



**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE FÍSICA
MESTRADO NACIONAL PROFISSIONAL EM ENSINO DE FÍSICA
POLO 01**

**SEQUÊNCIA DE ENSINO INVESTIGATIVA PARA O ESTUDO DA ÓPTICA
ANCORADA NA TEORIA DE INSTRUÇÃO DE BRUNER:
ATIVIDADES EXPERIMENTAIS E FRAGMENTOS HISTÓRICOS**

Nayana Helena Negrão de Souza

Brasília – DF

2023

Nayana Helena Negrão de Souza

**Sequência de Ensino Investigativa para o Estudo da Óptica ancorada na Teoria de
Instrução de Bruner: Atividades experimentais e fragmentos Históricos**

Dissertação apresentada ao Polo 01 do Programa de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física da Universidade de Brasília como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física. Área de concentração: Física na Educação Básica.

Orientadora: Prof. Dra. Vanessa Carvalho de Andrade

Brasília – DF
2023

FICHA CATALOGRÁFICA

Ficha catalográfica elaborada automaticamente,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Ss Souza, Nayana Helena Negrão de
Sequência de Ensino Investigativa para o Estudo da Óptica ancorada na Teoria de Instrução de Bruner: Atividades experimentais e fragmentos Históricos / Nayana Helena Negrão de Souza; orientador Vanessa Carvalho de Andrade. -- Brasília, 2023.
131 p.

Dissertação (Mestrado Profissional em Ensino de Física) -- Universidade de Brasília, 2023.

1. Ensino de Física. 2. Óptica. 3. Efeito Fotoelétrico. 4. Teoria de Instrução de Bruner. 5. Sequência de Ensino Investigativa. I. Andrade, Vanessa Carvalho de, orient. II. Título.

Nayana Helena Negrão de Souza

**UMA SEQUÊNCIA DE ENSINO INVESTIGATIVA PARA O ESTUDO DA ÓPTICA
ANCORADA NA TEORIA DE INSTRUÇÃO DE BRUNER:
ATIVIDADES EXPERIMENTAIS E FRAGMENTOS HISTÓRICOS**

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

Aprovada por:

BANCA EXAMINADORA

Dra. Vanessa Carvalho de Andrade - Orientadora
Universidade de Brasília

Dr. Khalil Oliveira Portugal – Membro Interno
Universidade de Brasília

Dr. Adam Smith Gontijo Brito de Assis – Membro Externo
Secretaria de Educação do Distrito Federal

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Ana Cecília e André Luis, pelos ensinamentos e valores que guiaram a minha trajetória pessoal e profissional.

Ao Tairone por todo companheirismo e incentivo em todos os meus projetos de vida, em particular, durante o período do mestrado, pois através da sua parceria foi possível vencer os momentos de inseguranças e incertezas.

À direção do Colégio Estadual da Polícia Militar de Goiás (CEPMG) – Domingos de Oliveira, na figura do Major Weber e da professora Tatiane, pela confiança e por acreditarem na proposta, oportunizando o desenvolvimento da sequência e auxiliando com recursos materiais e pedagógicos. À toda a comunidade do CEPMG Domingos de Oliveira, alunos e servidores, que participaram e me acolheram durante a aplicação da sequência.

À minha orientadora, professora Vanessa de Andrade, por compartilhar os seus conhecimentos que me direcionaram no desenvolvimento desta dissertação, também agradeço o compromisso e a dedicação, sem isso não seria possível chegar até esse momento. Aos professores Adam Smith Assis e Khalil Portugal pela avaliação e contribuições para a versão final dessa dissertação.

Aos meus professores que me ensinaram e orientaram, desde a minha infância até os que conheci no mestrado, em especial aos professores Roseline Strieder, Cássio Laranjeiras, Marcello Ferreira, Adriana (do jardim 2), Andreia (da alfabetização), Denison (do ensino médio) e tantos outros que me fizeram apreciar e seguir a profissão de educadora.

À Universidade de Brasília (UnB) pela excelência no ensino e pela qualidade dos docentes que atuam no programa de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF). À CAPES que juntamente com a UnB viabilizaram esse programa de Pós-Graduação.

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

RESUMO

O Novo Ensino Médio, que entrou em vigor em 2022, vem com a proposta de uma educação voltada para a formação de estudantes protagonistas e críticos, capazes de aplicar os conhecimentos aprendidos na escola para atuarem de forma plena no exercício de sua cidadania. Dentro dessa finalidade, a disciplina de trilhas de aprofundamento, do Itinerário Formativo (IF), é estruturada para que os estudantes sigam percursos em consonância com o seu projeto de vida e suas aptidões (GOIÁS, 2021a). De forma a avaliar a implementação de um itinerário formativo, essa dissertação apresenta uma Sequência de Ensino Investigativa (SEI) para o Ensino da Óptica, alicerçada no ensino por investigação de Carvalho e na teoria de aprendizagem de Bruner. Com o objetivo de aplicar uma proposta que promova o processo de Alfabetização Científica (AC), a SEI foi construída através de atividades experimentais de baixo custo e fragmentos de artigos científicos, que abordam a evolução histórica da teoria da luz, mediados por espaços de diálogo. As aulas são organizadas para que o aprendiz inicie com ações concretas que o guie às ações intelectuais. Com esse intuito, são analisadas diferentes formas de representação, a aprendizagem por descoberta e o currículo em espiral de Bruner, em que se argumenta que todos podem aprender de forma justa e simplificada de acordo com o seu estágio de desenvolvimento intelectual. A sequência aborda a teoria corpuscular da luz de Newton, a teoria ondulatória de Huygens, o experimento da dupla fenda de Young e o efeito fotoelétrico de Einstein; os estudantes são estimulados a exercer o seu protagonismo para a realização das atividades e ao final de cada ciclo são retomados os conceitos com a apresentação de uma linguagem mais formal nas aulas de sistematização. Durante toda a aplicação são realizadas avaliações para analisar o processo e verificar os índices de AC e se houve aprendizagem. Todas as atividades são dispostas sempre a partir da retomada de conteúdos já vistos no IF, que são reforçados, propiciando a construção de novos conhecimentos e o estudo de novos tópicos sobre a óptica. No caso deste estudo, identifica-se indícios da adoção de posturas criativas e da promoção da cultura científica através dos resultados obtidos nos diários de bordo e na mostra cultural e científica.

Palavras-chave: Ensino de Física; Sequência de Ensino Investigativa; Teoria de Instrução de Bruner; Óptica.

ABSTRACT

The New High School, which came into effect in 2022, comes with the proposal of an education aimed at training protagonist and critical students, capable of applying the knowledge learned at school to fully act in the exercise of their citizenship. Within this purpose, the discipline of deepening tracks, of the Formative Itinerary (IF), is structured so that students follow paths in line with their life project and their skills (GOIÁS, 2021a). In order to evaluate the implementation of a formative script, this dissertation presents an Investigative Teaching Sequence (SEI) for the Teaching of Optics, based on Carvalho's teaching by investigation and on Bruner's learning theory. With the objective of applying a proposal that promotes the process of Scientific Literacy, the SEI was built through low-cost experimental activities and fragments of scientific articles, which address the historical evolution of the theory of light, mediated by spaces for dialogue. Classes are organized so that the learner starts with concrete actions that guide him to intellectual actions. For this purpose, different forms of representation are followed, learning by discovery and Bruner's spiral curriculum, in which it is argued that everyone can learn in a fair and simplified way according to their stage of intellectual development. The sequence addresses Newton's corpuscular theory of light, Huygens' wave theory, Young's double-slit experiment, and Einstein's photoelectric effect; students are encouraged to practice their protagonism in carrying out the activities and at the end of each cycle the concepts are resumed with the presentation of a more formal language in the systematization classes. Throughout the application, estimates are made to analyze the process and verify the Scientific Literacy indices and whether there has been learning. All activities are always arranged from the resumption of contents already seen in the IF, which are reinforced, providing the construction of new knowledge and the study of new contents about optics. In the case of this study, the manifestations of the adoption of creative postures and the promotion of scientific culture are identified through the results obtained in the logbooks and in the cultural and scientific exhibition.

Keywords: Physics Teaching; Investigative Teaching Sequence; Bruner's Theory of Instruction; Optics.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Nuvem de palavras dos termos recorrentes na revisão de literatura.....	18
Figura 2 - Experimentum Crucis de Newton.....	24
Figura 3 - Experimento da dupla fenda	25
Figura 4 - Interferência de ondas	25
Figura 5 - Efeito fotoelétrico	30
Figura 6 - Experimento da dispersão da luz	36
Figura 7 - Experimento do espalhamento da luz	36
Figura 8 - Fragmentos sobre o experimento do prisma.....	37
Figura 9 - Captura de tela do simulador PhET	40
Figura 10 - Experimento da dispersão da luz	40
Figura 11 - Fragmentos sobre a evolução histórica da teoria ondulatória da luz	41
Figura 12 - Simulação do efeito fotoelétrico	43
Figura 13 - Realização do experimento da decomposição da luz.....	47
Figura 14 - Desenho de A13 em anotações complementares da aula 03	50
Figura 15 - Desenho de A27 em anotações complementares da aula 03	51
Figura 16 - Hipótese levantada por A15.....	51
Figura 17 - Hipótese levantada por A16.....	52
Figura 18 - Conclusão apresentada por A15	52
Figura 19 - Conclusão apresentada por A16	52
Figura 20 - Realização do experimento do espalhamento da luz	54
Figura 21 - Realização do experimento do espalhamento da luz	62
Figura 22 - Imagem de gravação realizada pelos alunos.....	65
Figura 23 - Experimento da dupla fenda com materiais de baixo custo.....	65
Figura 24 - Simulação do efeito fotoelétrico	73
Figura 25 - Experimento da lente cilíndrica de água.....	77
Figura 26 - Jogo da luz no alvo	77
Figura 27 - Experimento do “Disco de Newton”	78
Figura 28 - Experimento da decomposição das cores	78
Figura 29 - Câmara escura.....	79
Figura 30 - Microscópio caseiro	79
Figura 31 - Simulação do holograma 3D	80
Figura 32 - Experimento da quimioluminescência.....	80
Figura 33 - Água óptica e simulação da fibra óptica.....	81
Figura 34 - Quantitativo dos diários de bordo entregues por alunos.....	88
Figura 35 - Indicativos de Alfabetização Científica.....	89
Figura 36 - Nuvem de palavras com os termos mais utilizados na mostra cultural e científica	89

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Descrição das publicações analisadas	14
Quadro 2 - Cronograma das atividades realizadas	33
Quadro 3 - Transcrição da Atividade 03 com os indicativos de AC	48
Quadro 4 - Transcrição da Atividade 05 com os indicativos de AC	54
Quadro 5 - Análise das perguntas A até I da atividade 07	58
Quadro 6 - Análise do conteúdo do diário de bordo da atividade 09	63
Quadro 7 - Calendário do mês de abril com feriados e eventos escolares	66
Quadro 8 - Transcrição da Atividade 12 com os indicativos de AC	67
Quadro 9 - Transcrição do debate entre a teoria de Huygens e Newton	70
Quadro 10 - Análise do conteúdo das respostas da atividade 15	74
Quadro 11 - Divisão dos trabalhos apresentados na mostra científica e cultural	76
Quadro 12 - Descrição das apresentações	76
Quadro 13 - Pergunta (A) da atividade diagnóstica	83
Quadro 14 - Pergunta (B) da atividade diagnóstica.....	84
Quadro 15 - Pergunta (C) da atividade diagnóstica.....	85
Quadro 16 - Pergunta (D) da atividade diagnóstica	86

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
3 REFERENCIAL TEÓRICO	19
4 ÓPTICA	23
4.1 Problema da Radiação de Corpo Negro	27
4.2 Efeito Fotoelétrico	29
5 METODOLOGIA	32
5.1 Descrição da Comunidade Escolar	32
5.2 Descrição da Sequência	33
5.3 Ferramentas de Análise da Sequência	44
6 APLICAÇÃO E ANÁLISE DA SEQUÊNCIA DE ENSINO INVESTIGATIVA	45
6.1 Atividade 01. Explicar o que é a Sequência de Ensino Investigativa – Aplicação no dia 03/02/2022	45
6.2 Atividade 02. Explicar o que é a Sequência de Ensino Investigativa – Aplicação no dia 10/02/22	45
6.3 Atividade 03. Atividade Investigativa sobre a dispersão da luz – Aplicação no dia 11/02/2022	46
6.4 Atividade 04. Atividade Investigativa sobre o espalhamento da luz Aplicação no dia 17/02/2022	53
6.5 Atividade 05. Leitura e debate de fragmentos históricos extraídos de textos científicos sobre a teoria da luz de Newton – Aplicação no dia 18/02/2022	54
6.6 Atividade 06. Preparação e organização dos grupos para as apresentações – Aplicação no dia 24/02 e 25/02/2022	57
6.7 Atividade 07. Apresentação dos grupos e exposição dos seus resultados – Aplicação no dia 03/03 e 04/03/2022	57
6.8 Atividade 08. Aula de sistematização sobre dispersão, espalhamento e os fragmentos dos textos sobre Newton – Aplicação no dia 10/03/2022	61
6.9 Atividade 09. Atividade Investigativa da dupla fenda no simulador – realização e debate – Aplicação no dia 18/03 e 24/03/2022	62
6.10 Atividade 10. Atividade Investigativa de dupla fenda com materiais de baixo custo – Aplicação no dia 25/03/2022	64
6.11 Atividade 11. Leitura de fragmentos históricos extraídos de textos científicos sobre a teoria da luz de Huygens – Aplicação no dia 30/03/2022	66
6.12 Atividade 12. Sistematização sobre o experimento da dupla fenda – Aplicação no dia 31/03/2022	67
6.13 Atividade 13. Preparação para o debate sobre a teoria ondulatória e corpuscular da luz – Aplicação no dia 28/04 e 29/04/2022	70
6.14 Atividade 14. Debate entre os estudantes sobre a teoria ondulatória e corpuscular da luz – Aplicação no dia 05/05/2022	70

6.15 Atividade 15. Simulação do efeito fotoelétrico – PhET e sistematização da radiação de corpo negro e efeito fotoelétrico – Aplicação no dia 12/05 e 13/05/2022	73
6.16 Atividade 16. Preparação e elaboração da mostra cultural e científica – Aplicação no dia 19/05, 20/05, 26/05 e 27/05/2022	75
6.17 Atividade 17 – Aplicação no dia 09/06/2022	76
7 RESULTADOS E DISCUSSÕES	83
8 CONSIDERAÇÕES FINAIS	92
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	94
APÊNDICE A - Produto Educacional	98
APÊNDICE B – Diário de Bordo	113
APÊNDICE C – Atividade diagnóstica	115
APÊNDICE D – Fragmentos de textos científicos sobre Newton	116
APÊNDICE E – Fragmentos de textos científicos sobre Huygens	117
APÊNDICE F – Atividade no Simulador de ondas do PhET	118
APÊNDICE G - Roteiro da Simulação do Efeito Fotoelétrico	119
APÊNDICE H – Texto de Sistematização	120

1 INTRODUÇÃO

Não há uma maneira simples de descrever a luz, ela se comporta de forma diferente em fenômenos distintos, necessitando, portanto, de três modelos para explicar o seu comportamento: raio luminoso, onda e fóton (KNIGHT, 2009). Isso demonstra que o seu estudo, chamado de óptica ou ótica, não é trivial. Entretanto, no ensino médio o ensino da óptica costuma ser simplificado, como menciona Ortega e Moura (2019) é comum a óptica ter uma abordagem com enfoque na geometria e não na natureza da luz. Observa-se ainda uma divisão no estudo da óptica em ondulatória e moderna, separadas entre as séries do ensino médio. Essa separação, normalmente, não apresenta a luz como modelos diferentes para explicar o seu comportamento, e sim como objetos de estudo excludentes, como a luz que é onda e uma outra que é partícula. Muitas vezes, devido ao cronograma escolar, os estudantes não são apresentados à física moderna e contemporânea (FMC), portanto, à sua natureza corpuscular.

Embora nos últimos anos tenham aumentado o número de publicações favoráveis ao ensino da FMC no ensino médio e os materiais de apoio ao professor (ALVES; SANTOS, 2021), essa realidade ainda não é vivenciada na maioria das escolas públicas. O Documento Curricular para Goiás - Etapa Ensino Médio (DC-GOEM), publicado em 2021, traz essa proposta da inserção de tópicos da FMC nos objetos de conhecimento, na componente curricular física, dentro das competências da área de ciências da natureza, no trecho:

[...] ao/à estudante a análise dos fenômenos e processos tecnológicos, com base nas relações de energia, em sua conservação, condução e transformação, abordando a radioatividade e o eletromagnetismo e suas respectivas aplicações. Ademais, será apresentada a dinâmica dos movimentos de objetos na Terra, no Sistema Solar e no Universo, a partir da análise das interações gravitacionais, além de tópicos da física moderna (GOIÁS, 2021A, p. 385).

É necessário promover um estudo da óptica voltado para a discussão acerca da natureza da luz e que atenda ao DC-GOEM, inserindo, portanto, a FMC. Esse trabalho propõe uma sequência didática que aborde desde os fenômenos da luz, analisados sob a visão da física clássica até o efeito fotoelétrico, proposto por Einstein. A evolução histórica a partir da óptica do século XVIII até o início do século XX é importante para que os alunos compreendam que “A ciência não brota pronta, na cabeça de *grandes gênios*” (MARTINS, 2006, p.3), porque muitas teorias surgiram com falhas e/ou explicações incompletas sofrendo revisões e reformulações posteriores. Embora não seja possível substituir o conteúdo de física pela história da ciência, esta é uma grande aliada dentro do ensino (MARTINS, 2006). Durante a sequência são utilizados fragmentos de artigos científicos que narram episódios históricos, visando a compreensão da teoria proposta pelo cientista na sua época e aproximando os alunos de textos científicos.

A sequência didática tem o intuito de promover a Alfabetização Científica (AC), que “deve ser possibilitar ao analfabeto a capacidade de organizar seu pensamento de maneira lógica, além de auxiliar na construção de uma consciência mais crítica em relação ao mundo que o cerca” (SASSERON; CARVALHO, 2008, p. 334). Em consonância a essa proposta, há o compromisso com a formação integral dos estudantes e o exercício da cidadania, como previsto no Art. 2º da Lei de Diretrizes e Bases da Educação Nacional (LDB) “A educação, dever da família e do Estado, inspirada nos princípios de liberdade e nos ideais de solidariedade humana, tem por finalidade o pleno desenvolvimento do educando, seu preparo para o exercício da cidadania e sua qualificação para o trabalho” (BRASIL, 1996) e, portanto, descrito na área de ciências da natureza na Base Nacional Comum Curricular (BNCC):

No Ensino Médio, a área deve, portanto, se comprometer, assim como as demais, com a formação dos jovens para o enfrentamento dos desafios da contemporaneidade, na direção da educação integral e da formação cidadã. Os estudantes, com maior vivência e maturidade, têm condições para aprofundar o exercício do pensamento crítico, realizar novas leituras do mundo, com base em modelos abstratos, e tomar decisões responsáveis, éticas e consistentes na identificação e solução de situações-problema. (BRASIL, 2018, p. 537).

O ensino voltado para a participação dos alunos através da alfabetização científica, a fim de que estes tenham uma formação plena e integral, será proposto através do ensino por investigação de Carvalho (2020). Nessa perspectiva, Sasseron (2018) argumenta que o professor deve oferecer condições para que o aluno possa atuar conscientemente, acerca dos conhecimentos científicos, nos âmbitos individuais e sociais. Também é ressaltado, na BNCC, que a tomada de decisão consciente só pode ser desenvolvida através do pensamento crítico, que é estimulado quando pensamos em ciência como um processo de investigação (SASSERON, 2018). Evidenciando todos esses elementos apresentados, esta dissertação propõe uma sequência investigativa para o ensino da óptica que proporcione ao discente a construção de novos conhecimentos e o desenvolvimento de habilidades de análise crítica e reflexiva. Dessa forma, o objetivo deste trabalho é analisar a viabilidade de uma Sequência de Ensino Investigativa (SEI), utilizando os pressupostos da teoria de Bruner, a fim de oportunizar o estudo da óptica e a alfabetização científica.

A fim de facilitar a compreensão da proposta, a dissertação está dividida em 8 capítulos, sendo este o primeiro. No capítulo 2 – Revisão Bibliográfica, é realizada uma análise de literaturas dos últimos cinco anos sobre a temática a ser abordada nesse trabalho, como a utilização de metodologia ativas para o ensino da óptica e a teoria de Bruner como referencial teórico para o ensino de ciências. O intuito é verificar a relevância desses pressupostos teóricos para o ensino de Física através de artigos correlatos, analisando os resultados encontrados e as

dificuldades apresentadas pelos autores. Dessa forma, é observado o *status quo* da área e são dados os encaminhamentos para o capítulo seguinte.

No capítulo 3 – Referencial Teórico, são apresentadas as teorias e metodologias utilizadas na elaboração e aplicação da SEI. Para embasar as aulas e estruturar a SEI, são apresentados os tópicos: A) Ensino por investigação proposto por Carvalho (2020), com as etapas de planejamento e elaboração, práticas experimentais investigativas e o conceito de alfabetização científica de Sasseron (2018); B) Teoria de Instrução de Bruner (1976, 2006), com destaque nos estágios de desenvolvimento intelectual, aprendizagem por descoberta e no currículo em espiral.

Após os capítulos que explicam a estrutura da SEI e a fundamentação teórica, no capítulo 4 – Óptica, explica-se, de forma aprofundada, os conceitos físicos que se pretende ensinar durante as atividades. Com o propósito de oferecer ao professor subsídios suficientes para trabalhar a óptica em sala de aula. A abordagem desse capítulo é em nível de graduação, destacando a necessidade da transposição didática para a educação básica. No capítulo 5 – Metodologia, apresenta-se: A) Descrição da comunidade escolar; B) Metodologia para a construção e desenvolvimento da sequência e; B) Análise de Conteúdo de Bardin (1977) e indicativos de AC de Sasseron (2018), metodologias utilizadas para análise qualitativa dos resultados encontrados durante as aulas.

Nos últimos capítulos da dissertação os dados obtidos são apresentados e analisados. No capítulo 6 – Aplicação e Análise da Sequência de Ensino Investigativa, é feito um relato das aulas e são apresentadas as falas transcritas dos estudantes, com uma análise preliminar das atividades. Já no capítulo 7 – Resultados e Discussões, são realizadas as caracterizações e avaliações dos dados obtidos no capítulo 6, a partir dos referenciais teóricos elencados no capítulo 3. O último capítulo, intitulado de Considerações Finais, aborda os aspectos positivos e negativos da sequência didática aplicada, destacando a sua contribuição para o ensino de física e apontando sugestões para uma nova aplicação.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo será realizada uma análise de artigos em revistas científicas e de dissertações de pós-graduação dos últimos cinco anos que aplicaram metodologias ativas, em especial o ensino por investigação, para o estudo da óptica e do efeito fotoelétrico. Como boas abordagens didáticas necessitam de referenciais teóricos que lhes deem sustentação, Carvalho (2020) cita que na SEI deve ser utilizado dois referenciais, o primeiro construtivista, responsável por descrever como ocorre a construção do conhecimento, e o segundo sociointeracionista, que permite a compreensão entre as interações aluno-aluno, aluno-professor e aluno-ambiente. A autora cita a teoria construtivista de Piaget e a sociointeracionista de Vygotsky como possíveis referenciais a serem adotados na SEI (CARVALHO, 2020). Entretanto, neste produto o ensino por investigação será fundamentado pela Teoria de Instrução de Bruner (2006), porque ela é construtivista e apresenta também as condições necessárias para a aprendizagem, abordando a importância das interações para oportunizar a aprendizagem. Dessa forma, além das metodologias ativas utilizadas para o estudo da óptica e do efeito fotoelétrico, serão analisadas obras que recorrem a teoria de ensino do Bruner para o ensino de física. No Quadro 1 são apresentadas as obras analisadas, com o ano, nome do(s) autor(es), título e local de publicação.

Quadro 1 - Descrição das publicações analisadas

Ano	Autor(es)	Título	Local de publicação
2018	Débora Oliveira dos Santos e José Galúcio Campos	Óptica geométrica sob a luz de atividades investigativas no ensino fundamental	Revista Experiências em Ensino de Ciências
2018	Franciele Henrique, Nathália Tomazio, Ramon Rosa, Adélcio Souza, Camila de Paula D'Almeida, Lucas Sciuti, Marlon Garcia, Leonardo De Boni.	Luz à primeira vista: um programa de atividades para o ensino de óptica a partir de cores	Revista Brasileira de Ensino de Física
2018	Marcello Ferreira, Olavo Leopoldino da Silva Filho, Alessandro Pinto Freitas, Renato Lourenço e Michel Lourenço	Uma proposta de ensino investigativo sobre a Física Moderna e Contemporânea: O efeito fotoelétrico	Revista Pesquisa e Debate em Educação

2018	Matheus Fernandes Mourão e Gilvandenys Leite Sales	O uso do ensino por investigação como ferramenta didático-pedagógica no ensino de física	Revista Experiências em Ensino de Ciências
2019	Daniel Ortega e Breno Arsioli Moura	Uma abordagem histórica da reflexão e da refração da luz	Revista Brasileira do Ensino de Física
2020	Danilo Flügel Lucas	Elaboração de um produto educacional para a materialização de conceitos no aprendizado de óptica geométrica aplicada às anomalias da visão	Dissertação de Mestrado do programa MNPEF no polo de ponta Grossa/PR
2020	João Mauro da Silva Júnior e Geide Rosa Coelho	O ensino por investigação como abordagem para o estudo do efeito fotoelétrico com estudantes do ensino médio de um Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia.	Caderno Brasileiro de Ensino de Física
2020	Wendell da Silva Cruzeiro	Da Ótica ao Eletromagnetismo: Uma proposta de ensino investigativo sobre a luz e seus impactos tecnológicos	Dissertação de Mestrado do programa MNPEF no polo de Brasília/DF
2021	Ana Flavia Corrêa Leão e Mara Elisangela Jappe Goi	Um olhar na teoria da aprendizagem de Bruner sobre o ensino de Ciências	Research, Society and Development
2022	Diego de Oliveira Pezzin	Uma proposta de sequência didática com base em metodologias ativas por meio do ensino híbrido para o ensino da óptica da visão e do efeito fotoelétrico.	Dissertação de Mestrado do programa MNPEF no polo de Cariacica/ES

Fonte: Elaboração própria (2023).

Em artigos e dissertações recentes sobre o ensino da óptica nota-se a busca por metodologias que propiciem o protagonismo do estudante, a fim de adotar uma postura crítica e reflexiva para superar o ensino estruturado na educação bancária (FREIRE, 1987). Em sua dissertação de mestrado, Pezzin (2022) propõe uma sequência para o ensino da óptica e do efeito fotoelétrico utilizando a sala de aula invertida e a técnica de rotações por estação, uma metodologia híbrida, utilizada pelo professor no retorno das aulas presenciais durante a pandemia de COVID-19. O que possibilitou o estudo em casa através de leituras e atividades remotas, aproveitando os dias na escola para criar um espaço de discussões e interações em grupos. Pezzin (2022) utiliza a experimentação, recurso que tem se mostrado relevante durante as aulas de física e, quando bem explorado, oportuniza a aprendizagem. Essa visão também está

presente no artigo de Henrique et al. (2018), que utiliza a demonstração aberta para promover um ensino mais dinâmico e interativo, explorando a óptica a partir do processo de formação das cores, tema que segundo o autor atrai a atenção dos discentes, favorecendo assim o ensino dos fenômenos de refração, reflexão e transmissão da luz.

Martins (2006) destaca a importância da história da ciência (HC) no ensino para uma melhor compreensão a respeito da natureza da ciência, tendo em vista que a ciência está inserida em um contexto social e cultura que a influencia diretamente e vice-versa. Entretanto, existem desafios na utilização de temas históricos no ensino de física, que devem ser apresentados adequadamente para evitar concepções simplistas e equivocadas. Ortega e Moura (2019) citam a ausência de discussões acerca da natureza física da luz e, a fim de incorporá-la corretamente, propõem atividades com HC, explorando as obras de Descartes, Huygens e Newton. Assim como Pezzin (2022) e Henrique et al. (2018), o trabalho de Ortega e Moura (2019) propõe um ensino em que a participação do estudante seja ativa, para isso as duas atividades propostas são alicerçadas na investigação científica e construídas a partir dos três momentos pedagógicos de Delizoicov e Angotti – problematização, organização e aplicação do conhecimento. Essa escolha de Ortega e Moura (2019) não explora de forma simplista a disputa entre as teorias ondulatória e corpuscular, mas sim como as obras de Newton e Huygens foram influenciadas – a favor ou oposição – pelas obras de Descartes, apresentando a óptica sem enfoque no formalismo matemático, mas, em atividades que estimulem a criticidade e priorizem o protagonismo do próprio estudante.

Para possibilitar um modelo de ensino centrado no aluno e que favoreça aprendizagem, Santos e Campos (2018) aplicaram atividades investigativas através do laboratório aberto. O processo se inicia em modelos concretos para depois chegar aos abstratos, se opondo a metodologia tradicional que faz o processo inverso. Dentro da literatura verifica-se um crescimento nas proposições de metodologias ativas, tendo em vista que o modelo unidirecional em que o professor transmite o conhecimento e o aluno absorve, mostra-se desinteressante e desestimulante aos alunos na maioria das vezes. Um artigo que faz esse destaque é o de Junior e Coelho (2020) que também expõe a necessidade de incorporar a FMC nas práticas escolares, porque elas aproximam a ciência da realidade do aluno e permitem uma aproximação histórica mais ampla e menos distorcida. Por consequência um fator relevante para estimular a discussão acerca da natureza da ciência, temática importante dentro do ensino de física, como já analisado em Ortega e Moura (2019). Uma alternativa que está presente em Junior e Coelho (2020) é a realocação do conteúdo do efeito fotoelétrico – estudado ao final da terceira série do ensino

médio – para a segunda série, logo após o conteúdo de ondulatória, evitando que seja abordado superficialmente ou mesmo ausente devido à falta de tempo.

Os trabalhos citados acima ressaltam a importância de metodologias que promovam o protagonismo dos estudantes. Dessa forma Mourão e Sales (2018) dizem que é fundamental despertar o interesse e a motivação nos estudantes para que a aprendizagem aconteça. Os autores sugerem como alternativa o ensino por investigação, onde o professor é um mediador das interações entre os estudantes e o objeto de estudo, responsável por questionar e apresentar novos problemas para estimular a participação ativa do discente, que proporcionará a ele a construção do seu próprio conhecimento. Mourão e Sales (2018) planejaram uma aula com um experimento de demonstração investigativa sobre o processo de convecção, mostrando que o ensino por investigação é uma ferramenta metodológica que propicia a aprendizagem do conteúdo previsto e o desenvolvimento de habilidades para que o aluno aprenda conteúdos futuros.

Dentro das propostas de sequências de ensino investigativas e o ensino da FMC, Ferreira et al. (2018) apresenta uma sequência didática de 05 aulas, cujo tema era o ensino do efeito fotoelétrico fundamentado nos Três Momentos Pedagógicos, já citado nesse capítulo. Sendo assim, Ferreira et al. (2018) explica que para o estudante alcançar o conhecimento científico esperado, o professor deve disponibilizar diferentes materiais e recursos para que o discente seja capaz de relacionar o seu cotidiano, nesse caso o funcionamento dos relés fotoelétricos, com o conhecimento científico estudado na disciplina de Física – o efeito fotoelétrico.

Como a forma que o ensino de ciências é conduzido nas escolas mostra-se falha, Leão e Goi (2021) apontam a potencialidade da teoria de Jerome Bruner para alcançar bons resultados nessa área, que ainda reproduz teorias comportamentalistas. A ciência é dinâmica, portanto, precisamos de um ensino que também seja e, nessa proposta, considerando a maturidade cognitiva do aprendiz, o currículo em espiral de Bruner é um ótimo referencial. Leão e Goi (2021) ainda expõem que a aprendizagem por descoberta pode ser relacionada com a experimentação investigativa, já que ambas estão baseadas na resolução de problemas. A vantagem dessa relação é que durante o experimento são levantadas alternativas para resolver a situação problema, proporcionando a participação ativa dos estudantes e evitando que o método da descoberta reforce apenas a memorização de passos e recaia nos moldes tradicionais. Esse problema pode acontecer quando a aprendizagem por descoberta é utilizada isoladamente.

A teoria de Bruner permite ao ensino de física diferentes abordagens e escolhas para o processo de aprendizagem de determinado conteúdo, a exemplo disso temos os produtos desenvolvidos por Lucas (2020) e Cruzeiro (2020), que têm aporte dessa teoria para o ensino

da óptica, mas seguem caminhos teóricos e metodológicos diferentes. A sequência de Lucas (2020) tem como objetivo estudar as lentes geométricas e explicá-las a partir das anomalias de visão, estruturando suas aulas na adequação das aulas com a capacidade intelectual dos discentes, como proposto por Bruner. Enquanto Cruzeiro (2020) propôs uma sequência que visa o estudo fenomenológico da luz ancorado no ensino investigativo e na aprendizagem por descoberta de Bruner. Podemos observar que Cruzeiro (2020) consegue unir o ensino por investigação e a teoria de Bruner para promover uma sequência que estude a óptica, ondulatória e o eletromagnetismo.

Examinando as dissertações e os artigos é possível identificar o crescimento da proposição de metodologias ativas para o ensino de física, devido aos problemas encontrados no ensino tradicional, que por vezes gera desinteresse e dificuldade em relacionar a física da escola com a vivência do aluno. A análise realizada buscou compreender como a óptica, o efeito fotoelétrico e a teoria de Bruner foram abordadas nos trabalhos publicados nos últimos cinco anos e se os temas apontam resultados promissores quando estão interligados. Com base nos relatos dos autores, a utilização de metodologia ativas, como o ensino por investigação e a teoria de Bruner, apontam resultados promissores para o ensino de física, em partícula da óptica e do efeito fotoelétrico. Os temas discutidos nessa dissertação estão presentes na Figura 1, gerada a partir das palavras mais frequentes nesta revisão bibliográfica.

Figura 1 - Nuvem de palavras dos termos recorrentes na revisão de literatura



WordItOut

Fonte: Elaboração própria (2022) via Word It Out. Disponível em: <https://worditout.com/>. Acesso em: 20 out. 2022.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

A SEI articula as teorias sociointeracionista e construtivista, normalmente a de Vygotsky e Piaget, respectivamente. Carvalho (2020) ressalta que apesar de parecerem teorias incompatíveis, as duas mostram-se complementares quando utilizadas em diferentes circunstâncias nas práticas escolares. Contudo, para esta SEI a teoria construtivista utilizada será a de Jerome Bruner (1976, 2006), que apresenta a aprendizagem por descobertas, em que o aluno é direcionado a desenvolver sua capacidade de solucionar problemas. A escolha desse referencial é devido a dois fatores: 1) A teoria é prescritiva e normativa, apresenta como o indivíduo aprende e estabelece normas e condições para que isso aconteça; 2) Bruner cita que o processo desenvolvido pela criança é similar ao que o cientista faz em seus laboratórios (MOREIRA, 2019), apontando recurso para o despertar do interesse investigativo.

A SEI tem enfoque na aprendizagem por descoberta, nos estágios de desenvolvimento intelectuais (*representação ativa, icônica e simbólica*) e, na linguagem como instrumento de estruturação do pensamento (BRUNER, 1976). O autor ressalta que a ausência no desenvolvimento da linguagem ocasiona um desequilíbrio cognitivo. Concomitante a essa teoria de ensino construtivista, durante a SEI são proporcionados ambientes de interação entre os estudantes com os seus pares e com a professora através de *instrumentos e signos* (VYGOTSKY, 1991), proposto dentro das etapas do ensino por investigação (CARVALHO, 2020). As quatro etapas descritas por Carvalho (2020) são: (1) *distribuição do material experimental e proposição do problema pelo professor*, (2) *resolução do problema pelos alunos*, (3) *sistematização dos conhecimentos elaborados nos grupos* e, (4) *escrever e desenhar*.

Na etapa (1) ocorre a separação dos alunos em pequenos grupos e a apresentação da atividade, com o cuidado para não demonstrar a sua execução, pois essa tarefa é dos estudantes. Na etapa (2), as ações manipulativas devem estimular a proposição de hipóteses, que apontarão os possíveis erros e acertos quando testadas. Os resultados negativos servem para descartar as variáveis que não influenciam no problema e os positivos para prosseguir na análise e, por conseguinte, construir novos conhecimentos. Na etapa (3) são realizados os momentos de debate entre a sala, ou seja, a sistematização coletiva. Os estudantes explicam como realizaram a atividade e encontraram os seus resultados, nesse espaço de diálogo estimula-se a argumentação científica, com a elaboração das justificativas para validar os dados obtidos. Na etapa (4) acontece a sistematização individual, pois já houve o período de construção de conhecimentos entre os pares na etapa 3. A internalização do processo dá-se através da

linguagem verbal e não verbal, sintetizando o conhecimento que foi construído nas etapas anteriores (CARVALHO, 2020).

Aliado ao objetivo da etapa (4), a teoria de Bruner vai destacar que a linguagem é importante para a organização do pensamento, em um trecho é descrito: “Penso frequentemente que faria mais pelos meus alunos ensinando-lhes a ler e a pensar do que dando minha matéria” (BRUNER, 1976, p. 103). Em consonância a essa afirmação, refere-se à capacidade de representação do estudante em demonstrar o que aprendeu, com a habilidade em armazenar e recuperar o conhecimento quando necessário. Ao citar a aprendizagem do indivíduo, o autor estrutura que a compreensão de um conhecimento depende de três predisposições a serem dominadas pelo aprendiz: o *modo de representação* ao qual ele é submetido, a *economia* e a *potência efetiva* (BRUNER, 2006). Os três modos de representação relacionados com a capacidade do aprendiz em compreender são a *representação ativa (operativa)*, *representação icônica* e *representação simbólica* (BRUNER, 1976).

Por um conjunto de ações apropriadas para obter determinado resultado (representação ativa); por um conjunto de imagens resumidas ou gráficos que representam conceitos, sem defini-los completamente (representação icônica); ou por um conjunto de proposições, lógicas ou simbólicas, derivado de um sistema simbólico regido por normas ou leis para formar ou transformar proposições (representação simbólica) (BRUNER, 1976, p. 52).

Os *modos de representação* variam de acordo com a faixa etária do estudante, a formação dele e o assunto específico a ser estudado. Nessa SEI, essas três variáveis são analisadas e aplicadas de acordo com o conhecimento dos aprendizes sobre a óptica, em que a fase da *representação ativa* é referente ao estabelecimento de relações entre a experiência e a ação (MOREIRA, 2019). Já a *representação icônica* é quando eles têm a capacidade de resolver os problemas mentalmente remetendo-se aos objetos e símbolos, de forma direta ou abstrata. E, por fim, na *representação simbólica*, os alunos são capazes de solucionar problemas novos (MOREIRA, 2019). A *economia* na representação é a quantidade de informações necessárias para compreender determinado assunto, ou seja, se o aprendiz precisa de vários elementos torna-se necessário um processamento demasiado o que reduz a economia (BRUNER, 1976). Dessa maneira, afirma-se que o conteúdo pode ser abordado em diferentes níveis, conceito de *currículo em espiral*. O mais econômico é reduzir o número de informações a serem armazenadas e processadas, facilitando, portanto, a aprendizagem. A *potência efetiva* é a habilidade criativa do estudante sobre o assunto aprendido e a sua capacidade em relacioná-lo com outros temas aparentemente distintos (BRUNER, 1976).

Há uma relação interessante entre economia e potência, embora teoricamente sejam elas independentes – parece claro que uma estrutura pode ser simultaneamente econômica e sem potência. É raro, porém, que uma técnica poderosa de estruturação

de um campo não seja econômica, o que leva ao cânone da parcimônia e da fé compartilhada por muitos cientistas, de ser simples a natureza (BRUNER, 1976, p. 55).

Como a teoria de Bruner é prescritiva e normativa, o enfoque é otimizar a aprendizagem, através do estabelecimento de regras para a construção de conhecimentos e técnicas (BRUNER, 1976). A teoria descreve qual a melhor forma de atendê-los estabelecendo normas e oferecendo os parâmetros (BRUNER, 1976; MOREIRA, 2019). Nesse aspecto, a aprendizagem por descoberta desperta no aluno a predisposição em aprender, objetivo que só será atingido se houver instrução, que são fornecidas pelo professor a fim de propiciar a *exploração das alternativas* (BRUNER, 2006). A teoria de instrução busca a melhor forma de ensinar para alcançar os objetivos propostos, abordando a predisposição para *explorar alternativas*, que é resumida por três aspectos voltados para o espírito investigativo: *ativação, manutenção e direção*, cita-se que “a exploração de alternativas requer algo para iniciar, algo para manter em movimento e algo para ordenar” (BRUNER, 2006, p. 55). O autor argumenta que “qualquer ideia, problema ou corpo de conhecimento pode ser apresentado de forma simples o suficiente para que qualquer aprendiz possa entender de forma reconhecível” (BRUNER, 2006, p. 55), com ênfase nas três maneiras de domínio de conteúdo e a influência das condições sociais e culturais no processo de aprendizagem.

A SEI propõe a superação da visão de senso comum através da problematização, propiciada através da exploração de situações e alternativas, mas para que isso aconteça é preciso dominar através da linguagem determinadas ferramentas (CAPECCHI, 2020). A contextualização de diferentes símbolos e linguagens – como a matemática e os conceitos científicos – são essenciais durante as aulas, pois muitas vezes o estudante não aprende porque não possui conhecimentos sobre essas ferramentas. Além do domínio das ferramentas, o professor deve atentar-se, durante a superação do senso comum, para que não ocorra a passagem brusca da linguagem coloquial para a formal, porque caso isso ocorra ao invés de aproximar haverá o distanciamento entre o fenômeno observado e o conhecimento científico, diminuindo a curiosidade e o promovendo a desmotivação do estudante (CAPECCHI, 2020). Esse retrato apresentado por Capecchi (2020) vai ao encontro da teoria de Bruner (1976), que ressalta a necessidade de despertar a curiosidade (*ativação*) para a exploração de alternativas, em que o grau de desequilíbrio deve estar de acordo com o *modo de representação, economia e potência efetiva* dominada pelo aprendiz. Entretanto, se esta premissa não for verdadeira, não haverá a exploração de alternativas e, consecutivamente, a problematização.

A educação que esperamos é uma que gere pessoas capazes de avaliar os benefícios e os malefícios em diferentes cenários, que sejam capazes de refletir e intervir na sociedade

através da tomada de decisões coerentes (SASSERON, 2018). Nessa perspectiva, observa-se a importância de trazer as dimensões socioculturais da ciência, para que seja conhecido o seu impacto em cada indivíduo, no âmbito singular e coletivo. Com o intuito de uma formação integral, não meramente conteudista, a *alfabetização científica* descrita por Sasseron (2018) recomenda que o docente propicie ambientes que promovam a construção de novos conhecimentos e o desenvolvimento de habilidades para a formação de uma cultura científica concreta. Isso também é mencionado por Araújo e Abib:

[...] as propostas que têm sido formuladas para o encaminhamento de possíveis soluções indicam a orientação de se desenvolver uma educação voltada para a participação plena dos indivíduos, que devem estar capacitados a compreender os avanços tecnológicos atuais e a atuar de modo fundamentado, consciente e responsável diante de suas possibilidades de interferência nos grupos sociais em que convivem. Nessa direção, o entendimento da natureza da Ciência de um modo geral e da Física em especial constitui um elemento fundamental à formação da cidadania (ARAUJO; ABIB, 2003, p. 176).

Normalmente a óptica é trabalhada em pouco tempo com ênfase na parte geométrica, sendo pouco discutida a natureza da luz, que quando é trabalhada tem o seu enfoque apenas na disputa entre Newton e Huygens (ORTEGA; MOURA, 2019). Em oposição a essa tendência, a SEI vai enfatizar a natureza da ciência e o desenvolvimento de atividades experimentais investigativas, o uso desses recursos é importante para a compreensão e a construção de uma aprendizagem efetiva. A experimentação tem sido uma área de pesquisa amplamente discutida nos últimos anos, pois existem vários tipos de atividades experimentais, como as famosas “receitas de bolo”, as demonstrações fechadas, demonstrações abertas e os experimentos investigativos, que serão utilizados na SEI.

É comum os alunos possuírem concepções alternativas no ensino de ciências que estão ligadas a teorias que já predominaram (BARROS; CARVALHO, 1998). Com as atividades investigativas no campo histórico e experimental, os alunos podem observar que o processo de construção da ciência é criativo e dinâmico. Torna-se importante na SEI espaços de debates e argumentações, pois quando os alunos interagem entre si eles ressignificam o conteúdo aprendido. Sendo assim, quando os alunos explicam o que entenderam eles passam por um processo criativo, com a assimilação de novos significados, por isso a importância da mostra cultural e científica, porque nela há a potencialização do espírito criativo e investigativo, característica presente nos cientistas.

4 ÓPTICA

Os primeiros filósofos e cientistas acreditavam que as cores eram um atributo do objeto, enquanto a luz tinha a sua existência dependente da visão, ou seja, havia uma diferenciação entre os conceitos de cor e luz. A partir do século XVII estudos começaram a indicar que a luz era uma entidade física que independia do fato de alguém estar olhando (KNIGHT, 2009), fazendo com que surgissem questionamentos sobre a sua natureza. Descartes foi o primeiro a estabelecer uma relação mecânica para a luz, apresentando a refração como colisões corpusculares entre a luz e a superfície onde era refratada. A decomposição da luz no prisma era conhecida por Descartes, mas para ele isso era resultado das alterações na velocidade de rotação da luz branca ao passar pelo prisma, conforme observarmos a partir da lei de Snell:

$$n_i \operatorname{sen} \theta_i = n_r \operatorname{sen} \theta_r \quad (1)$$

Em que n_i é o índice de refração do meio incidente e n_r do meio refratado. Enquanto θ_i é o ângulo do raio incidente com a reta normal e θ_r do raio refratado com a normal. Como o índice de refração (n) é a velocidade da luz no vácuo (c) dividido pela velocidade da luz no meio material (v):

$$n = \frac{c}{v} \quad (2)$$

Substituindo os índices de refração do meio incidente (n_i) e do meio refratado (n_r), teremos a relação entre as velocidades no meio de incidência (v_i) e no de refração (v_r), em que a equação de Snell-Descartes é dada por:

$$\frac{\operatorname{sen} \theta_i}{v_i} = \frac{\operatorname{sen} \theta_r}{v_r} \quad \rightarrow \quad \frac{\operatorname{sen} \theta_i}{\operatorname{sen} \theta_r} = \frac{v_i}{v_r} \quad (3)$$

Embora vários estudiosos da época soubessem da decomposição da luz, Isaac Newton foi quem propôs a explicação detalhada desse fenômeno através da sua publicação intitulada *Óptica*, em 1704. Em sua obra, ele afirma que não é o prisma que transforma a luz branca em outras cores, e sim a junção de todas as cores que geram a cor branca. Dessa forma a luz seria composta de partículas leves, extremamente pequenas e velozes. Para comprovar sua teoria, Isaac Newton colocou um segundo prisma que refrataria apenas um dos raios decompostos pelo primeiro prisma, e verificou que este sofreria apenas um desvio e não uma nova dispersão (Figura 2), como seria esperado se a proposição de Descartes estivesse correta. Essa estratégia depois ficou conhecida como experimento crucial, do latim *experimentum crucis* (POLITO, 2016).

Figura 2 - *Experimentum Crucis de Newton*

Fonte: GRUSCHE, S. (2015), CC BY-SA 4.0, via Wikimedia Commons. Disponível em: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Newton%27s_Experimentum_Crucis_\(Grusche_2015\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Newton%27s_Experimentum_Crucis_(Grusche_2015).jpg). Acesso em 20 out. 2022.

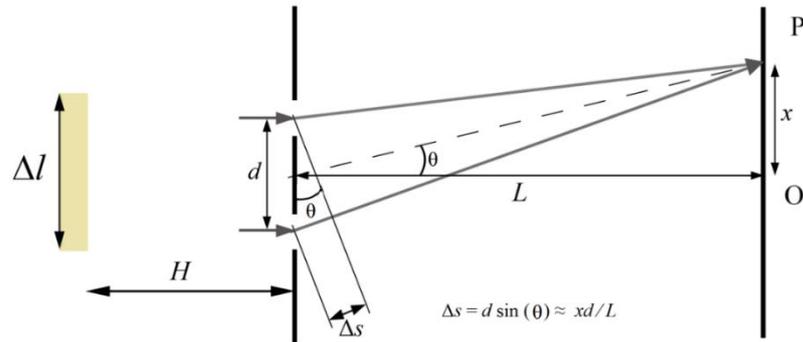
Em oposição a visão corpuscular do Newton, Robert Hooke e Christiaan Huygens defendiam uma natureza ondulatória para a luz. Em 1678, Huygens publicou a sua obra *Tratado da Luz*, desenvolvida a partir da teoria de Hooke, que comparava a luz com ondas propagadas na água (POLITO, 2016). Como a teoria de Huygens possuía limitações para explicar os fenômenos sofridos pela luz, a natureza corpuscular proposta por Newton prevaleceu durante todo o século XVIII. Apenas em 1801, com a realização do experimento da dupla fenda de Thomas Young, a teoria ondulatória superou a corpuscular.

O experimento da dupla fenda de Young consistia em passar a luz solar em uma fenda e depois incidir-la em uma superfície com duas fendas, onde seriam gerados raios (ondas) originários de uma mesma onda. Portanto, esses raios tinham o mesmo comprimento de onda e, a diferença de fase entre essas “novas ondas”, que são superpostas, não variam com o tempo, sendo os raios totalmente coerentes (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2016a). Assim, no anteparo era formada uma imagem com pontos claros (máximos) e escuros (mínimos), devido à interferência construtiva e destrutiva, pontos conhecidos como franjas de interferência (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2016a; KNIGHT, 2009).

A figura 3 mostra a separação entre as fendas d , em que o ponto P atingido pelas ondas depende do ângulo θ . Assim, de acordo com a posição do ângulo θ é demonstrado que $\Delta s = d \sin \theta$ ou $\Delta s = d \tan \theta$. No experimento, a distância L das fendas até o anteparo é sempre muito menor que a distância x entre um ponto de máximo (P) e o eixo central (O), logo teremos um ângulo muito pequeno ($\theta < 1^\circ$), então:

$$\tan \theta \approx \sin \theta \approx \theta \quad (4)$$

Figura 3 - Experimento da dupla fenda



Fonte: 567, CC0, via Wikimedia Commons (adaptada). Disponível em: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ungwikicoh.png>. Acesso em 20 out. 2022.

Na interferência Construtiva (franjas claras), Figura 4(a), temos que a diferença de percurso Δs será um número inteiro m (0, 1, 2, 3...) de comprimento de onda λ :

$$\Delta s = m\lambda \quad (5)$$

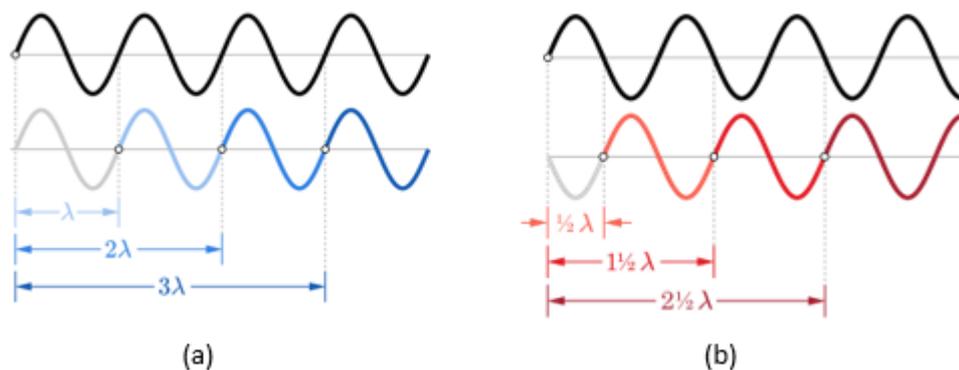
Relacionando a diferença de percurso descrita pela Figura 4(a) com a equação de interferência de onda construtiva (Eq. 5) teremos que as franjas de interferências construtivas m será dada por:

$$d \sin \theta = m\lambda \quad (6)$$

Já para interferências destrutivas (franjas escuras), Figura 4(b), a diferença de percurso Δs será um número inteiro (m) somado a metade do comprimento de onda ($\frac{1}{2}\lambda$):

$$d \sin \theta = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda \quad (7)$$

Figura 4 - Interferência de ondas



Fonte: RUN, M. (2022), CC BY-SA 4.0, via Wikimedia Commons. Disponível em: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Destructive-interference-path-difference.svg>. Acesso em 22 out. 2022.

Para ângulos muito pequenos em que são válidas as aproximações (Eq. 4), podemos achar as posições x_m e L , com θ em radianos:

$$\tan \theta \approx \theta = \frac{x_m}{L} \quad (8)$$

Em que x_m é a distância do eixo central até a franja clara m analisada. Logo se utilizarmos a Eq. 6 e a Eq. 8, teremos:

$$d \frac{x_m}{L} = m \lambda \quad (9)$$

Para as franjas claras temos:

$$x_m = \frac{m\lambda L}{d} \quad (10)$$

E para as escuras, que estão na metade do caminho entre duas franjas clara, temos:

$$x_m = \frac{\left(m + \frac{1}{2}\right) \lambda L}{d} \quad (11)$$

Assumindo que duas ondas que não estão em fase e são coerentes chegam ao ponto P (Figura 3) e sofrem interferência, com as funções de ondas:

$$f_1 = A_0 \sin(kx - \omega t) \quad e \quad f_2 = A_0 \sin(kx - \omega t + \phi) \quad (12)$$

Em que k é o número de ondas e ϕ a diferença de fase.

Como as ondas têm as mesmas amplitudes A e frequência angular ω , o deslocamento da onda (princípio da superposição) será a soma algébrica das duas funções (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2016b):

$$f' = A_0 [\sin(kx - \omega t) + \sin(kx - \omega t + \phi)] \quad (13)$$

Pela regra da soma de senos que diz:

$$\sin a + \sin b = 2 \sin\left(\frac{a+b}{2}\right) \cos\left(\frac{a-b}{2}\right) \quad (14)$$

Combinada a Eq. 13, o deslocamento da onda será:

$$f' = 2A \cos\frac{1}{2}\phi \sin \omega t (kx - \omega t + \phi) \quad (15)$$

Em que $2A \cos\frac{1}{2}\phi$ é o fator de amplitude e $\sin \omega t (kx - \omega t + \phi)$ o fator ondulatório (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2016b). A intensidade de luz é proporcional ao quadrado da amplitude e $I_1 = cA^2$ (velocidade da luz c multiplicada pela amplitude A ao quadrado), então a intensidade na franja de interferência no ponto P será:

$$I = c \left(2A \cos\frac{1}{2}\phi\right)^2, \quad (16)$$

Resolvendo $(2A)^2 = 4A^2$:

$$I = c 4A^2 \cos^2\left(\frac{1}{2}\phi\right), \quad (17)$$

Substituindo $4cA^2$ por $4I_1$:

$$I = 4I_1 \cos^2\left(\frac{1}{2}\phi\right) \quad (18)$$

Como a diferença de fase ϕ no ponto P será resultado apenas da diferença do percurso (KNIGHT, 2009):

$$\phi = 2\pi \frac{\Delta s}{\lambda} \quad (19)$$

E, substituindo a diferença do percurso Δs pela Eq. 5 com a Eq. 6, temos:

$$\phi = \frac{2\pi d}{\lambda} \sin \theta \quad (20)$$

Podemos notar que para explicar o experimento de Young é necessário um tratamento ondulatório, o que fez com que a natureza corpuscular da luz, proposta por Newton, fosse superada. Entretanto, as dúvidas sobre qual seria a natureza de onda da luz continuaram. Apenas cerca de 60 anos depois, influenciado pelos trabalhos de Michael Faraday e William Thomson, James Clerk Maxwell eleva a teoria ondulatória ao seu ápice, quando descreve matematicamente as ondas eletromagnéticas e descobre que a sua velocidade é a mesma da luz (TIPLER; MOSCA, 2009). Maxwell postulou que a luz deveria ser uma onda eletromagnética, mas a sua existência só foi comprovada experimentalmente em 1888, pelo físico Heinrich Rudolf Hertz. Contudo, novos fenômenos e descobertas, como o problema da radiação do corpo negro e o espectro discreto, não puderam ser explicadas no escopo da mecânica newtoniana e do eletromagnetismo de Maxwell. Até o início do século XX se acreditava que a luz fosse uma onda e os átomos fossem partículas, com características bem definidas. Apenas no século XX percebeu-se que por vezes os elétrons se comportam como ondas, enquanto a luz se comporta como partícula quando transporta energia em pacotes, conhecidos como quanta (TIPLER; MOSCA, 2009).

4.1 Problema da Radiação de Corpo Negro

Todos os corpos emitem radiação eletromagnética devido à sua temperatura, conhecida como radiação térmica. A exemplo disso, quando um corpo é aquecido com temperatura inferior a 600 °C ele emite radiação, inicialmente na faixa do infravermelho, ao aumentar essa temperatura para 600 °C nota-se uma coloração avermelhada. Conforme a temperatura fica maior a coloração do corpo vai mudando, ou seja, passa a emitir ondas eletromagnéticas mais energéticas (PERUZZO; POTTKER; PRADO, 2014). Existem corpos que são ótimos absorvedores de radiação, pois ao recebê-la os seus átomos ficam extremamente agitados o que provoca um aumento significativo da sua energia cinética. Com a aceleração das suas partículas ocorre a emissão de radiação, conseqüentemente são ótimos emissores também.

Gustav Robert Kirchhoff, praticamente na metade do século XIX, descreveu em seu artigo que corpos a mesma temperatura e com mesmo comprimento de onda tinham a mesma razão entre a potência emissiva (e) e a absorvida (a), como vemos na Eq. 21. Depois, mostrou que havia corpos cuja emissão de radiação dependia somente da frequência e da temperatura, os chamados corpos negros (STUDART, 2000), logo também absorvia toda a radiação incidida sobre ele:

$$\frac{e_1}{a_1} = \frac{e_2}{a_2} \quad (21)$$

À luz da física clássica, Josef Stefan (1879), experimentalmente, e Ludwig Boltzmann (1884), teoricamente, conseguiram relacionar a energia irradiada por unidade de área (E) com a temperatura (T):

$$E = \sigma T^4 \quad \text{corpos negros} \quad (22)$$

Em que σ é a constante de Stefan-Boltzmann, que corresponde a $5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$. Demonstrando que a energia irradiada por unidade de área dos corpos negros não depende das características do seu material, e, sim, apenas da sua temperatura; diferente dos corpos não negros em que E depende da sua emissividade ε , cujo valor varia de acordo as suas características (PERUZZO; POTTKER; PRADO, 2014):

$$E = \varepsilon \sigma T^4 \quad \text{corpos não negros} \quad (23)$$

Dentro dessa relação entre a radiação de corpo negro com a temperatura, há outra lei que é a lei Wien, que preserva a premissa da lei de Stefan- Boltzmann, resultando em termos do comprimento de onda na equação Eq.24:

$$\rho(\lambda, T) = \lambda^{-5} \varphi(\lambda T) \quad (24)$$

Que resulta na lei de deslocamento para calcular o comprimento de onda quando a intensidade de radiação for máxima (STURDART, 2000):

$$\lambda_{max} T = b \quad (25)$$

Sendo b a constante de dispersão de Wien, que equivale a $2,898.10^{-3} \text{ mK}$.

Com a Eq. 25 verifica-se que o comprimento de onda (λ) é diretamente proporcional a temperatura (T), relação comprovada experimentalmente. Apesar dessa evidência, não era possível encontrar uma função coerente para a distribuição espectral e a lei de Wien falhava na faixa do infravermelho. No início de 1900, Lord Rayleigh explicando a radiação de corpo negro através da mecânica estatística de Maxwell-Boltzmann, encontrou uma equação para a distribuição espectral diferente da proposta por Wien, que após correções de James Jeans, ficou conhecida como lei de Rayleigh-Jeans (STURDART, 2000), apresentada na Eq.26, com k sendo a constante de Boltzmann:

$$\rho(\lambda, T) = \frac{8\pi kT}{\lambda^3} \quad (26)$$

A Eq. 26 funcionava bem para grandes comprimentos de ondas, mas não correspondia ao que acontecia experimentalmente para pequenos comprimentos de ondas, por isso Paul Ehrenfest a chamou de catástrofe do ultravioleta. Então, *a priori*, havia uma equação que respondia a pequenos comprimentos de onda, lei de Wien, e outra aos grandes comprimentos de onda, lei de Rayleigh-Jeans. Quem conseguiu propor uma equação de distribuição espectral que satisfizesse e correspondesse ao que era visto no laboratório foi Max Planck. Apesar do seu conservadorismo clássico, ele precisou recorrer a um modelo não tradicional influenciado pela mecânica estatística de Boltzmann (STUDART, 2000), para explicar a radiação de corpo negro. Inicialmente, em 1900, Planck encontrou a Eq. 27 para a distribuição espectral, com base na lei de Wien:

$$\rho(\nu, T) = \frac{8\pi}{c^3} \frac{A\nu^3}{e^{B\nu/T} - 1} \quad (27)$$

Em que A e B são *constantes genéricas* (STUDART, 2000). Posteriormente, ao confirmar que a sua equação era adequada aos experimentos, Planck introduziu a ideia de quantização de energia.

4.2 Efeito Fotoelétrico

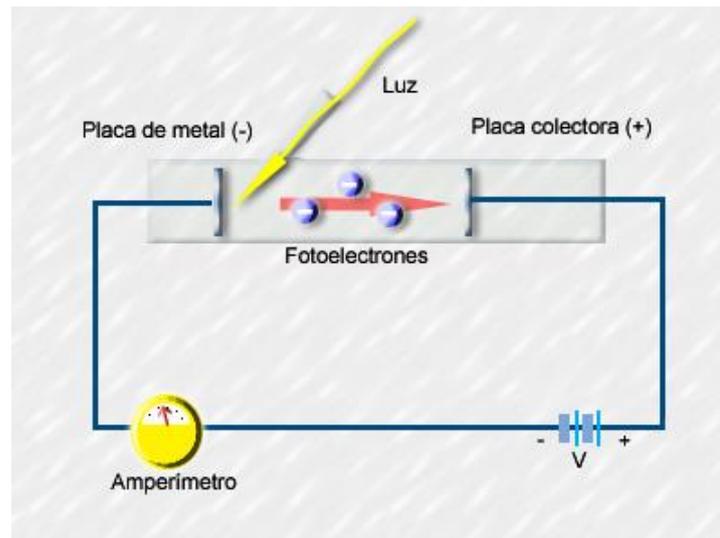
Em 1905, Albert Einstein publicou um artigo explicando o efeito fotoelétrico na revista alemã *Annalen der Physik*, em português a tradução é Anais da Física. Trouxe as ideias de Planck sobre quantização de energia, só que agora como uma característica elementar das fontes luminosas (PERUZZO; POTTKER; PRADO, 2014). Einstein definiu que “a luz é formada por unidades discretas e sem massa chamadas de fótons.” (KNIGHT, 2009, p. 770) e que um fóton tem energia E igual a:

$$E = hf \quad (28)$$

Em que h é a constante de Planck que corresponde a $6,63 \times 10^{-34}$ Js, e f é a frequência da luz emitida. Dessa forma, Einstein propôs que a menor energia a ser emitida ou absorvida por uma luz de frequência f terá o seu valor multiplicado a h . Além disso, enunciou que há a criação e aniquilação de fótons pela transferência de energia entre os átomos e a luz, sendo sempre a variação de energia correspondente a energia do fóton (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2016a). O conceito de fóton foi necessário para explicar a emissão de elétrons por superfícies metálicas quando submetidas a feixes de luz acima de determinada frequência, esse fenômeno foi chamado de efeito fotoelétrico.

Na Figura 5 há duas placas metálicas, uma delas está ligada ao terminal positivo de uma fonte de tensão e a outra ao terminal negativo. Ao incidir uma luz sobre a placa negativa ocorre um fluxo de elétrons que produz uma corrente elétrica que é medida pelo amperímetro. Isso acontece porque os elétrons são ejetados da placa submetida a tensão negativa e são recolhidos pela placa positiva.

Figura 5 - Efeito fotoelétrico



Fonte: JUZAM, domínio público, via Wikimedia Commons. Disponível em: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:EfectoFotoelectrico.png>. Acesso em 23 out. 2022.

O experimento do efeito fotoelétrico mostra que a corrente elétrica cresce com o aumento da diferença de potencial (V) entre as placas, até atingir o valor máximo e ficar constante (PERUZZO; POTTKER; PRADO, 2014). Em contrapartida, quando a luz incide sobre a placa coletora ligada ao terminal positivo, verifica-se que a placa negativa repele os elétrons caso a diferença de potencial seja menor ou igual ao potencial de corte (V_{corte}), o que permite o cálculo da energia cinética máxima (K_{max}) desses elétrons, em que e é a carga elementar do elétron:

$$K_{max} = eV_{corte} \quad (29)$$

Com os experimentos é possível notar que a energia cinética máxima não depende da intensidade da luz para uma mesma frequência que está atingindo a placa. Esse fato não pode ser explicado pela física clássica, que previa o aumento da energia dos elétrons ejetados quando submetidos a ondas luminosas com maior intensidade. Como já mencionado, a solução dada foi o tratamento corpuscular, em que para os elétrons saírem da placa positiva e chegarem na placa negativa é necessário atingir uma frequência (f) superior a frequência de corte (f_0). Tendo em vista que a energia do fóton é transmitida para o elétron, que para ser ejetado precisa de uma

energia mínima, chamada de função trabalho Φ que depende do material da placa. Por fim, a equação de Einstein que explica o efeito fotoelétrico é:

$$hf = K_{max} + \Phi \quad (30)$$

O prêmio Nobel recebido por Einstein foi devido à sua explicação do efeito fotoelétrico, que mostrou a natureza dual da luz – onda e partícula – em que os quanta de luz transportam energia e momento linear na sua propagação.

5 METODOLOGIA

5.1 Descrição da Comunidade Escolar

A Sequência de Ensino Investigativa (SEI) foi aplicada no Colégio Estadual da Polícia Militar (CEPMG) – Unidade Domingos de Oliveira, localizado em Formosa/GO. O CEPMG foi criado em julho de 1976 pela Lei 8.125, mas o seu funcionamento só iniciou em 1998, na cidade de Goiânia, após a publicação da portaria nº 604 de 19 de novembro do mesmo ano. As novas unidades de ensino, que totalizam 45 unidades em mais de 30 municípios goianos, foram criadas a partir de cessão de escolas já existentes. Houve assim, a reestruturação dessas escolas com um modelo de gestão híbrido entre a Secretaria de Estado da Educação de Goiás (SEDUC/GO), a Polícia Militar do Estado e a sociedade local.

O CEPMG – Domingos de Oliveira é uma escola de tempo parcial e a carga horária para a disciplina de física na 2ª série são 40 h anuais, resultando em 1 aula semanal com duração de 50 minutos, por isso não foi possível desenvolver a SEI nas aulas de física. Com essa impossibilidade, a SEI para o ensino da óptica foi construída para a disciplina de Trilhas de Aprofundamento, implementada no colégio no ano de 2022. A sequência apresenta diversas formas de representações e diferentes níveis de profundidade, como proposto por Bruner (1976), aumentando gradativamente a liberdade experimental entre as atividades (CARVALHO, 2018), com a utilização também de problemas não experimentais.

As trilhas de aprofundamento fazem parte dos Itinerários Formativos (IFs) presentes do DC-GOEM, instituído através do Parecer COCP-CEE-18461 Nº 32/2021. Em que é descrito a sua composição: “composto por duas partes indissociáveis: a Formação Geral Básica (FGB) e os Itinerários Formativos (IFs)” (GOIÁS, 2021b, p. 2). No DC-GOEM as Trilhas de Aprofundamento são definidas como:

um conjunto de atividades educativas que os/as estudantes podem escolher, conforme seu interesse, para aprofundar e ampliar a aprendizagem em uma ou mais áreas do conhecimento e/ou na Formação Técnica e Profissional, visando a formação integral dos/as estudantes para que se tornem cidadãos/ãs autônomos/as, críticos/as e responsáveis consigo e com o mundo (GOIÁS, 2021a, p. 506).

Na trilha, o estudante deve permear quatro eixos estruturantes: *Investigação Científica*, *Processos Criativos*, *Mediação e Intervenção Sociocultural* e *Empreendedorismo* (Goiás, 2021a). Dentro da SEI, na *Investigação Científica* os estudantes desenvolvem um projeto de pesquisa com elaboração de relatórios para ao final realizarem a mostra científica, com apresentações de trabalhos orais e pôsteres. Nos *Processos Criativos* eles são levados a criar explicações inovadoras para solução de problemas a fim de realizar apresentações teatrais, musicais e práticas experimentais durante e ao término da SEI. A culminância da construção

realizada pelos alunos é apresentada para a comunidade escolar no eixo de *Intervenção Sociocultural*, almejando a internalização dessas ações para que reflitam sobre caminhos a serem trilhados após o término da Educação Básica. No último eixo, *Empreendedorismo*, visa-se o âmbito pessoal e social, que está relacionado com o reconhecimento de experiência de pesquisa, mobilização e criações para desenvolver ou construir caminhos para sua vida após o ensino médio (GOIÁS, 2021a).

A aplicação da SEI aconteceu no Itinerário Formativo *Energia que nos Move*, trilha de aprofundamento de Ciências da Natureza e suas Tecnologias (CNT), durante o primeiro semestre de 2022. A disciplina possui quatro aulas semanais de aprofundamento em física, totalizando 80 horas semestrais, o que permitiu o desenvolvimento das unidades curriculares de *Investigação e Exploração da Carreira Científica* (Unidade 1) e *Natureza da Energia* (Unidade 2), propostas no DC-GOEM.

5.2 Descrição da Sequência

Na sequência investigativa é proposta uma questão-problema geral: Como podemos definir a natureza da luz? E para que esta seja respondida ao final da SEI, serão propostas questões-problema específicas em todas as Atividades Investigativas (AIs). Durante a SEI é explorado o *currículo em espiral*, os alunos estudam os conteúdos em vários níveis, sempre retomando-os nas atividades posteriores. Os registros das aulas são as gravações em vídeo das aulas e os diários de bordo, disponibilizados aos estudantes na aula 01, para que eles realizem suas anotações acerca das atividades experimentais. Ao final das 17 atividades, os diários de bordo são recolhidos e os alunos propõem novos experimentos, apresentações e conclusões para a mostra cultural e científica. O cronograma das atividades desenvolvidas é apresentado no Quadro 2.

Quadro 2 - Cronograma das atividades realizadas

Atividades	Datas	Descrição das Atividades
01	03/02/22	Explicar o que é a Sequência de Ensino Investigativa.
02	10/02/22	Aplicação da atividade diagnóstica e apresentação da questão-problema.
03	11/02/22	Atividade Investigativa sobre a dispersão da luz – realização do experimento e debate sobre o experimento.
04	17/02/22	Atividade Investigativa sobre o espalhamento da luz – realização do experimento e debate sobre o experimento.
05	18/02/22	Leitura e debate de fragmentos históricos extraídos de textos científicos sobre a teoria da luz de Newton.

06	24 e 25/02/22	Preparação e organização dos grupos para a apresentação das explicações e resultados dos experimentos e da leitura dos fragmentos.
07	03 e 04/03/22	Apresentação dos grupos e exposição dos seus resultados.
08	10/03/22	Aula de sistematização sobre dispersão, espalhamento e os fragmentos dos textos sobre Newton.
09	18 e 24/03/22	Atividade Investigativa da dupla fenda no simulador – realização e debate.
10	25/03/22	Atividade Investigativa de dupla fenda com materiais de baixo custo – realização e debate.
11	30/03/22	Leitura de fragmentos históricos extraídos de textos científicos sobre a teoria da luz de Huygens.
12	31/03/22	Sistematização sobre o experimento da dupla fenda.
13	28 e 29/04/22	Preparação para o debate sobre a teoria ondulatória e corpuscular da luz.
14	05/05/22	Debate entre os estudantes sobre a teoria ondulatória e corpuscular da luz.
15	12 e 13/05/22	Simulação do efeito fotoelétrico – PhET e sistematização da radiação de corpo negro e efeito fotoelétrico.
16	19 e 20/05/22 26 e 27/05/22	Preparação e elaboração da mostra cultural e científica.
17	09/06/22	Realização da mostra cultural e científica.

Fonte: Elaboração própria (2022).

ATIVIDADE 01. Explicar o que é a Sequência de Ensino Investigativa.

É explicada a metodologia da SEI que será desenvolvida no semestre, com a apresentação do diário de bordo e a descrição dos campos que devem ser preenchidos durante as AIs. Essa atividade é fundamental, porque durante as atividades manipulativas os estudantes devem refletir sobre suas ações para “a passagem da ação manipulativa para a ação intelectual” (CARVALHO, 2020, p. 3) acerca do conteúdo ensinado. Como a realidade do ensino de física é o modelo tradicional, esse primeiro momento apresenta o que são as metodologias de ensino ativas e pretende motivar os estudantes a fim de que explorem a sua autonomia e protagonismo durante as aulas, com ênfase na importância da análise dos erros durante a aprendizagem.

ATIVIDADE 02. Aplicação da atividade diagnóstica e apresentação da questão-problema.

O objetivo é identificar os conhecimentos preexistentes sobre o conceito da luz, mediante a aplicação de um questionário com diferentes perguntas, que permitam nortear e adequar a SEI para viabilizar a resolução da questão-problema. Como cita Abib (2018) a avaliação tem papel central no ensino, pois é através dela que identificamos os problemas e então propomos novas soluções e caminhos durante o processo de aprendizagem. Durante a

SEI são utilizadas diferentes ferramentas de avaliação. O seu intuito não é apontar apenas as dificuldades dos aprendizes, mas também, mostrar os erros nos procedimentos adotados pelo professor (ABIB, 2018).

A atividade diagnóstica é aplicada para identificar os conhecimentos já construídos e os em desenvolvimento pelos discentes e para isso são realizadas as perguntas: [1] Quais conceitos físicos estudados você relaciona com a luz? [2] Como você explicaria o conceito de luz para alguém? [3] Por que você acha que o céu é azul? [4] O que você entende por efeito fotoelétrico? As respostas norteiam a SEI na adequação ou na busca de novas atividades que propiciem a aprendizagem do conteúdo de óptica.

ATIVIDADE 03 e 04. Atividade Investigativa sobre a dispersão da luz – realização do experimento e debate sobre o experimento e; Atividade Investigativa sobre o espalhamento da luz – realização do experimento e debate sobre o experimento.

Nessa atividade os estudantes se reúnem em grupos com 05 integrantes e recebem os materiais para o experimento. Na AI 03 (Figura 6): uma cartolina, um espelho e uma bacia; na AI 04 (Figura 7): uma vasilha retangular transparente, diferentes fontes de luz e leite. Para essas atividades não há roteiros, é apenas solicitado na AI 03 que a bacia seja preenchida com água e que eles projetem um arco-íris na cartolina, para tanto eles devem utilizar a luz solar e o espelho. Já na AI 04, solicita-se que os estudantes observem como a luz se comporta em toda a extensão da vasilha com diferentes fontes de luz, na ausência e na presença do leite na água.

Conforme Freire (1987) e reforçado por Capecchi (2020) é necessário problematizar situações cotidianas a fim de superar visões de senso comum, dessa forma as duas AIs estimulam o questionamento, respectivamente, sobre a formação de arco-íris e a coloração azulada do céu. A partir dessas inquietações, os fenômenos ondulatórios experimentados pelos raios luminosos são analisados e explorados. O início da sequência com práticas experimentais vai ao encontro de uma sequência considerada ideal por Bruner (2006), que recomenda que esta seja construída partindo da *representação ativa* para a *simbólica*.

Após a realização dos experimentos é necessária a *etapa de resolução de problemas* (CARVALHO, 2020), em que o grupo se reúne para discutir a atividade e levantar hipóteses sobre as AIs. Essa etapa promove a construção de novos conhecimentos através dos acertos e dos erros que apontam os fatores que influenciam e os que não influenciam nas AIs (CARVALHO, 2020). Seguido das explicações e conclusões formuladas em grupos, os alunos, individualmente, realizam a sistematização do que compreenderam em seus diários de bordo. As anotações possibilitam a análise do que foi construído ou ressignificado pelo discente.

Materiais necessários:

- **Experimento de dispersão da luz** (Figura 6): vasilha com água, espelho, cartolina branca e luz solar.

Figura 6 - Experimento da dispersão da luz



Fonte: Elaboração própria (2018).

- **Experimento do espalhamento da luz** (Figura 7): vasilha transparente, água, leite e luz branca.

Figura 7 - Experimento do espalhamento da luz



Fonte: Canal Física Universitária. Disponível em <https://www.youtube.com/watch?v=sDcWsx00O48>. Acesso em 10 dez. 2021.

ATIVIDADE 05. Leitura e debate de fragmentos históricos extraídos de textos científicos sobre a teoria da luz de Newton.

Os fragmentos de artigos científicos são utilizados para iniciar um novo tópico que é a teoria corpuscular de Newton, e, também, para transpor da linguagem informal para a linguagem formal. Todavia, como a leitura científica não é uma realidade frequente na vida acadêmica dos estudantes, para aproximá-los da linguagem científica é utilizado um material de divulgação científica que traz um vocabulário mais próximo dos estudantes quando comparado as fontes primárias, como o *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* de Isaac Newton. Bruner (2006) afirma que qualquer conteúdo pode ser ensinado de forma simplificada para que o aprendiz possa compreender.

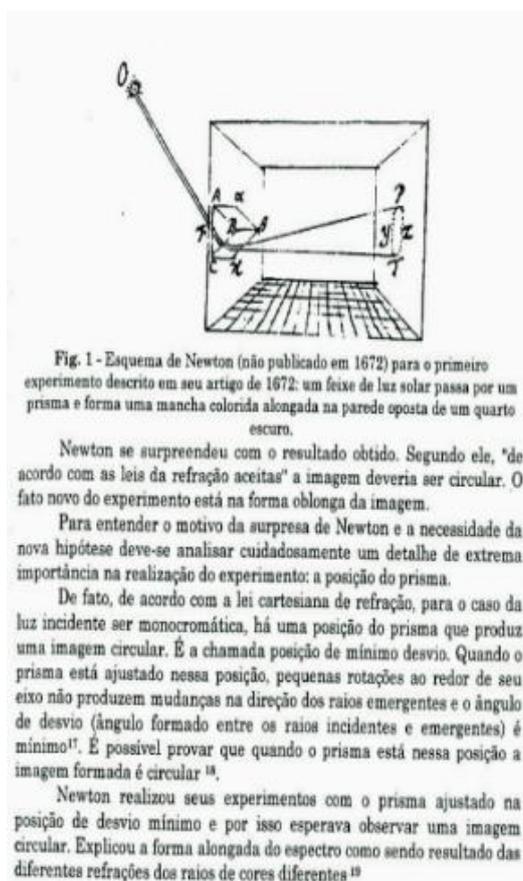
Nessa aula serão apresentados os termos “refringentes” e “decomposição da luz”, apresentados pelo Isaac Newton, abordando o ângulo de desvio mínimo e contextualizando com a atividade experimental da formação do arco-íris. Ao final da leitura individual, realiza-se os

debates entre os pares e depois há a retomada dos dois experimentos realizados na AI 03 e 04. A explicação dos fenômenos é demonstrada e são apresentadas as informações corretivas a fim de ampliar a aptidão do aprendiz em “compreender, transformar e transferir os conhecimentos” (BRUNER, 1976, p. 55).

Questões norteadoras: A) Quais fatores foram importantes para que Newton realizasse esse experimento? B) Como você descreveria a luz a partir dos fragmentos desse texto? C) Relacionando os fragmentos dos textos com o experimento da dispersão da luz, qual seria o raio de luz mais refringente e qual seria o menos? Justifique a sua resposta com o que você analisou na AI anterior.

Materiais: fragmento do texto “A teoria das cores de Newton e as críticas de Hooke” (1996) e “As pesquisas de Newton sobre a luz: uma visão histórica” (2015) de Silva e Martins, como ilustra a Figura 8.

Figura 8 - Fragmentos sobre o experimento do prisma



Logo depois de descrever esses experimentos, Newton registrou um comentário que certamente *não é consequência* dos mesmos: “Quanto mais uniformemente os glóbulos movem os nervos ópticos, mais os corpos parecem ser coloridos vermelho, amarelo, azul, verde etc.; mas quanto mais diversamente eles os movem, mais os corpos aparecem branco, negro ou cinza” [89]. Percebe-se que Newton estava tanto realizando experimentos quanto tentando compreender a natureza microscópica da luz e das cores.

Na página seguinte do caderno de anotações Newton registrou, sob a forma de tópicos numerados, um primeiro esboço da teoria sobre as cores [90]. A ideia principal dessa teoria (que depois foi abandonada por ele) era que os raios luminosos eram constituídos por partículas (glóbulos) que atingem os olhos, produzindo as diversas sensações de cores; haveria raios luminosos de diferentes velocidades; e os mais lentos seriam mais facilmente desviados (refratados) do que os mais rápidos. Relacionando essa proposta teórica com as observações feitas com o prisma, utilizando a hipótese de que os raios mais lentos sofrem maiores refrações, Newton concluiu que os raios mais lentos são os que produzem as cores azul, cor celeste e púrpura; os mais rápidos, vermelho e amarelo; e os de velocidade intermediária produzem o verde. Supôs também que uma mistura de raios rápidos e lentos produz branco, cinza e preto.

Fonte: A teoria das cores de Newton e as críticas de Hooke (SILVA; MARTINS, 1996) e As pesquisas de Newton sobre a luz: uma visão histórica (MARTINS; SILVA, 2015).

ATIVIDADE 06 e 07. Preparação e organização dos grupos para a apresentação das explicações e resultados dos experimentos e da leitura dos fragmentos e; Apresentação dos grupos e exposição dos seus resultados.

Bruner (2006) afirma que toda sequência de aprendizagem necessita de verificações ou avaliações. Nessa atividade o aluno expressará seus resultados e estes serão analisados, mostrando aos estudantes os critérios que se esperava alcançar e verificando a progressão deles durante a SEI. Como o professor é o responsável por orientar os alunos durante o processo de aprendizagem, são expostas novamente as perguntas para os grupos, com a finalidade de nortear as apresentações: (A) Quais os fatores interferem nos resultados obtidos no experimento da dispersão da luz? (B) Qual cor sofreu o maior desvio e qual sofreu o menor? (C) Quais os fatores interferem no resultado obtido no experimento do espalhamento da luz? (D) Você consegue relacionar os experimentos com fenômenos que já observou? (E) Por que você acha que acontece isso com a luz? (F) Como você explicaria a luz a partir dessas duas atividades? (G) Pelo que extraiu dos fragmentos, quais fatores você aponta como relevantes para que Newton realizasse esse experimento? (H) Como você descreveria a luz a partir dos fragmentos desse texto? (I) Relacionando os fragmentos dos textos com o experimento da dispersão da luz, qual o raio de luz mais refringente e qual o menos? Justifique a sua resposta com o que você analisou nas atividades anteriores.

ATIVIDADE 08. Aula de sistematização sobre dispersão, espalhamento e os fragmentos dos textos sobre Newton.

Toda SEI necessita do momento de sistematização, Carvalho (2020) cita a utilização de um texto para a sistematização de conhecimentos, que certificará a compreensão dos conteúdos e conceitos pelos estudantes, apresentando a eles uma linguagem mais formal. Entretanto, como os alunos já realizaram a leitura na atividade 05, nesse momento foi realizada a discussão do texto e das atividades, previstas por Carvalho (2020), através de uma aula expositiva e dialogada. Na aula são explicados o experimento do prisma de Newton e o experimento realizado por Tyndall, que explica a coloração azulada do céu devido ao seu comprimento de onda ser menor, promovendo o espalhamento em partículas pequenas. Destaca-se nessa atividade, o que é refringência de um meio e como se calcula o índice de refração, encerrando um ciclo de atividades investigativas iniciado na AI 03 e 04, com os experimentos de dispersão e espalhamento da luz.

ATIVIDADE 09 e 10. Atividade Investigativa da dupla fenda no simulador – realização e debate e; Atividade Investigativa de dupla fenda com materiais de baixo custo – realização e debate.

Com essas duas AIs são abordados os fenômenos de interferência e difração da luz, evidenciando a importância do experimento da dupla fenda de Thomas Young para o estudo da luz. O experimento da dupla fenda é abordado em duas situações, a primeira através da simulação computacional e a segunda a partir de um experimento de baixo custo. Esses dois recursos são utilizados como complementares, a simulação demonstra graficamente as variáveis a serem analisadas e transpõe mais facilmente para a linguagem matemática; a prática experimental aponta as dificuldades e as variáveis que influenciam na realização do experimento, os erros vivenciados ensinam e realçam os dados encontrados. Silva e Mercado (2019) alertam que as simulações “simplificam a realidade”, por isso cuidados devem ser tomados para que não haja confusão entre ela e a realidade. A escolha em utilizar a simulação em conjunto com o experimento, serve para que os estudantes entendam o experimento real e analisem as grandezas físicas nos fenômenos de interferência e difração.

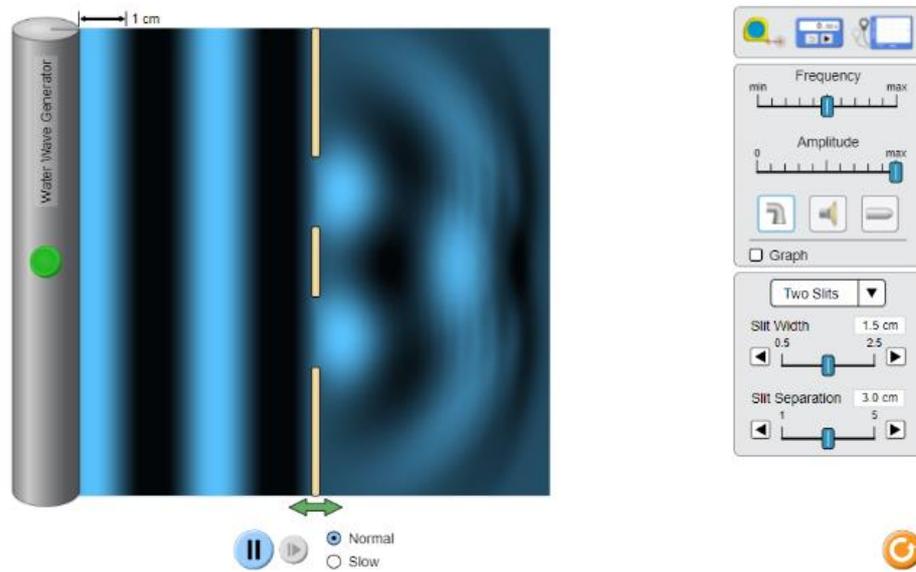
Na simulação sobre interferência das ondas, Figura 9, do simulador virtual Physics Education Technology Project (PhET), são apresentados o problema inicial e o roteiro pelo professor. Apesar do direcionamento, os alunos são os responsáveis por indicar quais variáveis influenciam no experimento, propor hipóteses e apresentar suas conclusões acerca da atividade, relacionando com fenômenos observados no cotidiano. Na prática experimental, não há roteiros, o único direcionamento é o problema inicial – a projeção da luz na cartolina através da fenda. A partir da imagem obtida no experimento, representada na Figura 10, são realizadas as análises com a proposição de hipóteses e explicações. A combinação dessas atividades visa apontar as incertezas, mas não exacerbadas, pois Bruner (1976) alega que sem a direção haverá “confusão” e “angústia”, desmotivando a *exploração de alternativas*. Dessa forma, primeiro os estudantes realizam a simulação em duplas e ao finalizarem, se reúnem em grupos com três ou quatro integrantes para a atividade experimental de baixo custo.

Questões norteadoras: (A) Você consegue relacionar as duas atividades investigativas? (B) Quais as diferenças encontradas entre os experimentos? (C) Quais as semelhanças entre as duas atividades? (D) Como você explicaria a atividade do simulador e o experimento?

Materiais utilizados:

- **Simulação de interferência de ondas:** Dispositivo eletrônicos e simulador virtual do PhET, roteiro no Apêndice F.

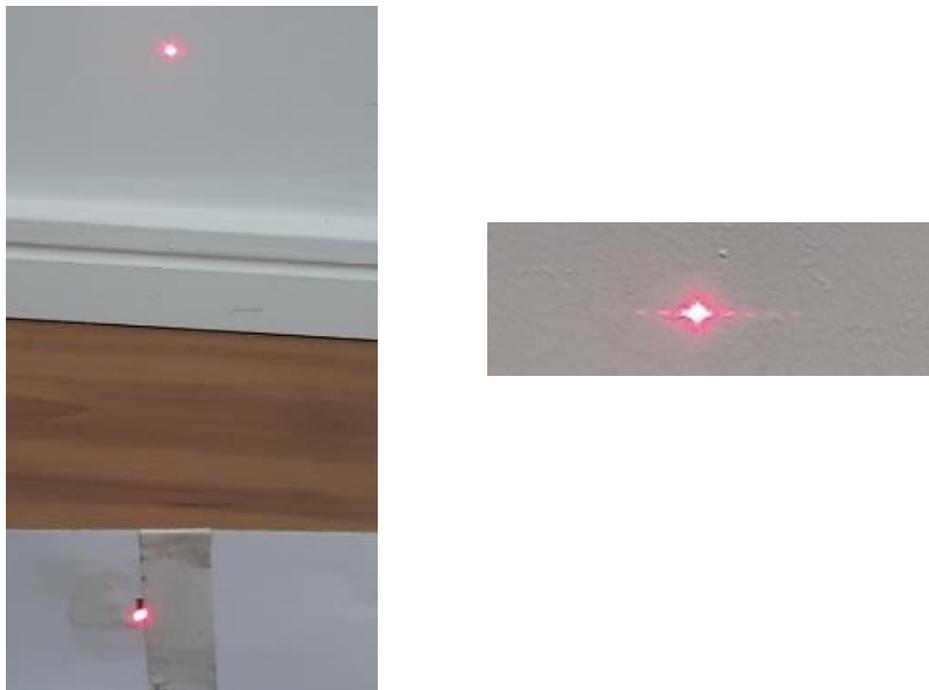
Figura 9 - Captura de tela do simulador PhET



Fonte: PhET. Disponível em <https://phet.colorado.edu/pt/simulations/wave-interference>. Acesso em 12 dez. 2021.

- **Experimento da dupla fenda:** laser pointer, papel cartão, palha de aço, tesoura e fita isolante.

Figura 10 - Experimento da dispersão da luz



Fonte: Elaboração própria (2021).

ATIVIDADE 11. Leitura de fragmentos históricos extraídos de textos científicos sobre a teoria da luz de Huygens.

É a aula em que ocorre a *manutenção* e a *direção* (BRUNER, 1976). A instrução é apresentada aos estudantes para aproximá-los do objetivo das AIs 9, 10 e 11, que é diferenciar a teoria ondulatória apresentada por Huygens da proposta por Young. Além de identificar e caracterizar os fenômenos de interferência e difração das ondas. Para alcançar os objetivos esperados, as seguintes perguntas são feitas: A) Como você identifica a luz na teoria de Huygens? B) Como você definiria a natureza da luz a partir dos argumentos de Newton e de Huygens? C) Lendo o fragmento, você consegue associar esse experimento a algum que você já realizou? D) Como você define a luz após essa leitura?

Materiais utilizados: fragmento do texto extraídos da página 152, 153, 155 e 156 “A evolução da teoria ondulatória da luz e os livros didáticos” de Silva (2007).

Figura 11 - Fragmentos sobre a evolução histórica da teoria ondulatória da luz

3. O tratado da luz

O Tratado da Luz de Huygens [2] é dividido em 6 capítulos. Para efeito deste artigo, será suficiente ater-se ao primeiro capítulo, denominado *Raios Diretamente Espalhados*, o qual apresenta alguns pressupostos e discute a natureza e as propriedades gerais da luz. Os demais versarão sobre a reflexão, a refração, a refração no ar, a birrefringência da calcita e um método para determinar as figuras produzidas por espelhos e lentes.

O capítulo I inicia-se com uma declaração que vincula o trabalho à tradição geométrica da física desenvolvida no Renascimento [11]:

As demonstrações que se referem à óptica, assim como em todas as ciências nas quais a geometria é aplicada à matéria, são fundadas em verdades extraídas da experiência: tais são que os raios de luz se propagam em linha reta; que os ângulos de reflexão e de refração são iguais e que nas refrações o raio é quebrado de acordo com a regra dos senos, bem conhecida e não menos correta que as precedentes.

Quanto à natureza da luz, afirma não duvidar que consista no movimento de alguma espécie de matéria, quer se considere sua produção, quer seus efeitos. Na Terra, a principal fonte é o fogo e a chama que o gera, os quais contêm corpos em movimento rápido, pois dissolvem e fundem diversos outros corpos dos mais sólidos. No que se refere aos efeitos, se a luz for concentrada por meio de espelhos côncavos, apresenta justamente essa propriedade de queimar como o fogo, isto é, de separar as partes dos corpos. Isso lhe confere, portanto, a marca de movimento, pelo menos no âmbito do que para ele seria a verdadeira Filosofia, na qual todos os efeitos naturais são concebidos por razões mecânicas. Acrescenta ainda que se deve proceder dessa forma ou renunciar a toda esperança de compreender qualquer coisa em física, ou seja, deve-se adotar o modelo mecânico como a única alternativa possível.

Com respeito ao caráter ondulatório, ele faz uma analogia com as ondas sonoras no ar, que são mecânicas e longitudinais [12]:

Sabemos que por meio do ar, que é um corpo invisível e impalpável, o som se propaga em torno do local em que é produzido, por um movimento que passa sucessivamente de uma parte a outra do ar, e que a extensão desse movimento se faz com igual velocidade por todos os lados, formando-se como ondas esféricas que se alargam permanentemente e vêm tocar nosso ouvido. Ora, não há qualquer dúvida que a luz venha também de corpos luminosos até nós por meio de algum movimento impresso à matéria entre os dois, pois já vimos que isso não pode ocorrer pelo transporte de um corpo que passaria de um a outro.

Fonte: A evolução da teoria ondulatória da luz e os livros didáticos (SILVA, 2007).

ATIVIDADE 12. Sistematização sobre o experimento da dupla fenda.

Conforme citado, toda SEI precisa da sistematização para verificar se todos os estudantes aprenderam os conteúdos esperados. Antes do professor explicar o conteúdo no momento de *reforço* e *retroalimentação* (BRUNER, 1976, p. 72), novamente é perguntado: (A)

Você consegue relacionar as duas atividades investigativas? (B) Quais as diferenças encontradas entre os experimentos? (C) Quais as semelhanças entre as duas atividades? (D) Como você explicaria a atividade do simulador e o experimento? Então, são abordados os fenômenos de interferência e difração, mas agora com uma linguagem mais formal, a fim de que os estudantes revejam esses tópicos e aos que não compreenderam adequadamente na simulação e no experimento, que seja realizado o resgate de conteúdo.

ATIVIDADE 13 e 14. Preparação para o debate sobre a teoria ondulatória e corpuscular da luz e; Debate entre os estudantes sobre a teoria ondulatória e corpuscular da luz.

Nessas aulas são realizadas as avaliações do processo e dos conhecimentos construídos durante as AIs, verificando a existência de indicativos de alfabetização científica (CARVALHO, 2018) e das temáticas estudadas. Sendo assim, os estudantes realizam explicações para o comportamento da luz nos experimentos e propõem argumentos para defender a teoria de Newton e a de Huygens, o que demonstra se a habilidade de argumentação foi desenvolvida durante a SEI. Para o debate a sala é dividida em dois grupos que apresentam: o argumento, o contra-argumento e as conclusões finais. O papel do professor é realizar novos questionamentos durante as explicações para incitar a reflexão dos estudantes e promover a elaboração de novas hipóteses e argumentos, estimulando habilidades para o desenvolvimento do pensamento crítico.

ATIVIDADE 15. Simulação do efeito fotoelétrico – PhET e sistematização da radiação de corpo negro e efeito fotoelétrico.

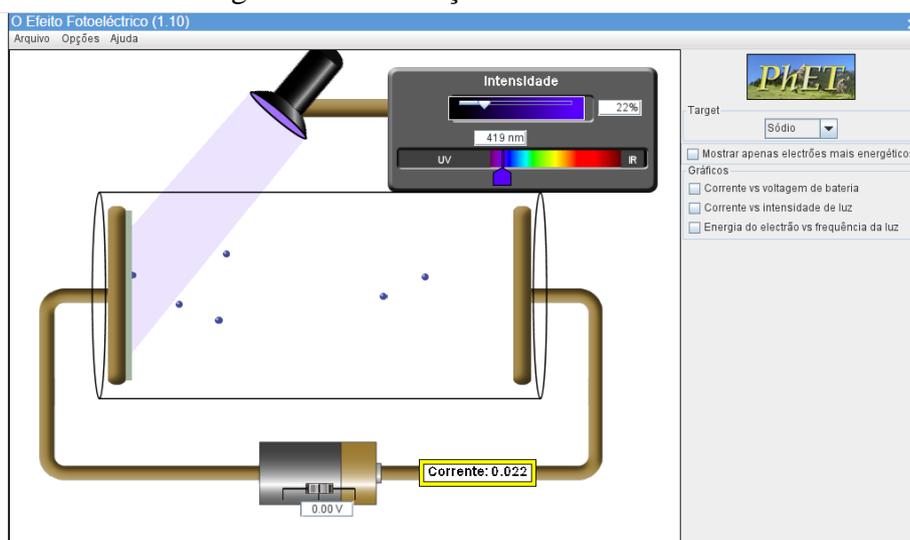
Novamente o recurso didático da simulação do PhET é utilizado. Nessa atividade, os aprendizes devem identificar fatores que interferem na simulação do efeito fotoelétrico, com proposições de hipóteses a fim de explicar esse fenômeno. Essa atividade busca *ativar a exploração de alternativas* (Bruner, 1976) e através do roteiro instrucional haverá a *manutenção* com o propósito de observar o comportamento da luz. Eles serão divididos em duplas para realizar a simulação (Figura 12), durante a atividade os materiais das placas coletoras são alterados, bem como a intensidade e a frequência das ondas eletromagnéticas, também é possível analisar os dados quantitativos através dos gráficos. Ao final, é realizada a sistematização com a leitura de um texto sobre a radiação do corpo negro e o desenvolvimento da teoria do efeito fotoelétrico de Einstein, que é necessário segundo Carvalho (2020) para a passagem da linguagem informal para uma mais formal.

Materiais necessários: simulador virtual Physics Education Technology Project (PhET).

Procedimentos:

- [1] Realizar as etapas do roteiro (Apêndice G).
- [2] Elaborar hipóteses para explicar o fenômeno observado na simulação, identificando as variáveis que o influenciam.
- [3] Propor em grupo explicações para descrever o efeito elétrico a partir do que observaram na simulação.

Figura 12 - Simulação do efeito fotoelétrico



Fonte: Captura da simulação do PhET. Disponível em <https://phet.colorado.edu/pt/simulations/photoelectric>. Acesso 12 dez. 2021.

ATIVIDADE 16 e 17. Preparação e elaboração da mostra cultural e científica e; Realização da mostra cultural e científica.

Bruner (2006) enfatiza que “o crescimento intelectual” está diretamente relacionado com a habilidade em explicar para si e para os outros, através da linguagem, o que fez ou fará. Então, para encerrar a SEI os alunos elaboram explicações para o comportamento da luz a partir de todas as atividades desenvolvidas na SEI, com o intuito de responder a questão-problema “Como podemos definir a natureza da luz?”.

Exercendo o protagonismo no seu processo de aprendizagem, os alunos organizam a mostra cultural e científica. Então realizam as suas explicações e respondem a questão-problema para a comunidade escolar por meio de pôsteres e apresentações artísticas. O objetivo é sistematizar os conhecimentos construídos a partir da SEI e divulgá-los para os seus pares. Os estudantes compartilham o que aprenderam com a sequência investigativa e o professor avalia se esta propiciou a construção de conhecimentos científicos adequados, com a promoção do desenvolvimento de habilidades de AC.

5.3 Ferramentas de Análise da Sequência

As transcrições das falas extraídas dos vídeos gravados e os diários de bordo, que permitiram a observação qualitativa das respostas dos estudantes durante as aulas, foram analisados a partir da análise do conteúdo de Laurence Bardin (1977) definida por ela como:

Um conjunto de técnicas de análise das comunicações, que utiliza procedimentos sistemáticos e objectivos de descrição do conteúdo das mensagens. [...] A intenção da análise de conteúdo é a inferência de conhecimentos relativos às condições de produção (ou, eventualmente, de recepção), inferência esta que recorre a indicadores (quantitativos ou não) (Bardin, 1977, p. 38).

Para a análise foram utilizadas as três fases de Bardin (2016) que são: I. Pré-análise; II. Exploração do Material e; III. Tratamento dos resultados, a interferência e a interpretação. A codificação é realizada através dos *indicadores de alfabetização científica* (SASSERON; CARVALHO, 2008) que apontam se há evidências do processo de AC, são estes: *seriação de informações; organização de informações; classificação de informações; levantamento de hipóteses; teste de hipóteses; justificativa; previsão e; explicação.*

6 APLICAÇÃO E ANÁLISE DA SEQUÊNCIA DE ENSINO INVESTIGATIVA

A sequência foi aplicada no Colégio Estadual da Polícia Militar do Estado de Goiás – Unidade Domingos de Oliveira, localizado em Formosa/GO. Em 2022, a escola tinha 1265 alunos matriculados, contabilizados desde o 6º ano do ensino fundamental II até a 3ª série do ensino médio. O público-alvo dessa SEI para o ensino da Óptica foram os alunos da 2ª série do ensino médio, do período matutino, que cursavam a disciplina chamada Trilhas de Aprofundamento *Energia que nos Move*, em que participavam 38 dos 164 discentes que estavam matriculados na 2ª série. A disciplina contava com quatro aulas semanais com duração de 50 minutos cada, totalizando 200 minutos semanais, divididos em duas aulas conjuntas (4º e 5º horário) na quinta-feira e mais duas (5º e 6º horário) na sexta-feira.

6.1 Atividade 01. Explicar o que é a Sequência de Ensino Investigativa – Aplicação no dia 03/02/2022

Explicou-se aos alunos o que é uma sequência de ensino investigativa, apresentando o cronograma de aulas, que depois foi alterado devido aos eventos escolares e pontos facultativos decretados posteriormente. Nessa primeira aula a intenção era que os alunos compreendessem o formato diferenciado de aulas quando comparado ao modelo tradicional, que estavam acostumados, e despertar neles o protagonismo que deve ser exercido durante o seu próprio processo de aprendizagem. Após esses momentos iniciais, houve a apresentação do diário de bordo (Apêndice B) com as informações sobre o preenchimento a ser realizado nas aulas futuras, explicitando que as anotações seriam realizadas durante os experimentos para que depois tivessem materiais para os debates internos do grupo e a seguir os com a turma.

6.2 Atividade 02. Explicar o que é a Sequência de Ensino Investigativa – Aplicação no dia 10/02/22

A aula começou pela aplicação da avaliação diagnóstica, com as perguntas: [1] Quais conceitos físicos estudados você relaciona com a luz? [2] Como você explicaria o conceito de luz para alguém? [3] Por que você acha que o céu é azul? [4] O que você entende por efeito fotoelétrico? Essa avaliação contribuiu para identificar os conhecimentos preexistentes sobre a temática e dos seus exemplos criar pontos de conexão para a sequência didática. Das respostas obtidas, destaca-se:

[1] *A luz faz aumentar a temperatura, energia elétrica é gerada por meio da luz.*

[2] *Tá vendo isso daqui? É luz, sem ela ficaria escuro.*

[3] *Gosto de pensar que Deus quis colocar essa cor no céu.*

[4] *Não entendo o efeito fotoelétrico, mas essa palavra me faz lembrar de foto.*

Antes de finalizar a aula foi apresentada aos estudantes a situação-problema: *Como podemos definir a natureza da luz?* Essa pergunta deveria ser pensada durante a SEI, e a sua resposta construída a cada aula. Ao final das atividades investigativas, eles preparariam a mostra cultural e científica para apresentarem a comunidade escolar, de acordo com o seu entendimento, como a luz se comporta e em explorá-la através de situações do cotidiano. Dentro da proposta, as atividades experimentais e as simulações ganharam liberdade manipulativa gradativa ao longo da SEI, com a verificação das progressões durante o processo e não apenas ao final, ou seja, a avaliação realizada foi formativa.

6.3 Atividade 03. Atividade Investigativa sobre a dispersão da luz – Aplicação no dia 11/02/2022

Ao iniciar a aula foi explicado aos estudantes que o objetivo não era que eles estivessem com ideias iniciais bem formuladas e se tornassem “pequenos cientistas”. A intenção era que eles comesçassem a se habituar a experimentos com maior nível de liberdade e se aproximassem do processo de investigação científica. O que seria possível através das suas anotações no diário de bordo, para a análise *a posteriori* dessas informações. Como esse experimento foi o primeiro contato com atividades sem roteiros, antes das instruções destacou-se as fases e a análise do experimento. As falas iniciais da professora, transcritas a seguir, foram importantes para que os estudantes não induzissem resultados, prática comum em atividades experimentais, em particular nos roteiros fechados, que não era o caso dessa AI.

P: Eu darei uma vasilha a cada grupo, vocês vão encher a vasilha com água e vocês vão utilizar o espelho para projetar na cartolina branca o arco-íris a partir da luz do Sol. Analisem a importância de cada elemento dentro desse experimento.

A1: Tem que ficar anotando o que está acontecendo nesse diário de bordo? O passo a passo?

P: Isso. Nesse diário de bordo está solicitando os materiais utilizados, procedimentos, análise. Observem como está o tempo, a posição do espelho, quantidade de água.

[...]

P: O erro também é um resultado e ele precisa ser analisado. Se realizamos um experimento e ele não dá certo, precisamos analisar esse resultado, levantando hipóteses para ele. O que importa é a forma que você trabalha com os seus dados e não se ele deu exatamente o que você esperava.

Depois de entregar os materiais e apresentar a situação-problema da aula – Formar o arco-íris na cartolina – os alunos se dividiram em 7 grupos, com 3 grupos com 6 integrantes e 4 grupos com 5 estudantes. Embora tivesse sido avisado na primeira aula que o diário de bordo deveria ser utilizado em todas as aulas experimentais, os estudantes questionaram novamente a sua necessidade, que é ressaltada com a abordagem, novamente, dos tópicos disponíveis no

fichamento. Como esperado, os estudantes sentiram uma dificuldade inicial pela falta de um roteiro bem definido, como a quantidade de água e a posição exata do espelho, como é retratado na fala a seguir:

A2: Professora, qual a quantidade de água?

P: Vocês vão testando. Coloquem uma quantidade pequena e aumentem conforme a necessidade.

Alguns alunos começaram a ter dificuldade com a realização da atividade e sugeriram fatores que não permitiam a formação do arco-íris:

A3: Professora, não tem muito Sol hoje [...] Professora, pode usar a lanterna?

Na fala de A3 nota-se que um problema foi encontrado “a não formação do arco-íris”, houve o levantamento de hipóteses “estar nublado” e o reconhecimento da variável que é o Sol. Analisando a sua realidade é apresentada uma solução que seria usar uma outra fonte luminosa, no caso a lanterna. Enquanto alguns grupos apresentavam dificuldades, o grupo 1 conseguiu achar a posição e projetar o arco-íris:

A1: Professora, faça o favor. Conseguimos formar o arco-íris.

P: Ótimo, escrevam a sequência de cores que estão vendo.

Isso fez com que os outros grupos começassem a observar quais fatores influenciaram na realização da atividade pelo grupo 1. Os grupos demoraram 30 minutos para realizar a atividade, etapa representada na Figura 13. Após esse momento houve o tratamento dos dados pelos grupos durante 10 minutos, seguido pela discussão e apresentação das conclusões para a turma.

Figura 13 - Realização do experimento da decomposição da luz



Fonte: Arquivos de registros da autora (2022).

Para a análise de indícios do processo de AC nas atividades investigativas, a discussão acerca do experimento é apresentada no Quadro 3, com a categorização dos indicativos de AC.

Quadro 3 - Transcrição da Atividade 03 com os indicativos de AC

Grupo	Falras transcritas	Categorização
G1	<i>A4: No começo foi muito difícil. O espelho era muito pequeno, não tinha sol, não tinha luz, não tinha nada.</i>	Seriação de informações
G1	<i>A5: ficamos em um local que não pegava luz também.</i>	Seriação de informações
G1	<i>A4: Aí eu fui olhar o processo dos outros grupos e vi o pessoal usando uma lupa e uma lanterna para um lugar escuro. Copiando a ideia do outro grupo e adaptando, usei as lentes do laboratório como lupa, molhamos ela e colocamos em frente ao espelho, daí conseguimos o arco-íris.</i>	Seriação e organização de informações
	<i>P: Vocês usaram a luz solar?</i>	-
G1	<i>A5: Não, a lanterna. Nós tampamos os focos da luz solar e usamos só a lanterna. Assim, como a lupa é meio oval a gente colocou água na lente desse jeito. Aí refletia reto assim alinhado com o espelho. O espelho tá aqui e a água bate aqui, onde ela tava batendo dava para ver que tinha um feixe com umas cores.</i>	Organização e classificação de informações
	<i>P: Pessoal, vamos respeitar os outros grupos. Na hora que estiverem falando vocês querem ser ouvidos também.</i>	-
G1	<i>A5: Fazia um efeito de aquarela com as cores.</i>	Classificação de informações
	<i>P: por que você acha que precisou da lupa?</i>	-
G1	<i>A5: Bom, não conseguimos usar a luz do Sol porque estava nublado.</i>	Classificação de informações
	<i>P: Alguém conseguiu com a luz solar?</i>	
G2	<i>A6: O nosso grupo conseguiu com a luz solar, com a lanterna e a lupa, e com a lanterna sem a lupa.</i>	Organização e classificação de informações
G2	<i>A7: Ficou bem fraco a intensidade das cores com a luz do Sol.</i>	Classificação de informações
	<i>P: A sequência de cores mudou quando fez com a lanterna e quando fez com o Sol?</i>	-
G2	<i>A7: Mudou o formato, na lanterna as cores ficaram circulares.</i>	Classificação de informações

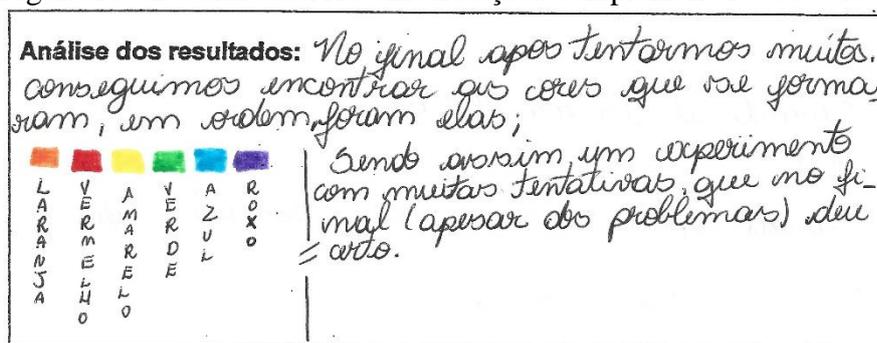
G1	<i>A5: Laranja, vermelho, amarelo, verde claro, azul e depois do azul não consegui identificar. Na parte do azul como estava mexendo muito não deu para identificar, mas parecia tipo um roxo.</i>	Classificação de informações
G3	<i>A8: Só conseguimos com a luz solar refletindo no espelho.</i>	Classificação de informação
G4	<i>A9: Logo de primeira o nosso grupo conseguiu. Apareceu as cores violeta, azul, verde, amarelo, alaranjado e vermelho. Daí nós mudamos o espelho e não apareceu mais, demorou para conseguirmos novamente a posição.</i>	Classificação de informação, levantamento e teste de hipóteses
G4	<i>A9: Sim.</i>	-
G1	<i>A5: E a quantidade de água também.</i>	Levantamento e teste de hipóteses
	<i>P: Então importava a quantidade de água e a posição do espelho?</i>	-
G4	<i>A1: O nosso espelho estava metade dentro da água e metade fora.</i>	Classificação de informação
G4	<i>A9: E a cartolina não podia tampar o Sol.</i>	Classificação de informações
	<i>P: Ótimo!</i>	-
G5	<i>A10: A água precisava estar em movimento.</i>	Levantamento de hipóteses
	<i>P: Precisava? Isso ocorreu com todos os grupos?</i>	-
G4	<i>A9: A nossa estava parada.</i>	Teste de hipóteses
G6	<i>A3: Igual como acontece com o arco-íris, tem água envolvida.</i>	Previsão
G4	<i>A11: A nossa experiência deu certo. Primeiro não deu certo porque não achamos a angulação do espelho e estava nublado. Mas ficamos tentando, no nosso caso colocamos o espelho ficou todo dentro da água, mas estava inclinado. As cores ficaram bem misturadas, mas percebemos que a primeira era o vermelho e a última o roxo.</i>	Classificação de informações
G7	<i>A12: No começo tivemos dificuldade porque nosso espelho era muito pequeno, mas depois achamos a angulação e deu certo.</i>	Classificação de informações
	<i>P: Por que vocês acham que surgem essas diversas cores?</i>	

G5	A13: Por causa da luz que bate na água	Levantamento de hipóteses
	P: A luz do Sol não é branca?	-
G1	A5: Não necessariamente é branca, mas um conjunto de cores, tem várias cores no Sol.	Justificativa
G5	A10: A luz do Sol está sendo dividida	Explicação
	P: Podemos usar a palavra decomposição?	-
	Maioria dos alunos: Sim	-
	P: Essa decomposição da luz só se dar com a água e o espelho?	
G4	A2: Não.	Previsão
	P: Exemplos?	
G3	A14: O CD.	Previsão
G6	A2: Com um prisma.	Previsão
	P: Observem no cotidiano de vocês esses exemplos de decomposição. Na próxima aula faremos um novo experimento e ao final iremos discuti-los juntos.	-

Fonte: Elaboração própria (2022).

Além das falas transcritas também foram analisados, posteriormente, os diários de bordo. Dentro da proposta apresentada, observou-se que muitos alunos participaram e se expressaram na aula. Os dados obtidos na etapa 2 - resolução do problema pelos estudantes foram explorados na etapa 3 - sistematização dos conhecimentos elaborados nos grupos (CARVALHO, 2020). Nesse experimento descritivo, as estratégias permitiram que os alunos observassem e explicassem através da linguagem verbal e não verbal, pois além da fala e da escrita, estiveram presentes os diagramas e desenhos na interpretação do fenômeno, como demonstrado na Figura 14, no desenho de A13, e na Figura 15, na representação da experiência por A27.

Figura 14 - Desenho de A13 em anotações complementares da aula 03



Fonte: Arquivos de registros da autora (2022).

Figura 15 - Desenho de A27 em anotações complementares da aula 03



Fonte: Arquivos de registros da autora (2022).

No diário de bordo verifica-se exemplos de hipóteses e conclusões apresentadas pelos estudantes A15 e A16. Na hipótese levantada por A15 (Figura 16) vemos que há uma relação do resultado obtido com a reflexão da luz, ele menciona a mudança de meio, mas ainda não relaciona isso com o fenômeno de refração da luz.

Figura 16 - Hipótese levantada por A15

Hipóteses levantadas:
 A luz do sol é refletida na água e ocorre uma dispersão da luz que reflete de volta no cartaz branco e ~~seu~~ ~~as~~ suas cores de arco-íris.

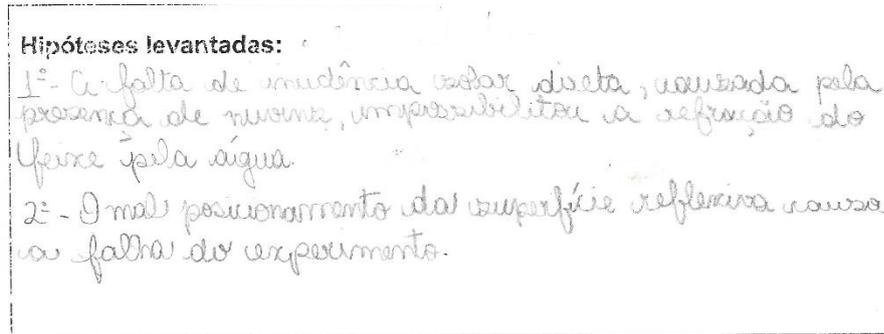
Fonte: Arquivos de registros da autora (2022).

Transcrição da hipótese de A15:

A luz do Sol é refletida na água e ocorre uma dispersão da luz e reflete de volta no cartaz branco e [?] as cores do arco-íris.

Na resposta de A16 surgem hipóteses que justificam as dificuldades encontradas durante a realização do experimento, como apresentado na Figura 17. Um ponto de destaque é que A16 identifica os dois fenômenos – reflexão e refração – dentro da atividade, levantando os motivos que dificultaram o seu acontecimento, resultando na falha inicial.

Figura 17 - Hipótese levantada por A16



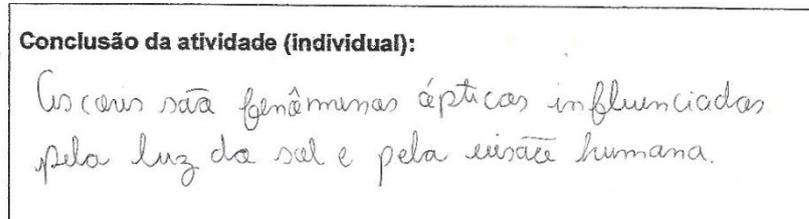
Fonte: Arquivos de registros da autora (2022).

Transcrição da hipótese de A16:

1ª A falta de incidência solar direta, causada pela presença de nuvens, impossibilitou a refração do feixe pela água; 2ª O mal posicionamento da superfície reflexiva causou a falha do experimento.

A15 diferencia a cor que seria resultado da visão humana, da luz que estaria vindo do Sol, conforme Figura 18. Essa visão é similar aos primeiros filósofos, que identificavam a cor e a luz como conceitos distintos.

Figura 18 - Conclusão apresentada por A15



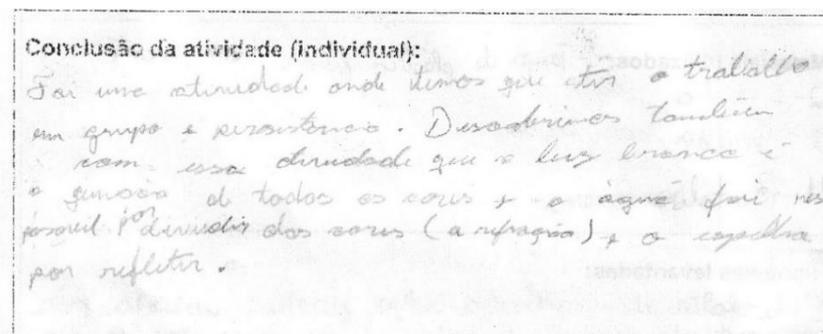
Fonte: Arquivos de registros da autora (2022).

Transcrição da conclusão de A15:

As cores são fenômenos ópticos influenciados pela luz do Sol e pela visão humana.

A16 conclui de maneira adequada o que aconteceu na atividade (Figura 19), citando a refração como responsável pela decomposição das cores, em suas palavras “dividir”. Cita também o espelho, como responsável pela reflexão da luz solar.

Figura 19 - Conclusão apresentada por A16



Fonte: Arquivos de registros da autora (2022).

Transcrição da conclusão de A16:

Foi uma atividade onde temos que ter o trabalho em grupo e persistência. Descobrimos também com essa atividade que a luz branca é a junção de todas as cores e a água foi responsável por dividir das cores (a refração) e o espelho por refletir.

6.4 Atividade 04. Atividade Investigativa sobre o espalhamento da luz Aplicação no dia 17/02/2022

No experimento de espalhamento da luz, inicialmente, os alunos observaram a propagação dos feixes de luz apenas na água, depois em uma mistura de água com leite. Essa atividade apresentou um grau de liberdade maior, porque agora eles tinham mais variáveis que deveriam ser observadas. Os recursos utilizados para a iluminação foram a lanterna de celular, luz de emergência, lanterna comum e vela. Toda a atividade foi realizada em 40 minutos e depois houve o momento de discussão entre os integrantes do grupo, em que foram apresentadas perguntas norteadoras: A) Quando estava sem o leite, como estava o feixe de luz? B) Depois com o leite houve mudança no feixe? C) Vocês conseguem relacionar o que aconteceu com algum fenômeno da natureza com esse experimento?

A etapa de resolução do problema demorou 30 minutos. Nessa fase em grupos, percebeu-se um ruído maior e a participação dos alunos entre si mais recorrente, fato que pode ser motivado pela afinidade entre os integrantes, indicativo que é apontado por Carvalho (2020). No grupo houve integrantes que preferiram a manipulação dos materiais e outros que observavam e davam sugestões, Bruner (1976) cita que cada aluno irá se destacar em uma função, não existindo uma uniformidade na aprendizagem.

Se grupos reciprocamente atuantes devem auxiliar a aprendizagem, estimulando cada um a congregar seus esforços em grupo, temos que admitir os papéis especializados que irão aparecer – o crítico, o inovador, o precavido, o ajudante etc. (BRUNER, 1976, p. 124).

Como é nessa etapa que eles avaliam quais os fatores que interferem no experimento e quais podem desconsiderar (CARVALHO, 2020), é importante que os estudantes estejam à vontade para compartilhar suas ideias e assumir diferentes papéis, com desenvolvimento de novas habilidades, permitindo também ao professor identificar se o grupo entendeu a proposta. A Figura 20 mostra a sugestão apresentada pelo A24 para visualizar melhor a trajetória dos feixes de luz na bacia transparente. A estratégia adotada foi alojar-se em um ambiente com pouca claridade, que permitiria uma observação mais nítida.

Figura 20 - Realização do experimento do espalhamento da luz



Fonte: Arquivos de registros da autora (2022).

Ao final da resolução do problema, ocorreu a organização da sala e os informes para a aula do dia seguinte, em que seria realizada a leitura dos fragmentos de textos sobre a teoria da luz de Newton. Para essa atividade foi solicitado que os alunos levassem dicionários, para que pesquisassem as palavras que lhes fossem desconhecidas.

6.5 Atividade 05. Leitura e debate de fragmentos históricos extraídos de textos científicos sobre a teoria da luz de Newton – Aplicação no dia 18/02/2022

Os alunos realizaram a leitura dos fragmentos históricos durante 20 minutos. Após a leitura houve o debate em grupo por 15 minutos. Então, foi realizada a retomada das explicações dos experimentos com a turma, transcrição no Quadro 4, característica do currículo em espiral de Bruner, aprofundando o conteúdo e passando de uma representação icônica para uma representação simbólica, com novas terminologias.

Quadro 4 - Transcrição da Atividade 05 com os indicativos de AC

Grupo	Falas transcritas	Categorização
	<i>P: Vocês conseguem relacionar o texto com os experimentos?</i>	-
G1	<i>A5: Com o experimento do arco-íris.</i>	Previsão
	<i>P: O arco-íris acontece o tempo todo?</i>	-
G1	<i>A5: Não.</i>	-
	<i>P: O que precisa para ter o arco-íris?</i>	-
G1	<i>A5: Tem reflexão através da chuva.</i>	Justificativa
	<i>P: Certo, vamos pensar nas gotículas de água o que está acontecendo lá dentro?</i>	-
G2	<i>A17: Mudança de meio.</i>	Justificativa e explicação
	<i>P: Quando a gente pensa no espalhamento da luz, que fizemos ontem, com o que podemos associar?</i>	-
G5	<i>A11: Cor da atmosfera?</i>	previsão

	<i>P: Podemos né? Vocês lembram que fiz uma pergunta para vocês? Por que o céu é azul? O céu é azul por que reflete a água do mar?</i>	-
G4	<i>A18: Não.</i>	-
	<i>P: Por quê? O que aconteceu no experimento ontem?</i>	-
	<i>P: O que aconteceu no experimento ontem quando colocamos o leite, o que aconteceu com a luz?</i>	-
G4	<i>A9: Ela se propagou menos.</i>	Levantamento de hipóteses
G7	<i>A12: Ela ficou azul.</i>	Classificação de informações
	<i>P: Quais as colorações que vocês viram?</i>	
G5	<i>A19: O que estava mais próximo da lanterna ficou azul e o mais longe amarelado.</i>	Classificação de informações
	<i>P: Foi isso que perceberam, né? Aquele leite podíamos pensar como sendo o quê?</i>	-
G5	<i>A19: Nuvem, gás, atmosfera.</i>	Previsão e Explicação
	<i>P: Fisicamente então temos moléculas?</i>	-
	<i>Maioria dos alunos: Sim.</i>	-
	<i>P: Beleza! Então por que o céu seria azul pensando nesse experimento?</i>	-
G2	<i>A7: Porque a luz reflete nas gotículas da água reflete junto com o branco das nuvens que vira um azul.</i>	Levantamento de Hipótese
G5	<i>A20: Deus criou tudo!</i>	Levantamento de Hipótese
	<i>P: Quando tinha só a água vocês perceberam essa mudança na coloração?</i>	-
G5	<i>A11: Não.</i>	Classificação de informações
	<i>P: O leite é um coloide, ou seja, a olho nu parece uma mistura homogênea, mas na verdade as partículas de leite e água estão separadas e podemos observar isso com o microscópio, ou seja, é uma mistura heterogênea. Essas partículas muito pequeninas interferem na coloração que estamos vendo. Qual a coloração vemos no pôr do sol?</i>	-

	<i>Aluno não identificado: Vermelho, laranja, rosinha</i>	Classificação de informações
	<i>P: Vou mostrar uma imagem (eclipse lunar), como chamamos isso?</i>	
G1	<i>A21: Lua de sangue.</i>	Classificação de informações
	<i>P: O que está acontecendo?</i>	-
G5	<i>A20: O sol tá refletindo na lua?</i>	Levantamento de Hipótese
G4	<i>A18: Quando pega e reflete de marte.</i>	Levantamento de Hipótese
	<i>P: Mais alguém tem alguma hipótese?</i>	
G6	<i>A22: Eclipse.</i>	Levantamento de Hipótese
G5	<i>A19: Da Lua.</i>	Levantamento de Hipótese
	<i>P: O que seria o eclipse lunar?</i>	-
G3	<i>A14: Quando o sol fica na frente da lua.</i>	Levantamento de Hipótese
G5	<i>A20: Não, o lunar é o contrário, quando a lua fica na frente entre o sol e a Terra.</i>	Levantamento de Hipótese
	<i>P: Então, é quando a lua fica na frente do Sol ou quando a Terra fica entre o sol e a lua?</i>	-
	<i>Aluno não identificado: Segundo.</i>	-
	<i>P: Então a luz passa por toda a Terra e ao final chega apenas a coloração?</i>	-
G5	<i>A20: Vermelha.</i>	Classificação de informações
	<i>P: O que aconteceu com as outras cores?</i>	-
G5	<i>A20: Ficaram na Terra.</i>	Previsão e justificativa
	<i>P: Podemos falar espalhadas? Por isso temos o céu azul e a gente enxerga o sol amarelado, graças a molécula das atmosferas. Lembrando o sol está emitindo luz, sendo que a maior parte da luz irradiada está na faixa do verde. Já as nuvens são brancas porque tem uma concentração grande de moléculas de água.</i>	-

Nessa aula os estudantes apontaram mais hipóteses quando comparado com a AI 03, isso aponta para uma análise mais crítica sobre os fenômenos. Contudo, faltou uma relação dos experimentos com os textos nas falas dos estudantes. Para que eles conseguissem relacioná-los, foi informado que haveria apresentações dos trabalhos realizados, e que na aula seguinte seria feita a preparação dessas apresentações. Portanto, eles deveriam responder as perguntas propostas nas aulas e elaborar conclusões com base nos experimentos e nos fragmentos dos textos.

6.6 Atividade 06. Preparação e organização dos grupos para as apresentações – Aplicação no dia 24/02 e 25/02/2022

Os alunos foram levados ao laboratório de informática em dois dias consecutivos para elaborarem as suas apresentações, que foram feitas com base apenas nos seus diários de bordo. As respostas a serem respondidas, exploradas nas atividades anteriores, que deveriam ser contempladas em suas apresentações foram:

- (A) Quais os fatores interferem nos resultados obtidos no experimento da dispersão da luz?
- (B) Qual cor sofreu o maior desvio e qual sofreu o menor?
- (C) Quais os fatores interferem no resultado obtido no experimento do espalhamento da luz?
- (D) Você consegue relacionar os experimentos com fenômenos que já observou?
- (E) Por que você acha que acontece isso com a luz?
- (F) Como você explicaria a luz a partir dessas duas atividades?
- (G) Pelo que extraiu dos fragmentos, quais fatores você aponta como relevantes para que o Newton realizasse esse experimento?
- (H) Como você descreveria a luz a partir dos fragmentos desse texto?
- (I) Relacionando os fragmentos dos textos com o experimento da dispersão da luz, qual o raio de luz mais refringente e qual o menos? Justifique a sua resposta com o que você analisou nas atividades anteriores.

Na semana seguinte aconteceram as apresentações, os recursos e o formato utilizados foram pensados e executados pelos grupos, sem interferência da professora.

6.7 Atividade 07. Apresentação dos grupos e exposição dos seus resultados – Aplicação no dia 03/03 e 04/03/2022

Cada grupo apresentava os seus resultados e os outros grupos podiam perguntar, esse modelo foi mantido para todas as apresentações. Para facilitar a análise, utilizou-se o quadro 5,

que evidenciou se as perguntas norteadoras foram exploradas durante as apresentações. Esse instrumento serviu como avaliação do processo, para saber quais os tópicos que precisavam ser revistos e discutidos na aula de sistematização. Carvalho (2020) diz que o professor deve estar sempre atento aos resultados obtidos para acompanhar o desempenho estudantil. Essa aula permitiu que fosse dado o direcionamento dentro do processo de exploração de alternativas proposto por Bruner (1976).

As respostas das perguntas (A) até (I) estão dispostas abaixo, etiquetadas com “abordaram” ou “ausente”. Como observado no Quadro 5, as quatro primeiras perguntas foram respondidas pela maioria dos grupos, G1 e G7 foram os dois únicos grupos que não responderam a (B) e o grupo G1 não respondeu a (D). Em comparação com as quatro perguntas iniciais, respondidas em sua totalidade pela maioria dos grupos, nota-se que as perguntas (E) até (I) não foram amplamente contempladas. Apenas o G5 respondeu todas as perguntas, os demais grupos não abordaram todos os tópicos.

Quadro 5 - Análise das perguntas A até I da atividade 07

Perguntas		A	B	C	D
Grupos	G1	Abordaram	Ausente	Abordaram	Ausente
	G2	Sem registro			
	G3	Abordaram	Menor desvio foi o vermelho	Abordaram	Conseguiram relacionar com a cor do céu.
	G4	Abordaram	Menor desvio foi o azul.	Abordaram	Relacionaram o primeiro com a decomposição da luz em cachoeiras.
	G5	Abordaram	Maior desvio foi o vermelho.	Abordaram	Compararam com a Terra e o Sol
	G6	Citou apenas o Sol	Trocaram a ordem Maior- vermelho Menor – azul	Abordaram	Relação do leite com céu nublado. Sendo que A23 discordou dizendo que seria um dia mais ensolarado

	G7	Abordaram	Ausente	Abordaram	Sim, mas relacionaram apenas com dias nublados.	
Perguntas		E	F	G	H	I
Grupos	G1	Apresentaram refração, reflexão, difração e interferência.	Ondas	Abordaram	Ausente	Ausente
	G2	Sem registro				
	G3	Explicaram a dispersão da luz branca	Radiação reflexiva que possui frequência (ondas).	Abordaram	Sentidos ópticos (sensações visuais)	Ausente
	G4	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente
	G5	Cor branca é um conjunto de cores.	Apontaram a dualidade da luz	Abordaram	Partícula	Mais velozes são menos refratadas
	G6	Apresentou como raios que possuem partículas.	Ausente	Abordaram	Partícula	Ausente
	G7	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente

Fonte: Elaboração própria (2022).

Pela análise infere-se que os estudantes conseguiram observar e propor conclusões, mas há uma dificuldade em relacionar o experimento com os fragmentos de texto, por isso a necessidade da aula de sistematização, prevista no cronograma. Abaixo foram destacadas algumas falas dos discentes que categorizam os tópicos que deveriam ser respondidos nas apresentações:

- (A) Quais os fatores interferem nos resultados obtidos no experimento da dispersão da luz?

A9: Bom, na primeira experiência a gente teve dificuldade por causa da luz solar porque estava nublado no dia e de primeira a gente conseguiu de primeira achar a posição certa do espelho e apareceu o arco-íris em forma de bandeira, não sei se sabem, mas a bandeira LGBT é a do arco-íris.

(D) Você consegue relacionar os experimentos com fenômenos que já observou?

A1: Aqui temos a foto do prisma, da cachoeira e do arco-íris após a chuva. No prisma a luz branca se encontra com o prisma e do outro lado forma o arco-íris. A luz que reflete fica na horizontal e as refletidas na diagonal. Na cachoeira e na chuva, nesses dois fenômenos temos a decomposição da luz branca em várias cores. Essa separação das cores acontece por causa das gotículas de água que ficam na superfície da terra após a chuva ou próximo de uma cachoeira, assim tendo a luz solar sobre essas gotículas formando o arco-íris. Assim foi a relação com a experiência que a gente fez, tanto a primeira como a segunda.

(F) Como você explicaria a luz a partir dessas duas atividades; e (H) Como você descreveria a luz a partir dos fragmentos desse texto?

A15: A luz obedece o princípio de dualidade onda-partícula. Hoje em dia a gente já tem a concepção que a luz não é uma partícula propriamente dita como Newton disse [...] porque a luz não obedece a todos os pré-requisitos para ser uma partícula, mas não obedece todos para ser onda. Então criamos uma categoria a parte.

(I) Relacionando os fragmentos dos textos com o experimento da dispersão da luz, qual o raio de luz mais refringente e qual o menos? Justifique a sua resposta com o que você analisou nas atividades anteriores.

A15: Então sobre Newton ele formulou uma teoria sobre as cores como a gente pode ver no experimento do prisma ele já estava pensando bastante sobre as cores, sobre refração da luz e como ela se comporta. A luz como partícula e como ela se comporta já falei. A posição do prisma altera o formato do feixe refletido. Então... a posição dele influência nas cores, dependendo da posição você não consegue ver. No caso do experimento precisamos encontrar um ângulo para ver o arco-íris. Não só isso, mas como o outro grupo falou... a luz do ambiente, se tiver muito escuro você não vai ver. Nessa teoria as partículas de cor seriam mais facilmente refratadas que as mais velozes.

A11: Acho que faltou uma palavra, nessa teoria as partículas de cores mais lentas seriam mais facilmente refratadas que as mais velozes.

Pela resposta de A15 nas perguntas (F) e (H) percebe-se que este já possui conhecimentos sobre a temática da luz. Em relação aos grupos, o G5 respondeu todos os tópicos solicitados e utilizou recursos audiovisuais. A apresentação ocorreu através de slides e foi cantada uma música de autoria própria, transcrita a seguir:

*Me escute aqui
No início não dava certo
O vermelho não apareceu
O céu tava nublado, não deu, não deu.*

*Como marinheiro em alto mar só avistava a cor azul. O esforço não foi em vão...
A energia é o que nos move, como desafio que surge
Mude o lado dê um passo até conseguir...
A Light*

*Põe um pouco de leite
light "up" (15:51)
acende a lanterna*

Get down

Aprecie o resultado

Rainbow yes

Vamos... juntos alcançar e deixar colorir esse lugar. A sala que não tinha cor...

Rainbow yes

Mais uma vez

com o copo ... ele apareceu... nós

a energia é que nos move contra os desafios que surgem

mude o lado dê um passo... até conseguir...

Abriremos novas portas, vamos colorir!!

Dá um passo para trás mira, dá um passo para o lado e mira, dá um passo adiante e mira!!

A canção foi explicada por A10 como:

“O conceito da música... se prestar atenção na letra, no início não dava certo. Nós colocamos “mude o lado, dê um passo” Bom, não foi de primeiro que conseguimos então foi necessário mudar a posição até encontrar. “Light up” acende a lanterna. É isso gente, não sei nem falar inglês. “Get down” vá para baixo.

Com base nas lacunas apresentadas pelos grupos durante as explanações e na *direção* (BRUNER, 1976) durante o processo de ensino, na aula de sistematização torna-se necessário orientar e trabalhar os tópicos que não foram abordados. Nessa aula é fundamental um ambiente propício a discussões e conseqüentemente novos significados.

6.8 Atividade 08. Aula de sistematização sobre dispersão, espalhamento e os fragmentos dos textos sobre Newton – Aplicação no dia 10/03/2022

Nesse momento de sistematização houve a discussão da teoria da luz proposta por Isaac Newton abordando a sua visão atomista, que o influenciou a uma teoria de caráter corpuscular. Foram retomados os tópicos que não foram apresentados pelos grupos na atividade anterior e foi explorado os fenômenos de reflexão e refração, com a apresentação da Lei de Snell-Descartes. Para explicar a refração foi utilizado o canudo em um copo com água, mostrando que visualmente parece que o canudo está quebrado, mas na verdade essa “impressão” acontece porque a luz está sofrendo uma refração. Nessa aula, o aluno A11 traz uma organização dos conhecimentos construídos e aborda aspectos sociais e culturais presentes no desenvolvimento de uma teoria científica, indicando o processo de alfabetização científica.

A11: Se parar para pensar, a frequência que o corpo não absorve é propriedade do corpo, mas a cor é interpretação humana sobre aquela realidade. A gente só sabe que o vermelho é vermelho, porque de modo social e cultural nós atribuímos determinada tonalidade ao nome vermelho.

6.9 Atividade 09. Atividade Investigativa da dupla fenda no simulador – realização e debate – Aplicação no dia 18/03 e 24/03/2022

Ocorreu a preparação do experimento da dupla fenda e a simulação “Interferência de Onda” no PhET. As duas atividades foram simultâneas, já que não existiam computadores suficientes para que todos os alunos realizassem a simulação ao mesmo tempo. Sendo assim, 10 duplas foram para os computadores e os demais estudantes ficaram preparando as suas fendas, depois houve a troca. Para realizar a atividade, instruções claras e objetivas com o intuito de “ativação, manutenção e direção” (Bruner, 1976, p. 51) foram dadas:

P: Prestem atenção como irá funcionar! Vou montar 10 duplas e os outros alunos, os 18, irão fazer fendas. Eu trouxe para cada aluno esses quadradinhos e vocês vão fazer fendas ao meio de tamanhos diversos, desde 0,1 cm até o máximo que conseguirem. Vou montar as duplas de vocês para o simulador e cada aluno fará uma fenda. Aqui temos a fita isolante, tesoura e arame.

P: Vamos colocar no meio da fenda esses arames que vocês trouxeram, vou mostrar aqui o modelo. Coloquem o nome de vocês na fenda. Olhem aqui, vocês vão fazer a fenda e colocar o arame aqui no meio colando com a fita isolante. Escolham no grupo de vocês para que cada integrante faça uma fenda com aberturas diferentes.

Para essa atividade houve a necessidade de 02 dias, a sistematização entre as duplas acontecia ao terminarem a simulação. Destaca-se após a leitura dos diários de bordo, que uma das duplas montou um quadro (Figura 21) para apresentar a análise dos seus resultados, referente ao passo 15 “Aumente e diminua a distância entre as lanternas” do roteiro (apêndice F). Na representação, os estudantes chamaram as franjas formadas no anteparo de “ondas”, pois ainda não conheciam esse termo. É interessante observar que eles contam como ondas as franjas claras e as escuras. Essa análise serviu como um elemento de partida para a aula de sistematização.

Figura 21 - Realização do experimento do espalhamento da luz

Análise dos resultados:	
Separação	Onda PA
500 - 800 m	3 ondas P
900 - 1.300	5 ondas P
1400 - 1900	7 ondas
2000 - 2.600	9 ondas
2700 - 3.300	11 ondas
3.000 - 3.300	13 ondas
3.400 - 3.600	14 ondas
3.700 - 4.000	15 ondas

Fonte: Arquivos de registros da autora (2022).

A análise do conteúdo nos registros dos diários de bordo, mostrou que a maioria não encontrou problemas com a leitura do roteiro, apenas três alunos informaram que tiveram dificuldades, o que sugere a necessidade de leitura prévia com a turma em uma nova aplicação.

Apesar desse problema encontrado, todos conseguiram realizar a atividade e identificaram as características de frequência, amplitude, comprimento de onda e intervalo de tempo na simulação, conforme apresentado no Quadro 6.

Quadro 6 - Análise do conteúdo do diário de bordo da atividade 09

Categories	Objeto Central	Objeto secundário	Exemplos das respostas apresentadas	Freq.
Problemas Encontrados pelos estudantes	Manipulação do simulador	Entender o que era visto na simulação Utilizar os recursos da simulação	“Dificuldade para saber como funciona o simulador” “não saber mexer exatamente no aplicativo”	5
	Leitura do roteiro	Complexidade do passo a passo Ambiguidade nas instruções	“entender os passos” “falta de interpretação ao ler as instruções”	3
Pontos destacados	Frequência	Frequências associadas a cores Relação entre frequência e tempo	“quando aumenta a frequência a velocidade das ondas são mais rápidas” “com a mudança da frequência ela muda de cor”	12
	Amplitude	Relação de amplitude e intensidade de cores Identificar cristas e vales	“conforme aumentamos a amplitude, as cores ficaram mais intensas” “quanto maior a amplitude maior as cristas/vales deixando as ondas mais altas”	11

	Pontos de máximo e mínimo	Relação entre as duas fontes de luz	<p>“por vários feixes de luz”</p> <p>“quando maior a distância entre as fontes luminosas, mais feixes de luz são formados</p>	5
--	---------------------------	-------------------------------------	---	---

Fonte: Elaboração própria (2022).

Dos pontos destacados pelos estudantes, além da frequência e amplitude, houve a identificação dos fatores que influenciavam no surgimento de mais ou menos franjas. Essa atividade foi sistematizada com a sala juntamente com a atividade experimental da dupla fenda, no dia 31/03/2022. O intuito era que os estudantes conseguissem relacionar a simulação com o experimento e que pudessem perceber que virtualmente era possível identificar e modificar as variáveis, com a obtenção de resultados precisos, porque estavam trabalhando com modelos idealizados. Por outro lado, na prática experimental, eles conseguiam observar e identificar os fatores que influenciavam na difração, mas de forma qualitativa, porque é uma atividade mais passível a erros e sem escalas para observação a olho nu. Essa diferenciação é importante para os alunos identificarem as dificuldades de práticas experimentais e não as simplificarem, como ocorre quando realizam apenas simulações.

6.10 Atividade 10. Atividade Investigativa de dupla fenda com materiais de baixo custo – Aplicação no dia 25/03/2022

Os alunos se dividiram em grupos de 03 ou 04 integrantes e realizaram o experimento da dupla fenda. Antes de iniciar a atividade foram apresentadas as instruções iniciais e a partir de orientações claras, conforme transcrição abaixo, visando evitar o desinteresse dos aprendizes (BRUNER, 2016), os estudantes puderam realizar o experimento e encontrar os seus resultados.

P: Primeiro tirem a tampa desse ponteiro, cuidado para não quebrar. Vocês vão utilizar a parte de trás da folha, que é o anteparo. Então, uma pessoa segura o anteparo (a folha), o outro aluno segura a fenda e o outro o ponteiro. E o outro aluno fará as anotações sobre o experimento. No caso, iremos trabalhar com grupos de quatro integrantes.

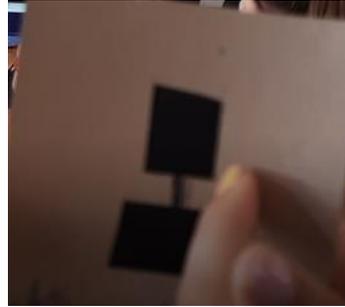
P: Primeiro fiquem com uma distância de um metro, diminuam gradativamente a distância e depois aumentem essa distância do ponteiro em relação a fenda. Toda atividade experimental deve ser anotada, então anotem a distância, o tamanho da fenda utilizada e todas as variáveis do experimento. Como essa sala é pequena vocês vão fazer no pátio da escola.

Esse experimento demorou cerca de 53 minutos para ser realizado. Os alunos construíram a sua fenda no papel cartão e colocaram ao meio um pedaço de arame para fazer

uma dupla fenda. Um dos grupos pegou o celular e começou a relatar como desenvolveu o experimento, essa descrição foi assistida depois da aula, segue a sua transcrição:

A20: A gente estava colocando a luz nesse feixe aqui [A20 mostra no vídeo a imagem da fenda, Figura 22].

Figura 22 - Imagem de gravação realizada pelos alunos



Fonte: Arquivos de registros da autora (2022).

A20: Só que a gente viu 13 feixes.

A10: foram 15.

A20: quando estava mais perto a gente via menos, mais longe via mais.

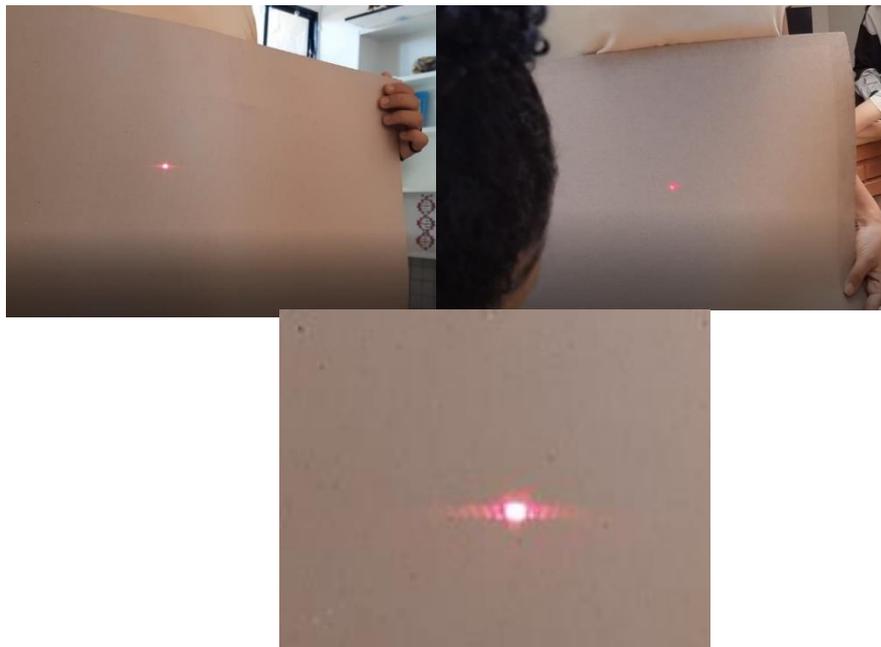
A19: isso tinha mais divisões no anteparo.

A10: nós fizemos com várias fendas de tamanhos diferentes, porque quanto menor a fenda era melhor.

A20: na fenda muito grande a gente não consegue ver as divisões.

Essa disposição dos alunos em gravarem o vídeo e explicarem, sem a necessidade de solicitações, mostra que ocorreu o processo de *ativação* (BRUNER, 1976). Os estudantes demonstraram interesse e motivação na realização da atividade experimental, ou seja, a curiosidade foi despertada porque a atividade apresentou um nível de incerteza adequado. Na Figura 23, são apresentadas as imagens registradas pelos próprios estudantes.

Figura 23 - Experimento da dupla fenda com materiais de baixo custo



Fonte: Arquivos de registros da autora (2022).

Ao final da aula as perguntas foram apresentadas para que os estudantes pudessem refletir em seus grupos e a atividade fosse retomada na aula seguinte:

P: Gente, vou escrever aqui no quadro. Vocês conseguem relacionar a atividade do simulador com a atividade experimental?

A11: Ela passa no buraco e divide.

P: O que vocês vão fazer agora... vão apontar quais foram as diferenças encontradas no experimento e no simulador. E depois quais os pontos em comum. Como você explicaria a atividade do simulador e o experimento para alguém que nunca fez essa atividade?

Em toda a sequência os tópicos de refração, reflexão, interferência, difração e natureza da luz foram abordados mais de uma vez, aumentando o nível de dificuldade em cada retomada. A intenção era sempre abordar o conteúdo com diferentes recursos – simulação, textos e experimentos – a fim de estimular a construção de novos conhecimentos, através do currículo em espiral.

6.11 Atividade 11. Leitura de fragmentos históricos extraídos de textos científicos sobre a teoria da luz de Huygens – Aplicação no dia 30/03/2022

Devido aos eventos escolares e feriados, as aulas da trilha foram interrompidas e aconteceram apenas na última semana do mês de abril. No tocante a isso, a atividade que seria realizada no dia 01/04 foi adiantada para o dia 30/03, conforme descrito no Quadro 7.

Quadro 7 - Calendário do mês de abril com feriados e eventos escolares

01/04	Aula foi antecipada para o dia 30/03, porque no dia 01/04 houve um evento da escola.
07/04	Atividade da trilha – disciplina de química
08/04	Conselho de classe- encerramento do bimestre
14/04	Recesso escolar – Quinta-feira Santa
15/04	Feriado – Sexta-feira Santa
21/04	Feriado – Tiradentes
22/04	Recesso escolar

Fonte: Elaboração própria (2022).

Dessa forma, no dia 30/03 foi realizada a leitura dos fragmentos históricos sobre a teoria da luz de Huygens. Essa aula precisou ser menor, porque os alunos estavam mobilizados em outra atividade na escola, então eles apenas leram em 15 minutos e debateram em duplas durante 20 minutos os tópicos:

(A) Como você identifica o conceito luz na teoria de Huygens?

(B) Como você definiria a natureza da luz a partir dos argumentos de Newton e de Huygens?

(C) Lendo o fragmento, você consegue associá-lo a algum experimento que realizou?

(D) Como você definiria a luz após essa leitura?

As perguntas (A), (B), (C) e (D) sobre os fragmentos do texto e o experimento da dupla fenda de Young só foram discutidas no dia 31/03/2022, em que houve a sistematização da simulação e do experimento da dupla fenda.

6.12 Atividade 12. Sistematização sobre o experimento da dupla fenda – Aplicação no dia 31/03/2022

Na aula do dia 31/03/22 os alunos se reuniram na sala de aula e foram divididos em suas duplas para discutir sobre as perguntas da simulação e do experimento realizado no dia 25/03, juntamente com o texto do dia 30/03. Eles ficaram 20 minutos discutindo em dupla, depois ocorreu o aprofundamento e a sistematização reutilizando a simulação do PhET. Ao comparar a simulação com o experimento, os estudantes perceberam que na simulação havia duas fontes de luz que sofriam interferência, já no experimento havia uma fonte de luz e uma fenda dupla que separava a luz em dois feixes luminosos. As transcrições das falas dos estudantes com a categorização são representadas no Quadro 8.

Quadro 8 - Transcrição da Atividade 12 com os indicativos de AC

Grupo	Falas transcritas	Categorização
	<i>P: O que aconteceu nesse experimento da dupla fenda?</i>	
G7	<i>A12: Houve interferência.</i>	Explicação
	<i>P: Isso, mas ao invés de duas fontes (simulação) tínhamos apenas uma na experiência.</i>	
	<i>P: Qualquer tamanho de fenda provocava aquelas tracinhas iluminados e escuros?</i>	
	<i>Alunos não identificados: Não.</i>	Classificação de informações
	<i>P: Quais as diferenças que vocês encontraram entre a simulação e o experimento de bancada?</i>	
G5	<i>A10: Na simulação foi mais fácil de ver.</i>	Classificação de informações
	<i>P: Em qual dos dois nós temos um ambiente controlado, Na simulação ou no experimento?</i>	

	<i>Aluno não identificado: Simulação.</i>	Classificação de informações
G5	<i>A15: Temos uma exatidão.</i>	Justificativa
G1	<i>A24: Já no caso do experimento era difícil contar (feixes).</i>	Justificativa
	<i>P: As escalas são as mesmas?</i>	
	<i>Aluno não identificado: Não.</i>	Classificação de informações
	<i>P: Aqui (simulação) está em nanômetro, ou seja, muito menor que as fendas que vocês fizeram.</i>	
	<i>P: Se vocês fossem explicar a atividade para alguém que nunca fez esse experimento, como vocês explicariam?</i>	
G5	<i>A11: Para ter uma interferência nós precisávamos de dois pontos luminosos, mas nós não tínhamos. Então pegando um papel com um obstáculo no meio do buraco, que tinha que ser bem pequeno, porque a luz é pequena, aí o buraco dividia e nós tínhamos como se fosse duas fontes luminosas. Essas duas fontes causam interferência, quando elas aparecem na cartolina nós vamos ter as partes pretas e coloridas.</i>	Teste de hipóteses, justificativa e explicação
G1	<i>A24: Por isso que na simulação dava para ver no gráfico.</i>	Classificação de informações
	<i>P: Isso, nós temos interferências contrutivas nos pontos claros e destrutivas nos escuros.</i>	
G5	<i>A19: Complementando, tipo assim, o que ele falou tá certo. Mas tem outros fatores que alteram o resultado de como você vê a luz. Eu não daria outra, só complementar. O que ele falou tá certo, mas tem outros fatores que alteram o resultado em como você vê a luz, como a distância, o posicionamento da fenda, tudo isso vai mudar. O ambiente mais escuro consegue ver mais nitidamente. Tudo isso acrescenta no que ele disse.</i>	Levantamento de hipóteses, teste de hipóteses, justificativa e explicação
	<i>P: Pensando no texto, como o Huygens pensa a luz?</i>	
G5	<i>A19: Pensa como matéria, diferente do Newton.</i>	Levantamento de hipótese
G5	<i>A11: Para mim ele vê como onda.</i>	Levantamento de hipótese e justificativa
G5	<i>A19: Fala como movimento de uma espécie de matéria. No final ele acrescentou com respeito a ondulatória seria como uma onda sonora.</i>	Justificativa

	<i>P: Eu tenho matéria oscilando, mas ela não se locomove ao longo da perturbação. Então tenho matéria oscilando, mas ele pensa como uma onda.</i>	
G5	<i>A19: Pensa como onda longitudinal</i>	Justificativa
	<i>P: Quem é uma onda mecânica e longitudinal que conhecemos?</i>	
G5	<i>A10: O som.</i>	Previsão
	<i>P: Ele estava certo?</i>	
G5	<i>A20: Mais ou menos.</i>	-
G5	<i>A11: Todo errado.</i>	-
	<i>P: A luz é uma onda mecânica?</i>	
G1	<i>A24: É uma eletromagnética né professora?</i>	Previsão e justificativa
	<i>P: Sim. Esse experimento que fizemos, adaptado e com materiais de baixo custo, do Thomas Young mostrou que a luz seria uma onda.</i>	
	<i>P: Foi o experimento que comprovou que a teoria adequada seria a ondulatória, antes a teoria que prevalecia era do Newton.</i>	
	<i>P: Ele comprovou a teoria ondulatória porque a difração e interferência não aconteceriam em partículas.</i>	
	<i>P: Quem está certo hoje em dia é o Huygens?</i>	
G5	<i>A20: Não.</i>	Previsão
G5	<i>A15: Então a luz não é uma partícula?</i>	Previsão
	<i>P: Ela se comporta em momentos como partícula e em outros como ondas. Os primeiros experimentos que fizemos podemos justificar como partícula ou onda, mas esse experimento só podemos justificar através da ondulatória.</i>	
G5	<i>A19: Segundo Newton, o argumento, a luz é uma partícula.</i>	Explicação e justificativa
	[...]	
	<i>P: Senhores, vocês serão divididos em dois grupos. Vamos dividir em dois grupos grandes, alguns vão defender a teoria do Huygens e o outro a do Newton. Pensem em experimentos que justifiquem uma e a outra.</i>	

Fonte: Elaboração própria (2022).

Gradativamente os alunos passaram a questionar mais e refletir sobre as atividades, percebe-se um amadurecimento intelectual durante a SEI. As explicações dadas pela professora

foram construídas junto com os alunos, não de forma impositiva, e sim dialogada, em que eles trouxeram argumentos e considerações para a análise do experimento e os fenômenos relacionados. Um dos pontos de atenção foi que o grupo G5 acabou respondendo mais que os outros grupos. Dessa forma, para mudar a dinâmica e estimular a participação dos demais, ao final da aula foi proposto um debate sobre a teoria ondulatória do Huygens e a corpuscular do Newton, dividindo a sala em dois grupos que foram formados através de sorteio.

6.13 Atividade 13. Preparação para o debate sobre a teoria ondulatória e corpuscular da luz – Aplicação no dia 28/04 e 29/04/2022

Após o sorteio, os grupos se prepararam para o debate, que aconteceria da seguinte forma: 1º) O grupo A (sorteio) escolhia os seus integrantes para explicar e defender a teoria de Newton ou de Huygens; 2º) O grupo B questionava sobre o que havia sido apresentado; 3º) O primeiro grupo respondia as perguntas e defendia a sua teoria com as suas conclusões; 4º) Trocava as posições dos grupos A e B e recomeçava a 1º, 2º e 3ª etapa.

6.14 Atividade 14. Debate entre os estudantes sobre a teoria ondulatória e corpuscular da luz – Aplicação no dia 05/05/2022

Na aula do dia 05/05/2022 houve o sorteio para definir qual grupo iniciaria, o grupo de Huygens (A) foi o sorteado para explicar sua teoria ao de Newton (B), que por conseguinte questionaria. Desde a atividade 01 até a 13, a sequência de aulas foi estruturada a fim de os estudantes trilharem caminhos diferentes, para que depois houvesse o aprofundamento do conteúdo de ondulatória. Na aula 14, a partir das transcrições do Quadro 9, a sequência mostra que os alunos estão em busca de argumentos que justifiquem a teoria que estão defendendo, ou seja, engajados na resolução de problemas que é uma característica da SEI (CARVALHO, 2020) e da teoria de Bruner (1976).

Quadro 9 - Transcrição do debate entre a teoria de Huygens e Newton

Grupo	Falas transcritas	
A	<i>A11: É interessante introduzir falando um pouco da história, essa história começou bem cedo. O Aristóteles acreditava que a luz era uma vibração do éter, depois dele tivemos teorias adjacentes, mas a mais importante é a do Newton seria uma colisão elásticas dessa partícula com o objeto o que provocaria refração e reflexão. A do Newton e do Huygens acontecem paralelamente, mas pelo Newton ser mais famosos acabou ganhando mais notoriedade que o Huygens. No final o Newton</i>	Apresentação

	<i>estava errado, o que você ser visto pelo experimento da dupla fenda, e a comunidade científica ficou muito indecisa. O Newton defendia que a velocidade da luz na água seria maior que no ar, mas depois fizeram essa medição e viram que a luz era mais rápida no ar, assim como Huygens tinha proposto. E é isso gente...</i>	
B	<i>A25: Por que para Huygens a velocidade da luz era mais rápida no ar?</i>	Questionamento
A	<i>A11: Na verdade inicialmente foi um pressuposto teórico, dentro da teoria do Huygens ele não tinha feito um experimento concreto. Dentro da linha de raciocínio dele era um pressuposto teórico que se tudo tivesse certinho, a velocidade da luz seria maior do ar. Depois o Foucault fez o aferimento da velocidade na água e na luz e comprovou que era mais rápido no ar. A12: E era o oposto do experimento de Newton, se Newton tivesse certo seria dado ao contrário.</i>	Resposta e conclusão
B	<i>A8: Então voltando para a saga para a teoria do Newton. Após ele analisar o modelo cinético molecular, a partir dele ver que as partículas eram microscópicas. Ele acreditava em um modelo corpuscular, em a luz como partícula. E aí ele denominou os fenômenos luminosos. E aí ele denominou os fenômenos luminosos, e aí tinha a refração e reflexão que vinham através das forças. A propagação diante do newton ele acreditava que ela vinha de forma retilínea e se propagava em várias direções, acreditava que a luz era branca e diante do experimento dele do prisma que ele foi exatamente analisar que a luz possuía diversas cores. Ele acreditava que a luz se propagava com uma velocidade maior na água. A16: Eu só queria falar do experimento que ele fez que foi justamente para fazer a reflexão da luz, que ele jogou a luz em uma determinada posição do prisma teria a refração da luz, que dividia (fragmentava) em sete cores que são as cores do arco-íris, as luzes visíveis. A7: O experimento do prisma foi onde ele utilizou para realizar os estudos ópticos e também de onde tirou a conclusão que a luz é um corpo que se fragmentava conforme as modificações que ele recebia, e que quando entrava em contato com um corpo além de se fragmentar e se transformar em outras cores não só a branca. Ela também dependendo do material e da superfície que está entrando em contato,</i>	Apresentação

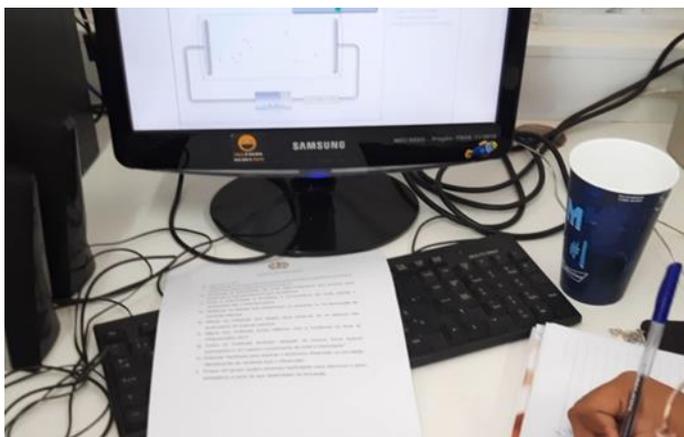
	<i>colidindo, ele tem uma divisão formando outras formas além daquela luz que esteja transmitindo.</i>	
A	<i>A9: Eu queria saber como que explicam o experimento do Newton a partir do experimento da fenda dupla. A11: Você falou que é uma partícula, se ela está vindo aqui como teríamos vários sombreamentos? Se ela vem aqui bate e para, tem um obstáculo aqui. A fenda está aqui (desenhou).</i>	Questionamento
B	<i>A13: A partícula poderia se repartir em várias. A26: Ficaria fragmentada. Como o vidro. A7: É fragmentado e se divide em várias partes, a distância interfere muito, porque mesmo sendo uma fenda mínima de 1 mm, com apenas uma divisão a distância que vai interferir para se dividir em várias partes. Porque estando mais próxima vai se dividir em uma só porque ele não tem uma distância de uma amplitude muito grande para dividir em uma quantidade muito grande e quando tá mais distante da fenda que tá passando ele cria uma ilusão fazendo a divisão, a repetição na verdade daquela repetição que ele fez de apenas uma fragmentação. Quanto maior a força e altura que ele é jogado... maior o espalhamento.</i>	Resposta e conclusão
	<i>P: Professora: então você explicaria na teoria do newton como ele sendo várias partículas. Tem algum experimento que justifique a luz como várias partículas?</i>	
B	<i>A7: O do prisma</i>	
	<i>P: Ok. quando falamos de espalhamento não é uma reflexão. Como a A8 falou que o Newton via como várias colisões. Já a reflexão ele usa o momento que faz com que ele mude a sua velocidade. P: Esse que estamos falando na dupla fenda é a difração e interferência. Esses fenômenos já eram conhecidos antes do experimento da dupla fenda?</i>	Sistematização para evitar concepções equivocadas
A e B	<i>Vários alunos: Sim!</i>	
B	<i>A7: O som</i>	
	<i>P: Ótimo, então já sabiam que ondas sofriam difrações e interferências. Parabéns ao grupo pela elaboração da justificativa dentro da teoria do Newton, mesmo que a gente tenha visto a resposta desse problema.</i>	

Durante o debate foram percebidos, nos dois grupos, modelos explicativos que indicam a presença dos três indicadores de alfabetização científica: “justificativa, previsão e explicação” (SASSERON, 2018).

6.15 Atividade 15. Simulação do efeito fotoelétrico – PhET e sistematização da radiação de corpo negro e efeito fotoelétrico – Aplicação no dia 12/05 e 13/05/2022

A simulação do efeito fotoelétrico foi realizada em dois dias. Como a quantidade de alunos era superior a quantidade de computadores, foram organizados dois grupos. O primeiro grupo, no dia 12/05, se organizava em duplas e realizava a simulação do Efeito Fotoelétrico no PhET (Figura 24), enquanto o segundo participava da aula de sistematização. No dia 13/05 houve a troca das posições dos grupos.

Figura 24 - Simulação do efeito fotoelétrico



Fonte: Arquivos de registros da autora (2022).

A sistematização começou com o resgate do que havia sido estudado para avançar até o problema da radiação de corpo negro, conforme fala transcrita a seguir:

P: Primeiro nós vimos a teoria de Huygens e depois de Newton sobre a natureza da luz. Houve depois uma superação da visão de Newton e a teoria de Huygens com a natureza ondulatória prevaleceu. Nós temos depois o Maxwell que formulou matematicamente as equações para ondas eletromagnéticas, ou seja, ele descreveu essas ondas. Nesses cálculos ele percebeu que a velocidade dessas ondas eletromagnéticas era idêntica a velocidade da luz, ou seja, ele percebe que a luz é uma onda eletromagnética. O que vai acontecer depois disso, nós começamos a ter problema com a luz porque ela não conseguia ser explicada com o que tínhamos da física clássica. Então começamos a ter lacunas e para explicar esses fenômenos começamos a usar explicações ad hoc. Na aula de hoje falaremos sobre o efeito fotoelétrico e qual a revolução que ele provoca dentro da física. O que nós vamos fazer então ... já coloquei em todos os computadores os sites, vocês vão se organizar em duplas, mas como não tem computador suficiente, nós vamos nos dividir em dois grupos, uma parte ficará aqui na bancada e o restante irá para os computadores, depois trocamos.

Os alunos que estavam nos computadores iniciaram a simulação e os demais participaram de uma aula expositiva, em que foi explicado a radiação térmica que está relacionada com a temperatura do corpo, explicando depois o que é um corpo negro e as suas características.

P: Existem corpos que são ótimos emissores, eles absorvem toda a radiação que chega nele e emite depois toda ela, que é o que chamamos de corpo negro. Não tem um corpo perfeitamente negro, mas temos corpos similares a corpos negros, como o Sol e a Terra. O que é diferente da radiação da terra para a do Sol? A temperatura da Terra é menor que a do Sol.

Depois da explicação sobre a radiação do corpo negro, abordou-se o que é um espectro contínuo e o discreto apresentando um material para leitura, apêndice H.

P: Se nós tivermos uma câmera infravermelha a gente vai ver essa imagem aqui (papel) dependendo da radiação, que é que chamamos de espectro. Quando falamos normalmente mostramos o espectro contínuo que vai desde o vermelho até o violeta. Mas todos os átomos e moléculas emitem esse espectro contínuo?

A10: Sim!

P:[...] Não, eu tenho alguns que não emitem espectro contínuo que é o que nós chamamos de espectro discreto. Exemplo esse gás quente só emite essas faixas, uma no vermelho, duas no amarelo, uma no verde, uma no azul e uma no violeta. Então ele é discreto. Deem uma lida e já já conversamos de novo.

Os alunos também receberam o roteiro, apêndice G. As respostas dadas foram analisadas com relação aos pontos que influenciaram no efeito fotoelétrico. O Quadro 10 aponta os destaques realizados pelos alunos durante a execução da simulação.

Quadro 10 - Análise do conteúdo das respostas da atividade 15

Fatores	Interações analisadas	Amostragem das Respostas	Freq.
Luz incidida	Relação entre comprimento de onda da luz e a emissão de elétrons	“na ultravioleta os elétrons tende a se atrair de forma mais rápida”	10
	Relação entre a intensidade da luz e a emissão de elétrons	“quando aumenta a intensidade da onda eletromagnética tende a aumentar a quantidade de elétrons”	10
Material das placas	Relação do material com a emissão de elétrons	“alguns ficam mais rápidos que outros”	8

Tensão elétrica da pilha	Relação da corrente elétrica gerada com a voltagem	“Quando alteramos na voltagem da bateria, altera na corrente elétrica, se alteramos o lado da bateria os elétrons podem voltar de onde vieram”	5
--------------------------	--	--	---

Fonte: Elaboração própria (2022)

Ao longo das atividades observou-se um aumento da organização e da classificação de informações que desencadearam o levantamento de hipóteses, indicativos de AC (SASSERON, 2018). Exemplos desses indicativos são dados nas respostas do item “h” que pede para “elaborar hipóteses para explicar o fenômeno observado na simulação, identificando as variáveis que o influenciam”:

*A12 e A16: a luz ultravioleta precisa se dividir já as outras são divididas.
A10 e A15: alguns materiais absorvem os elétrons em vez de refletir, diminuindo a quantidade de elétrons emitidos.*

Embora as hipóteses formuladas nas duplas tenham sido diferentes, as explicações (indicativo de AC) identificadas no item “i”, que é “propor em grupo (quatro pessoas) explicações para descrever o efeito fotoelétrico a partir do que observaram na simulação”, foram muito semelhantes, servindo para ilustrar aos estudantes que hipóteses equivocadas também podem chegar a explicações e conclusões verdadeiras.

*A12 e A16: quando as partículas da luz apresentam energia para arrancar elétrons.
A10 e A15: os metais presentes no experimento possuem elétrons e ao entrarem em contato com as ondas de radiação interagem entre si liberando elétrons.*

Dessa forma, destaca-se a importância do processo e não apenas do resultado, abordando com os discentes o processo de investigação para o desenvolvimento de teorias científicas.

6.16 Atividade 16. Preparação e elaboração da mostra cultural e científica – Aplicação no dia 19/05, 20/05, 26/05 e 27/05/2022

Ao final das 15 atividades os alunos formaram duplas e trios para desenvolver uma apresentação em estande ou palco para a mostra cultural e científica. Os temas foram escolhidos e desenvolvidos por eles. Nas suas apresentações eles deveriam responder a questão-problema da SEI que era: Como podemos definir a natureza da luz? Os alunos se dividiram em 12 grupos (Quadro 11), de acordo com suas aptidões e interesses.

Quadro 11 - Divisão dos trabalhos apresentados na mostra científica e cultural

Apresentação de palco	Estandes
1	11

Fonte: Elaboração própria (2022).

Os trabalhos foram desenvolvidos na escola e todos os grupos precisavam apresentar o roteiro (apresentações de palco) ou um pôster (apresentações em estandes). No dia 26/05/2022 foi realizada a análise do roteiro e dos pôsteres, com a devolutiva para as correções. Além da parte escrita, fundamental a SEI, descrita por Carvalho como “a etapa do escrever e desenhar” (2020, p. 13), também foram preparados nas aulas os experimentos a serem demonstrados na mostra científica e cultural.

6.17 Atividade 17 – Aplicação no dia 09/06/2022

Na mostra científica e cultural os fenômenos mais abordados foram a refração e a reflexão, presentes nos questionamentos e nas respostas dos alunos ao longo da sequência didática. Diferente de como esses temas eram tratados inicialmente, na mostra cultural e científica percebeu-se uma melhor compressão dos fenômenos, com a diferenciação entre ambos. Nos pôsteres os alunos abordaram as teorias de Newton e de Huygens para introduzir os seus trabalhos, no desenvolvimento exploraram jogos e aplicações do cotidiano para apresentar seus experimentos, conforme observa-se no Quadro 12. As apresentações foram realizadas para todos os alunos da escola no dia 09 de junho de 2022 e os grupos não eram os mesmos que iniciaram a sequência, uma vez que houve uma redução do número inicial de alunos, pois alguns saíram da escola ou estavam em afastamento médico.

Quadro 12 - Descrição das apresentações

Grupos	Temas dos trabalhos apresentados	Representação dos trabalhos
F1	Experimento da lente cilíndrica	Figura 25
F2	Jogo acerte o alvo a partir de prismas	Figura 26
F3	Jogo reflexivo (reflexão da luz)	
F4	Experimento do “disco de Newton”	Figura 27
F5	Experimento da decomposição das cores	Figura 28
F6	Câmara escura	Figura 29
F7	Microscópio caseiro	Figura 30
F8	Simulação Holograma em 3D	Figura 31

F9	Experimento da quimiluminescência	Figura 32
F10	Experimento da água óptica	Figura 33
F11	Simulação de fibra óptica	
F12	Peça e paródia sobre a natureza da luz	Apenas transcrição

Fonte: Elaboração própria (2022).

O grupo F1 explicou os fenômenos de refração e reflexão da luz a partir da ilusão de óptica, associando às lentes corretivas e suas funções. O experimento é retratado na Figura 25. Esse grupo preferiu explicar a luz a partir de uma análise ondulatória.

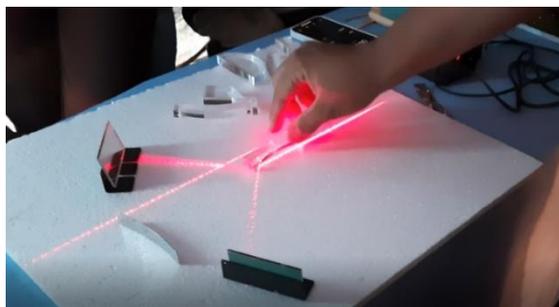
Figura 25 - Experimento da lente cilíndrica de água



Fonte: Arquivos de registros da autora (2022).

O grupo F2 e F3 se juntaram e montaram um jogo (Figura 26) em que os alunos deveriam acertar o alvo utilizando prismas e espelhos, através dos desvios dos feixes luminosos. A explicação se baseou apenas nos fenômenos de absorção, refração e reflexão. Os grupos deram destaque para explicar que esses fenômenos foram explicados por Newton a partir de uma visão corpuscular, mas que isso se mostrou equivocado posteriormente, pois com a realização do experimento de Thomas Young verificou-se que a luz se comportava como uma onda. Esse grupo não abordou a FMC na sua explicação sobre a luz.

Figura 26 - Jogo da luz no alvo



Fonte: Arquivos de registros da autora (2022).

Experimentos sobre a decomposição da luz foram abordados por dois grupos de forma isolada, o F4 e F5. O grupo F4 trouxe a história sobre o experimento e a explicação da

decomposição da luz no prisma, a fim de ilustrar que o branco é a composição das sete cores, para isso fizeram o “disco de Newton” (Figura 27). Os integrantes de F4 apresentaram a parte histórica na introdução, falaram sobre a ilusão de óptica e explicaram o processo da visão citando as células fotorreceptoras, descrevendo que esses fótons recebidos geram impulsos elétricos e são propagados até o cérebro.

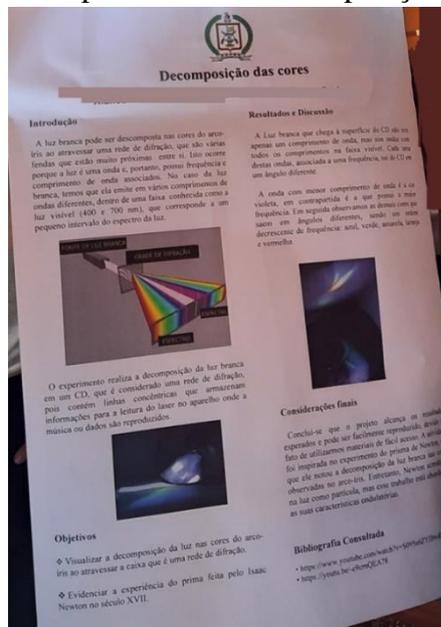
Figura 27 - Experimento do “Disco de Newton”



Fonte: Arquivos de registros da autora (2022).

O F4 utilizou-se da FMC para explicar o seu experimento, enquanto o grupo F5 explicou a decomposição da luz através das redes de difração, com uma análise ondulatória (Figura 28).

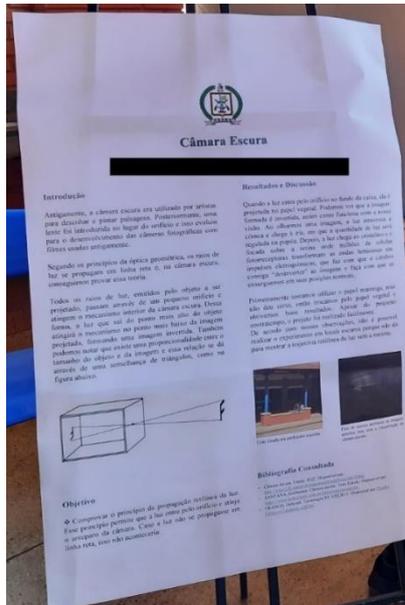
Figura 28 - Experimento da decomposição das cores



Fonte: Arquivos de registros da autora (2022).

O grupo F6 apresentou a câmara escura (Figura 29) com enfoque na geometria, explicando os princípios de independência dos raios de luz e da propagação retilínea da luz. Esse grupo também abordou o processo de visão e detalhou a geração de corrente elétrica a partir dos fótons, como o grupo F4.

Figura 29 - Câmara escura



Fonte: Arquivos de registros da autora (2022).

O grupo F7 construiu um microscópio caseiro, como mostra a Figura 30(a), mas este não funcionou. Então eles explicaram o funcionamento de um microscópio, Figura 30(b), concentrando a sua explanação na óptica geométrica. Também levantaram fatores e propuseram hipóteses para o dispositivo construído não ter funcionado como o esperado. Com isso, percebe-se que durante as atividades os alunos passaram a fazer uma análise mais crítica sobre as suas atividades, percebendo que erros também são resultados e devem ser apresentados.

Figura 30 - Microscópio caseiro



(a)

(b)

Fonte: Arquivos de registros da autora (2022).

A simulação do holograma 3D (Figura 31) foi explicada pelo grupo F8 por meio do fenômeno de reflexão, a FMC não esteve presente na explanação desse grupo.

Figura 31 - Simulação do holograma 3D

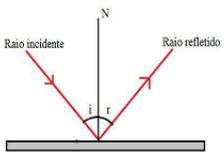


Simulação Holograma em 3D

Introdução

A reflexão da luz é o fenômeno onde uma onda de luz atinge uma superfície e muda sua direção e seu sentido mantendo-se no mesmo meio de propagação, como exemplo, quando a luz atinge um espelho, e é refletida, mudando sua direção, mas mantendo-se no mesmo meio, ou seja, o ar.

Já o experimento da simulação de holograma 3D, usa a propriedade do vidro de refletir a luz, que sendo transparente, cria uma ilusão óptica de uma imagem flutuando no ar, semelhante a um holograma 3D.



Materiais e Métodos Utilizados

Para realizar o experimento foram utilizados quatro pedaços de uma superfície transparente que quando juntos formam uma pirâmide ou um prisma; fita adesiva para unir as superfícies transparentes; e um celular para reproduzir os vídeos de projeção holográfica.

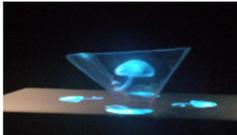
Objetivos

- ❖ Compreender o comportamento da luz;
- ❖ Compreender o fenômeno de reflexão da luz;
- ❖ Explicar como funciona uma ilusão óptica.

Resultados e Discussão

O efeito visual criado, se dá pelas quatro fontes de imagem sendo refletidas em sua respectiva superfícies transparentes, que são redirecionadas para o centro do prisma, formando uma imagem 3D.

O experimento funciona, e por ser um experimento de baixo custo, torna-se muito acessível para aqueles que querem fazer-lo e ver na prática como funciona o fenômeno de reflexão.



Bibliografia Consultada

- <https://www.educamaisbrasil.com.br/ene/m/fisica/reflexao-da-luz>
- <https://www.youtube.com/watch?v=9PA024nMDBE>
- <https://www.youtube.com/watch?v=xrAWgmth0aM>

Fonte: Arquivos de registros da autora (2022).

O grupo F9 expôs em sua apresentação que reações químicas podem resultar na emissão de luz, como ilustra a Figura 32. Para exemplificar, o grupo citou a liberação de fótons de energia, decorrente da utilização do luminol com a solução de peróxido de hidrogênio. Na experiência usaram álcool, água, água oxigenada volume 10, bastões de marca texto de tinta amarelo fluorescente e luz negra.

Figura 32 - Experimento da quimioluminescência



Fonte: Arquivos de registros da autora (2022).

Como os grupos F10 e F11 escolheram o mesmo tema, eles fizeram juntos a demonstração do experimento, complementando as suas explicações. Nesse trabalho foi discutido sobre a reflexão total, a fim de explicar como a luz é “curvada” a partir das múltiplas reflexões. Eles explicaram o funcionamento da fibra óptica, discorrendo sobre a função dos fotodetectores, que convertem a luz emitida pela fibra em corrente elétrica (Figura 33).

Figura 33 - Água óptica e simulação da fibra óptica



Fonte: Arquivos de registros da autora (2022).

Ao final foi realizada a apresentação de palco do grupo F12, segue abaixo a transcrição da peça:

A20: Sejam todos bem-vindos ao fisicamente falando, nós trouxemos três cientistas especiais para vocês hoje que vieram de uma máquina do tempo. O primeiro Huygens (entrou A28)! E o segundo Isaac Newton (entrou A10)! E não menos especial, Albert Einstein (entrou A12).

A20: Isaac, você poderia nos mostrar a sua teoria da luz, como ela se comporta?

A10: Olha... a luz na minha opinião são átomos [interrompido por A28].

A28: Pare de falar besteiras! A luz ela é uma onda.

A10: Ah! Onde já se viu, onda fica é no mar!

A12: Burro! Burro! Burro! Eu vou explicar! É o seguinte, a teoria dele tá errado [apontando para A28], a dele tá errado [apontando para A10]. Tudo burro, burro, burro. Através dos meus estudos eu sei que não há nada nem ninguém mais rápido que a luz e por aí eu criei a teoria da relatividade, que deveria ser ensinada nas escolas, mas tá ensinado só a deles.

A12: Além disso, ganhei meu prêmio Nobel resolvendo o problema da radiação do corpo negro, a luz é onda e partícula, o que também não vemos nas escolas!

Para encerrar as atividades eles cantaram a paródia construída em cima da música “Deixa Acontecer”, do compositor Carlos Caetano do Nascimento, interpretada pelo grupo Revelação.

*Deixa acontecer fisicamente
O prisma na luz vai refratar
Relaxar que Snell ajuda a gente
O arco-íris vai se projetar*

*Deixa acontecer fisicamente
O Newton e o Huygens vão explicar*

*Raio refratado e incidente
Com a normal é só calcular*

*Até que o Einstein chegou com a fotoeletricidade
E não foi tão rápido assim com a dualidade
E sem saber em quem mais crer, Huygens ou Newton
Ondulatória ou atomismo
No meio científico*

*Deixa acontecer fisicamente
O prisma na luz vai refratar
Relaxar que Snell ajuda a gente
O arco-íris vai se projetar*

*Deixa acontecer fisicamente
O Newton e o Huygens vão explicar
Raio refratado e incidente
Com a normal é só calcular*

Com a apresentação dos trabalhos observa-se que os grupos buscaram formas e caminhos diferentes para explicar a luz e as suas características, alguns priorizaram a natureza ondulatória da luz e outros abordaram a sua natureza dual. Os estudantes da escola que participaram da mostra cultural e científica puderam ver diferentes representações para explicar a natureza da luz, abordando o seu comportamento diferenciado em cada um dos experimentos apresentados pelos grupos.

7 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Dos 38 estudantes que estavam cursando a disciplina, 32 alunos responderam à avaliação diagnóstica, que tinha as perguntas: (A) Quais conceitos físicos estudados você relaciona com a luz? (B) Como você explicaria o conceito de luz para alguém? (C) Por que você acha que o céu é azul? (D) O que você entende por efeito fotoelétrico? Essa atividade diagnóstica é a referência para analisar se os estudantes aprenderam novos conceitos sobre a óptica durante a SEI e qual a sua viabilidade de aplicação no itinerário formativo de Trilhas de Aprofundamento.

Nos quadros a seguir, as respostas dos estudantes podem ser classificadas em mais de uma categoria, por exemplo na pergunta (A), no Quadro 13, alguns alunos utilizaram a eletricidade e a luz solar para definir a luz, então as suas respostas foram contabilizadas nas duas categorias. Dessa forma, observa-se que a maioria dos estudantes relacionam a luz com a eletricidade, ou seja, a luz proveniente das lâmpadas e a transformação da luz em energia elétrica. E em segundo lugar com a luz solar ou alguma claridade, nesse caso só enxergam como a luz a parte do espectro visível. Poucos alunos identificaram a natureza ondulatória ou corpuscular da onda.

Quadro 13 - Pergunta (A) da atividade diagnóstica

Quais conceitos físicos estudados você relaciona com a luz?			
Categorias centrais	Palavras-chave	Exemplos de respostas	Freq.
Eletricidade	Energia elétrica eletricidade	“Eletricidade e não sei mais.” “energia, eletricidade” “energia elétrica é gerada por meio da luz”	19
Iluminação	Sol Claridade	“todos com energia solar” “a luz é muito essencial para clarear um local, um exemplo: a lâmpada com a chama acesa”	9
Termologia	Calor Temperatura	“a luz faz aumentar a temperatura” [...] pra formar um arco-íris é preciso de água e é isso,	7

		deve ter a ver com o fogo porque nele tem luz”	
Fenômenos ondulatórios	Reflexão Refração	“refração, reflexo, atrito, velocidade, força e flash” Todos, kskks; meme. São vários, mas acredito que o estudo da ondulatória [..]	5
Eletromagnetismo	Ímãs Eletromagnetismo	[...] a energia envolvida nos ímãs e os materiais	2

Fonte: Elaboração própria (2022).

Na pergunta (B), no Quadro 14, percebe-se novamente a identificação da luz apenas como o que enxergamos, o que é próximo ao senso comum, ou seja, a visão da luz como uma pequena parte do espectro. Em quatro citações são feitas referências à luz como partícula e uma delas o aluno A11 aborda a natureza dual da luz, mostrando que esse conhecimento já está presente na sua estrutura cognitiva.

Quadro 14 - Pergunta (B) da atividade diagnóstica

Como você explicaria o conceito de luz para alguém?			
Categorias centrais	Palavras-chave	Exemplos de respostas	Freq.
Luz visível	Iluminação Sol Lâmpada Clareza luminosa visual	“luz é uma iluminação natural graças ao sol” “luz é algo que se utiliza para iluminar” “tanto a luz da energia elétrica como a luz solar está presente em nossas vidas”	23
Partícula	Átomos Moléculas	“com o atrito dos átomos positivos e negativos faz uma ligação onde ocorrerá a luz” “ligações eletrônicas, diante de movimentos”	3

Infravermelho	Calor Temperatura Esquenta	“luz é um condutor de energia, temperatura e calor. Ela eleva a temperatura ao seu redor fazendo com que gere calor e energia”	3
Dualidade da luz	Dualidade	“a luz obedece a um princípio de dualidade, onde se comporta tanto como onda quanto partícula”	1
Outras	Raios Energia Não sei	“Não sei” “a luz é uma energia, pelo menos um tipo dela”	3

Fonte: Elaboração própria (2022).

Na pergunta (C), no Quadro 15, identifica-se que muitos estudantes relacionaram a cor azul com a formação atmosférica, entretanto não explicam adequadamente como ocorre esse processo. Sendo assim, durante a SEI foi trabalhado os conceitos científicos por trás desse fenômeno. Já outra grande parcela, associou a coloração do céu a uma reflexão do mar, uma visão equivocada que durante as AIs buscou-se a superação.

Quadro 15 - Pergunta (C) da atividade diagnóstica

Por que você acha que o céu é azul?			
Categorias centrais	Palavras-chave	Exemplos de respostas	Freq.
Formação Atmosférica	Atmosfera Gases atmosféricos Posição do Sol Refração	“por causa da refração da água. Onde a água é um cristal que divide as cores e vai permanecer o mais predominante (azul)”. “por conta da camada de gases da Terra”.	13
Processo de reflexão	Espelho Gotículas de água	“dizem que na verdade o céu é branco, e por um fato de espelho imita a cor do mar”	12

		“por causa dos raios solares que refletem nas geleiras”	
Criação divina	Deus	“porque Deus quis que fosse azul” “gosto de pensar que Deus quis colocar essa cor no céu”	2
Outras	Provocado pela visão Não sabia informar	“eu acho que ele não tem cor, mas nossos olhos põem uma cor nele” “Não sei” “acredito que o céu não tenha cor ao certo, o azul é visível a olho nu”	6

Fonte: Elaboração própria (2022).

A pergunta (D), no Quadro 16, demonstra a capacidade de correlação através da palavra “fotoelétrica”, pois muitos alunos associaram essa palavra a fotos e a eletricidade. Dos que citaram “fotos”, apenas um associou à formação de imagens nas câmeras. Os que apontam a eletricidade abordaram a emissão de elétrons provocada por feixes de luz, demonstrando um conhecimento adequado sobre o efeito fotoelétrico.

Quadro 16 - Pergunta (D) da atividade diagnóstica

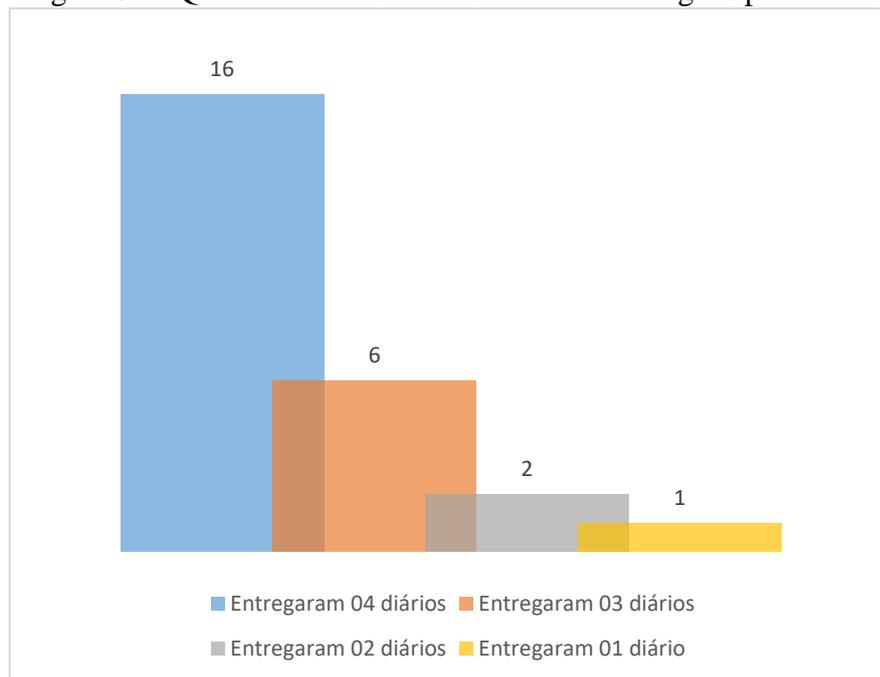
O que você entende por efeito fotoelétrico?			
Categoria central	Palavras-chave	Exemplos de respostas	Freq.
Foto	Câmeras fotográficas Fotografia Imagem	“eu pensei na forma que as pessoas tiravam foto antigamente, naquelas máquinas fotográficas e etc...” “uma câmera fotográfica necessita de energia para funcionar”	13
Emissão de elétrons	Fótons Geração de eletricidade	“É um átomo de eletricidade”	7

	Átomos	“quando a luz bate em uma superfície gerando energia” “quando os fótons emitem eletricidade”	
Reflexão da luz	Espelho Refletir	“é quando a luz bate em uma determinada superfície que reflete essa luz” “entendo como um espelho refletindo a luz do sol”	8
Outro	Processo espontâneo Energia solar Associação com a gravidade	“eu acho que é algo que se produz de forma sozinha” “nada, mas o nome me leva a pensar em gravidade tipo estátua”	6

Fonte: Elaboração própria (2022).

Ao final da SEI, além dos pôsteres, foram analisados 84 diários de bordo de 25 alunos, 13 não entregaram, mas participaram das aulas e da mostra científica e cultural, como foi o caso dos alunos A11 e A20. A quantidade de diários de bordo entregues por estudante é expressa na Figura 34. Nos relatos dos alunos e nas apresentações verifica-se a ocorrência de mudanças no vocabulário, tendo em vista que passaram a explicar a luz como ondas eletromagnéticas e, também, citaram o seu comportamento corpuscular a partir do efeito fotoelétrico. Essa evidência está presente nos diários de bordo e nos pôsteres apresentados na mostra cultural e científica. Isso aponta o crescimento intelectual previsto por Bruner (2006) que é “dizer para si mesmo e para os outros, por meio de palavras ou símbolos, o que foi feito ou será realizado” (BRUNER, 2006, p. 19) e a “internalização dos eventos em um *sistema de armazenamento* que corresponda ao ambiente” (BRUNER, 2006, p. 19).

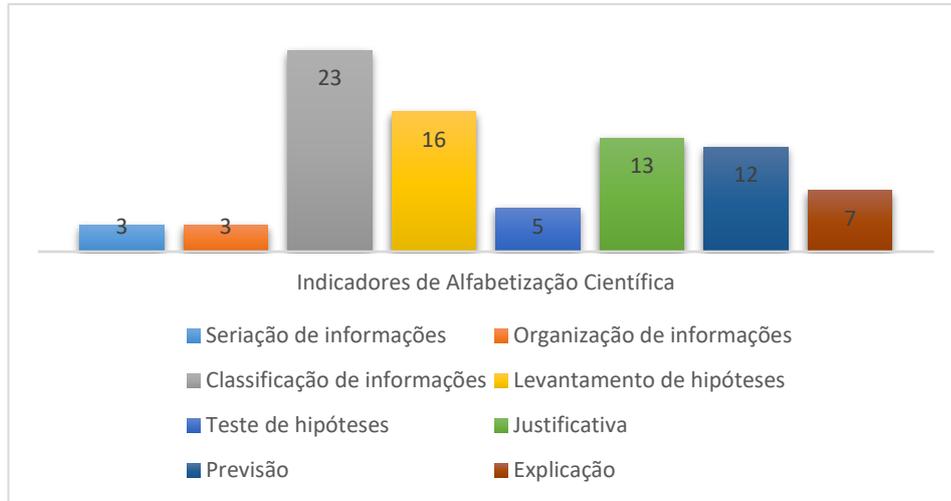
Figura 34 - Quantitativo dos diários de bordo entregues por alunos



Fonte: Elaboração própria (2023).

Em cada AI nota-se que os estudantes participaram mais ativamente das atividades e se tornaram mais questionadores, habilidades que são esperadas na BNCC. Essa evolução demonstra o desenvolvimento do espírito participativo, crítico e investigativo citado por Sasseron (2018), possibilitado através de ambientes de colaboração e diálogo entre os próprios colegas e destes com a professora. Como a AC é um processo dinâmico, ou seja, sempre está em construção e evolução, como a ciência (SASSERON, 2018), na SEI foram observados se havia indícios de AC através dos indicadores – *seriação de informações, organização de informações, classificação de informações, levantamento de hipóteses, teste de hipóteses, justificativa, previsão e explicação* (SASSERON, 2018, p. 19-20) que são retratados na Figura 35. A categorização das falas dos estudantes demonstrou um processo de desenvolvimento da cultura científica. Observa-se ainda que dentro dos eixos estruturantes, os alunos compreenderam os conceitos gerais como a natureza da luz, os fenômenos ondulatórios e o efeito fotoelétrico, analisando e aplicando esses conhecimentos em situações do seu cotidiano, como é demonstrado na culminância.

Figura 35 - Indicativos de Alfabetização Científica



Fonte: Elaboração própria (2023).

O currículo em espiral de Bruner (1976) mostrou-se motivador e instigador, a cada *reforço e retroalimentação*, como exemplo os fenômenos de refração e reflexão abordados desde a primeira atividade experimental até a exposição na mostra. No decorrer das aulas ocorreu uma compreensão desses fenômenos, como observamos nas apresentações da mostra cultural e científica, dos quais os tópicos mais abordados estão compilados na nuvem de palavras da Figura 36.

Figura 36 - Nuvem de palavras com os termos mais utilizados na mostra cultural e científica



WordItOut

Fonte: Elaboração própria (2023) via Word It Out. Disponível em: <https://worditout.com/>. Acesso em: 10 jan. 2023.

A sequência construída inicialmente com *representações ativas* e depois passando para as *representações simbólicas* (BRUNER, 1976) apresenta resultados satisfatórios dentro dos diálogos em sala de aula. Na SEI o aprendiz trabalha primeiro com atividades que partem do concreto e adquire novos vocabulários científicos para em seguida, quando já é capaz de internalizar os conhecimentos construídos, resolver situações-problema diferenciadas dentro do conteúdo de óptica. Na primeira aula foi realizada a aplicação da atividade diagnóstica, que apresentou uma diversidade em relação aos conhecimentos sobre a óptica. Havia alunos que possuíam pouco conhecimento sobre a temática ou estavam cercados de concepções equivocadas, e outros que já haviam estudado sobre a óptica e possuíam conhecimentos preexistentes mais adequados. Para despertar o espírito investigativa, independente dos conhecimentos anteriores, iniciou-se com atividades experimentais classificadas como *representações ativas*, para depois trabalhar com a leitura de textos e ao final realizar a sistematização dos conhecimentos construídos, ou seja, internalizar e passar para a forma de *representação simbólica*. Essa sequência investigativa permitiu que os estudantes desenvolvessem ações intelectuais através manipulações, conforme descrito por Carvalho (2020), que só foi viável através das interações dos aprendizes com os colegas, com os recursos metodológicos e com a professora.

Através da linguagem apresentadas pelos estudantes na SEI é perceptível a internalização das atividades, que demonstra as suas estruturas e o desenvolvimento do pensamento (BRUNER, 1976). Isso é ilustrado através de um estudante que explica inicialmente o efeito fotoelétrico como “É um átomo de eletricidade” e, ao final, através da interação com os materiais e seus colegas, ressignifica como “quando as partículas da luz apresentam energia para arrancar elétrons”. Os indicativos de AC e a apresentação de uma linguagem mais formal revela que durante a SEI os alunos passaram de ações manipulativas para o desenvolvimento intelectual (CARVALHO, 2020).

Carvalho (2020) fundamenta o ensino por investigação no sociointeracionismo de Vygotsky, que estabelece o papel do docente e a importância na seleção dos recursos didáticos que estimulem a construção de novas habilidades e competências, no caso dessa SEI, previstas na BNCC e no DC-GOEM. Dessa forma, junto com o sociointeracionismo abordado no ensino por investigação de Carvalho, a teoria construtivista foi essencial para a SEI, sendo utilizada a teoria de aprendizagem de Bruner (1976). Esta teoria mostrou ser significativa por elucidar como o estudante aprende e quais as instruções necessárias para essa aprendizagem, resultando em construção de novos conhecimentos, que indicam o desenvolvimento das finalidades

previstas na LDB – a formação para o exercício da cidadania, condições para progredir nos estudos e formação para o mercado de trabalho (BRASIL, 1996).

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para fundamentar a sequência foi utilizado o ensino por investigação de Carvalho (2020) que necessita de uma teoria sociointeracionista e uma construtivista, em que foi utilizada a teoria de aprendizagem (instrução) de Bruner (1976). Esta teoria construtivista descreve a forma como o indivíduo aprende e estabelece normas para que essa aprendizagem aconteça. O entrelaçamento entre a proposta de Carvalho (2020) e a teoria de aprendizagem de Bruner (1976) permitiu que a sequência pudesse guiar os estudantes, que ainda estavam em uma fase de representação ativa, apenas executando atividades concretas sem a aquisição de linguagem científica, para a representação simbólica, em que ocorreu o desenvolvimento da ação intelectual. Com base nos referenciais adotados para a construção da sequência e os resultados qualitativos obtidos, verifica-se a viabilidade desta SEI para o ensino de óptica. Tendo em vista que a SEI apresentou resultados satisfatórios, provocando o despertar do espírito investigativa nos estudantes, observado através dos indicativos de alfabetização científica, que por conseguinte resultam na aprendizagem do conteúdo.

Como objetivo, a sequência didática não se propunha apenas ao ensino da óptica, mas que houvesse uma análise crítica e reflexiva das ações realizadas para a construção de conhecimentos. A proposta da SEI era propiciar o desenvolvimento de habilidades, atitudes e valores que permitissem aos estudantes atuarem de forma consciente em situações individuais e sociais, ou seja, esperava-se que ao decorrer das aulas houvesse o desenvolvimento da alfabetização científica (SASSERON, 2018), que foi verificado durante as falas transcritas e as leituras das anotações do diário de bordo dos discentes. Contudo, como a AC é um processo, destaca-se a importância de aulas futuras que continuem fomentando a participação ativa dos estudantes. No início da SEI foi observada uma resistência à metodologia ativa por causa da comodidade apresentada em uma aula tradicional, dificuldade inicial que foi superada através das conquistas e descobertas realizadas nas atividades experimentais.

Todas as AIs desenvolvidas buscaram dar ao ensino da óptica um enfoque nas definições e na evolução dos conceitos, não priorizando em demasia a parte geométrica, a fim de evitar o desinteresse e desestímulo dos alunos que não possuíssem uma linguagem matemática adequada. O formalismo matemático (não exacerbado) foi trabalhado nas aulas de sistematização após o reforço dos conceitos aprendidos, introduzindo a equação geral de ondas, característica das ondas, cálculo do índice de refração, lei de Snell-Descartes, potencial de corte e função trabalho. Essa adequação poderia ser modificada por uma reaplicação da sequência,

abordando também a linguagem matemática nos experimentos, de acordo com os conhecimentos preexistentes dos estudantes.

Por fim, apesar dos resultados positivos, alguns desafios foram encontrados na sequência de aulas, como a sua extensão e aceitação inicial dos estudantes a aulas não tradicionais. Para o primeiro problema, devido a quantidade de projetos e atividades escolares que provocaram um espaçamento entre as aulas da SEI, resultando em uma descontinuidade nas atividades, a solução encontrada no próprio referencial foi o *reforço* e a *retroalimentação* (BRUNER, 2006), que auxiliou nessas retomadas de conceitos com a apresentação de novos significados. Ao professor que não disponha de carga horária extensa é possível a redução da quantidade de aulas. Em relação a segunda dificuldade, a aceitação dos estudantes às aulas não tradicionais, a solução foi encontrada no ensino por investigação (CARVALHO, 2020) com a utilização de práticas experimentais que estimulam o protagonismo e despertam a curiosidade deles, promovendo o desenvolvimento do espírito investigativo. Dentro dessa perspectiva é necessário a adoção de metodologias ativas nos anos iniciais do fundamental, com propostas de sequências didáticas que estimulem a participação e a exploração dentro das salas de aula. Assim, os discentes desenvolverão desde a tenra infância a criatividade e a criticidade, que resultará em cidadãos conscientes e atuantes dentro e fora dos muros da escola.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABIB, Maria Lúcia Vital dos Santos. A avaliação como um processo de investigação a favor da aprendizagem em ciências. In CARVALHO, A. M. P (Org.), **Ensino de física**. São Paulo: Cengage Learning, 2018.
- ALVES, Esdras Garcia; SANTOS, Andre Lucas Matthaeus. Efeito fotoelétrico: desenvolvimento de um experimento quantitativo. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 43, e20210146, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2021-0146>.
- ARAÚJO, Mauro Sérgio Teixeira de; ABIB, Maria Lúcia Vital dos Santos. Atividades experimentais no ensino de física: diferentes enfoques, diferentes finalidades. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 25, n. 2, 2003. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbef/a/PLkjm3N5KjnXKgDsXw5Dy4R/abstract/?lang=en#>. Acesso em 20 dez. 2022.
- BARDIN, Laurence. **Análise de Conteúdo**. Lisboa: Edições 70, 1977.
- BARROS, Marcelo Alves; CARVALHO, Anna Maria Pessoa de. A história da ciência iluminando o ensino de física. **Revista Ciência & Educação**, v.5, n.1, p. 83–94, 1998. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1516-73131998000100008>.
- BRASIL. Lei n. 9.394, de 20 de dezembro de 1996. **Estabelece as diretrizes e bases da educação nacional**. 1996. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9394.htm. Acesso 11 jan. 2023.
- BRASIL. Ministério da Educação. **Base Nacional Comum Curricular**. Brasília, 2018. Disponível em: <http://basenacionalcomum.mec.gov.br/>. Acesso 10 jan. 2023.
- BRUNER, Jerome Seymour. **Uma nova teoria de aprendizagem**. 4. ed. Rio de Janeiro: Bloch, 1976.
- BRUNER, Jerome Seymour. **Sobre a Teoria da Instrução**. São Paulo: Ph Ltda., 2006.
- CAPECCHI, Maria Candida Varone de Moraes. Problematização no ensino de ciências. In CARVALHO, A. M. P (Org.), **Ensino de ciências por investigação: condições para implementação em sala de aula**. São Paulo: Cengage Learning, 2020.
- CARVALHO, Anna Maria Pessoa de. Fundamentos teóricos e metodológicos do ensino por Investigação. **Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências**, v. 18, n. 3, p. 765–794, 2018a. DOI: <https://doi.org/10.28976/1984-2686rbpec2018183765>.
- CARVALHO, Anna Maria Pessoa de. As práticas experimentais no ensino de Física. In CARVALHO, A. M. P (Org.), **Ensino de física**. São Paulo: Cengage Learning, 2018b.
- CARVALHO, Anna Maria Pessoa de. O ensino de ciências e a proposição de sequências de ensino investigativas. In CARVALHO, A. M. P (Org.), **Ensino de ciências por investigação: condições para implementação em sala de aula**. São Paulo: Cengage Learning, 2020.
- CRUZEIRO, Wendell. **Da ótica ao eletromagnetismo: uma proposta de ensino investigativo sobre a luz e seus impactos tecnológicos**. 2020. Dissertação (Mestrado Profissional de Ensino de Física) – Instituto de Física, Universidade de Brasília, 2020.
- FERREIRA, Marcello *et al.* Uma proposta de ensino investigativo sobre a física moderna e contemporânea: o efeito fotoelétrico. **Pesquisa e Debate em Educação**, [S. l.], v. 8, n. 2, p. 312–357, 2018. Disponível em: <https://periodicos.ufjf.br/index.php/RPDE/article/view/31179>. Acesso em: 4 jan. 2023.

FREIRE, Paulo. **Pedagogia do Oprimido**. 17. ed. Rio de Janeiro: Paz e Terra, 1987.

FÍSICA UNIVERSITÁRIA. **Experimentos - Espalhamento da luz**. YouTube, 3 jun. 2016. Disponível em: https://www.youtube.com/playlist?list=PL1Dg4Oxxk_RIw4M-bT9bgTiv4MMBth-ln. Acesso em 10 dez. 2021.

GOIÁS. Secretaria de Estado da Educação de Goiás. **Documento Curricular para Goiás – Etapa Ensino Médio**. 2021a. Disponível em: <https://site.educacao.go.gov.br/novo-ensino-medio>. Acesso em 10 jan. 2023.

GOIÁS. Secretaria de Estado da Educação de Goiás. **Documento Curricular para Goiás – Formação Geral Básica (Bimestralização)**. 2021b.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentos de Física - Vol. 2 - Gravitação, Ondas e Termodinâmica, 10ª edição**. Rio de Janeiro: Grupo GEN, 2016. E-book. ISBN 9788521632078. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521632078/>. Acesso em: 08 jan. 2023.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentos de Física - Vol. 4 - Óptica e Física Moderna, 10ª edição**. Rio de Janeiro: Grupo GEN, 2016. E-book. ISBN 9788521632115. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521632115/>. Acesso em: 07 jan. 2023.

HENRIQUE, Franciele Renata *et al.* Luz à primeira vista: um programa de atividades para o ensino de óptica a partir de cores. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 41, n. 3, e20180223, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2018-0223>.

JÚNIOR, João Mauro da Silva; COELHO, Geide Rosa. O ensino por investigação como abordagem para o estudo do efeito fotoelétrico com estudantes do ensino médio de um Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 37, n. 1, p. 51-78, abr. 2020. DOI: <https://doi.org/10.5007/2175-7941.2020v37n1p51>.

KNIGHT, Randall D. **Física: Uma Abordagem Estratégica - Volume 2: Termodinâmica Óptica**. Porto Alegre: Bookman, 2009. E-book. ISBN 9788577805389. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788577805389/>. Acesso em: 07 jan. 2023.

LEÃO, Ana Flavia Corrêa; GOI, Mara Elisangela Jappe. Um olhar na teoria da aprendizagem de Bruner sobre o ensino de Ciências. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 13, e367101321214, 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v10i13.21214>.

LUCAS, Danilo Flügel. **Elaboração de um produto educacional para a materialização de conceitos no aprendizado de óptica geométrica aplicada às anomalias da visão**. 2020. Dissertação (Mestrado Profissional de Ensino de Física) – Universidade Estadual de Ponta Grossa, 2020.

MARTINS. Roberto de Andrade. Introdução: A História das Ciências e seus usos na Educação. In SILVA, C. C. (Org.), **Estudos de história e filosofia das ciências: subsídios para aplicação no ensino**. São Paulo: Livraria da Física, 2006.

MARTINS, Roberto de Andrade; SILVA, Cibelle Celestino. As pesquisas de Newton sobre a luz: uma visão histórica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 37, n. 4, p. 4202-1-4202-32, 2015. Tradução. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S1806-11173731817>. Acesso em: 11 jan. 2022.

MOREIRA, Marco Antonio. **Teorias de aprendizagem**. 2 ed. São Paulo: E.P.U, 2019.

- MOURÃO, Matheus Fernandes; SALES, Gilvandenys Leite. O uso do ensino por investigação como ferramenta didático-pedagógica no ensino de física. **Experiências em Ensino de Ciências**, v. 13, n. 5, p. 428-440, 2018. Disponível em <https://fisica.ufmt.br/eenciojs/index.php/eenci/article/view/113>. Acesso em: 26 dez. 2022.
- ORTEGA, Daniel; MOURA, Breno Arsioli. Uma abordagem histórica da reflexão e da refração da luz. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 42, e20190114, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2019-0114>.
- PERUZZO, Jucimar; POTTKER, Walmir Eno; PRADO, Thiago Gilberto do. **Física moderna e contemporânea: das teorias quânticas e relativística às fronteiras da física – Volume 1**. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2014.
- PEZZIN, Diego de Oliveira. **Uma proposta de sequência didática com base em metodologias ativas por meio do ensino híbrido para o ensino da óptica da visão e do efeito fotoelétrico**. 2022. Dissertação (Mestrado Profissional de Ensino de Física) – Instituto Federal do Espírito Santo, 2022.
- PHET. **Interactive Simulations da Universidade do Colorado**. 2016. Disponível em: https://phet.colorado.edu/pt_BR/about. Acesso em: 14 dez. 2021.
- POLITO, Antony Marco Mota. **A construção da estrutura conceitual da física clássica**. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2016.
- SANTOS, Débora Oliveira dos; CAMPOS, José Galúcio. Óptica geométrica sob a luz de atividades investigativas no ensino fundamental. **Experiências em Ensino de Ciências**, v. 13, n.4, p. 212-225, 2018. Disponível em: <https://fisica.ufmt.br/eenciojs/index.php/eenci/article/view/70/57>. Acesso em: 02 jan. 2023.
- SASSERON, Lúcia Helena; CARVALHO, Anna Maria Pessoa de. Almejando a alfabetização científica no ensino fundamental: a proposição e a procura de indicadores do processo. **Investigações em Ensino de Ciências**, v. 13, n.3, p.333-352, 2008. Disponível em <https://ienci.if.ufrgs.br/index.php/ienci/article/view/445>. Acesso em: 20 ago. 2022.
- SASSERON, Lúcia Helena. Alfabetização científica e documentos oficiais brasileiros: um diálogo na estruturação do ensino de física. In CARVALHO, A. M. P (Org.), **Ensino de física**. São Paulo: Cengage Learning, 2018.
- SASSERON, Lúcia Helena. Interações discursivas e investigação em sala de aula: o papel do professor. In CARVALHO, A. M. P (Org.), **Ensino de ciências por investigação: condições para implementação em sala de aula**. São Paulo: Cengage Learning, 2020.
- SILVA, Cibele Celestino; MARTINS, Roberto de Andrade. A teoria das cores de Newton e as críticas de Hooke. **Atas do V Encontro de Pesquisadores em Ensino de Física**. Belo Horizonte: UFMG/CECIMI G/FAE, 1997, p. 230-7.
- SILVA, Fabio W.O. da. 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. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1806-11172007000100021>.
- SILVA, Ivanderson Pereira; MERCADO, Luis Paulo Leopoldo. Revisão sistemática de literatura acerca da experimentação virtual no ensino de Física. **Ensino & Pesquisa**, v.17, n. 1, p. 49-77, 2019. Disponível em <https://periodicos.unespar.edu.br/index.php/ensinoepesquisa/article/view/2381v>. Acesso em: 06 mar. 2023.

STUDART, Nelson. A Invenção do Conceito de Quantum de Energia segundo Planck. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, vol. 22, n. 4, p. 523-535, 2000. Disponível em: https://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/v22_523.pdf. Acesso em: 06 jan. 2023

TIPLER, Paul A.; MOSCA, Gene. **Física para Cientistas e Engenheiros - Vol. 3 - Física Moderna, 6ª edição**. Rio de Janeiro: Grupo GEN, 2009. E-book. ISBN 978-85-216-2620-6. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/978-85-216-2620-6/>. Acesso em: 08 jan. 2023.

VYGOTSKY, L. S. **A Formação Social da Mente**. 4.ed brasileira. São Paulo: Martins Fontes, 1991. 168 p.

APÊNDICE A - Produto Educacional



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE FÍSICA
MESTRADO NACIONAL PROFISSIONAL EM ENSINO DE FÍSICA
POLO 01

Nayana Helena Negrão de Souza

Sequência de Ensino Investigativa para o estudo da Óptica ancorada na Teoria de Instrução de Bruner: atividades experimentais e fragmentos históricos

Brasília - DF
2023

APRESENTAÇÃO

Caro professor(a) esse material é um produto do Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF) e tem o objetivo de oferecer uma Sequência de Ensino Investigativa (SEI) para o estudo da óptica, que pode ser aplicada em uma disciplina de física na Formação Geral Básica (FGB) ou nos Itinerários Formativos (IFs). A partir dessa sequência, o discente estudará desde a teoria corpuscular da luz proposta por Newton até o efeito fotoelétrico de Einstein. Como a SEI foi desenvolvida para as trilhas de aprofundamento, ela foi construída a partir dos eixos estruturantes da Base Nacional Comum Curricular (BNCC) que são: *Investigação Científica; Processos Criativos; Mediação e Intervenção Sociocultural e; Empreendedorismo* (BRASIL, 2018).

Para a SEI foram adotados o ensino por investigação de Carvalho (2020), que explica as interações dos professores e alunos em etapas, fundamentado pela teoria de instrução do Bruner (2006), que enuncia os modos de representação vividos pelos aprendizes (BRUNER, 2006; MOREIRA, 2019) e apresenta o currículo em espiral e a aprendizagem por descoberta. Esses dois referenciais propiciam uma sequência de atividades que sejam desafiadoras e estimulem o desenvolvimento de habilidades críticas e reflexivas almejando a *alfabetização científica* (SASSERON, 2018).

OBJETIVO

Oportunizar o estudo da óptica e a alfabetização científica através de uma Sequência de Ensino Investigativa (SEI), utilizando os pressupostos da Teoria de Instrução de Bruner.

DESCRIÇÃO DA SEQUÊNCIA

Formato: Presencial

Público-alvo: alunos da 2ª série

Disciplina: Trilhas de aprofundamento de Física

Formas de Avaliação: diário de bordo, participação e realização dos experimentos nas aulas e as apresentações na mostra científica e cultural.

Autora: Nayana Helena Negrão de Souza

Orientadora: Professora Dra. Vanessa Carvalho de Andrade

REFERENCIAL TEÓRICO

A Sequência de Ensino Investigativa (SEI) articula as teorias sociointeracionista e construtivista, usualmente as de Vygotsky e Piaget. Entretanto, para este trabalho será utilizada a teoria construtivista de Jerome Bruner, que afirma que o ensino deve ser identificado pelo estudante em termos de problemas para que haja uma aprendizagem efetiva. Esse destaque na teoria de Bruner, a aprendizagem por descoberta, direciona o aluno a desenvolver a sua capacidade de solucionar problemas, o autor retrata que a criança realiza um processo similar ao que o cientista faz em seus laboratórios (BRUNER, 2006; MOREIRA, 2019). Além desse fator, o que favoreceu a escolha desse referencial é a teoria de instrução (aprendizagem) de Bruner ser prescritiva e descritiva, ou seja, apresenta como o indivíduo aprende e estabelece normas e condições para que isso aconteça (MOREIRA, 2019). Bruner (1976) também retrata a importância da linguagem para a organização do pensamento, em um trecho diz “Penso frequentemente que faria mais pelos meus alunos ensinando-lhes a ler e a pensar do que dando minha matéria” (BRUNER, 1976, p. 103) e em outro trecho “se não há uma preocupação desenvolvida das diferentes funções a que a linguagem serve, a aflição resultante não será apenas de um falar e escrever falho, mas de uma mente inepta” (BRUNER, 2006, p. 116). Além da teoria de instrução ser cognitivista, também apresenta elementos sociointeracionistas que auxiliam a SEI.

A SEI está estruturada na aprendizagem por descoberta através dos estágios de desenvolvimento intelectual (*Representação ativa, icônica e simbólica*) descritos por Bruner, e na linguagem como instrumento de estruturação do pensamento. Aliada a essa teoria de ensino construtivista, será apresentado durante a SEI ambientes de interação entre os estudantes com os seus pares e com o professor através de instrumentos e signos (VYGOTSKY, 1991) descritos no ensino por investigação de Carvalho (2020). Durante as aulas são seguidas as quatro etapas de planejamento, elaboração e gerenciamento em sala (CARVALHO, 2020), que são: *Etapa da distribuição do material experimental e proposição do problema pelo professor; Etapa da resolução do problema pelos alunos; Etapa da sistematização dos conhecimentos elaborados nos grupos e; Etapa do escrever e desenhar*. Para o início da sequência investigativa é proposta uma questão-problema geral que é “Como podemos definir a natureza da luz?”. A fim de solucionar essa questão-problema ao final da SEI, em todas as Atividades Investigativas (AIs) serão propostas as questões-problema específicas.

Frequentemente, o estudo sobre a luz é compreendido no capítulo de óptica nos livros da 2ª série, em que alguns conceitos são trabalhados no capítulo de ondulatória na própria 2ª

série e outros na introdução à física moderna, logo após o conteúdo de eletromagnetismo na 3ª série (GAMA, 2016). Dentro desse contexto, normalmente a óptica tem uma abordagem com enfoque na geometria, não sendo discutida a natureza da luz, e, quando acontece isso, ocorre de forma superficial com a disputa entre Newton e Huygens (ORTEGA; MOURA, 2019). A história da ciência não costuma ser apresentada nos livros didáticos com o desenvolvimento das teorias, abordando como uma teoria prevaleceu em detrimento de outra e qual a relação entre os acontecimentos históricos e a ciência (MARTINS, 2006). Com base na importância do estudo da física moderna e da natureza da luz, esta sequência irá trabalhar com a óptica desde as teorias do século XVII até início do século XX. Martins (2006) afirma que não é possível substituir o conteúdo de física pela história da ciência, mas esta é importante para que os alunos compreendam que não existem “grandes gênios” que criam teorias de repente e do nada, pois muitas vezes as suas teorias surgiram com grandes falhas, sem comprovações experimentais e observacionais, com explicações incompletas que necessitaram de aperfeiçoamento e até mesmo de reformulações. A ciência está inserida num contexto social e cultural, de tradições que influenciam diretamente a sociedade e vice-versa (MARTINS, 2006).

Dentro do ensino de Física é importante que o aluno saiba que o processo científico não é simples e direto, e que não existe uma equação infalível. Há uma arte da pesquisa, que pode ser aprendida, mas esta não é uma sequência de etapas que deve ser seguida sempre, como uma receita de bolo (MARTINS, 2006). A história da ciência propicia uma compreensão melhor sobre a natureza da ciência e auxilia na aprendizagem dos conteúdos, tendo em vista que os alunos são seres inseridos num contexto social, e, como citado na LDB, a formação se dá também no desenvolvimento para o pleno exercício da cidadania. Durante as aulas é importante a construção de uma cultura científica efetiva e a abordagem histórica é fundamental para evitar concepções equivocadas acerca da ciência, inclusive o anticientificismo. A ciência deve ser respeitada e não adorada ou ignorada, portanto, o processo pelo qual o aluno precisa passar é semelhante ao processo de desenvolvimento histórico da própria ciência (BARROS; CARVALHO, 1998).

SEQUÊNCIA DE ENSINO INVESTIGATIVA

➤ PLANO DE AULA 01: APLICAÇÃO DA ATIVIDADE DIAGNÓSTICA E APRESENTAÇÃO DO DIÁRIO DE BORDO E DA QUESTÃO-PROBLEMA.

Objetivos específicos: diferenciar metodologias de ensino ativas e tradicionais; reconhecer a importância da autonomia e do protagonismo durante o processo de ensino e aprendizagem; identificar os erros como oportunidade de reflexão e construção de novas habilidades que propiciem soluções de questões-problema.

Objetivo específico do professor: identificar os conhecimentos preexistentes dos alunos sobre o conceito de luz, que permitam nortear e adequar a SEI para viabilizar a resolução da situação-problema.

Descrição da atividade: na primeira aula é explicado o que é uma sequência de ensino investigativa, enfatizando a importância de os alunos participarem e realizarem todas as atividades propostas. Após esse momento inicial os estudantes respondem a avaliação diagnóstica. Ao terminarem de responder o questionário, a questão-problema da SEI é apresentada para que os estudantes reflitam sobre ela ao longo da sequência.

Procedimentos:

- [1] Explicar a metodologia utilizada e apresentar o cronograma das atividades investigativas.
- [2] Aplicar a avaliação diagnóstica com as perguntas ([APÊNDICE C – Atividade diagnóstica](#)):
A) Quais conceitos físicos que você já estudou que você relaciona com a luz? B) Como você explicaria o conceito de luz para alguém? C) Por que você acha que o céu é azul? D) O que você entende por efeito fotoelétrico?
- [3] Apresentar o diário de bordo ([APÊNDICE B – Diário de Bordo](#)).
- [4] Apresentar a questão-problema da SEI.

➤ PLANO DE AULA 02: ATIVIDADE INVESTIGATIVA SOBRE A DISPERSÃO E O ESPALHAMENTO DA LUZ.

Objetivo específico: compreender os fenômenos de dispersão (Figura 1) e espalhamento da luz (Figura 2) através de experimentos de baixo custo e relacioná-los com fenômenos naturais presentes no cotidiano.

Questões norteadoras: A) Quais os fatores interferem nos resultados obtidos no experimento da dispersão da luz? B) Qual cor sofreu o maior desvio e qual sofreu o menor? C) Quais os

fatores interferem no resultado obtido no experimento do espalhamento da luz? D) Você consegue relacionar os experimentos com fenômenos que já observou? E) Por que você acha que acontece isso com a luz? F) Como você explicaria a luz a partir das atividades?

Descrição da atividade: os alunos realizam a atividade em grupos (é recomendado cinco integrantes), em que cada grupo realizará dois experimentos, um sobre a dispersão da luz (Figura 1) e o outro sobre o espalhamento da luz (Figura 2). Após a realização dos experimentos o grupo se reunirá para discutir e levantar hipóteses sobre o que aconteceu nas atividades. O grupo elaborará uma explicação para cada um dos experimentos. Individualmente, o aluno fará as anotações no seu diário de bordo.

Materiais necessários:

- **Experimento de dispersão da luz:** vasilha com água, espelho, cartolina branca e luz solar.

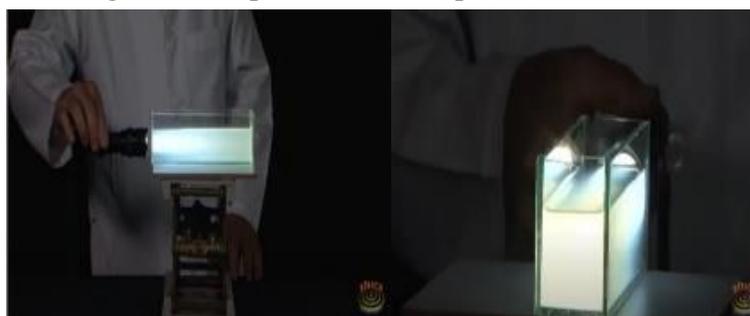
Figura 1 - Experimento da dispersão da luz



Fonte: Elaboração própria (2018).

- **Experimento do espalhamento da luz:** vasilha transparente, água, leite e luz branca.

Figura 2 - Experimento do espalhamento da luz



Fonte: Canal Física Universitária. Disponível em <https://www.youtube.com/watch?v=sDcWsx00O48>. Acesso em 10 dez. 2021.

➤ **PLANO DE AULA 03: LEITURA DE FRAGMENTOS HISTÓRICOS EXTRAÍDOS DE TEXTOS CIENTÍFICOS SOBRE A TEORIA DA LUZ DE NEWTON.**

Objetivos específicos: identificar as variáveis que influenciaram o experimento do prisma realizado por Isaac Newton; relacionar o experimento de dispersão da luz realizado na Aula 02 com os fragmentos do texto.

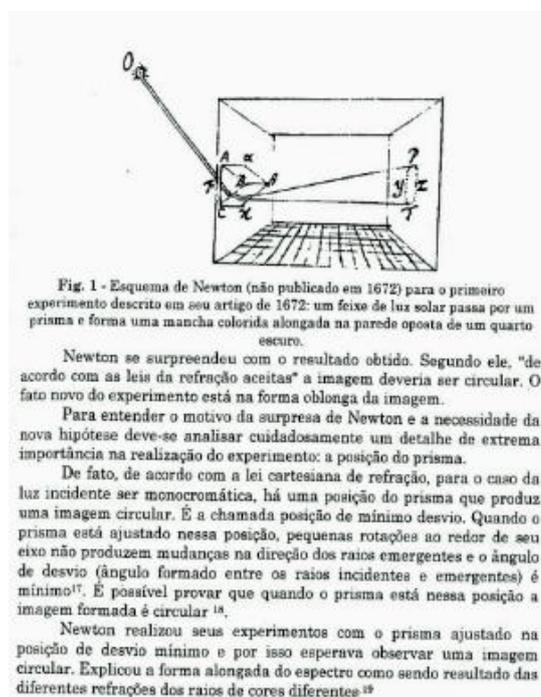
Objetivo específico do professor: aproximar os alunos de textos científicos e a partir deles compreender a teoria corpuscular proposta por Newton.

Questões norteadoras: A) Quais fatores foram importantes para que o Newton realizasse esse experimento? B) Como você descreveria a luz a partir dos fragmentos desse texto? C) Relacionando os fragmentos dos textos com o experimento da dispersão da luz, qual seria o raio de luz mais refringente e qual seria o menos? Justifique a sua resposta com o que você analisou na AI anterior.

Descrição da atividade: Os fragmentos são lidos individualmente, após a leitura o aluno elabora respostas para as questões norteadoras. Depois de responderem as perguntas, os estudantes se reúnem em grupos para compartilhar as respostas e elaborar uma resposta única do grupo. Toda a atividade é registrada no diário de bordo do aluno.

Materiais: fragmentos dos textos de Silva e Martins (Figura 3): “A teoria das cores de Newton e as críticas de Hooke” (1996) e “As pesquisas de Newton sobre a luz: uma visão histórica” (2015).

Figura 3 - Fragmentos sobre o experimento do prisma



Logo depois de descrever esses experimentos, Newton registrou um comentário que certamente *não é consequência* dos mesmos: "Quanto mais uniformemente os glóbulos movem os nervos ópticos, mais os corpos parecem ser coloridos vermelho, amarelo, azul, verde etc.; mas quanto mais diversamente eles os movem, mais os corpos aparecem branco, negro ou cinza" [89]. Percebe-se que Newton estava tanto realizando experimentos quanto tentando compreender a natureza microscópica da luz e das cores.

Na página seguinte do caderno de anotações Newton registrou, sob a forma de tópicos numerados, um primeiro esboço da teoria sobre as cores [90]. A ideia principal dessa teoria (que depois foi abandonada por ele) era que os raios luminosos eram constituídos por partículas (glóbulos) que atingem os olhos, produzindo as diversas sensações de cores; haveria raios luminosos de diferentes velocidades; e os mais lentos seriam mais facilmente desviados (refratados) do que os mais rápidos. Relacionando essa proposta teórica com as observações feitas com o prisma, utilizando a hipótese de que os raios mais lentos sofrem maiores refrações, Newton concluiu que os raios mais lentos são os que produzem as cores azul, cor celeste e púrpura; os mais rápidos, vermelho e amarelo; e os de velocidade intermediária produzem o verde. Supôs também que uma mistura de raios rápidos e lentos produz branco, cinza e preto.

Fonte: A teoria das cores de Newton e as críticas de Hooke (SILVA e MARTINS, 1996) e As pesquisas de Newton sobre a luz: uma visão histórica (SILVA e MARTINS, 2015).

Texto integral disponibilizado para a turma no drive do Google no sítio eletrônico:

https://drive.google.com/drive/folders/1bkys7_dgilVq1Bt4eQaevV4Ivff4bvxB?usp=sharing.

➤ **PLANO DE AULA 04: ATIVIDADE INVESTIGATIVA DO EXPERIMENTO DA DUPLA FENDA.**

Objetivo específico: propor hipóteses para a natureza da luz a partir do experimento de dupla fenda, relacionando essa atividade com o fenômeno observado em ondas na água.

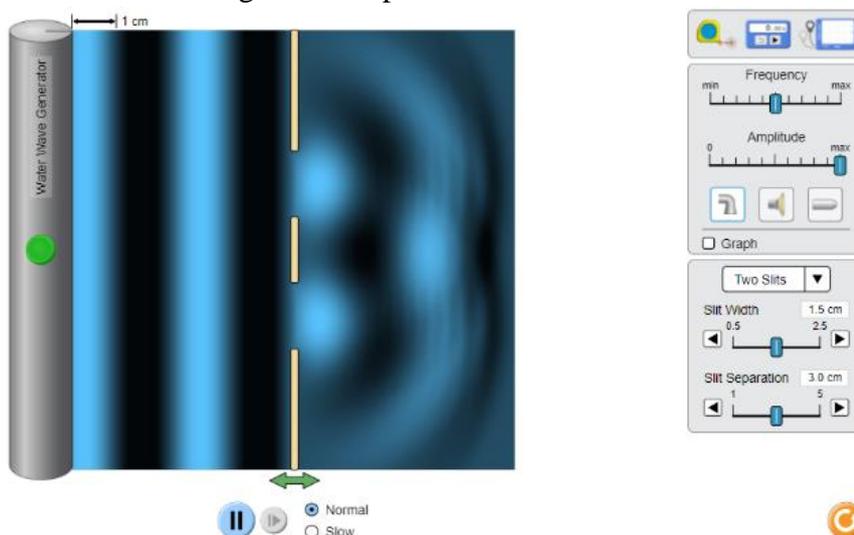
Questões norteadoras: (A) Você consegue relacionar as duas atividades investigativas? (B) Quais as diferenças encontradas entre os experimentos? (C) Quais as semelhanças entre as duas atividades? (D) Como você explicaria a atividade do simulador e o experimento?

Descrição da atividade: Primeiro, em duplas, os estudantes realizam a simulação sobre interferência das ondas, captura de tela ilustrada na Figura 4, no simulador virtual Physics Education Technology Project (PhET) – roteiro no ([APÊNDICE F – Atividade no Simulador de ondas do PhET](#)). Ao finalizarem a atividade, os grupos (formados desde a Aula 02) se reúnem novamente para a realização da prática experimental da dupla fenda com materiais de baixo custo (Figura 5).

Materiais utilizados:

- **Simulação de interferência de ondas:** Dispositivo eletrônicos e simulador virtual do PhET.

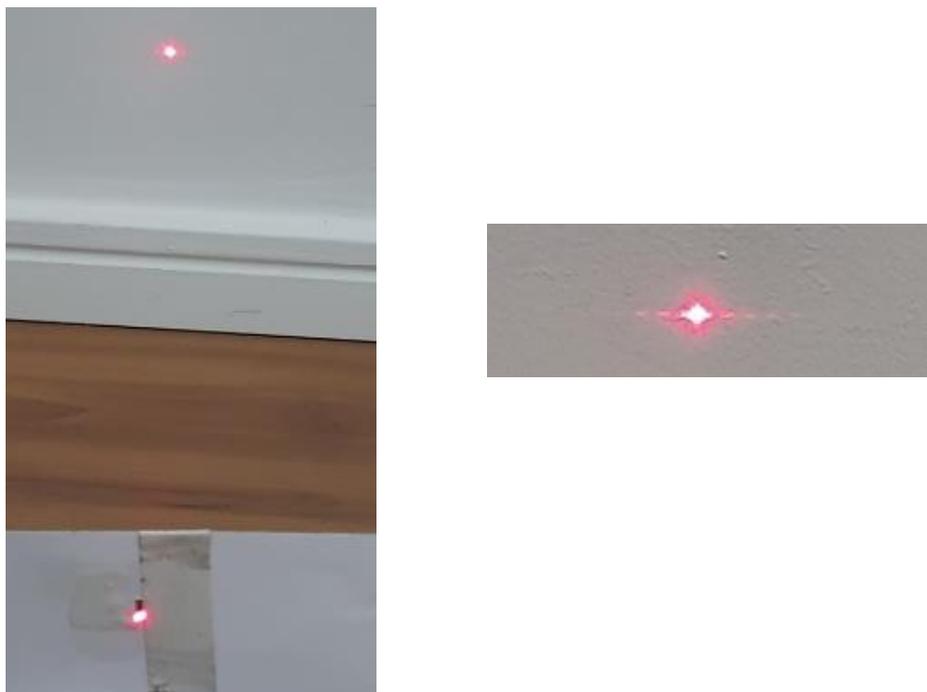
Figura 4 - Captura de tela do simulador PhET



Fonte: PhET. Disponível em <https://phet.colorado.edu/pt/simulations/wave-interference>. Acesso em 12 dez. 2021.

- **Experimento da dupla fenda:** laser pointer, papel cartão, palha de aço, tesoura e fita isolante.

Figura 5 - Experimento da dispersão da luz



Fonte: Elaboração própria (2021).

➤ **PLANO DE AULA 05: LEITURA DE FRAGMENTOS HISTÓRICOS SOBRE A TEORIA ONDULATÓRIA DE HUYGENS.**

Objetivo específico: aproximar os alunos de textos científicos a fim de compreender a evolução histórica da natureza da luz.

Questões norteadoras: A) Como você identifica a luz na teoria de Huygens? B) Como você definiria a natureza da luz a partir dos argumentos de Newton e de Huygens? C) Lendo o fragmento, você consegue associar esse experimento a algum que você já realizou? D) Como você define a luz após essa leitura?

Descrição da atividade: os fragmentos são lidos individualmente, após a leitura o aluno elabora respostas para as questões norteadoras. Depois de responderem as perguntas, os estudantes se reúnem em grupos para compartilhar as suas respostas e elaborar uma resposta do grupo. Toda a atividade é registrada no diário de bordo do aluno.

Materiais utilizados: fragmento do texto extraídos da página 152, 153, 155 e 156 “A evolução da teoria ondulatória da luz e os livros didáticos” de Silva (2007), conforme ilustração na Figura 6.

Figura 6 - Fragmentos sobre a evolução histórica da teoria ondulatória da luz

3. O tratado da luz

O Tratado da Luz de Huygens [2] é dividido em 6 capítulos. Para efeito deste artigo, será suficiente ater-se ao primeiro capítulo, denominado *Raios Diretamente Espalhados*, o qual apresenta alguns pressupostos e discute a natureza e as propriedades gerais da luz. Os demais versarão sobre a reflexão, a refração, a refração no ar, a birrefringência da calcita e um método para determinar as figuras produzidas por espelhos e lentes.

O capítulo I inicia-se com uma declaração que vincula o trabalho à tradição geométrica da física desenvolvida no Renascimento [11]:

As demonstrações que se referem à óptica, assim como em todas as ciências nas quais a geometria é aplicada à matéria, são fundadas em verdades extraídas da experiência: tais são que os raios de luz se propagam em linha reta; que os ângulos de reflexão e de

Quanto à natureza da luz, afirma não duvidar que consista no movimento de alguma espécie de matéria, quer se considere sua produção, quer seus efeitos. Na Terra, a principal fonte é o fogo e a chama que o gera, os quais contêm corpos em movimento rápido, pois dissolvem e fundem diversos outros corpos dos mais sólidos. No que se refere aos efeitos, se a luz for concentrada por meio de espelhos côncavos, apresenta justamente essa propriedade de queimar como o fogo, isto é, de separar as partes dos corpos. Isso lhe confere, portanto, a marca de movimento, pelo menos no âmbito do que para ele seria a verdadeira Filosofia, na qual todos os efeitos naturais são concebidos por razões mecânicas. Acrescenta ainda que se deve proceder dessa forma ou renunciar a toda esperança de compreender qualquer coisa em física, ou seja, deve-se adotar o modelo mecânico como a única alternativa possível.

Com respeito ao caráter ondulatório, ele faz uma analogia com as ondas sonoras no ar, que são mecânicas e longitudinais [12]:

Sabemos que por meio do ar, que é um corpo invisível e impalpável, o som se propaga em torno do local em que é produzido, por um movimento que passa sucessivamente de uma parte a outra do ar, e que a extensão desse movimento se faz com igual velocidade por todos os lados, formando-se como ondas esféricas que se alargam permanentemente e vêm tocar nosso ouvido. Ora, não há qualquer dúvida que a luz venha também de corpos luminosos até nós por meio de algum movimento impresso à matéria entre os dois, pois já vimos que isso não pode ocorrer pelo transporte de um corpo que passaria de um a outro.

Fonte: A evolução da teoria ondulatória da luz e os livros didáticos (SILVA, 2007).

Texto integral disponibilizado para a turma no drive do *Google* no sítio eletrônico:

https://drive.google.com/drive/folders/1bkys7_dgilVq1Bt4eQaevV4Ivff4bvxB?usp=sharing.

➤ PLANO DE AULA 06: SISTEMATIZAÇÃO DAS ATIVIDADES INVESTIGATIVAS (AIS) – PARTE 01.

Objetivo específico: caracterizar as grandezas físicas ondulatórias como frequência, comprimento de onda e velocidade; resolver situações-problema que envolvam as variáveis de frequência, comprimento de onda; identificar e diferenciar os fenômenos ondulatórios de refração, reflexão, difração e interferência nos fenômenos observados no dia a dia.

Descrição da atividade: aula expositiva e dialogada para reforçar os conteúdos construídos durante as AIs e apresentar uma linguagem mais formal aos estudantes. Durante a aula são sistematizados os fenômenos de refração, reflexão, difração e interferência observados nas atividades experimentais. Apresenta-se o formalismo matemático.

➤ PLANO DE AULA 07: DEBATE SOBRE AS TEORIAS DE NEWTON E HUYGENS.

Objetivo específico: elaborar argumentos para defender a teoria corpuscular de Newton e a ondulatória de Huygens com base nos experimentos e artigos lidos.

Descrição da atividade: os grupos apresentam suas hipóteses para explicar os três experimentos realizados e propõem argumentos de defesa para a teoria de Newton e de Huygens. Cada grupo terá 10 minutos para apresentar as suas conclusões e 5 minutos para contra-argumentar. A professora realiza novos questionamentos durante as explicações para que os estudantes reflitam e elaborem novas hipóteses e construam novos argumentos, propiciando a construção de novos conhecimentos.

➤ PLANO DE AULA 08: ATIVIDADE INVESTIGATIVA DE SIMULAÇÃO SOBRE O EFEITO FOTOELÉTRICO.

Objetivo específico: identificar as variáveis que influenciam o efeito fotoelétrico e propor hipóteses para explicar esse fenômeno a partir do que foi observado na simulação.

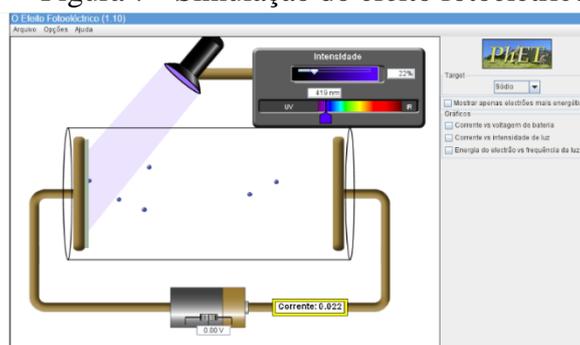
Descrição da atividade: os estudantes são divididos em duplas para observar os fatores que influenciam na simulação do efeito fotoelétrico (Figura 7). Durante a atividade os estudantes alteram os materiais, a intensidade e a frequência das ondas eletromagnéticas. Nessa AI é possível analisar os dados quantitativos através dos gráficos.

Materiais necessários: simulador virtual Physics Education Technology Project (PhET).

Procedimentos:

- [1] Realizar as etapas do roteiro ([APÊNDICE G - Roteiro da Simulação do Efeito Fotoelétrico](#)).
- [2] Elaborar hipóteses para explicar o fenômeno observado na simulação, identificando as variáveis que o influenciam.
- [3] Propor em grupo explicações para descrever o efeito elétrico a partir do que observaram na simulação.

Figura 7 - Simulação do efeito fotoelétrico



Captura da simulação do PhET. Disponível em <https://phet.colorado.edu/pt/simulations/photoelectric>. Acesso 12 dez. 2021.

➤ **PLANO DE AULA 09: SISTEMATIZAÇÃO DAS ATIVIDADES INVESTIGATIVAS (AIS) – PARTE 02.**

Objetivo específico: elaborar explicações para o comportamento da luz a partir de todas as atividades desenvolvidas na SEI, com o intuito de responder a questão-problema “Como podemos definir a natureza da luz?”.

Descrição da atividade: os grupos elaboram hipóteses e apresentam as suas explicações para responder a questão-problema. A professora realiza novos questionamentos durante as explicações para que os estudantes reflitam e elaborem novas hipóteses e construam novos argumentos, propiciando a construção de novos conhecimentos.

➤ **PLANO DE AULA 10: TEXTO PRÓPRIO SOBRE A CONSTRUÇÃO HISTÓRICA DA TEORIA QUÂNTICA.**

Objetivo específico: compreender o problema da radiação do corpo negro e a sua contribuição para o desenvolvimento da teoria quântica.

Descrição da atividade: a leitura do texto é realizada de forma individual e ao final os estudantes fazem um fichamento com as ideias centrais do material. Após a realização do fichamento, os estudantes apresentam as suas dúvidas acerca do texto e realiza-se a discussão a respeito do que foi compreendido sobre a evolução dos conceitos e a natureza da ciência.

Materiais necessários: texto da Evolução Histórica do Surgimento da Teoria Quântica ([APÊNDICE H – Texto de Sistematização](#)).

PLANO DE AULA 11: ELABORAÇÃO DA MOSTRA CULTURAL E CIENTÍFICA.

Objetivo específico: sistematizar os conhecimentos construídos a partir da SEI e divulgá-los para a comunidade escolar.

Descrição da atividade: os grupos organizam uma mostra cultural e científica para divulgar à comunidade escolar os conhecimentos construídos sobre a luz e a sua natureza. Os estudantes podem escolher entre apresentações em pôsteres ou artísticas. Uma parte dos estudantes apresentam em estandes e os outros no palco, de acordo com a proposta apresentada pelo grupo. Nessa atividade os próprios estudantes serão os responsáveis pela mostra, tendo a comissão de organização com o coordenador geral, o coordenador das apresentações em estande, coordenador das apresentações artísticas e coordenadores dos grupos.

Materiais necessários: escolha dos estudantes.

PLANO DE AULA 12: MOSTRA CULTURAL E CIENTÍFICA – EXPOSIÇÃO E APRESENTAÇÕES.

Objetivo específico: Divulgar os conhecimentos construídos durante a SEI.

Descrição da atividade: será realizada uma mostra cultural e científica para que os estudantes apresentem os seus trabalhos que podem ser em estande ou no palco, essa atividade será a culminância da SEI. Nesse momento os alunos compartilham o que aprenderam com a sequência de ensino investigativa, e o professor pode avaliar se esta propiciou o desenvolvimento de conhecimentos adequados e promoveu a cultura científica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRUNER, Jerome Seymour. **Uma nova teoria de aprendizagem**. 4. ed. Rio de Janeiro: Bloch, 1976.

BRUNER, Jerome Seymour. **Sobre a Teoria da Instrução**. São Paulo: Ph Ltda., 2006.

BARROS, Marcelo Alves; CARVALHO, Anna Maria Pessoa de. A história da ciência iluminando o ensino de visão. **Revista Ciência & Educação**, v.5, n.1, p. 83–94, 1998. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1516-73131998000100008>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ciedu/a/bsMxsFJvBgvF7zTtFXWzqqv/abstract/?lang=pt>. Acesso em 17 jan. 2023.

CARVALHO, Anna Maria Pessoa de. O ensino de ciências e a proposição de sequências de ensino investigativas. In CARVALHO, A. M. P. (Org.), **Ensino de ciências por investigação: condições para implementação em sala de aula**. São Paulo: Cengage Learning, 2020.

FÍSICA UNIVERSITÁRIA. **Experimentos - Espalhamento da luz**. YouTube, 3 jun. 2016. Disponível em: https://www.youtube.com/playlist?list=PL1Dg4Oxxk_RIw4M-bT9bgTiv4MMBth-ln. Acesso em 10 dez. 2021.

GAMA, Leonardo Pereira. **O estudo da natureza da luz: uma introdução à física quântica na 2ª série do ensino médio**. 2016. Dissertação (Mestrado Profissional de Ensino de Física) – Universidade Federal do Espírito Santo, 2016.

MARTINS, Roberto de Andrade. Introdução: A História das Ciências e seus usos na Educação. In SILVA, C. C. (Org.), **Estudos de história e filosofia das ciências: subsídios para aplicação no ensino**. São Paulo: Livraria da Física, 2006.

MARTINS, Roberto de Andrade; SILVA, Cibelle Celestino. As pesquisas de Newton sobre a luz: uma visão histórica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 37, n. 4, p. 4202-1-4202-32, 2015. Tradução. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S1806-11173731817>. Acesso em: 11 jan. 2022.

MOREIRA, Marco Antonio. **Teorias de aprendizagem**. 2 ed. São Paulo: E.P.U, 2019.

ORTEGA, Daniel; MOURA, Breno Arsioli. Uma abordagem histórica da reflexão e da refração da luz. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 42, e20190114, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2019-0114>. Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/rbef/a/BXDnH3HCJWntNSXpNNh7qjz/?lang=pt>. Acesso em: 26 dez. 2022.

PHET. **Interactive Simulations da Universidade do Colorado**. 2016. Disponível em: https://phet.colorado.edu/pt_BR/about. Acesso em: 14 dez. 2021.

SASSERON, Lúcia Helena; CARVALHO, Anna Maria Pessoa de. Almejando a alfabetização científica no ensino fundamental: a proposição e a procura de indicadores do processo.

Investigações em Ensino de Ciências, v. 13, n.3, p.333-352, 2008. Disponível em <https://ienci.if.ufrgs.br/index.php/ienci/article/view/445>. Acesso em: 20 ago. 2022.

SASSERON, Lúcia Helena. Alfabetização científica e documentos oficiais brasileiros: um diálogo na estruturação do ensino de física. In CARVALHO, A. M. P (Org.), **Ensino de física**. São Paulo: Cengage Learning, 2018.

SASSERON, Lúcia Helena. Interações discursivas e investigação em sala de aula: o papel do professor. In CARVALHO, A. M. P (Org.), **Ensino de ciências por investigação: condições para implementação em sala de aula**. São Paulo: Cengage Learning, 2020.

SILVA, Cibele Celestino; MARTINS, Roberto de Andrade. A teoria das cores de Newton e as críticas de Hooke. **Atas do V Encontro de Pesquisadores em Ensino de Física**. Belo Horizonte: UFMG/CECIMI G/FAE, 1997, p. 230-7.

SILVA, Fabio W.O. da. 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. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1806-11172007000100021>.

VYGOTSKY, L. S. **A Formação Social da Mente**. 4.ed brasileira. São Paulo: Martins Fontes, 1991. 168 p.

APÊNDICE B – Diário de Bordo

Diário de bordo
Nome:
Turma:
Grupo:
Atividade realizada:
Data de realização:
Materiais utilizados:
Resultados encontrados:
Problemas na execução da atividade:
Hipóteses levantadas:

Análise dos resultados:

Conclusão da atividade (individual):

APÊNDICE C – Atividade diagnóstica**Aluno (a):** _____ **Turma:** _____

[1] Quais conceitos físicos estudados você relaciona com a luz?

[2] Como você explicaria o conceito de luz para alguém?

[3] Por que você acha que o céu é azul?

[4] O que você entende por efeito fotoelétrico?

APÊNDICE D – Fragmentos de textos científicos sobre Newton

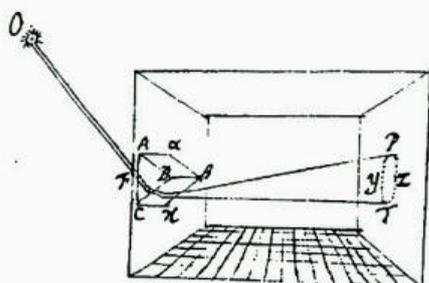


Fig. 1 - Esquema de Newton (não publicado em 1672) para o primeiro experimento descrito em seu artigo de 1672: um feixe de luz solar passa por um prisma e forma uma mancha colorida alongada na parede oposta de um quarto escuro.

Newton se surpreendeu com o resultado obtido. Segundo ele, "de acordo com as leis da refração aceitas" a imagem deveria ser circular. O fato novo do experimento está na forma oblonga da imagem.

Para entender o motivo da surpresa de Newton e a necessidade de uma nova hipótese deve-se analisar cuidadosamente um detalhe de extrema importância na realização do experimento: a posição do prisma.

De fato, de acordo com a lei cartesiana de refração, para o caso de luz incidente ser monocromática, há uma posição do prisma que produz uma imagem circular. É a chamada posição de mínimo desvio. Quando o prisma está ajustado nessa posição, pequenas rotações ao redor de seu eixo não produzem mudanças na direção dos raios emergentes e o ângulo de desvio (ângulo formado entre os raios incidentes e emergentes) é mínimo¹⁷. É possível provar que quando o prisma está nessa posição a imagem formada é circular¹⁸.

Newton realizou seus experimentos com o prisma ajustado na posição de desvio mínimo e por isso esperava observar uma imagem circular. Explicou a forma alongada do espectro como sendo resultado das diferentes refrações dos raios de cores diferentes¹⁹.

Logo depois de descrever esses experimentos, Newton registrou um comentário que certamente *não é consequência* dos mesmos: "Quanto mais uniformemente os glóbulos movem os nervos ópticos, mais os corpos parecem ser coloridos vermelho, amarelo, azul, verde etc.; mas quanto mais diversamente eles os movem, mais os corpos aparecem branco, negro ou cinza" [89]. Percebe-se que Newton estava tanto realizando experimentos quanto tentando compreender a natureza microscópica da luz e das cores.

Na página seguinte do caderno de anotações Newton registrou, sob a forma de tópicos numerados, um primeiro esboço da teoria sobre as cores [90]. A ideia principal dessa teoria (que depois foi abandonada por ele) era que os raios luminosos eram constituídos por partículas (glóbulos) que atingem os olhos, produzindo as diversas sensações de cores; haveria raios luminosos de diferentes velocidades; e os mais lentos seriam mais facilmente desviados (refratados) do que os mais rápidos. Relacionando essa proposta teórica com as

Perguntas sobre o texto

- Quais fatores foram importantes para que o Newton realizasse esse experimento?
- Como você descreveria a luz a partir dos fragmentos desse texto?
- Relacionando os fragmentos dos textos com o experimento da dispersão da luz, qual seria o raio de luz mais refringente e qual seria o menos? Justifique a sua resposta com o que você analisou na AI anterior.

APÊNDICE E – Fragmentos de textos científicos sobre Huygens

3. O tratado da luz

O Tratado da Luz de Huygens [2] é dividido em 6 capítulos. Para efeito deste artigo, será suficiente ater-se ao primeiro capítulo, denominado *Raios Diretamente Espalhados*, o qual apresenta alguns pressupostos e discute a natureza e as propriedades gerais da luz. Os demais versarão sobre a reflexão, a refração, a refração no ar, a birrefringência da calcita e um método para determinar as figuras produzidas por espelhos e lentes.

O capítulo I inicia-se com uma declaração que vincula o trabalho à tradição geométrica da física desenvolvida no Renascimento [11]:

As demonstrações que se referem à óptica, assim como em todas as ciências nas quais a geometria é aplicada à matéria, são fundadas em verdades extraídas da experiência: tais são que os raios de luz se propagam em linha reta; que os ângulos de reflexão e de refração são iguais e que nas refrações o raio é quebrado de acordo com a regra dos senos, bem conhecida e não menos correta que as precedentes.

Quanto à natureza da luz, afirma não duvidar que consista no movimento de alguma espécie de matéria, quer se considere sua produção, quer seus efeitos. Na Terra, a principal fonte é o fogo e a chama que o gera, os quais contêm corpos em movimento rápido, pois dissolvem e fundem diversos outros corpos dos mais sólidos. No que se refere aos efeitos, se a luz for concentrada por meio de espelhos côncavos, apresenta justamente essa propriedade de queimar como o fogo, isto é, de separar as partes dos corpos. Isso lhe confere, portanto, a marca de movimento, pelo menos no âmbito do que para ele seria a verdadeira Filosofia, na qual todos os efeitos naturais são concebidos por razões mecânicas. Acrescenta ainda que se deve proceder dessa forma ou renunciar a toda esperança de compreender qualquer coisa em física, ou seja, deve-se adotar o modelo mecânico como a única alternativa possível.

Com respeito ao caráter ondulatório, ele faz uma analogia com as ondas sonoras no ar, que são mecânicas e longitudinais [12]:

Sabemos que por meio do ar, que é um corpo invisível e impalpável, o som se propaga em torno do local em que é produzido, por um movimento que passa sucessivamente de uma parte a outra do ar, e que a extensão desse movimento se faz com igual velocidade por todos os lados, formando-se como ondas esféricas que se alargam permanentemente e vêm tocar nosso ouvido. Ora, não há qualquer dúvida que a luz venha também de corpos luminosos até nós por meio de algum movimento impresso à matéria entre os dois, pois já vimos que isso não pode ocorrer pelo transporte de um corpo que passaria de um a outro.

Perguntas sobre o texto

- A. Como você identifica o conceito luz na teoria de Huygens?
- B. Como você definiria a natureza da luz a partir dos argumentos de Newton e de Huygens?
- C. Lendo o fragmento, você consegue associá-lo a algum experimento que realizou?
- D. Como você definiria a luz após essa leitura?

APÊNDICE F – Atividade no Simulador de ondas do PhET

CEPMG – UNIDADE FORMOSA – DOMINGOS DE OLIVEIRA

Série: 2ª série

Data: __/__/2022

Turma: Energia que nos move

Professor: Nayana Souza

Disciplina: Física

Passo 1. Acesse o link

<https://phet.colorado.edu/sims/html/wave-interference/latest/wave-interference_en.html>

Passo 2. Clique em “Waves” e depois no ícone da onda na água:



Passo 3. Clique em “Side View” (Vista Lateral) e observe como estão sendo geradas as ondas na água.

Passo 4. Explore a simulação, observe o que acontece quando você aumenta e depois quando diminui a frequência (frequency).

Passo 5. Analise o que acontece quando você aumenta e depois diminui a amplitude.

Passo 6. Coloque o gráfico (Graph) e refaça os passos 04 e 05.

Passo 7. Clique em “Top View” (Vista de cima) e pense como você diferencia as cristas e os vales dessas ondas.

Passo 8. Clique nesse símbolo para observar o comportamento da luz na simulação.



Passo 9. Clique em “screen” (tela) antes de emitir os feixes luminosos. Descreva como a imagem está sendo formada na tela.

Passo 10. Altere a frequência (frequency) e observe o que muda na tela.

Passo 11. Observe na tela o que acontece quando aumenta e depois quando diminui a amplitude.

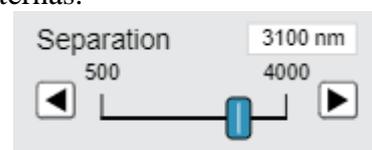
Passo 12. Coloque o gráfico (Graph) e refaça os passos 10 e 11.

Passo 13. Clique no ícone “Interference”.



Passo 14. Clique em “screen” (tela) e observe como a imagem é formada antes e depois da emissão dos feixes de luz.

Passo 15. Aumente e diminua a distância entre as lanternas.



Passo 16. Pense em explicações para o que está acontecendo na tela.

Passo 17. Repita os passos 13, 14 e 15 com a simulação da onda na água.



APÊNDICE G - Roteiro da Simulação do Efeito Fotoelétrico

CEPMG – UNIDADE FORMOSA – DOMINGOS DE OLIVEIRA

Série: 2ª série

Data: __ / __ / 2022

Turma: Energia que nos move

Professor: Nayana Souza

Disciplina: Física

- a) Acessar o link <https://phet.colorado.edu/sims/cheerpj/photoelectric/latest/photoelectric.html?simulation=photoelectric&locale=pt>
- b) Aumentar a intensidade da onda eletromagnética aos poucos para observar o que acontecerá com os elétrons.
- c) Fixar a intensidade e modificar o comprimento de onda (desde o ultravioleta até o infravermelho).
- d) Observar os fatores que influenciam no aumento ou na diminuição da corrente elétrica.
- e) Alterar os materiais (em target) para observar se os elétrons são arrancados da mesma maneira.
- f) Algum dos materiais emitiu elétrons com a incidência na faixa do infravermelho (IV)?
- g) Todos os materiais emitiram radiação da mesma forma quando submetidos a um mesmo comprimento de onda e intensidade?
- h) Elaborar hipóteses para explicar o fenômeno observado na simulação, identificando as variáveis que o influenciam.
- i) Propor em grupo (quatro pessoas) explicações para descrever o efeito fotoelétrico a partir do que observaram na simulação.

APÊNDICE H – Texto de Sistematização

EVOLUÇÃO HISTÓRICA DO SURGIMENTO DA TEORIA QUÂNTICA

A física quântica nasce a partir dos questionamentos sobre o desconhecido espectro da radiação térmica e da descoberta de novas radiações, sua origem está entrelaçada à origem da química quântica. O marco do desenvolvimento da mecânica quântica é a descoberta dos raios catódicos.

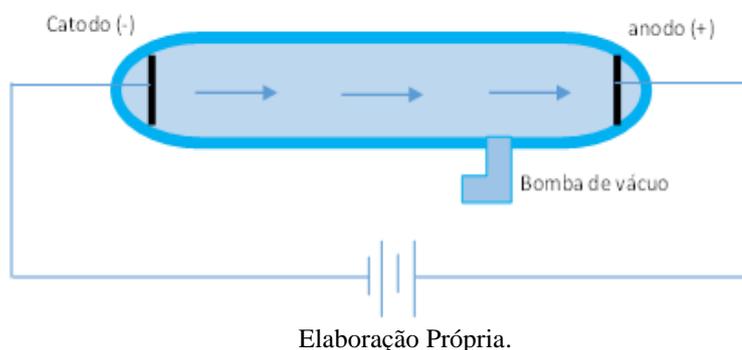
Mas o que são raios catódicos? Provavelmente você já utilizou equipamentos reprodutores de imagem, tais como televisor, monitor de computador, tela de radar, dentre outros, não é mesmo?! Os tubos de raios catódicos são os dispositivos responsáveis por gerar essas imagens. Vamos ver como eles foram descobertos? E qual a contribuição dele para o desenvolvimento da física quântica?

Raios Catódicos

Quem iniciou os estudos sobre raios catódicos foi Michael Faraday, um grande físico experimentalista inglês, em 1838. Considerado um dos maiores cientistas experimentais, propiciou grandes contribuições à física, em especial na área do eletromagnetismo, e à química. Nas suas experiências em química, conseguiu liquefazer, ou seja, passar do estado gasoso para o líquido, gases que nunca tinham sido liquefeitos. Para isso, foram necessárias determinadas condições de temperatura e pressão, já que nas condições normais de temperatura e pressão, esses gases liquefeitos estão na forma gasosa. Então, em seus estudos sobre gases, Faraday aplicou uma diferença de potencial (tensão elétrica) entre gases a baixas pressões (gases rarefeitos), o que proporcionou a pesquisa dos raios catódicos.

Um dos problemas para o avanço dos estudos sobre raios catódicos foi a dificuldade de soldar materiais com coeficientes de dilatação diferentes, neste caso, vidro e metal. Em 1855, um alemão que trabalhava com vidros, Heinrich Geissler, construiu tubos de vidros selados com uma bomba de vácuo de mercúrio (como era um metal líquido, ajudava na vedação) para retirar o ar e regular a pressão dentro do tubo (Conforme figura 1), podendo também retirar todo o ar e inserir um outro gás. Nesses tubos não havia vácuo porque o gás sempre estava a uma dada pressão.

Figura 1 - Tubo de Geissler

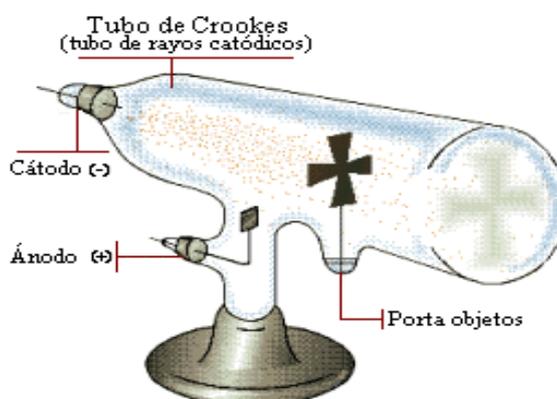


Era aplicada uma tensão alta ao tubo. Quando o gás estava numa pressão elevada, não havia passagem de corrente pelo tubo. Quando a pressão diminuía, até chegar a aproximadamente 40 mmHg, a corrente começava a fluir e surgia uma luminosidade que dependia do gás, da tensão e da pressão.

A partir desses estudos, em 1858, Julius Plücker, físico e matemático alemão, realizou vários experimentos para analisar os desvios dos raios catódicos. Ele descobriu que próximo ao catodo se formava uma luminescência esverdeada que variava com a posição do campo magnético.

No início da década de 1870, William Crookes, físico e químico britânico, desenvolveu tubos bem parecidos com o de Geissler. As diferenças consistiam no fato de que nos tubos de Crookes (Figura 2), eram colocadas ampolas de vidro com dois eletrodos, que permitia fazer o melhor vácuo possível; e a luminosidade não ficava entre o catodo e o anodo, e sim na parede do tubo oposta ao catodo.

Figura 2 - Tubo de Crookes



Fonte: Site A imagem comunica¹.

Após alguns anos, o físico Eugen Goldstein observou que a luminosidade era provocada por raios imperceptíveis a olho nu, que partiam do catodo e atravessavam em linha reta o tubo, nomeando-os de raios catódicos. Posteriormente, foram construídos catodos côncavos para produzir raios concentrados e dirigidos. E em 1878, Crookes concluiu que os raios catódicos possuíam cargas negativas e eram emitidos do catodo com velocidades altas. Dados que foram comprovados em 1879 por Joseph Jonh Thomson (Figura 3), responsável por demonstrar que as radiações desviadas aconteciam devido à ação de campos elétricos. Thomson, que a partir de então ficou conhecido como o pai do elétron, foi um grande físico britânico que, por não possuir muitas habilidades manuais, utilizou a sua capacidade matemática para solucionar questões da física teórica. Escreveu um artigo em 1981, precursor da teoria de Einstein; em 1897, descobriu as cargas elétricas negativas (elétron) e, por isso, recebeu o prêmio Nobel de Física em 1906.

Figura 3 - J. J. Thomson



Fonte: Wikimedia².

A descoberta de Thomson foi obtida por meio dos seus estudos sobre os raios catódicos. Na época havia duas hipóteses: a primeira defendia que os raios catódicos eram feitos de partículas eletrizadas, e a segunda afirmava que ambos eram distintos. Nos seus experimentos ele percebeu que podia alterar os raios com um ímã e com o campo elétrico, provando que os raios catódicos eram correntes de partículas que possuíam carga elétrica. Thomson dedicou os seus estudos a medir a massa relativa do elétron, encontrando o valor da massa de $1/2000$ de um átomo de hidrogênio e a velocidade de $256\ 000$ km/s.

Notamos, então, a importância dos raios catódicos para o desenvolvimento da teoria quântica, porque foi devido ao estudo destes raios que se descobriu o elétron e houve o desenvolvimento da teoria atômica e, assim, foi possível medir a massa e a carga elétrica do elétron, que é muito importante para a Física Moderna.

Antes de avançarmos, vamos formalizar o conceito dos raios catódicos:

“são elétrons que são arrancados do catodo por causa da diferença de potencial e são atraídos pelo anodo, possuem velocidade alta, ou seja, possuem energia cinética”.

Você deve estar se perguntando por qual motivo emitem uma luminosidade, a resposta é que os elétrons dos raios catódicos possuem uma energia cinética alta que é perdida no choque com o vidro. Assim, os elétrons do átomo do vidro são acelerados e, por consequência, as cargas elétricas aceleradas emitem ondas eletromagnéticas. No caso do vidro, os comprimentos de onda estão nos valores visíveis da luz.

Ondas eletromagnéticas e o efeito fotoelétrico.

As ondas eletromagnéticas foram comprovadas matematicamente por James Clerk Maxwell, físico e matemático escocês. Seus estudos foram estabelecidos pelos dois princípios do eletromagnetismo, descritos pelos trabalhos de Oersted, Ampère, Henry e Faraday:

1-Uma corrente elétrica num condutor produz linhas de força magnéticas que envolvem o condutor; e

2-Quando um condutor se move através de linhas de força magnéticas que se criaram por meios exteriores ao condutor, induz-se uma corrente no condutor.

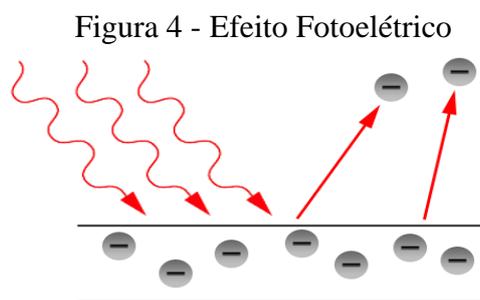
Maxwell começou o seu trabalho construindo uma formulação matemática para a Teoria de Faraday. Por de volta de 1860, ele desenvolveu uma teoria magnética do eletromagnetismo, em que os princípios se aplicavam aos campos magnéticos e elétricos existentes nos condutores, isoladores e até mesmo no espaço sem matéria. Maxwell construiu quatro equações que relacionavam o campo magnético com o campo elétrico, que passaram a ser a base do eletromagnetismo, essas fórmulas tinham potencialidades que permitiam abandonar o modelo mecânico. Além disso, trouxe uma ideia inovadora de que a variação do campo elétrico provoca o surgimento de um campo magnético, e que isso se aplica também ao espaço sem matéria, já que antes acreditava-se que apenas a corrente em um condutor gerava campo magnético.

James Clerk Maxwell também concluiu que a luz era uma onda eletromagnética e que elas poderiam existir com diferentes frequências, se propagando no vácuo com a velocidade da luz, cujo valor encontrado foi de 315.000.000 m/s. Contudo, somente em 1888, o físico alemão Heinrich Hertz conseguiu comprovar experimentalmente a existência das ondas eletromagnéticas e a teoria de Maxwell sobre a propagação da luz.

Antes de falarmos sobre a descoberta do efeito fotoelétrico, é curioso saber que, durante a sua juventude, Hertz se interessava pelo estudo das humanidades e línguas, e somente após seu avô lhe dar alguns aparelhos, começou a sua investigação pela ciência, sendo que muitas das suas experiências foram feitas em um laboratório simples na sua casa. O físico dedicou seus

estudos ao eletromagnetismo e após as suas experiências sobre as ondas eletromagnéticas descobriu o efeito fotoelétrico.

Hertz notou que uma descarga entre dois eletrodos ocorre mais facilmente quando é incidido sobre eles luz ultravioleta. Já Philipp Lenard, físico alemão, verificou experimentalmente que quando eram incididos raios ultravioletas numa superfície do catodo, isso fazia com que os elétrons fossem emitidos pelo catodo, facilitando assim a descarga. Essa emissão de elétrons de uma superfície quando expostos a uma radiação eletromagnética de frequência alta é chamada de efeito fotoelétrico, representado na Figura 4.



Fonte: Site Wikimedia³.

O efeito parece simples, mas intrigou muitos pesquisadores da época pela impossibilidade de explicar esse fenômeno a partir da mecânica clássica. Somente em 1905, Einstein explicou efetivamente o efeito fotoelétrico, o que lhe rendeu o Prêmio Nobel de Física de 1921. A teoria quântica de Einstein foi construída a partir da radiação do corpo negro de Planck. Essa descoberta do efeito fotoelétrico foi determinante para o estabelecimento da mecânica quântica.

Radiação térmica

A radiação térmica foi fundamental no desenvolvimento da teoria quântica, porque foi tentando descrevê-la teoricamente que Planck encontrou uma constante, posteriormente chamada de “constante de Planck”. Antes de falarmos de como a radiação propiciou a descoberta de Planck, vamos explicar o que é a radiação térmica.

Primeiro vamos nos questionar: o que fazemos quando estamos com frio? Provavelmente você já utilizou um cobertor. Mas você sabe o motivo disso? É o que iremos discutir agora:

Todos os corpos a certa temperatura emitem uma radiação eletromagnética. Isso porque a temperatura corresponde à agitação das moléculas que estão mudando constantemente de direção, ou seja, acelerando. Como moléculas são constituídas de cargas elétricas, as cargas elétricas também são aceleradas originando a radiação eletromagnética. Essa radiação emitida pelo corpo devido à temperatura é chamada radiação térmica.

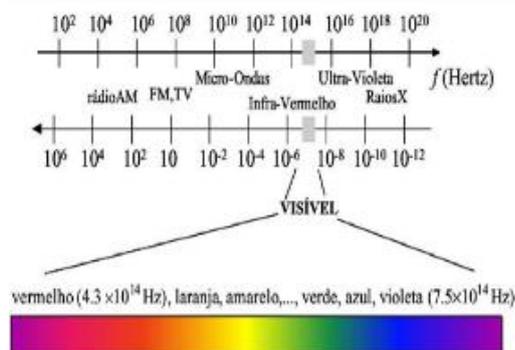
Os corpos emitem e absorvem essa radiação do meio que os cerca. Quando um corpo está mais quente que o meio ele irá esfriar, já que a sua taxa de emissão será maior que a de absorção. Quando o equilíbrio térmico é alcançado, as taxas de emissão e absorção serão iguais. Esse é o motivo pelo qual usamos o cobertor, dependendo do material, ele nos isolará do meio externo e entraremos em equilíbrio térmico com o novo meio, que é o cobertor, evitando a troca de calor com o meio externo.

O espectro de radiação do corpo independe da composição do material de que é feito, dependendo apenas da temperatura. A maior parte da radiação térmica, cerca de 90%, é feita na faixa do infravermelho e por isso é invisível a nós.

Você poderia então questionar: como nós vemos os objetos?

A resposta é que nós os enxergamos não pela luz que emitem, e sim pela luz que refletem, portanto, os corpos visíveis são muito quentes. Como exemplo, podemos citar o sol, que emite radiações térmicas tanto na faixa visível, quanto nas menores (infravermelho) e maiores (ultravioletas). Na Figura 5 é apresentado o espectro das ondas eletromagnéticas, conforme a frequência aumenta, o comprimento de onda diminui.

Figura 5 - Espectro das ondas eletromagnéticas



Fonte: Site InfoEnem⁴.

Quando a temperatura aumenta, o corpo emite mais radiação térmica. De maneira geral, o espectro de radiação térmica de corpos muito quentes depende de algum modo da matéria deles. Entretanto, há um tipo de corpo quente que emite um espectro universal, os chamados corpos negros. Esses corpos absorvem toda a radiação térmica incidida sobre ele, não refletindo a luz. Os corpos negros produzem radiação eletromagnética e quando aquecidos tornam-se excelentes emissores de radiação térmica.

Atividade – Debata com os colegas sobre a radiação térmica e depois escreva um texto sobre o que você entendeu sobre o assunto.

Radiação de Corpo Negro

Em 1853, o físico escocês William Ritch ao utilizar um termômetro diferencial, notou que existia uma taxa de proporcionalidade entre dois corpos radiantes quando chegavam ao equilíbrio térmico: a potência de emissividade e (quantidade de energia radiante emitida por unidade de tempo) e a absorção total a . Essa taxa é dada pela seguinte equação:

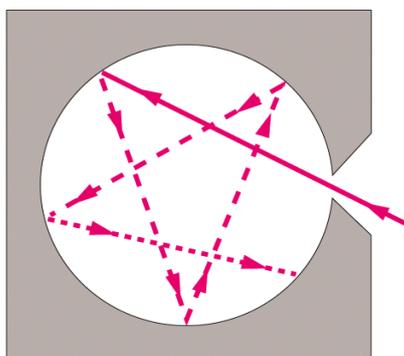
$$\frac{e_1}{a_1} = \frac{e_2}{a_2}$$

Como o corpo negro absorve toda a radiação térmica incidida sobre ele, temos que:

$$\frac{e_{CN}}{1} = \frac{e_2}{a_2}$$

Sendo assim, $e_{CN} > e_2$, o que mostra que um corpo negro possui uma potência emissiva maior em relação a outros corpos. Na prática, não existem corpos na natureza com essa característica, mas eles podem ser construídos. A forma mais comum é utilizando uma caixa vazia espelhada com um pequeno orifício, ilustrada na Figura 6. Incidindo uma radiação térmica pelo orifício, essa radiação será refletida pelos espelhos dentro da caixa até alcançar o equilíbrio térmico. Tendo em vista que o orifício é bem pequeno e dificilmente a radiação sairá por ele, toda a radiação será absorvida pela caixa.

Figura 6 - Radiação de corpo negro

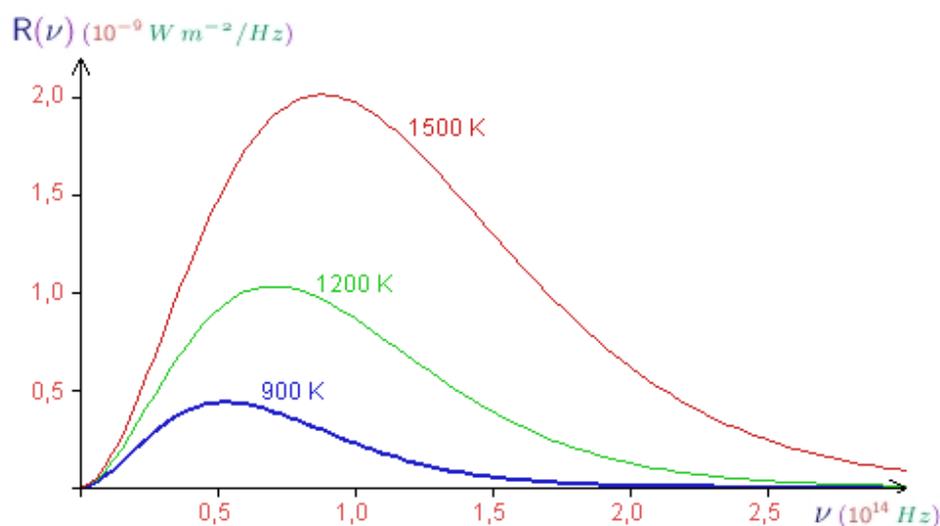


Fonte: Universidade do Porto, FE, Física Quântica 1⁵.

Se as paredes da caixa forem aquecidas uniformemente a certa temperatura, as paredes emitirão radiação térmica que preencherá a caixa, e a parte dessa radiação que for incidida pelo orifício irá atravessá-lo. Essa radiação emitida pelo buraco terá também o espectro de corpo negro. Como a radiação de um corpo negro depende somente da temperatura a que está submetido, então o comprimento de onda estará associado diretamente à temperatura; conforme a temperatura aumenta, a frequência aumenta e o comprimento de onda diminui.

Em temperatura ambiente, o corpo negro emite radiação infravermelha, mas ao ser aquecido a altas temperaturas, o comprimento de onda passa a ser visível, sendo a primeira cor a vermelho e a última a azul, e, em seguida, passa a emitir quantidades de ultravioletas. Corpos com pigmentação preta são exemplos de corpos quase negros, pois corpos perfeitamente negros não existem na natureza. Na Figura 7 é apresentado o gráfico de radiância espectral de corpo negro com base na temperatura em que está submetido.

Figura 7 - Radiância espectral do corpo negro



Fonte: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Radiação Térmica – Teoria de Planck⁶.

O primeiro a utilizar o termo “radiação do corpo negro”, em 1862, foi o físico alemão Gustav Robert Kirchhoff. Em 1845, ele havia formulado as leis das malhas e dos nós que permitiam calcular a tensão e as correntes corretamente em circuitos elétricos, conhecidas como Leis de Kirchhoff. Em 1859, ele apresentou um trabalho que mostrava que corpos com raios de mesmo comprimento de onda e mesma temperatura possuíam a mesma razão entre a potência emissiva e a absorvidade, provando a veracidade da equação de Ritchie. Posterior a esse trabalho, lançou um artigo com a noção de “um corpo perfeitamente negro”, provando que a potência de emissividade depende somente da temperatura e da frequência de radiação.

Em 1884, baseando-se na crença que perdurou até 1890, de que os fenômenos físicos poderiam ser explicados pela mecânica clássica, termodinâmica e eletrodinâmica clássica, Boltzmann deduziu uma equação que relacionava a dependência da radiação do corpo negro com a temperatura. Partindo da teoria de James Maxwell encontrou o valor para a pressão de radiação como $p = U/3$. Ele comprovou o que Stefan, físico e matemático austro-esloveno, tinha concluído em 1879, que a energia total irradiada U por um corpo negro é proporcional à temperatura T elevada a quarta potência. Deduzindo a seguinte equação:

$$U = \sigma T^4,$$

Em que σ é a constante de Stefan-Boltzmann.

Em 1893, o físico alemão Wilhelm Wien encontra uma segunda lei que também tenta relacionar a radiação do corpo negro com a temperatura, chamada lei de deslocamento. Essa função é a razão entre a frequência e a temperatura, partindo de que $\lambda T = cte$, em que λ é o comprimento de onda e T a temperatura. Em termos de comprimento de onda de radiação é possível escrevê-la como:

$$\rho(\lambda, T)\lambda^5 = cte \rightarrow \rho(\lambda, T) = \lambda^{-5}\varphi(\lambda T)$$

Contudo, essa função só conseguia ser obtida experimentalmente. Sendo assim, em 1896, Wien apresentou uma nova proposta, em que a distribuição de energia era similar às equações de Maxwell para a distribuição da velocidade de moléculas de gás, sendo $\varphi(\lambda T) = A \exp(-\frac{B}{\lambda T})$, com A e B positivos ou $f(\frac{v}{T}) = \alpha \exp(-\beta \frac{v}{T})$. Em 1899, foram realizados experimentos na faixa visível, e em 1900, na faixa do infravermelho, ambos mostraram que para grandes comprimentos de onda e altas temperaturas, a lei de Wien estava incorreta.

No mesmo ano, Lord Rayleigh (William Strutt), encontrou problemas na região ultravioleta do espectro. Para resolver o problema baseou-se na mecânica estatística clássica de Maxwell-Boltzmann, o princípio da equipartição da energia, $\bar{\mathcal{E}} = kT$, e encontrou uma equação bem diferente da de Wien. Em 1905, James Jeans contribuiu com um fator que Rayleigh tinha esquecido e a equação de Jeans-Rayleigh para a distribuição de energia em altas temperaturas foi dada como:

$$\rho(\lambda, T) = \frac{8\pi kT}{\lambda^4}$$

Só que essa função apresentava problemas para o limite de altas frequências, o que foi mostrado por Albert Einstein posteriormente, e ficou conhecido como “*Catástrofe ultravioleta*”. O que acabou colocando o princípio de equipartição em dúvida já que a equação foi derivada deste.

Radiação de Corpo Negro de Planck

Quem deu a largada inicial a teoria quântica foi Max Karl Ernst Ludwig Planck (Figura 8), um físico alemão. As suas grandes contribuições para a física foram feitas quando tinha aproximadamente 40 anos, uma idade avançada em relação a outros pesquisadores. No começo de sua carreira estudava principalmente a segunda lei da termodinâmica.

Figura 8 - Max Planck 1933



Fonte - Wikimedia⁷.

Em 1894, inspirado no trabalho de Wilhelm Wien, Planck se aproxima do problema do corpo negro com base em fundamentos da teoria eletromagnética e da termodinâmica. E em 1897, começa a sua descoberta quando busca a relação entre a radiação e a matéria da partícula ao atingir o equilíbrio térmico. Planck utilizou o teorema de Kirchhoff que fala da independência da matéria com a radiação eletromagnética e construiu um modelo de osciladores harmônicos para explicar a matéria. Nos anos seguintes ele se preocupou em encontrar a entalpia termodinâmica já que todos acreditavam que a lei de Wien estava correta.

Como foi descrito, somente em 1900 que comprovaram experimentalmente que a lei de Wien não respondia corretamente em baixas frequências e altas temperaturas. A lei dizia que o espectro deveria ser proporcional a temperatura, entretanto, mostrou-se independente da temperatura. Então, em 7 de outubro de 1900, Rubens informou os resultados dos experimentos a Planck. E naquele mesmo dia, Planck deduziu a sua fórmula de radiação.

Em 19 de outubro, Kurlbaum, parceiro de Rubens, apresentou na Academia Alemã de Física a falha da fórmula de Wien, e Planck apresentou sua fórmula para distribuição espectral da radiação do corpo negro. Uma equação empírica, que Planck construiu com base na fórmula de Wien e da equação de Rayleigh-Jeans:

$$\rho(\nu, T) = \frac{8\pi A}{c^3} \frac{\nu^3}{e^{B\nu/T} - 1}$$

Dois meses depois, 14 de dezembro de 1900, Planck apresentou a hipótese de quantização de energia, baseado na mecânica estatística de Boltzmann. Ele propôs que as energias sucessivas (ΔE) e a frequência (ν) fossem proporcionais, com o objetivo de satisfazer a lei de Wien. Planck notou que a energia total média (\bar{E}) podia ser descrita como $\bar{E} \approx kT$, quando as

diferenças sucessivas de energia ($\Delta\mathcal{E}$) fosse pequena, e $\bar{\mathcal{E}} \approx 0$ quando fosse grande. A forma dessa função é:

$$\Delta\mathcal{E} = h\nu$$

Sendo " h " a constante de proporcionalidade, chamada constante de Planck. O trabalho de Planck apresentado em 1900, mesmo iniciando uma revolução na física, só começou a ter reconhecimento em 1905 com o trabalho de Einstein e a sua hipótese dos fótons.

Um fato interessante é que foi Max Planck quem recebeu o primeiro artigo de Einstein falando sobre a relatividade, em 1905, ideia que ele defendeu na área acadêmica. Contudo demorou para aceitar a teoria quântica da radiação de Einstein, que concretizou posteriormente o seu próprio trabalho. Essa demora é devida ao seu conservadorismo físico, pois buscava enquadrar o seu conceito de quantum na física clássica.

Agora que vimos como aconteceu o desenvolvimento da teoria quântica antiga, percebemos como é construído um conceito físico, ou até mesmo uma teoria. A física é realizada por pessoas comuns, que a partir de inquietações físicas desenvolvem trabalhos que impactam a sociedade e a comunidade científica.

Referências Bibliográficas

- [1] Eisberg, R. *Física Quântica: Átomos, Moléculas, Sólidos, Núcleos e Partículas*, R. Eisberg, R. Resnick. Rio de Janeiro: Editora Campus (1994), 9ª Ed.
- [2] Polito, A.M.M.(2017) *Radiação de Corpo Negro e os Primórdios da Física Quântica*. Brasília: Physicae Organum, vol.3, n.2.
- [3] Studart, N. (2000). *A invenção do Conceito de Quantum de Energia segundo Planck*. São Paulo: Revista Brasileira do Ensino de Física, vol.22, n.4.
- [4] Medeiros, W.H. (2010). *Primórdios da Física Quântica: Radiação de Corpo Negro e Efeito Fotoelétrico*. Rondônia.
- [5] Raios Catódicos. Portal São Francisco. Disponível em: <<http://www.portalsaofrancisco.com.br/fisica/raios-catodicos>>.
- [6] Raios Catódicos. Mundo Vestibular. Disponível em: <<http://www.mundovestibular.com.br/articles/1203/1/raios-catodicos/Paacutegina1.html>>.

[7] Julius Plücker. UFCG. Disponível em:

<<http://www.dec.ufcg.edu.br/biografias/JuliusPl.html>>.

[8] Noções Sobre Condução de Eletricidade pelos Gases. USP. Disponível em:

<http://efisica.if.usp.br/moderna/conducao-gas/cap1_08/>.

[9] Biografia de Joseph John Thomson. Disponível em:

<https://www.ebiografia.com/joseph_john_thomson/>.

[10] Ondas Eletromagnéticas. Mundo Educação. Disponível em:

<<http://mundoeducacao.bol.uol.com.br/fisica/o-que-sao-ondas-eletromagneticas.htm>>.

[11] A História do Eletromagnetismo. Brasil Escola. Disponível em:

<<http://brasilecola.uol.com.br/fisica/a-historia-eletromagnetismo.htm>>.

[12] Leis de Radiação (Para Corpos Negros). UFPR. Disponível em:

<<http://fisica.ufpr.br/grimm/aposmeteo/cap2/cap2-5.html>>.

[13] Radiação térmica - Teoria de Planck. UFRGS. Disponível em:

<https://www.if.ufrgs.br/~betz/iq_XX_A/radTerm/aRadTermFrame.htm>.

Referência das Figuras

¹ A descoberta do raio X. A imagem comunica. Disponível em:

<<http://aimagemcomunica.blogspot.com.br/2011/04/>>.

² Biografia de Joseph John Thomson. Disponível em:

<https://www.ebiografia.com/joseph_john_thomson/>.

³ Photoelectric effect. Wikimedia Commons. Disponível em:

<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Photoelectric_effect.png>.

⁴ InfoEnem. Disponível em: <<https://www.infoenem.com.br/sabia-que-fisica-moderna-cai-e-muito-no-enem/>>.

⁵ Radiação de corpo negro. Universidade do Porto. Disponível em:

<<https://def.fe.up.pt/fisica3/quantica1/index.html>>.

⁶ Radiação térmica - Teoria de Planck. UFRGS. Disponível em:

<https://www.if.ufrgs.br/~betz/iq_XX_A/radTerm/aRadTermFrame.htm>.

⁷ Max Planck 1933. Wikimedia Commons. Disponível em:

<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Max_Planck_1933.jpg>.