de reflexão, refração, difração, interferência etc.

Apesar de serem coisas totalmente diferentes, do ponto de vista da física, **toda partícula tem uma onda a ela associada e vice-versa**. A forma como a matéria se expressa, seja em forma de onda, seja em forma de partícula, está relacionada à forma como ela é observada.

Fonte: <https://brasilecola.uol.com.br/fisica/a-natureza-dual-luz.htm>

DIFRAÇÃO

Fenômeno ondulatório que ocorre quando uma onda contorna ou desvia um obstáculo.

MÓDULO 2
MATERIAL PARA O ALUNO

Aluno/Aluna: _____

DISCUTINDO O TEXTO

Escreva quais são as principais diferenças que existem entre as ondas e as partículas.

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

Isaac Newton



Fonte: Autoria própria (2021)

Vimos que a carta pode ser representada por uma partícula e o e-mail por uma onda. Descreva outras situações que possam ser representadas por:

partículas

.....

.....

.....

ondas

.....

.....

.....

Christian Huygens



Fonte: Autoria própria

MÓDULO 3

ORGANIZADOR PRÉVIO DO TIPO COMPARATIVO -II

OBJETIVOS

- ✓ Apresentar outro organizador prévio, para o ensino da natureza corpuscular e a natureza ondulatória da luz.
- ✓ Levar o aluno a observar que, tanto no fenômeno do arco íris como no funcionamento do periscópio há a presença da luz, comportando-se de diferentes formas.

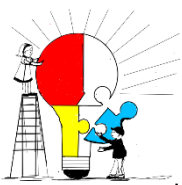
ENCAMINHAMENTO METODOLÓGICO

Após a leitura dos textos Arco-íris e Periscópio, o professor deve discutir a leitura com os alunos e solicitar que respondam as questões.

O professor pode falar um pouco mais sobre a formação do arco-íris explicando que a dispersão da luz ocorre devido a velocidade de propagação correspondente a cada cor, que sofre mudança na velocidade ao mudar de meio. E sobre o periscópio, pode aprofundar falando da reflexão da luz que age como bolinhas ao interagir com a matéria. Mas ainda sem deixar claro a dualidade da luz. Podendo retomar esses textos após a conceituação da dualidade.

AVALIAÇÃO

Propor questões aos alunos para verificar se eles conseguem perceber o comportamento ondulatório e corpuscular da luz no fenômeno do arco-íris e na funcionalidade do periscópio.



SAIBA MAIS...

Sobre Aprendizagem Significativa

A Aprendizagem Significativa é oposta a aprendizagem mecânica, em que o aluno apenas memoriza conceitos e fórmulas, mas na verdade esse novo “conhecimento” não se integra com o que já havia na sua estrutura cognitiva, logo, é arbitrário e acaba sendo deixado de lado, esquecido.

“Assim, a *aprendizagem significativa* ocorre quando novos conceitos, ideias, proposições interagem com outros conhecimentos relevantes e inclusivos, claros e disponíveis na estrutura cognitiva, sendo por eles assimilados, contribuindo para sua diferenciação, elaboração e estabilidade” (MOREIRA, 2011, p. 104).

Os Organizadores prévios, precisam ser pensados de forma que sejam capazes de ativar informações que o aluno já tenha sobre o novo conteúdo, em nível mais inferior ao que se deseja chegar, ou que sejam subsunçores para essa nova informação.

“Os *organizadores prévios* podem tanto fornecer “ideias-âncora” relevantes para a *aprendizagem significativa* do novo material, quanto estabelecer relações entre ideias, proposições e conceitos já existentes na estrutura cognitiva e aqueles contidos no material de aprendizagem, ou seja, para explicitar a relacionabilidade entre os novos conhecimentos e aqueles que o aprendiz já tem, mas não percebe que são relacionáveis aos novos” (MOREIRA, 2011, p. 105).

MÓDULO 3

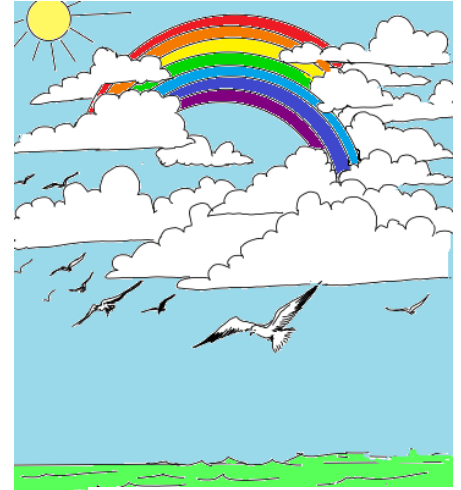
MATERIAL PARA O ALUNO

“Você nunca achará o arco-íris, se você estiver olhando para baixo.”

Charles Chaplin

ARCO-ÍRIS

Chuva e Sol, uma combinação perfeita, logo vem aquela imagem que todos conhecem, o arco-íris. Basta vir aquele solzinho depois de uma chuva e está formado o fenômeno físico, há quem acredite ser místico, lá no fim do arco-íris você encontrará um pote de ouro, entre outras crenças, o espetáculo é tão maravilhoso que é normal que os sonhadores atribuam poderes mágicos. Mas a física já explicou; trata-se da dispersão da luz branca emitida pelo Sol, que ao atravessar as gotículas de água da chuva, é refratada e refletida e se decompõem em sete cores. A dispersão é um fenômeno da óptica que separa a luz branca nas diferentes cores que a compõe.

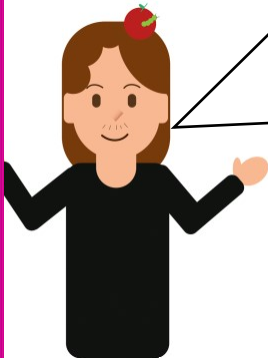


Fonte: Aatoria própria (2021)

Você já observou que quando você vê o arco-íris o Sol está atrás de você?

Isso mesmo, para que o observador veja esse fenômeno deve estar entre o sol e as gotas de chuva, assim a luz do Sol vai mudar de meio de propagação que é o ar e propagar-se na água (gotas de chuva), isso é a refração, depois a luz retorna para os olhos do observador, é a reflexão.

Isaac Newton



Você sabia?

Foi durante uma pandemia que Isaac Newton descobriu como se forma o arco-íris. Nos anos de 1665 e 1666, ocorreu a grande peste bubônica, fazendo com que as pessoas se mantivessem isoladas, e para Newton 1666 tornou-se o “ano miraculoso” pois desenvolveu várias pesquisas que contribuíram com a física e a matemática.

Um de seus experimentos foi a decomposição da luz branca em um prisma triangular, ele colocou o prisma de vidro em frente a um pequeno orifício na parede de seu quarto deixando um raio de luz solar incidir no objeto e assim observou as cores do arco-íris. Em 1672, Newton publicou um trabalho sobre as cores dos corpos.

Fonte: Aatoria própria (2021)



Fonte: Aatoria própria (2021)

MÓDULO 3

MATERIAL PARA O ALUNO

A palavra periscópio vem do grego periskopein, que significa “ver em volta”.

PERISCÓPIO

Figura 1 – Tirinha sobre periscópio

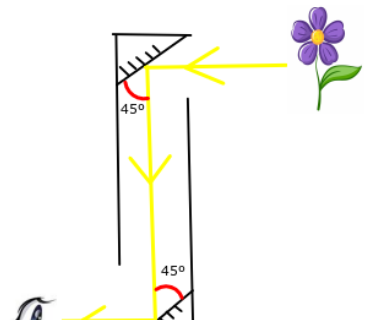


Fonte: Sant'Anna et al. (2013, p. 175)¹

Calvin quer ver a prova de Susie, você acha que ele teve êxito em ler a prova da colega?

É possível ver algo que esteja fora do campo visual do observador?

A resposta é sim. Basta usar um periscópio; um instrumento óptico que utiliza dois espelhos planos que ficam a uma certa distância um do outro e paralelos entre si, e devem estar com uma inclinação de 45° para que a imagem fique perfeita.



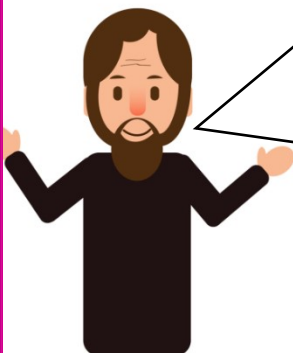
Fonte: Autoria própria (2021)

Você sabia?

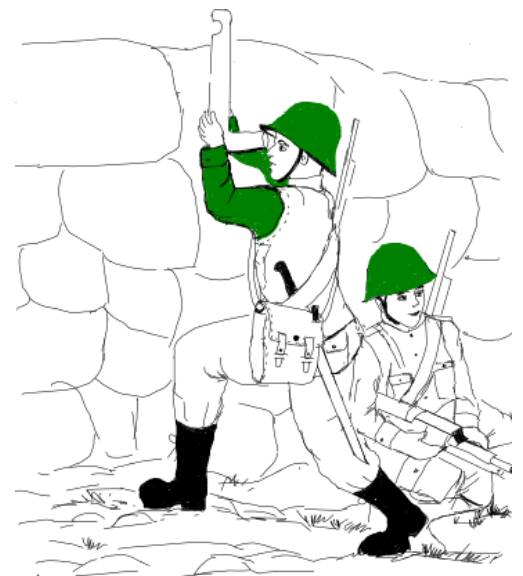
O periscópio foi planejado pelo russo Drzewiecki, mas quem construiu o primeiro modelo, foi o Italiano Ângelo Salmoirghi, em 1894. E no ano de 1902, durante a guerra, o cientista Simon Lake atribuiu a primeira função a este instrumento, foi utilizado em tanques de guerra para visualizar o inimigo do lado de fora e em trincheiras.

Ao passar do tempo ele foi evoluindo, adaptando lentes mais potentes, para que se pudesse ver objetos mais distantes e passou

Pitágoras



Fonte: Autoria própria (2021)



Fonte: Autoria própria (2021)

¹ CALVIN & HOBBS, BILL WATTERSON, 2006 PAWS, INC ALL RIGHTS RESERVED/DIST. UNIVERSAL UCLICK In Sant'Anna et al., 2013.

MÓDULO 3
MATERIAL PARA O ALUNO

Aluno/Aluna: _____

DISCUTINDO O TEXTO

O arco-íris é um fenômeno natural e o periscópio é um instrumento óptico, o que há em comum entre os dois?

.....

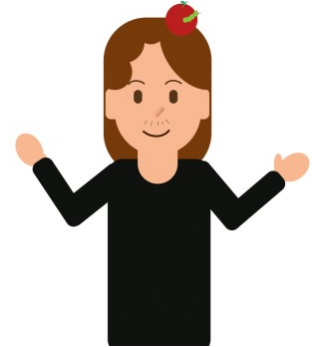
.....

.....

.....

.....

Isaac Newton



Fonte: A autoria própria (2021)

Observando o fenômeno do arco íris, você acredita que a luz se comporta como onda ou como partícula? Justifique sua resposta.

.....

.....

.....

.....

.....

Christian Huygens



Fonte: A autoria própria (2021)

Observando o funcionamento do periscópio, você acredita que a luz se comporta como onda ou como partícula? Justifique sua resposta.

.....

.....

.....

.....

.....

Aristóteles



Fonte: A autoria própria (2021)

MÓDULO 4

MATERIAL POTENCIALMENTE SIGNIFICATIVO - I

OBJETIVOS

- ✓ Utilizar experimentos que atuam como material potencialmente significativo, para a compreensão da dualidade da luz.
- ✓ Realizar e demonstrar aos alunos um experimento que mostra a difração da luz, lembrando o experimento realizado por Young, comprovando o comportamento ondulatório da luz ao se propagar.
- ✓ Demonstrar um experimento composto por um circuito que simula o acender e apagar das luzes dos postes de iluminação pública, fazendo referência ao efeito fotoelétrico, que comprova o comportamento corpuscular da luz ao interagir com a matéria.
- ✓ Levar o aluno a compreender o caráter dual da luz.

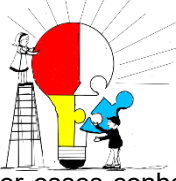
ENCAMINHAMENTO METODOLÓGICO

O professor deve realizar os experimentos propostos no roteiro a seguir, no roteiro de construção dos experimentos, também há uma orientação de como encaminhar as discussões com os alunos no momento da apresentação dos mesmos.

Após os experimentos o professor deve explicar sobre o comportamento onda/partícula da luz, que foi observado individualmente em cada um.

AVALIAÇÃO

Propor questões aos alunos, para verificar a compreensão que tiveram sobre os experimentos realizados.



SAIBA MAIS...

Sobre Aprendizagem Significativa

Um material potencialmente significativo deve ser um facilitador da aprendizagem. “[...] o material deve ser relacionável a determinados conhecimentos e o aprendiz deve ter esses conhecimentos prévios necessários para fazer esse relacionamento de forma não-arbitrária e não-litera” (MOREIRA, 2011, p. 25).

É o aprendiz que atribui significados aos materiais, e as vezes pode não ser o significado esperado pelo professor, aceito naquele conteúdo, o significado a ser atribuído depende do intercâmbio de significados realizado, que pode ser um processo demorado.

“É importante enfatizar aqui que o material só pode ser *potencialmente significativo*, não *significativo*: não existe livro significativo, nem aula significativa, nem problema significativo, ..., pois o significado está nas pessoas, não nos materiais” (MOREIRA, 2011, p. 25).

MÓDULO 4
MATERIAL PARA O ALUNO

Aluno/Aluna: _____

EXPERIMENTOS

Comente o experimento realizado com o pente e o laser: Thomas Young

.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....

Thomas Young



Fonte: Autoria própria (2021)

Comente o experimento realizado, que simula a iluminação pública:

.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....

Albert Einstein



Fonte: Autoria própria (2021)

MÓDULO 4

ROTEIRO PARA EXPERIMENTO 1

CONSTRUINDO O EXPERIMENTO DA DUPLA FENDA

Para o experimento você vai precisar de:

- ✓ Um pente de cabelo, que tenha o menor espaçamento possível, entre seus “dentes”
- ✓ Fita isolante
- ✓ Laser

REALIZANDO O EXPERIMENTO

- ✓ Com a fita isolante cubra parte dos “dentes” do pente, deixando duas fendas, que são separadas por um “dente” do pente;
- ✓ Em seguida posicione o pente em frente a uma parede ou quadro da sala de aula, pode utilizar livros ou caixas para suporte, deixar com distância de aproximadamente 1,5m;
- ✓ Posicione o laser de forma que sua luz incida nas fendas deixadas no pente;
- ✓ Ajuste as distâncias até que seja possível a observação da difração e interferência da luz, projetada na parede.

ABORDANDO O EXPERIMENTO

Inicialmente deve-se questionar os alunos sobre a propagação retilínea da luz e formação de sombras, refletindo se a luz pode desviar obstáculos, levar os alunos a investigar o que esperam que irá acontecer ao incidir luz na fenda dupla, e posteriormente, por que acham que ocorreu a formação da rede de difração.

Com esse experimento é possível observar a luz comportando-se como onda, uma vez que a difração é fenômeno ondulatório.

É provável que antes de realizar a demonstração algum aluno julgue que a luz irá atravessar as duas fendas formando a imagem das mesmas no anteparo (parede), o que caracterizaria um comportamento de partículas.

MÓDULO 4

IMAGENS DO EXPERIMENTO 1

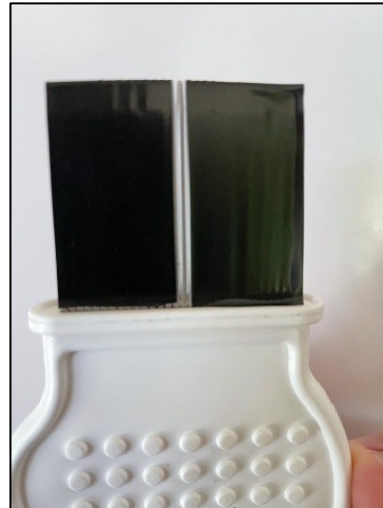
EXPERIMENTO DA DUPLA FENDA

Figura 2 - Pente com espaço pequeno



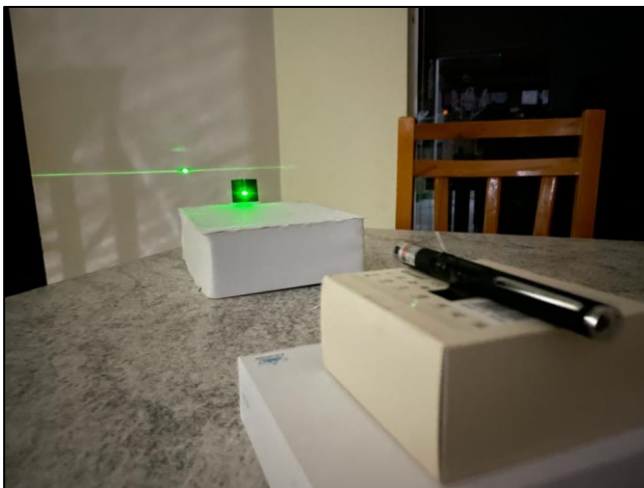
Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 3 - Dupla



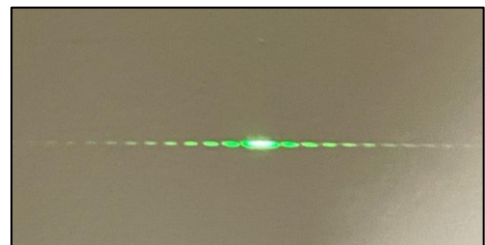
Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 4 - Realizando o experimento



Autoria própria (2021)

Figura 5 - Imagem de difração



Autoria própria (2021)

MÓDULO 4

ROTEIRO PARA EXPERIMENTO - II

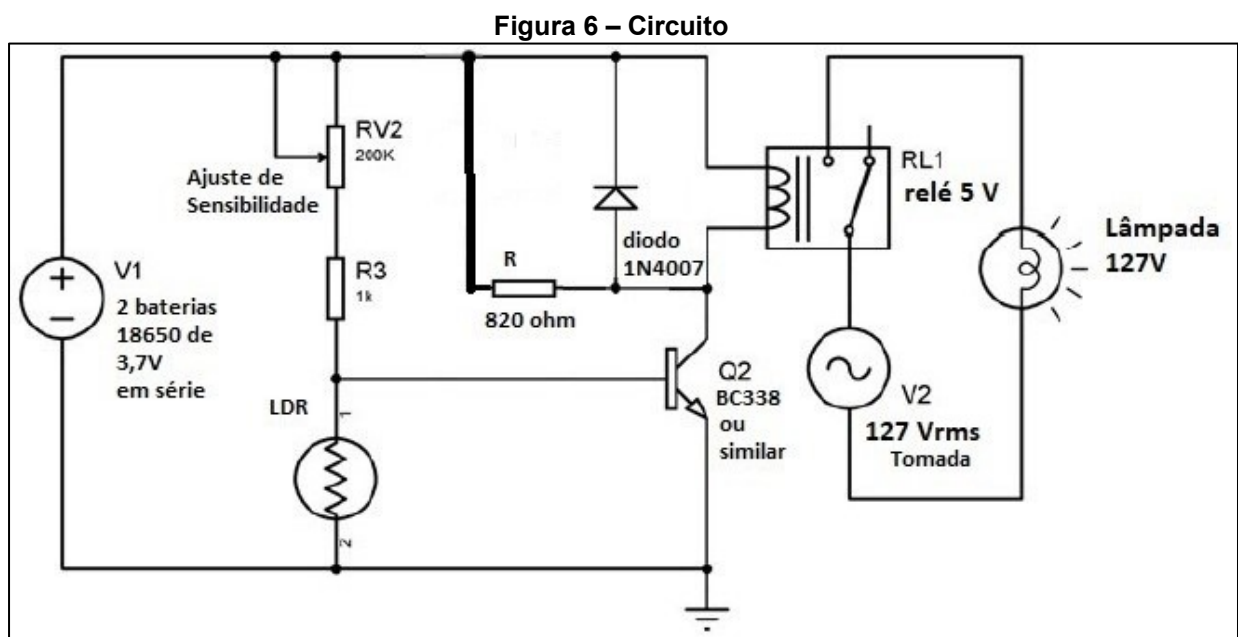
CONSTRUINDO O EXPERIMENTO “SIMULANDO A ILUMINAÇÃO PÚBLICA”

Para o experimento você vai precisar de:

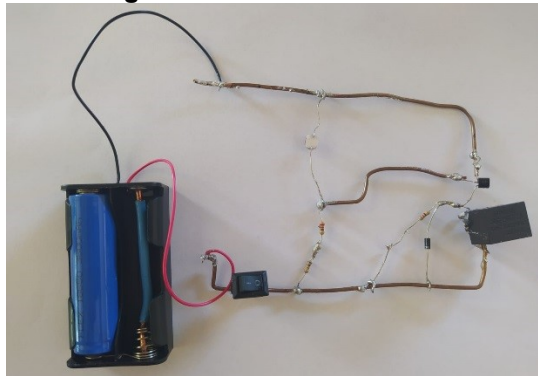
- ✓ 1 sensor LDR: 5mm
- ✓ Aproximadamente 40 cm de fio de cobre de 2mm
- ✓ 1 transistor BC 337-25
- ✓ 1 resistor de $1k\Omega$ $\frac{1}{4}$ W
- ✓ 1 resistor $200 k\Omega$ $\frac{1}{4}$ W
- ✓ 1 resistor 820Ω $\frac{1}{4}$ W
- ✓ 1suporte para pilha
- ✓ 1 pilha 3,7 V
- ✓ 1 relé 5V
- ✓ 1 diodo N4007
- ✓ 1 soquete
- ✓ 1 lâmpada LED 127V
- ✓ 1 interruptor
- ✓ Fio 2mm, comprimento suficiente para ligar a lâmpada na tomada
- ✓ 1 tomada
- ✓ 1 caixa de material não condutor (exemplo: caixa de sapato)
- ✓ Cola quente

MONTANDO O EXPERIMENTO

- ✓ Conectar os componentes de acordo com o esquema representado na imagem abaixo, utilizando o fio de cobre;



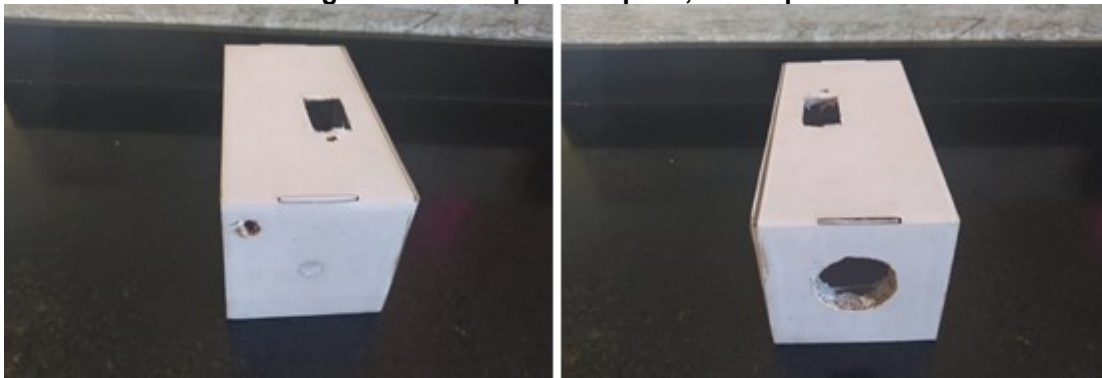
Autoria própria (2021)

Figura 7 – Circuito montado

Autoria própria (2021)

Em uma caixa:

- ✓ Fazer um recorte para que a lâmpada conectada ao circuito fique externa a caixa e o circuito interno a mesma;
 - ✓ Fazer uma abertura para o interruptor e ao lado, uma pequena abertura para o LDR;
 - ✓ Fazer um furo para a saída da tomada da lâmpada;
- Importante: Antes de fazer os recortes na caixa, verifique as posições dos componentes: lâmpada, interruptor, LDR e tomada.

Figura 8 – Furos para lâmpada, interruptor e LDR

Autoria própria (2021)

Para finalizar, coloque o esquema dentro da caixa, cole algumas partes com cola quente para fixar o circuito no interior da caixa, deixando o interruptor, o LDR e a lâmpada expostos na parte externa.

Figura 9- Circuito montado

Autoria própria (2021)

UTILIZANDO O EXPERIMENTO

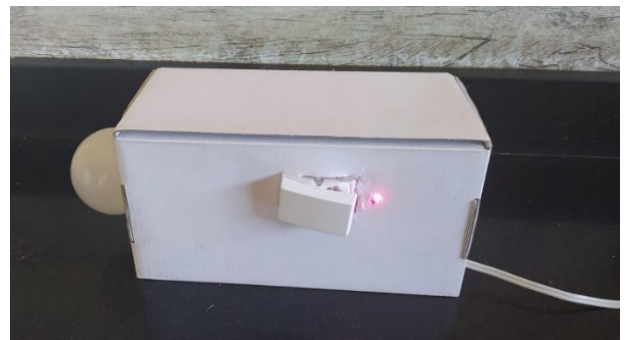
O experimento possui uma lâmpada que será acesa quando o aparato for conectado na tomada, essa luz pode ser apagada de duas maneiras: utilizando o interruptor ou incidindo a luz de um laser no furo onde está localizado o LDR. Se o LDR receber luz solar direta, a lâmpada também será apagada, isso porque o LDR (led dependent resistor) é uma resistência que varia conforme a incidência de luz visível, assim quando recebe maior incidência de luz, sua resistência diminui, aumentando a corrente elétrica que chega ao transistor e esse permite a corrente vinda da pilha que aciona o relé, que direciona a corrente vinda da tomada (127V) para outro sentido, apagando a lâmpada.

Figura 10 - Sem incidir o laser no



Autoria própria (2021)

Figura 11 - Ao incidir o laser



Autoria própria (2021)

ABORDANDO O EXPERIMENTO

O professor deve iniciar questionando os alunos de que maneira poderíamos apagar a luz, sem tocar o aparato com as mãos, deve deixar alguns itens a mostra para que os alunos pensem e sugiram meios para se apagar a luz, como por exemplo: bola de borracha, controle remoto, laser, mola, bola de papel, entre outros que o professor julgar interessante. A intenção é levar os alunos a investigarem possibilidades e quem sabe propor a utilização do laser. Na sequência o professor mostra aos alunos como apagar a luz com auxílio do laser, após realizada a demonstração, falar sobre o funcionamento dos postes de iluminação pública que acendem as luzes ao escurecer e apagam as luzes quando há claridade, portas automáticas entre outros equipamentos que funcionam a partir de situação parecida com efeito fotoelétrico.

MÓDULO 4

MATERIAL PARA O PROFESSOR

DUALIDADE DA LUZ

A luz é uma **forma de energia que se propaga no espaço por meio de radiação eletromagnética**, e, de acordo com sua frequência, é visível ao olho humano; a intensidade de energia está diretamente relacionada à frequência: quanto maior a frequência, maior a energia.

A radiação eletromagnética é uma oscilação nos campos elétrico e magnético simultaneamente, ou seja, apresenta comportamento ondulatório. Porém, a energia transportada por ondas de luz ocorre de forma concentrada em pacotes, denominados fótons; essa quantização da luz só é possível se um raio de luz for caracterizado como um feixe de partículas materiais. Essa é a **dualidade onda - partícula da luz**, na qual duas propriedades distintas tornam-se complementares para o estudo a respeito da natureza da luz.

Como a luz é energia em movimento, possui velocidade determinada, e essa velocidade é variável de acordo com o meio em que se propaga: quanto mais denso o meio de propagação, menor será sua velocidade. Não há conhecimento de nada que se desloque com velocidade superior à velocidade da luz no vácuo.

A velocidade da luz no vácuo atualmente é uma constante universal e, de acordo com Barthem (2005), com o avanço de tecnologias como lasers e diodos metal-isolante-metal passou a ser comprovada. Afirma ainda que “[...]em 1983, a velocidade da luz passou a ser considerada como um padrão primário de velocidade e o metro, uma grandeza a ser medida” (BARTHEM, 2005, p. 29).

Portanto essa constante universal assume o valor:

$$c = 299.792.458 \text{ m/s}$$

A letra *c* escolhida para representar a velocidade da luz no vácuo tem origem na palavra *celerita* que, do latim, significa celeridade, o mesmo que rapidez.

COMPORTAMENTO ONDULATÓRIO DA LUZ

Onda é uma perturbação causada no meio, que realiza o transporte de energia sem transportar matéria.

As ondas são classificadas em **mecânicas**, quando necessitam de um meio material para se propagar, e **eletromagnéticas**, quando não necessitam de um meio material para a sua propagação, ou seja, se propagam também no vácuo.

A **luz é uma onda eletromagnética** que tem como fonte fundamental cargas elétricas aceleradas.

James Clerk Maxwell constatou que a luz é uma onda eletromagnética quando verificou que a velocidade de qualquer onda eletromagnética no vácuo é aproximadamente igual à velocidade da luz no vácuo.

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}} \qquad c = \frac{1}{\sqrt{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 8,85 \cdot 10^{-12}}} \qquad c = 2,999 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

Em que:

μ_0 é a permeabilidade magnética do vácuo, que vale $4\pi \cdot 10^{-7}$ T.m/A

ε_0 é a permissividade elétrica no vácuo que vale $8,854 \cdot 10^{-12}$ C².N/m².

Elementos de uma onda

Comprimento de onda (λ): Trata-se do tamanho da onda, que pode ser medido de um vale a outro vale, de uma crista a outra crista ou do início ao final de um período (uma oscilação completa). No SI esse comprimento é medido em metros (m).

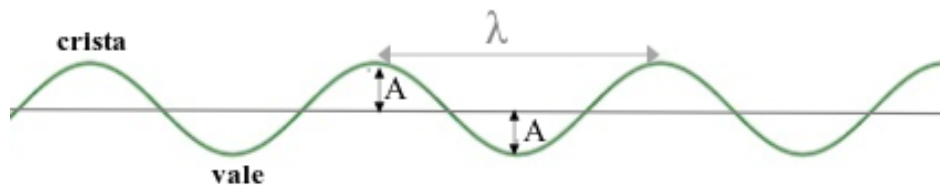
Frequência (f): Número de oscilações de uma onda, num intervalo de tempo. No SI esse intervalo vale 1s.

Período (T): Tempo gasto por uma onda para realizar uma oscilação completa (um comprimento de onda). Medido em segundos (s) no SI.

Velocidade (v): A velocidade com que a onda se propaga no meio; a velocidade de uma onda depende do meio no qual ela se propaga, e sua unidade de medida no SI é o m/s.

Amplitude (A): Altura da onda, que corresponde à distância do eixo central à crista, ou do eixo central ao vale, cuja unidade de medida no SI é o metro(m); determina a intensidade da onda: quanto maior a amplitude, maior a energia transportada.

Figura 12 - Representação de uma onda



Fonte: Autoria própria (2021)

Algumas equações que relacionam os elementos de uma onda:

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

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

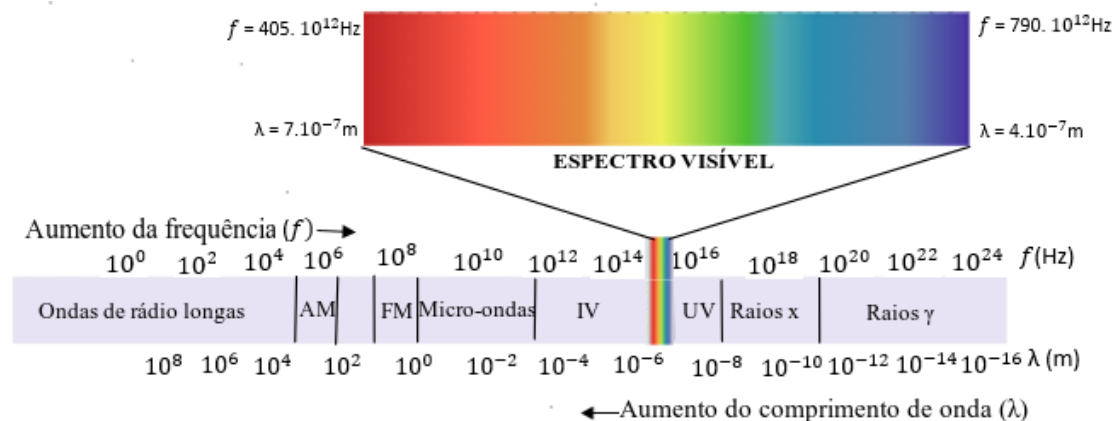
$$v = \lambda \cdot f$$

A velocidade de qualquer onda eletromagnética no vácuo é c .

Então tem-se: $c = \lambda \cdot f$

Na sequência, apresentamos a representação do **espectro eletromagnético**. Nesse esquema é possível visualizar e comparar os comprimentos de onda e frequências das distintas radiações eletromagnéticas, que são divididas em sete tipos: ondas de rádio, micro-ondas, infravermelho, luz visível, ultravioleta, raios x e raios gama.

Figura 13 - Representação do espectro eletromagnético



Fonte: Autoria própria (2021)

Como podemos observar, a luz ocupa uma pequena fração desse espectro e corresponde à única faixa visível de radiações eletromagnéticas, perceptíveis a olho nu. Sua variação de cores corresponde a diferentes comprimentos de onda com capacidade de sensibilizar a visão humana. As cores variam do vermelho, que possui a menor frequência, ao violeta, que apresenta maior frequência.

Quanto a sua energia, pode ser calculada em função de sua frequência; como já sabemos, a radiação violeta, de maior frequência, é a de maior energia.

Distribuição de frequência e comprimento de onda das cores

Cor	Frequência (10^{14}Hz)	Comprimento de onda (10^{-7}m)
Vermelho	4,05 – 4,80	7,40 – 6,25
Alaranjado	4,80 – 5,10	6,25 – 5,90
Amarelo	5,10 – 5,30	5,90 – 5,65
Verde	5,30 – 6,00	5,65 – 5,00
Ciano	6,00 – 6,20	5,00 – 4,85
Azul	6,20 – 6,80	4,85 – 4,40
Violeta	6,80 – 7,90	4,40 – 3,80

Fonte: Autoria própria (2021)

Difração da luz

A **difração** é um fenômeno atribuído às ondas em que a onda contorna um determinado obstáculo ou atravessa a abertura de um obstáculo e se espalha no lado oposto a ele. Assim, um pequeno ponto da onda primária atinge e atravessa o obstáculo, originando a sua onda secundária, usualmente denominada onda de Huygens.

A difração da luz é um fenômeno pouco observado no dia a dia, pois a faixa de comprimento da radiação visível

Importante: a difração será mais perceptível se o tamanho da abertura no obstáculo e o comprimento da onda forem de dimensões próximas, e ainda mais acentuada para comprimentos de onda maiores em aberturas de dimensões menores que esse.

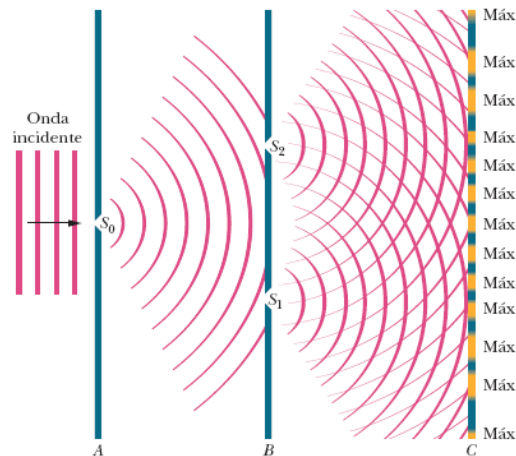
A dupla fenda de Young

A partir do princípio de Huygens, Thomas Young realizou um experimento que provou a natureza ondulatória da luz; ele foi capaz de demonstrar que a luz sofre interferência tal qual as ondas mecânicas.

Quando duas ondas se encontram ocorre o que chamamos de **interferência**, que pode ser **destrutiva**, quando ocorre a superposição de fases distintas das ondas, ou **construtiva**, quando ocorre a superposição da mesma fase de duas ondas.

Em seu experimento, Young utilizou uma fonte de luz monocromática e três anteparos: o primeiro a receber a luz, com uma pequena fenda que a difrata, tornando uma fonte pontual; no segundo anteparo havia dois pequenos orifícios, nos quais a luz também era refratada, projetando as franjas claras e escuras no terceiro anteparo.

Figura 14 - Representação do experimento de Young



Fonte: Halliday; Resnick; Walker (2012, p.78)

As franjas claras são regiões em que as fases das ondas, que se interferem, são iguais e são denominadas **máximos**, ocorrendo a interferência construtiva; as franjas escuras são as regiões de interferência em que as fases são distintas, denominadas de **mínimos**, ocorrendo a interferência destrutiva.

COMPORTAMENTO CORPUSCULAR DA LUZ

A luz como onda tem como característica principal o fato de se propagar por todo o espaço, já a luz como partículas ocupa um lugar determinado no espaço. Apesar de ser facilmente observado, o modelo corpuscular foi de fato consagrado no advento da Física Quântica, quando em uma concepção moderna foi o único modelo satisfatório para explicar o efeito fotoelétrico.

A partícula de luz

A luz é constituída por pequenos pacotes de energia, uma forma quantizada elementar, que são responsáveis pelo transporte de energia da radiação eletromagnética. Esses pacotes são denominados **fótons**, ou quanta de luz. Apesar de ser usualmente denominado como partícula, o fóton tem características bem singulares; sua velocidade é igual a velocidade da luz, sua massa de repouso é nula e tem características de onda, tais como frequência e comprimento de onda.

A quantização da energia pode ser comparada ao nosso sistema monetário: o menor valor é de R\$ 0,01, portanto só poderemos obter quantidades que sejam múltiplos inteiros deste valor; por exemplo, $15 \times \text{R\$ } 0,01 = \text{R\$ } 0,15$. Não é possível admitir valores como R\$ 0,155; para isso seria necessário multiplicar o valor R\$ 0,01 por um número

não inteiro (115,5). Assim, o fóton é quantizado, como nosso sistema monetário; define-se como um pacote de energia para o qual devemos considerar como um todo, e quantidades discretas e múltiplas inteiras desse.

Albert Einstein, em 1905, postulou sobre a quantização da radiação eletromagnética, mas o primeiro a pensar na quantização de energia foi Max Planck, em 1900, procurando descrever a radiação do corpo negro.

Energia do Fóton

$$E = hf$$

$$f = \frac{c}{\lambda}$$

Em que:

E = energia do fóton (utiliza-se usualmente, J ou eV, como unidade de medida);

$h = h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ (constante de Planck);

f = frequência (unidade de medida no SI: Hz);

c = velocidade da luz no vácuo (aproximadamente $3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$);

λ = comprimento de onda (medida em metros (m));

“A menor energia que uma onda luminosa de frequência f pode possuir é hf , a energia de um único fóton. Se a onda possui uma energia maior, esta deve ser múltiplo inteiro de hf [...]” (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2012, p.179).

Emissão de fótons: quando um átomo emite um fóton de frequência f , transfere uma energia hf para a luz, e um fóton é criado.

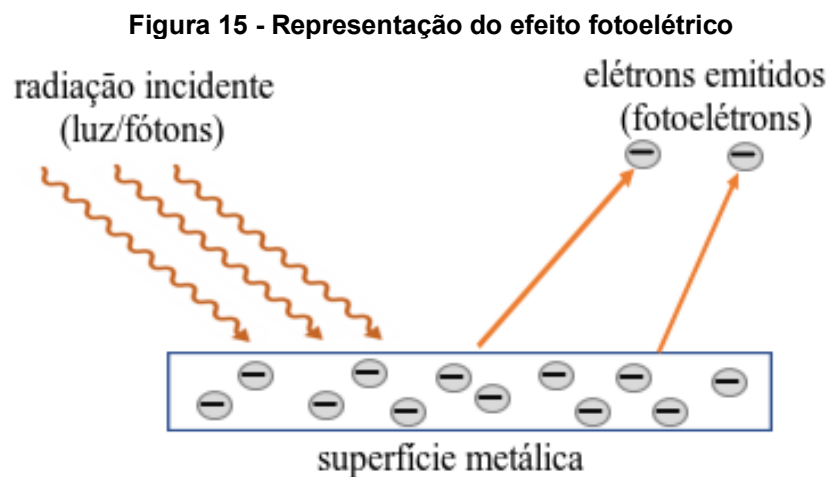
Absorção de fótons: quando um fóton de frequência f transfere sua energia hf da luz para um átomo, esse fóton é extinto.

Efeito Fotoelétrico

O efeito fotoelétrico não é explicável no domínio da Física Clássica; surge, então, a Física Quântica (com a proposta de quantização da luz), em que é necessário considerar a luz como partícula, o fóton.

Esse fenômeno é verificado quando uma **placa de metal é atingida por luz de determinada frequência e tem elétrons emitidos da sua superfície**, porém, verifica-se que não é em todos os casos que o elétron é desprendido do metal. A energia do fóton (E) depende de sua frequência (quanto maior a frequência, maior será a energia do fóton) e, para que ocorra o efeito fotoelétrico, a energia do mesmo precisa ser igual ou maior do que a energia de interação do elétron com a placa. Observou-se que mesmo aumentando-se a intensidade da luz incidente não ocorria o desprendimento dos elétrons, ou seja, mesmo aumentando-se a quantidade de fóton o fenômeno não ocorria.

O primeiro a observar o efeito fotoelétrico foi Heinrich Rudolf Hertz, em 1886. Um fato curioso é que foi nesse experimento que Hertz comprovou a natureza de onda eletromagnética da luz, mas observou também que a incidência de raios ultravioleta gerava faíscas na placa coletora.



Fonte: Autoria própria (2021)

É dada a **função trabalho (ϕ)** como sendo a mínima energia necessária para a emissão do fotoelétron. Essa é uma característica que é determinada pelo material da placa metálica; quanto maior for a função trabalho, maior será a dificuldade de desprender elétrons da superfície metálica.

Importante: Só ocorrerá o efeito foto elétrico se $E > \Phi$.

Lembrando que a energia do fóton depende da frequência do mesmo, é estabelecida uma energia mínima, correspondente a uma frequência mínima, denominado **potencial de corte (V_0)**. Ou seja, o fóton deverá conter essa energia

mínima para que o elétron a absorva e se desprenda do metal. No caso de o fóton conter energia maior do que a energia de corte, o fotoelétron será despreendido e a diferença de energia será absorvida pelo fotoelétron, o que corresponderá à sua energia cinética ($K_{m\acute{a}x}$).

Para determinar a energia cinética de um elétron, temos:

$$K_{m\acute{a}x} = eV_0$$

Em que:

$K_{m\acute{a}x}$ = energia cinética do elétron – a unidade de medida de energia no SI é o Joule (J), porém convenientemente utiliza-se o Elétron-Volt (eV);

e = valor absoluto da carga do elétron ($1,6 \cdot 10^{-19}C$);

V_0 = potencial de corte - a unidade de medida é o Volt (V).

Matematicamente, a equação do Efeito Fotoelétrico é a seguinte:

$$hf = K_{m\acute{a}x} + \phi$$

Em que:

$hf = E$ (Energia do fóton);

$K_{m\acute{a}x} = eV_0$ (Energia cinética do elétron);

ϕ = Função trabalho (característica do metal da placa metálica).

A unidade de medida utilizada é o Joule (J) ou Elétron-Volt (eV).

É importante ressaltar que fótons com uma baixa frequência não são capazes de desprender elétrons da placa metálica; se aumentarmos a intensidade da luz, a qual ficará mais brilhante, isso só faz aumentar o número de fótons que atingem a placa, mas nenhum desses fótons tem energia suficiente para desprender um elétron.

MÓDULO 5

MATERIAL POTENCIALMENTE SIGNIFICATIVO - II

OBJETIVOS

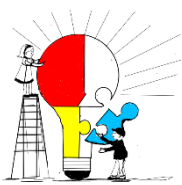
- ✓ Propor um material potencialmente significativo para a compreensão da dualidade da luz.
- ✓ Abordar historicamente a evolução das concepções sobre a natureza da luz.
- ✓ Identificar os principais físicos e filósofos que contribuíram para o desenvolvimento da ciência, com seus estudos referentes a natureza da luz.
- ✓ Levar o aluno a perceber que a ciência está em constante evolução e que toda contribuição mesmo que refutada é imprescindível para o desenvolvimento.

ENCAMINHAMENTO METODOLÓGICO

Apresentar aos alunos o vídeo “O Julgamento da Luz”, disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=mDygrmcTiBk>. Após assistirem o vídeo, o professor pode realizar uma discussão com os alunos, destacando a importância de todas as contribuições, e que não devemos menosprezar aqueles que pensaram diferente e tinham limitações que hoje foram superadas, levando o aluno a perceber que, todas as tecnologias de hoje surgiram de hipóteses, pesquisas, erros e acertos.

AVALIAÇÃO

Propor questões aos alunos, para verificar a compreensão que tiveram sobre o vídeo, destacando a conclusão final da dualidade da luz e pontos importantes sobre a natureza da luz. Após analisar as respostas o professor pode retomar e explicar alguns pontos que não tenham ficado claros para os alunos.



SAIBA MAIS...

Sobre Aprendizagem Significativa

A Aprendizagem Significativa ocorre quando há uma interação entre os conhecimentos já existentes na estrutura cognitiva do aprendiz e o novo conhecimento apresentado.

Ao propor uma abordagem na perspectiva da Aprendizagem Significativa observa-se algumas condições.

“Essencialmente, são duas as condições para aprendizagem significativa: 1) *o material de aprendizagem deve ser potencialmente significativo* e 2) *o aprendiz deve apresentar uma predisposição para aprender*” (MOREIRA, 2011, p. 24).

O material que será utilizado pelo professor precisa ser coerente e se relacionar com o conteúdo e com os conhecimentos prévios que foram inicialmente ativados ou inseridos na estrutura cognitiva.

“A primeira condição implica 1) que o material de aprendizagem (livros, aulas, aplicativos, ...) tenha significado lógico (isto é, seja relacionável de maneira não-arbitrária e não literal a uma estrutura cognitiva apropriada e relevante) e 2) que o aprendiz tenha uma estrutura cognitiva ideias-âncora relevantes com as quais esse material possa ser relacionado” (MOREIRA, 2011, p. 24-25).

MÓDULO 5
MATERIAL PARA O ALUNO

Aluno/Aluna: _____

DISCUTINDO O VÍDEO – “O Julgamento da Luz”

Assinale qual era a concepção que cada personagem histórico, tinha sobre a natureza da luz.

Aristóteles de Estagira	() onda	() partícula
Pitágoras	() onda	() partícula
Christian Huygens	() onda	() partícula
Isaac Newton	() onda	() partícula
Thomas Young	() onda	() partícula
Albert Einstein.	() onda	() partícula



Autoria própria (2021)

Historicamente, antes de ser compreendida como onda-partícula, a teoria mais aceita até o fim do séc. XVII foi o comportamento corpuscular da luz, defendida por Newton. Comente como Newton definia a luz, e fale sobre seu experimento realizado com a luz.

.....

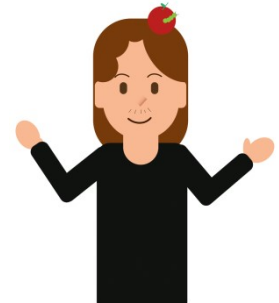
.....

.....

.....

.....

Isaac Newton



Autoria própria (2021)

No início do séc. XIX, Thomas Young conseguiu comprovar que a luz se comporta como onda e mudar a concepção aceita até aquele momento, como Young conseguiu fazer isso?

.....

.....

.....

.....

.....

.....

Thomas Young



Autoria própria (2021)

MÓDULO 5
MATERIAL PARA O ALUNO

DISCUTINDO O VÍDEO – “O Julgamento da Luz”

Em 1838, o astrônomo e físico François Arago afirmou que, a determinação da velocidade de propagação da luz na água e no ar seria um fator determinante para o impasse entre as teorias defendidas por Huygens e por Newton.

Newton afirmava que em meios mais densos a velocidade da luz era maior.

Huygens afirmava que em meios mais densos a velocidade da luz era menor.

Como vimos no vídeo, Bertrand Léon Foucault conseguiu medir a velocidade da luz, em 1850, verificou que a luz se propaga com velocidade maior no ar do que na água.

Ou seja, Newton estava errado.

Christian Huygens

Qual sua opinião sobre esse erro de Newton?

.....
.....
.....
.....



Autoria própria (2021)

Em 1886 o alemão Heinrich Rudolf Hertz realizou um experimento e comprovou que a luz é onda eletromagnética, mas esse mesmo experimento mais tarde comprovou que a luz se comporta como partícula. Verificou-se um fenômeno que ocorre com a luz ao interagir com a matéria. Qual o nome desse fenômeno e o que ocorre?

Pitágoras

.....
.....
.....
.....



Autoria própria (2021)

No vídeo “O Julgamento da Luz” ocorre um hipotético julgamento sobre a natureza da luz. Qual foi a conclusão final e os principais fatores que levaram a esse desfecho?

Albert Einstein

.....
.....
.....
.....



Autoria própria (2021)

MÓDULO 5

MATERIAL PARA O PROFESSOR

UM POUCO DA HISTÓRIA DA NATUREZA DA LUZ

Desde a antiguidade, filósofos e físicos teceram diversas teorias e definições para a natureza da luz, seguindo duas linhas principais: a luz tem natureza corpuscular e a luz tem natureza ondulatória. O modelo com maior aceitação até o séc. XVIII foi o modelo corpuscular, defendido por Isaac Newton (1642-1727), que, devido a sua influência na comunidade científica, não encontrava muita resistência para ser aceito. Já a natureza ondulatória da luz tinha como principal defensor Christian Huygens (1629-1695), afirmando que a luz era onda e que cada ponto de uma frente de onda agia como uma fonte para uma nova onda.

No início do século XIX a teoria ondulatória ganhou espaço no cenário científico. O mérito para esse feito é dado a Thomas Young (1773-1829), que em 1801 consagrou-se na defesa da teoria ondulatória realizando um importante experimento denominado “experimento da fenda dupla”.

Para realizar sua experiência, Young observou, através de um anteparo no qual havia feito dois furos pequenos e próximos, a luz proveniente de uma fonte pequena e suficientemente distante, para que pudesse ser considerada como praticamente pontual. A figura que observou [...] era composta por uma série de franjas, com regiões claras e escuras, - um efeito parecido como batimento nas ondas sonoras (BARTHEM, 2005, p. 32).

O modelo ondulatório foi formalizado a partir do aperfeiçoamento do modelo de Huygens e Young, de ondículas, proposto por Augustin Jean Fresnel (1788-1827), primeiro a desenvolver um modelo matemático para a teoria ondulatória da luz, que até então era de caráter qualitativo.

Assim, a teoria da natureza ondulatória da luz foi aceita e prevaleceu durante todo o século XIX. Porém, o que já parecia muito bem definido voltou a ser questionado quando, no início do século XX, Albert Einstein (1879-1955) retomou um experimento realizado em 1886 por Heinrich Rudolf Hertz (1857-1894). Nesse experimento, Hertz conseguiu comprovar que a luz é uma onda eletromagnética. O mais impressionante fato presente nos estudos de Hertz é que em uma única experiência ele consolida a natureza eletromagnética das ondas da luz e aponta novamente para a natureza corpuscular da mesma.

Rosa (2012) assim descreve o experimento de Hertz:

[...] utilizando um detector e um oscilador que construía, [Hertz] foi capaz de produzir ondas eletromagnéticas de comprimento suficientemente curtas para estudá-las em laboratório. Sua conclusão seria a de que as propriedades das ondas eram similares às da luz, o que o levou a concluir que as ondas de luz eram radiações eletromagnéticas, segundo as equações de Maxwell. Estava dado o primeiro passo para o conhecimento do efeito fotoelétrico (ROSA, 2012. p. 137).

Para Barthem (2005), “Hertz deparou-se com aquilo que viria a ser o segundo tempo da teoria corpuscular. Ele notou que, quando a luz ultravioleta iluminava o terminal negativo, as faíscas surgiam mais facilmente” (BARTHEM, 2005, p. 38).

Naquele momento, Hertz não se ateu a tentar compreender a emissão das faíscas em seus terminais; esse fenômeno é atualmente denominado efeito fotoelétrico.

O efeito fotoelétrico não é explicável no domínio da Física Clássica; surge, então, a Física Quântica (com a proposta de quantização da luz), em que é necessário considerar a luz como partícula, o fóton.

Esse fenômeno é verificado quando uma placa de metal é atingida por luz de determinada frequência e tem elétrons emitidos da sua superfície, porém, verifica-se que não é em todos os casos que o elétron é desprendido do metal. A energia do fóton (E) depende de sua frequência (quanto maior a frequência, maior será a energia do fóton) e, para que ocorra o efeito fotoelétrico, a energia do mesmo precisa ser igual ou maior do que a energia de interação do elétron com a placa.

No ano de 1905 Einstein retoma o modelo corpuscular, com um aspecto totalmente diferente do que já havia sido proposto, atingindo conjecturas não imaginadas até então, dando origem à Física Quântica. Rocha *et al.* (2011, p. 401) descrevem que “Einstein explicou o efeito fotoelétrico, partindo da hipótese de Planck, e afirmando que, ao invés de imaginar a luz como uma onda de energia discreta, era mais conveniente imaginá-la como formada por partículas”.

O modelo proposto por Einstein apresenta a quantização da luz, em que a luz é composta por fótons (quanta de energia). Cada fóton é um conjunto de determinada quantidade de energia definida, comumente chamado de “pacote”, que tem a velocidade da luz; o fóton é formado por quantum de luz e a sua energia é proporcional à sua frequência. Segundo Salvetti (2008), a luz pode ser compreendida como um conjunto de fótons comportando-se como onda eletromagnética, ou seja, um “pacote de energia” que apresenta características e comportamento ondulatório, com comprimento de onda e frequência quando analisados de forma coletiva; mas, observado individualmente, o

fóton apresenta características de partículas, tendo energia, velocidade e podendo colidir-se com elétrons. De acordo com Rocha *et al.* (2011), a comprovação realizada por Einstein evidenciava este caráter dual da luz e, por esse motivo, tornou-se dramática.

Esta observação o levou, em 1924, a afirmar que havia duas teorias para a luz, ambas indispensáveis, porém sem qualquer conexão lógica. O que aquele célebre físico imaginava é que não se poderia abandonar o caráter “ondulatório” da luz (e de todas as radiações eletromagnéticas) consagrado no século anterior. Por isso mesmo, estabeleceu-se um dos mais sérios dilemas entre os cientistas àquela época - que era a compreensão do caráter dual (onda-partícula) da luz. Apesar de tal dificuldade, nada poderia evitar que a luz se comportasse de tal maneira (ROCHA *et al.*, 2011, p. 403).

A partir do modelo apresentado por Einstein, a natureza da luz passou a ser compreendida como de caráter ondulatório e corpuscular, ou seja, obteve o caráter dual onda-partícula.

MÓDULO 6

AVALIAÇÃO

OBJETIVOS

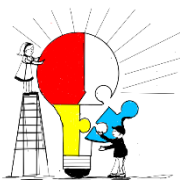
- ✓ Produzir mapa conceitual sobre a luz.
- ✓ Realiza um levantamento dos conhecimentos e conceitos adquiridos no decorrer dos encontros.
- ✓ Propor questões nas quais o conteúdo abordado está contextualizado de diferentes formas.

ENCAMINHAMENTO METODOLÓGICO

O professor deve solicitar que os alunos produzam individualmente, um mapa conceitual sobre a luz, disponibilizar o tempo necessário para a realização dessa atividade. Na sequência pedir que os alunos respondam as questões propostas. Sugere-se que o professor convide os alunos a analisarem e compararem o primeiro mapa conceitual construído com o mapa feito nesse momento, refletindo se houve aumento e diferenciação entre os conceitos relacionados.

AVALIAÇÃO

Com a produção do mapa conceitual individual, o professor pode analisar a compreensão que o aluno teve sobre a natureza da luz, observando os conceitos principais que serão expostos por cada aluno, espera-se que o aluno consiga realizar a luz com conceitos que remetam ao seu comportamento dual, como partículas, corpúsculos, ondas, ondas eletromagnéticas. Ao analisar o questionário final, o professor, pode verificar se o aluno consegue identificar os conceitos trabalhados quando são aplicados em diferentes situações.



SAIBA MAIS...

Sobre Aprendizagem Significativa

O **mapa conceitual** pode ser usado como um instrumento facilitador da aprendizagem. Outro detalhe importante sobre mapas conceituais é que o mesmo deve ser explicado por quem o fez.

“Como instrumento de avaliação da aprendizagem, mapas conceituais podem ser usados para se obter uma visualização da organização conceitual que o aprendiz atribui a um dado conhecimento. Trata-se, basicamente, de uma técnica não tradicional de avaliação que busca informações sobre os significados e relações significativas entre conceitos-chave da matéria de ensino segundo o ponto de vista do aluno” (MOREIRA, 2011, p. 129).

A **avaliação** da Aprendizagem Significativa não pode ser simplesmente uma constatação de certo ou errado, exige uma nova postura do docente, pois trata-se de uma avaliação progressiva.

“É necessário buscar evidências de aprendizagem significativa, ao invés de querer determinar se ocorreu ou não” (MOREIRA, 2011, p. 52).

O professor deve estar atento à necessidade de retomada, mesmo que seja dos subsunçores necessários e não disponíveis pelos alunos, e permitir que o aluno refaça suas atividades formativas mais de uma vez se for o caso, assim, a avaliação deve ser formativa e recursiva. “É importante que ele externalize os significados que está captando, que explique, justifique, as suas respostas” (MOREIRA, 2011, p. 52).

REFERÊNCIAS

BARTHEM, R. **A Luz: Temas atuais de física**. 1. ed. São Paulo: Livraria da Física: Sociedade Brasileira de Física, 2005.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de física – Volume 4**. Tradução Ronaldo Sérgio de Biasi. 9.ed. v. 2. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

HAWKING, S. W. **Uma Breve História do Tempo**. Ilustração Ron Miller, tradução Cássio de Arantes Leite. 1. ed. Rio de Janeiro: Intrínseca, 2015.

HELERBROCK, R. "**Dualidade onda-partícula**"; *Brasil Escola*. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/fisica/a-natureza-dual-luz.htm>. Acesso em: 24 set. 2021.

Laboratório de Pesquisa em Ensino de Física da Faculdade de Educação da USP. <https://sites.usp.br/nupic/wp-content/uploads/sites/293/2016/05/aluno-Blocoll-Particula-e-onda.pdf> . Acesso em: 15 jul. 2021.

MAGRON, A. A. **Estudo de uma proposta para o ensino de astrofísica a partir da aprendizagem significativa**. 2021. Dissertação (Mestrado Profissional de Ensino de Física) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2021.

MOREIRA, M. A. **Aprendizagem Significativa: a teoria e textos complementares**. 1. ed. São Paulo: Livraria da Física, 2011.

ROCHA, J. F. M. (Org.), *et al.* **Origens e evolução das idéias da física** [livro eletrônico]. Salvador: EDUFBA, 2011.

ROSA, C. A. de P. **História da ciência: o pensamento científico e a ciência no século XIX**. volume II. 2. ed. Brasília: FUNAG, 2012.

SALVETTI, A. R. **A História da Luz**. 2. ed. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2008.

SANT'ANNA, B. *et al.* **Conexões com a física- 2** Estudo do calor, óptica geométrica, fenômenos ondulatórios. 2. ed. São Paulo: Moderna, 2013.

SILVA, F. W. O. História da Física e Ciências Afins: A evolução da teoria ondulatória da luz e os livros didáticos. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 29, n. 1, p. 149-159, 2007.