

# Atividades experimentais no ensino de óptica: uma nova revisão

Experimental activities in optics teaching: a new revision

P.H.D. Ferreira<sup>\*1</sup>, F. Ghiglieno<sup>1</sup>, V. Tribuzi<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de São Carlos, 13565-905, São Carlos, SP, Brasil.

Recebido em 25 de março de 2024. Revisado em 07 de maio de 2024. Aceito em 10 de maio de 2024.

Este estudo oferece uma análise detalhada de publicações científicas sobre a implementação de práticas experimentais no ensino de óptica, cobrindo um intervalo temporal de 2011 a 2022. Foram avaliados com rigor artigos publicados em periódicos na área da educação em física, incluindo o Caderno Brasileiro de Ensino de Física, a Revista Brasileira de Ensino de Física e a Física na Escola. O propósito desta revisão é fornecer uma visão abrangente e atualizada sobre as pesquisas em experimentação óptica, estruturada em categorias temáticas: natureza da luz, reflexão, refração, difração, polarização, interferência e espalhamento. Os achados apontam para a importância crítica da experimentação como recurso pedagógico no aprendizado de óptica, realçando seu papel no aprofundamento do entendimento teórico e no fomento ao interesse estudantil pela matéria. Ademais, constatou-se que as práticas experimentais são cruciais no estímulo ao desenvolvimento de competências essenciais, tais como a capacidade de observação, o registro preciso de dados, a análise crítica e a interpretação de fenômenos. Nota-se, igualmente, uma tendência de crescimento tanto quantitativo quanto qualitativo nas publicações da área, refletindo um interesse crescente e a valorização da experimentação como estratégia didática no ensino de óptica. **Palavras-chave:** Óptica, experimentação, natureza da luz, reflexão, refração, difração, espalhamento, interferência, polarização.

This study provides a detailed analysis of scientific publications on the implementation of experimental practices in the teaching of optics, covering a time span from 2011 to 2022. Published articles from journals in the field of physics education were evaluated, including the Brazilian Journal of Physics Education, the Brazilian Notebook of Physics Teaching, and Physics in School. The purpose of this review is to offer a comprehensive and updated overview of research in optical experimentation, structured into thematic categories: the nature of light, reflection, refraction, diffraction, polarization, interference, and scattering. The findings highlight the critical importance of experimentation as a pedagogical resource in the learning of optics, emphasizing its role in deepening theoretical understanding and fostering student interest in the subject. Furthermore, it was observed that experimental practices are crucial in stimulating the development of essential skills, such as observation capacity, precise data recording, critical analysis, and interpretation of phenomena. A quantitative and qualitative growth trend in the publications of the field is also noted, reflecting an increasing interest and appreciation of experimentation as a didactic strategy in the teaching of optics.

**Keywords:** Optics, experimentation, nature of light, reflection, refraction, diffraction, scattering, interference, polarization.

## 1. Introdução

A educação em física, especialmente no campo da óptica, é essencial para cultivar uma sociedade crítica e informada. Contudo, desvendar os princípios desta disciplina representa um desafio significativo para os estudantes, persistindo as dificuldades em seu ensino ao longo dos anos. Entre as diversas estratégias propostas para facilitar o aprendizado em física, a experimentação laboratorial destaca-se como um método amplamente adotado. A integração de experimentos em sala de aula oferece um potencial considerável para fomentar a participação ativa dos alunos, estimulando sua curiosidade

e interesse, além de promover a criação de um ambiente de aprendizagem motivador. A experimentação abrange uma gama de abordagens, variando conforme o contexto educacional, desde a verificação de modelos teóricos até atividades demonstrativas, observação investigativa e experimentação direta.

Com os avanços tecnológicos, novas ferramentas e tecnologias têm revolucionado a execução de experimentos, elevando a qualidade e o alcance das práticas experimentais. Os experimentos virtuais, ganhando popularidade crescente, proporcionam aos estudantes acesso a experiências antes inalcançáveis em ambientes educacionais convencionais. O emprego de simulações e experimentos virtuais pode amplificar a compreensão dos conceitos físicos e enriquecer a experiência educacional dos alunos.

\*Endereço de correspondência: paulohdf@gmail.com

Neste panorama, a prática laboratorial em física emerge como uma tática pedagógica fundamental e irrefutável. Além de conferir aos estudantes uma perspectiva prática dos conceitos físicos, permite-lhes explorar o universo da física, fomentando o desenvolvimento de habilidades práticas e aprimorando suas capacidades analíticas e interpretativas. A óptica, em particular, tem recebido atenção destacada no âmbito da experimentação. Referências indicam que, após a mecânica, a óptica é o tema com o segundo maior volume de publicações sobre experimentação no período entre 1992 e 2001 [1], com um aumento significativo observado nas publicações sobre óptica entre 2002 e 2011 [2]. Nossa pesquisa atual, detalhada neste documento, evidencia um crescimento ainda mais expressivo.

A adoção de tecnologias avançadas, incluindo simulações e experimentos virtuais, tem facilitado a execução de experimentos mais complexos e abrangentes. Tais ferramentas permitem a simulação de fenômenos físicos que seriam desafiadores ou impossíveis de replicar em ambientes educacionais tradicionais.

Este trabalho expande as revisões anteriores sobre experimentação em óptica e fotônica, destacando a relevância dessas práticas no ensino de óptica, tanto em ambientes físicos quanto virtuais, para a formação de estudantes de física. As inovações tecnológicas e metodológicas em ensino contribuem significativamente para o aprimoramento da experiência educacional, incentivando um envolvimento mais ativo dos alunos na construção do conhecimento. Adicionalmente, oferecemos um panorama abrangente da pesquisa contemporânea em experimentação óptica e fotônica, fortalecendo a base da disciplina e impulsionando o progresso científico. Nosso intuito é prover uma referência sólida para pesquisadores na área de experimentação óptica, apresentando um resumo atualizado das investigações em curso. Almejamos que este estudo sirva de recurso para pesquisadores e educadores empenhados em refinamento do ensino experimental em física.

## 2. Metodologia da Revisão

A metodologia empregada neste estudo envolveu uma revisão bibliográfica rigorosa, focada em artigos provenientes de periódicos de renome e ampla circulação, acessíveis gratuitamente na internet. A seleção de artigos abrangeu o período de 2011 a 2022, estendendo-se assim às bases estabelecidas pelas referências fundamentais [1, 2]. Seguindo a abordagem metodológica de [2], os periódicos escolhidos para esta revisão incluíram o Caderno Brasileiro de Ensino de Física, a Revista Brasileira de Ensino de Física e Física na Escola. Esta escolha permitiu uma análise comparativa e continuada dos artigos publicados nestes veículos sobre experimentação em óptica, cobrindo um arco temporal de 1992 a 2022. É importante notar a interrupção da publicação de Física

na Escola entre 2013 e 2015, um fato que foi considerado na nossa análise temporal.

A óptica, dada sua natureza abrangente e interdisciplinar, engloba uma vasta gama de fenômenos relacionados à propagação, interação e manipulação da luz. Estes fenômenos se conectam profundamente com outras áreas da física, como eletromagnetismo, ondulatória, física quântica e relatividade, bem como com campos diversificados como engenharia e medicina. A revisão focou em artigos que abordassem aspectos fundamentais da natureza da luz, incluindo tópicos como formação de sombras, eclipses, cores, o caráter corpuscular da luz (fótons), e fenômenos como reflexão, refração, difração, interferência, polarização e espalhamento. Procuramos também por trabalhos que explorassem aplicações práticas da óptica em áreas como telecomunicações, óptica biomédica e processamento de imagens.

Durante a categorização dos artigos, enfrentamos desafios similares aos observados em [2], como a dificuldade de classificação em alguns casos. Por exemplo, no artigo [3], os autores propõem uma sequência didática para a construção e execução de experimentos demonstrativos, visando auxiliar o professor nas práticas pedagógicas e tornar o ensino de óptica física mais significativo. Com esta abordagem, baseada no uso planejado de materiais simples e de baixo custo, os autores foram capazes de reproduzir efeitos ópticos, tais como difração, dispersão da luz e interferência. Na análise desses casos, optamos por classificar o artigo de acordo com sua finalidade principal. Desta forma, o referido artigo foi categorizado como pertencente ao tema “interferência”. Em contraste, os autores de [4] destacam atividades experimentais quantitativas e qualitativas fundamentadas em materiais de baixo custo e fácil acesso, com o objetivo de estruturar um laboratório para a disciplina de laboratório de óptica, baseada em experimentos realizados pelos estudantes em seus domicílios. Essas atividades englobam diversas experiências com características distintas e relacionadas aos aspectos gerais da luz, sendo classificadas como “natureza da luz”. Este método de revisão bibliográfica permitiu não apenas a continuidade do mapeamento da experimentação em óptica, mas também a identificação de tendências e lacunas no corpo de conhecimento existente, estabelecendo um fundamento robusto para futuras investigações na área.

Nesta fase da revisão bibliográfica, ampliamos nosso escopo para incluir artigos que discutem o uso de experimentos virtuais e de simulação como ferramentas didáticas no ensino da óptica, referenciados como [5, 6]. Observou-se que esses métodos de apresentação de experimentos se mostraram extremamente valiosos, particularmente em contexto de pandemia e ensino remoto, onde as oportunidades para a realização de experimentos presenciais foram limitadas. Esta abordagem adaptativa demonstra a flexibilidade e a resiliência do ensino de óptica frente a desafios educacionais contemporâneos.

Adicionalmente, notamos que alguns dos artigos analisados não se centravam exclusivamente no uso de atividades experimentais como recurso didático. Contudo, propunham explicações e contextos práticos que podem ser diretamente aplicados ao ambiente escolar por meio de experimentos didáticos. Decidimos incluir tais artigos na revisão, entendendo que seu conteúdo possui um potencial significativo para enriquecer a prática pedagógica de docentes e a aprendizagem de estudantes interessados na exploração prática da óptica.

Finalmente, neste artigo de revisão foi utilizada a estratégia PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*), uma metodologia reconhecida por promover a transparência e a qualidade no relato de revisões sistemáticas e meta-análises [7]. O uso do PRISMA visa garantir a relevância e precisão dos dados analisados, estabelecendo critérios claros de inclusão e exclusão. Com isso, os artigos elegíveis para inclusão são apenas estudos experimentais que explorassem práticas experimentais no ensino de óptica, incluindo experimentos realizados fisicamente, bem como aqueles conduzidos mentalmente ou por meio de softwares online. Aceitamos artigos publicados nos periódicos científicos brasileiros mencionados na introdução, em quaisquer idiomas, cobrindo o período de 2011 a 2022. Foram excluídos da análise quaisquer artigos que se caracterizassem como revisões de literatura, editoriais, comentários ou que não fossem estritamente experimentais. Além disso, foram desconsiderados artigos que não estivessem diretamente relacionados ao ensino de óptica ou que não estivessem formalmente publicados até a data de nossa pesquisa.

As fontes de dados para esta revisão foram selecionadas exclusivamente das páginas web dos periódicos Caderno Brasileiro de Ensino de Física, Revista Brasileira de Ensino de Física, e Física na Escola, para manter a consistência com as bases usadas em revisões anteriores, enquanto a estratégia de busca envolveu o uso de palavras-chave específicas como 'óptica', 'luz', 'cor', 'comprimento de onda', 'espalhamento', 'interferência', entre outras, com uma análise minuciosa de cada artigo em periódicos selecionados para assegurar a relevância ao tema. O processo de seleção foi realizado manualmente, sem o auxílio de ferramentas de automação, através da busca nos sites dos periódicos e avaliação individual de títulos e resumos, e a coleta de dados foi conduzida por um único autor, responsável por extrair todas as informações pertinentes dos estudos selecionados. A fim de ter uma abordagem clara e unívoca, o mesmo autor foi responsável por toda a categorização dos artigos.

Na sequência deste artigo, os temas de revisão serão explorados de acordo com sua classificação. Posteriormente, será apresentada a análise dos dados quantitativos coletados. Concluindo, com base nesses dados, discutiremos as principais conclusões e delinearemos as perspectivas futuras para pesquisas subsequentes.

## 3. Temas da Revisão

### 3.1. Natureza da luz

A luz é uma forma de energia eletromagnética que se propaga através do vácuo e de meios materiais com diferentes velocidades. De acordo com a teoria ondulatória, a luz é descrita como uma onda eletromagnética que se propaga em direção perpendicular ao campo elétrico e magnético oscilantes. Já a teoria corpuscular descreve a luz como partículas chamadas de fótons, que possuem energia e momento. A natureza da luz tem sido objeto de estudo e discussão por muitos séculos, e sua compreensão é fundamental para o desenvolvimento da ciência e tecnologia. No entanto, muitos estudantes enfrentam dificuldades em entender conceitos básicos e elementares sobre a luz, principalmente devido ao seu comportamento dual quando interage com a matéria. Historicamente, evidencia-se que uma estratégia eficaz para mitigar essas barreiras de compreensão envolve a implementação de experimentos ópticos educativos. Tais atividades experimentais permitem aos estudantes a visualização e entendimento dos fenômenos de maneira mais palpável e intuitiva. Ademais, a prática experimental em óptica enriquece o processo de ensino, conferindo-lhe uma dimensão lúdica e engajadora, potencializando a motivação estudantil e o fascínio pela ciência. Esses experimentos são versáteis, podendo ser ajustados para atender distintos níveis educacionais e objetivos pedagógicos específicos.

Nos segmentos iniciais de obras dedicadas à óptica, a explanação acerca do conceito de cor se apresenta como um tópico recorrente. No contexto contemporâneo, caracterizado pela acessibilidade econômica a LEDs que abrangem uma ampla gama de comprimentos de onda (incluindo tanto o espectro visível quanto o infravermelho), torna-se viável a execução de experimentos que exploram a combinação de cores de maneira tanto tradicional quanto inovadora. Esta abordagem permite uma experiência educativa rica, incentivando a compreensão e aplicação prática dos conceitos de cor através de métodos experimentais diversificados, conforme ilustrado nas referências [8–12].

Por ter um aspecto interdisciplinar, os autores de [13] exploraram a influência da cor no processo de fotossíntese, onde observaram que as plantas expostas à iluminação nas faixas de luz azul e vermelha apresentaram um desenvolvimento mais acelerado e atingiram maior comprimento em comparação às plantas iluminadas por outras cores do espectro. Esse simples e cativante experimento evidencia que a abordagem interdisciplinar se apresenta como uma possibilidade viável, instigante e estimulante. Ainda sobre cores do espectro eletromagnético, os autores de [14] demonstraram com LEDs e uma esfera integradora artesanal como realizar uma calibração radiométrica e fotométrica, auxiliando o aluno a compreender, de uma forma bastante simples, o processo de composição de cores. Pode-se também explorar o

espectro invisível [15], com técnicas de imageamento no infravermelho, que possibilitam ver no escuro e medir as temperaturas de um corpo ou de um ambiente. Uma câmera digital foi utilizada para determinar cores de estrelas em [16], e em [17] os autores utilizaram ilusões de óptica para propor experimentos que expliquem formação de cores na visão. Finalmente, na era da inclusão, é importante experimentos físicos que possam auxiliar pessoas com deficiência a entender melhor os conceitos físicos. Assim, [18] realizaram dois experimentos para apresentar as relações entre frequências invisíveis e inaudíveis. Com o uso da plataforma Arduino, uma ferramenta que será cada vez mais utilizada em ambientes em sala de aula devido ao custo baixo e capacidade, os autores conseguiram converter essas frequências em sinais que possam ser percebidos pelos sentidos humanos. Com essa abordagem, buscou-se tornar acessível ao aluno o mundo invisível, permitindo que estudantes com deficiência visual ou auditiva também possam participar das atividades experimentais em sala de aula. Os autores de [19] também exploraram painéis tátil-visuais com estruturas autossuficientes, ou seja, de forma que o próprio painel incluísse uma mesa com a descrição em braile e que fosse estável o suficiente para que as pessoas pudessem tocá-lo. Diversos experimentos ópticos foram detalhados e explicados através destes painéis, tais como ondas eletromagnéticas, efeito fotoelétrico, como a visão é formada, dentre outros, cujo propósito era explorar conceitos de óptica de uma forma que tanto pessoas com deficiência visual quanto videntes pudessem aprender de uma forma lúdica.

A premissa de que a luz se propaga em linha reta é fundamental para elucidar os fenômenos de sombra e penumbra, conforme detalhado nas referências [20–22]. Essa noção é igualmente crucial na elaboração e solução de exercícios didáticos que abordam essa temática [23]. Propõe-se a realização de experimentos, tanto reais [24, 25] quanto hipotéticos [26], com o intuito de debater sobre a velocidade da luz e proceder ao seu cálculo. Vários autores [27–31] adotam uma abordagem prática, empregando uma variedade de instrumentos ópticos – incluindo espelhos esféricos e telescópios, além de simulações – para demonstrar aos estudantes o processo de formação de imagens. Essa metodologia não apenas facilita a compreensão dos princípios físicos subjacentes, mas também estimula o interesse e a curiosidade dos alunos acerca dos conceitos ópticos.

Aspectos mais simples de óptica geométrica, onde a luz é tratada como raios, foram colocados nesta seção, porque ela é a base para a compreensão dos fenômenos ópticos mais complexos. Para tornar acessível diversos experimentos, os autores de [4, 32–35] propuseram a construção de um banco óptico e um iluminador de LEDs de baixo custo, onde todos utilizaram como base materiais de baixo custo e fácil manuseio. Tais propostas viabilizam a realização de uma gama ampla de experimentos. Por outro lado, os autores de [36, 37]

mergulham no universo dos hologramas, usualmente utilizado para atrair a atenção das pessoas por ser capaz de demonstrar a formação de imagens tridimensionais de objetos no ar, através de experimentos alternativos de baixo custo em comparação aos disponíveis comercialmente, onde ainda explicam aspectos fundamentais de óptica geométrica. A criação de câmeras escuras, explorada em [38, 39], aprofunda a discussão sobre o emprego da luz na formação de imagens, seu uso histórico e contemporâneo, além de abordar aspectos ópticos e geométricos relevantes à sua construção. Adicionalmente, os trabalhos em [40, 41] destacam o uso de tecnologias digitais da informação e comunicação (TDICs) como recursos didáticos valiosos para o ensino de física, potencializando o engajamento dos alunos por meio de materiais tecnológicos. Ferramentas como o simulador *PhET – Simulações Interativas*, o software *GeoGebra* e o *Lab Óptica – Laboratório de Simulações de Óptica* foram aplicadas para enriquecer o aprendizado em óptica geométrica. Experimentos virtuais acerca de um elevador panorâmico para observação do pôr do sol [6], a construção e utilização de uma esfera celeste [42], bem como a realização de experimentos com ilusões ópticas em sala de aula [43] e estratégias de ensino integradas a práticas experimentais em óptica [44], recorrem aos conceitos da óptica geométrica para explicar os fenômenos envolvidos. Finalmente, os autores de [45] exploraram no artigo diferentes formas de aplicações de matrizes de transformações ópticas, ou matrizes ABCD, junto com simulações ópticas, utilizando o software freeware OSLO EDU, para utilização como ferramentas no ensino de óptica geométrica. A proposta dos autores visa fornecer ao professor alternativas para abordagem do ensino de óptica geométrica, de modo a tornar sua didática mais eficiente e aprimorar a aprendizagem dos alunos em sala de aula ou laboratórios de óptica. Além disso, a exploração de novas abordagens no estudo da óptica geométrica possibilitará a introdução de aplicações práticas e o uso de softwares de simulação óptica em ambiente escolar.

Com o avanço tecnológico e a disseminação de dispositivos eletrônicos economicamente viáveis, como o resistor dependente de luz (LDR) [46–50], transistores semicondutores funcionando como fotodiodos ou fotocélulas [51–55], além de smartphones equipados com luxímetros [56], a prática de medir a intensidade óptica transformou-se numa abordagem prática e implementável em contextos educacionais. Em tempos anteriores, aferir a intensidade luminosa exigia o emprego de aparatos caros e complexos, restringindo sua aplicabilidade em atividades pedagógicas. Contudo, com a introdução de tais dispositivos, tornou-se factível mensurar a intensidade óptica de forma descomplicada e acessível, inaugurando novos horizontes para experimentação e ensino em campos como a óptica. Este progresso na acessibilidade de ferramentas de medição luminosa representa um marco significativo para o avanço da educação científica, promovendo uma

maior interação prática e exploratória entre os estudantes e os conceitos fundamentais da óptica.

Assim, torna-se evidente que os avanços tecnológicos da última década têm sido cruciais para a transformação do ensino de Física. Concomitantemente ao barateamento dos dispositivos de medição luminosa mencionados anteriormente, observou-se um progresso significativo na tecnologia de emissão de luz. Esse desenvolvimento tem viabilizado a abordagem de conceitos relacionados ao aspecto corpuscular da luz em ambientes educacionais. Em particular, o uso de diodos emissores de luz (LEDs) [57–59], apontadores laser [60] e luz ultravioleta (“luz negra”) [61, 62] tem facilitado a execução de experimentos sobre fenômenos como o efeito fotoelétrico e a fluorescência, bem como a discussão acerca da natureza corpuscular da luz (fótons), anteriormente limitados a contextos de pesquisa avançada, de forma acessível e econômica. A simulação [63] também emergiu como uma ferramenta valiosa, introduzindo o ensino do efeito fotoelétrico de maneira inovadora. Esta riqueza de recursos tecnológicos tem simplificado a compreensão dos conceitos fundamentais da óptica pelos estudantes, enriquecendo o ensino com práticas mais dinâmicas e interativas.

A exploração da natureza da luz tem sido uma área fértil para aplicações experimentais em contextos educacionais, abrangendo uma diversidade de temas e técnicas. As experiências destacadas incluem: sistema automático de baixo custo para medidas de intervalos de tempo [64]; armadilhas ópticas de dipolo [65]; determinação da constante de Planck com LEDs [66, 67]; processos de desinfecção de superfícies com radiação ultravioleta [68]; radiômetro de Crookes [69]; análise de vídeo com câmera trêmula [70]; medida de temperatura [71]; planetários [72]; sensor de presença [73]; espectroscopia com simulações interativas [5]; “efeito estufa” via absorção de radiação infravermelha [74]; observação das fases da lua [75] e maquete fosforescente de constelações [76]. Essas atividades, ao abordarem variados conceitos e propriedades da luz, proporcionam aos estudantes a chance de aprofundar seu entendimento da física de maneira prática e engajante, estimulando a aprendizagem através do experimento e do lúdico.

### 3.2. Reflexão

A reflexão da luz constitui um fenômeno óptico fundamental, caracterizado pelo retorno da luz ao meio de origem após incidir sobre uma superfície, mantendo os ângulos de incidência e reflexão idênticos. Este processo é predominantemente observado em superfícies polidas, como espelhos metálicos ou vidros, e desempenha um papel crucial na formação de imagens, encontrando aplicabilidade em uma vasta gama de sistemas ópticos, incluindo telescópios. Em livros didáticos, o tema da reflexão é frequentemente abordado no contexto de espelhos planos e esféricos, sendo a compreensão desse

fenômeno imprescindível para o entendimento aprofundado da óptica e do princípio de operação de diversos dispositivos. Os estudos revisados focam na implementação de estratégias práticas e econômicas para a execução de experimentos que visam enriquecer o ensino e a compreensão dos estudantes acerca da formação de imagens e outros fenômenos correlatos. Essas abordagens experimentais propostas visam não apenas a facilitar o entendimento dos princípios subjacentes à reflexão da luz, mas também a estimular uma perspectiva holística no aprendizado de óptica, encorajando os estudantes a explorarem conceitos ópticos de maneira crítica e aplicada.

No estudo da reflexão da luz, o tópico mais abordado são aspectos da formação de imagens devido a sistemas que envolvem superfícies lisas, sejam elas planas ou com curvatura esférica. É observado que, tradicionalmente, nos livros didáticos de física, usamos o conceito de aumento linear transversal (AL) para fazer a comparação entre o tamanho do objeto e a imagem produzida por espelhos e lentes esféricas. Contudo, conforme indicado pelos autores em [77], essa abordagem pode induzir a interpretações distorcidas, propondo, assim, a adoção do aumento angular (AA) para uma análise mais precisa e fiel das imagens projetadas.

Para complementar a teoria, várias iniciativas têm sido propostas, visando facilitar a execução de experimentos educativos. O trabalho de [78] se destaca ao oferecer uma solução prática e de baixo custo para a montagem de conjuntos didáticos voltados ao estudo de espelhos esféricos, promovendo uma abordagem teórico-experimental acessível no ensino de física. Seguindo essa linha, os autores de [79] sugerem estratégias pedagógicas baseadas em atividades experimentais simples, mas profundamente lúdicas, para explorar a formação de imagens em espelhos, incentivando a participação ativa dos alunos no processo de aprendizagem.

De forma inovadora, o trabalho apresentado em [80] integra conceitos de física e matemática através de uma atividade prática que envolve a construção de espelhos parabólicos, tornando o estudo de funções quadráticas mais relevante e interessante para alunos do ensino médio. Este enfoque interdisciplinar não apenas solidifica o conhecimento teórico, mas também estimula o desenvolvimento de habilidades práticas essenciais.

No âmbito do ensino superior, os autores de [81] abordam um experimento didático que mergulha em conceitos e leis óticas fundamentais, como o ângulo de Brewster, as equações de Fresnel e a polarização, aplicando-os em uma atividade de modelagem científica adaptada a laboratórios de graduação. Inspirado por um caso prático – o desaparecimento de um objeto em águas claras de um lago – esse experimento propõe uma experiência rica em aprendizado e aplicação teórica. Além disso, [82] realiza um estudo sobre a familiaridade de estudantes de engenharia com instrumentos ópticos essenciais, como microscópios e telescópios, visando

identificar e preencher lacunas no conhecimento técnico desses futuros profissionais.

Incorporando a física no cotidiano, buscando uma conexão do ensino com observações do dia a dia, a série de artigos iniciada por [83] explora a interação entre espelhos planos através de experimentos simplificados, permitindo a observação de fenômenos ópticos complexos de forma acessível, em particular permitindo a observação de imagem ciclópica. Este esforço é seguido por [84], que estabelece um diálogo interdisciplinar entre física e arquitetura, utilizando os edifícios da Procuradoria Geral da República (PGR) em Brasília como um estudo de caso para atividades experimentais que examinam a reflexão e aberrações ópticas. Para tal, lança mão de um modelo experimental em escala reduzida dos prédios, apresentando sugestões de atividades experimentais, com destaque para a análise da formação da imagem de um prédio no outro. Inspirado por este trabalho, [85] propõe uma atividade prática utilizando imagens do Google Maps para analisar fenômenos ópticos em edificações reais (edifícios cilíndricos da PGR), aproximando ainda mais o ensino da física da experiência vivencial dos estudantes.

### 3.3. Refração

A refração representa um fenômeno óptico fascinante, caracterizado pela alteração de direção e velocidade da luz ao transitar entre meios com índices de refração distintos. Este processo resulta em uma modificação no ângulo de incidência da luz, fenômeno este descrito, de forma geral, pela lei de Snell. Esta lei estabelece uma relação direta entre os ângulos de incidência e refração e os respectivos índices de refração dos meios por onde a luz passa. Em livros didáticos, a exploração deste tema abrange desde o estudo da refração em si até a análise de lentes esféricas delgadas e o funcionamento de instrumentos ópticos. No contexto experimental, muitos estudos têm sido conduzidos com o objetivo de superar as limitações apresentadas pelos livros didáticos. Além de demonstrar a aplicabilidade do fenômeno, alguns desses trabalhos se dedicam a identificar e expor deficiências no método de ensino da refração. Essa abordagem crítica e construtiva visa enriquecer o processo educativo, proporcionando aos alunos uma compreensão mais profunda e abrangente sobre a refração, não apenas em termos teóricos, mas também através de uma vivência prática e investigativa do fenômeno.

Os tópicos sobre a refração cobrem um leque variado de estudos e aplicações práticas. Tradicionalmente, a analogia entre o olho humano e uma máquina fotográfica tem sido um recurso didático recorrente entre professores e em materiais educativos. Contudo, nas duas últimas décadas, a disseminação de câmeras digitais e *webcams* de baixo custo tem impulsionado uma produção acadêmica focada em sua utilização no contexto educacional. Essa tendência tem facilitado a exploração dos princípios

de refração em lentes de forma mais eficaz nas salas de aula.

Em particular, estudos como os de [86, 87] abordam a óptica do olho humano através de modelos didáticos que elucidam o comportamento da luz desde sua entrada até a formação de imagens nítidas na retina. Outras pesquisas [88–90] se concentram em demonstrar a Lei de Snell-Descartes, ou lei da refração, por meio de experimentos que clarificam esse princípio de maneira precisa. Destaca-se o trabalho de [88], que propõe a construção de lentes esféricas a partir de gelatina, permitindo medir seu índice de refração. Essa metodologia estimula os estudantes a fabricarem suas próprias lentes e experimentarem com formatos variados, promovendo uma participação ativa no processo educativo. Além disso, [89] ressalta a importância de considerar a curvatura do recipiente ao explicar o fenômeno das imagens “quebradas” e “separadas” de objetos submersos em água, observadas lateralmente. Essa abordagem destaca a necessidade de uma compreensão aprofundada e contextualizada dos fenômenos de refração, encorajando uma visão crítica e investigativa por parte dos alunos.

Experimentos muito explorados em livros didáticos também são revisitados. A ocorrência do desvio mínimo de um raio de luz que sofre refração em faces adjacentes de um prisma triangular [91] e o fenômeno da reflexão total interna [92] são apresentados através de demonstrações matemáticas e com experimentos simples para estudantes de ensino médio, mas que também podem ser explorados em graduações de física e engenharia. O padrão de refração da luz branca após a refração por um prisma foi revisitado através da proposta de um novo modelo construído com plástico transparente [93]. No âmbito de visualização de objetos, microscópios sempre foram fundamentais na ciência. A explicação básica de seu funcionamento é rasamente vista em livros didáticos. Nos artigos [94–96], os autores foram capazes de construir versões alternativas de microscópios, com o intuito de explorar os aspectos do funcionamento do microscópio, bem como apresentar algumas ideias pedagógicas que possam ajudar na compreensão dos conceitos científicos associados a essa tecnologia. Em [94], a montagem proposta consiste em uma lente esférica e um suporte de papelão, tornando o microscópio portátil e de fácil manuseio. Já em [95], houve a transformação de uma webcam em microscópio enquanto [96] utilizou uma gota de água que funciona ao mesmo tempo como lente e como portadora dos espécimes a serem observados. A ideia central nos artigos sempre foi norteadada com foco na utilização dessa tecnologia pode contribuir para o desenvolvimento de competências como criatividade e pensamento inventivo, através da exploração das diversas possibilidades de abordagens que podem ser feitas com o experimento.

Outros aspectos que exploram o fenômeno de refração da luz foram apresentados com diferentes experimentos. O artigo de [97] apresenta um estudo sobre o supracitado fenômeno, com base no método de Ptolomeu, que

descreve como objetos observados através de materiais transparentes têm suas imagens deslocadas de sua posição original. No artigo [98], os autores descrevem a construção de um dispositivo didático simples e de baixo custo para detectar gotas de água (chuva) através da reflexão total interna da luz. Através de uma atividade experimental simples e de baixo custo, os autores de [99] apresentam um método para encontrar o índice de refração da água utilizando a imagem de uma piscina e uma régua comum, enquanto [100] descreve duas atividades experimentais, inspirado em questões de vestibular, envolvendo associações de espelhos e lentes, comparando seus resultados com os exercícios didáticos que lhes deram origem. Por sua vez, o artigo [101] descreve a elaboração de um equipamento automatizado de óptica geométrica, criado para o Museu de Ciência e Tecnologia de Londrina (MCTL), com o objetivo de auxiliar na divulgação e ensino de conceitos de óptica para o público em geral. O equipamento apresenta demonstrações de convergência e divergência de raios de luz por lentes e espelhos.

Baseado no contexto do ensino remoto que se deu devido à pandemia de COVID-19, os autores de [102] descrevem a criação de experimentos portáteis de física, que podem ser utilizados tanto em aulas presenciais quanto remotas. Esses experimentos foram criados com base na metodologia ISLE e foram desenvolvidos para ajudar os professores de ciências e matemática a ensinar essas disciplinas de forma mais eficaz durante a pandemia. Os experimentos foram montados em uma placa magnética e incluem componentes ópticos, como lentes, espelhos e prismas, que podem ser facilmente manuseados pelos alunos. Por fim, em [103], os autores discutem a falta de ensino de assuntos atuais na óptica em cursos de graduação de Física e propõem um experimento de baixo custo para evidenciar que a luz pode modificar as propriedades ópticas de um meio. O experimento consiste em gerar uma lente térmica no material por efeito da absorção óptica, seguida de um processo de relaxação não radiativa, utilizando molho shoyu como amostra. Através de um laser de HeNe, é possível observar a formação da lente térmica no molho shoyu, enquanto na água pura, devido à absorção desprezível no comprimento de onda do laser, a lente térmica não é formada. O efeito de lente é medido a partir da observação da mudança no diâmetro do feixe depois da amostra em função do deslocamento da amostra em relação a um anteparo. O experimento é simples e pode ser realizado com equipamentos encontrados em laboratórios didáticos universitários.

Essas iniciativas experimentais refletem um movimento em direção a uma pedagogia mais interativa e engajada, onde a teoria da refração é não apenas estudada, mas vivenciada pelos alunos por meio de experimentos tangíveis e relacionados ao cotidiano. Ao integrar tecnologias acessíveis e práticas experimentais inovadoras, os educadores estão ampliando as fronteiras

do ensino de física, tornando-o mais relevante, compreensível e estimulante para os estudantes.

### 3.4. Difração

A difração é o fenômeno que permite que ondas possam contornar obstáculos ou passar por aberturas. Esse feito é mais pronunciado quando a fenda ou abertura é da ordem de grandeza do comprimento da onda incidente. Na óptica, a difração é essencial para entender o comportamento da luz ao interagir a matéria e tem aplicações em diversas áreas. Entre elas destaca-se a espectroscopia, onde uma rede de difração geralmente é usada como dispositivo que irá separar os diferentes comprimentos de onda. A espectroscopia permite a análise de materiais e é usada em áreas diversas como química e astronomia. Além disso, por ser um fenômeno ondulatório geral, seus efeitos são relevantes também na acústica e em mecânica quântica.

Parte significativa dos trabalhos analisados faz uso de CDs e DVDs para a realização de experimentos onde se pode observar o espectro luminoso de algum tipo de fonte ou emissão.

No trabalho [104], os autores propõem uma abordagem deste tipo para o ensino de Astronomia em sala de aula por meio da construção de um espectrômetro simples e de baixo custo pelos estudantes. A proposta destaca a importância didática e pedagógica do espectrômetro para tratar uma ampla gama de temas interdisciplinares. Já em [105] apresenta a construção de uma máscara espectrográfica adaptável à objetiva de uma câmera. Utilizando um software livre, os autores realizaram a calibração em comprimento de onda para o espectro solar, permitindo a identificação de vários elementos químicos. O artigo também sugere projetos interessantes para estudantes, como o registro fotográfico do engrossamento das linhas do oxigênio no espectro solar durante o crepúsculo.

Por sua vez, os autores de [106] oferecem a descrição detalhada de uma construção de espectrômetro um pouco diferente, facilitando a posterior calibração e medição de espectros. O objetivo principal é fornecer aos estudantes uma ferramenta prática para explorar espectros de emissão e absorção de diversas fontes de luz. E novamente os autores destacam o valor didático do espectrômetro que reside na vasta gama de experimentos que podem ser realizados.

Em [107] usam o mesmo tipo de material para transformar um smartphone em um espectrômetro caseiro. A demonstração principal é feita pela observação do espectro de emissão de uma lâmpada fluorescente compacta e as linhas de Fraunhofer do Sol. Apesar de ser um experimento potencialmente complexo para o ensino médio, é uma prática introdutória valiosa para estudantes universitários, envolvendo técnicas como ajuste de reta por mínimos quadrados e processamento de imagens digitais. Os autores também mencionam a

possibilidade de substituição do CD por um DVD para melhorar a resolução espectral.

Ainda no contexto do uso de CDs e DVDs, o trabalho [108] discute a construção e calibração de um espectroscópio quantitativo como ferramenta para explorar modelos quânticos em contextos mais amplos do que aqueles tipicamente abordados no ensino médio. O artigo enfatiza o uso do espectroscópio para investigar espectros de luz emitidos por diferentes fontes, como lasers e LEDs.

Uma alternativa aos CDs e DVDs é trazida em [109], que descreve como obter filmes polarizadores e redes de difração a partir de telas de LCD descartadas. A estratégia apresentada oferece uma solução econômica para obter estes recursos e superar as barreiras de custo associadas à realização de experimentos ópticos avançados.

O trabalho [110] traz uma proposta de ensino que usa o Google Earth para despertar o interesse dos alunos e facilitar a visualização de fenômenos como a difração e interferência de ondas. Essa abordagem estimulou os estudantes a explorarem o tema e a reconhecer as diferenças entre as concepções sobre a natureza da luz.

Um conjunto interessante de artigos faz uso de montagem com a plataforma Arduino. Em [111], há a descrição de uma abordagem metodológica alternativa e de baixo custo para realizar o experimento de difração automatizado com Arduino, visando superar os desafios relacionados às medidas entre as franjas de difração, que frequentemente são suscetíveis à subjetividade e experiência do observador humano. Ao utilizar essa metodologia, foi possível calcular a espessura de um fio de cabelo com um erro estimado de 3% e visualizar graficamente a distribuição de intensidade luminosa ao longo do espectro de difração.

Os autores de [112] mostram a construção e aplicação de um luxímetro utilizando um fotodetector/conversor luz em frequência (LTF) e a plataforma Arduino. O luxímetro construído foi testado em experimentos didáticos, incluindo a difração da luz, a Lei de Malus e a Lei Fotométrica da Distância, demonstrando sua adequação para substituir equipamentos comerciais mais caros. Já no trabalho [113], os autores propõem o uso da plataforma Arduino e a linguagem de programação “em blocos” *Scratch for Arduino*, para análise quantitativa de espectros. Além disso, o estudo apresentado faz uso do software *Tracker* para determinação dos comprimentos de onda. Destaca-se a rápida montagem do experimento com materiais simples e de fácil aquisição, dispensando soldas ou placas de circuito impresso, tornando-o viável mesmo em salas de aula comuns.

Outra montagem experimental, dessa vez usando uma grade de difração comercial, lupas e uma webcam, é a proposta por [114]. Os autores desenvolveram um protótipo de espectrômetro óptico de baixo custo capaz de coletar espectros de emissão de fontes luminosas como lâmpadas fluorescentes, LEDs e lasers, com resultados comparáveis aos de espectrômetros comerciais.

Em [115], os autores trazem um método para obter calibrações em comprimento de onda de espectros utilizando espectrógrafos caseiros em uma atividade didática prática. O objetivo é proporcionar uma abordagem simples e acessível para calibrar espectros mesmo quando as linhas espectrais não são conhecidas previamente. O método envolve a obtenção simultânea de espectros de interesse e de calibração, seguida por técnicas de processamento de imagens para extrair os dados relevantes. Os autores demonstram a aplicação do método em um espectro de lâmpada de vapor de hélio.

Por fim, o artigo [116] demonstra um experimento simples e de baixo custo para discutir a natureza ondulatória da luz e o limite em que a óptica geométrica é válida. A atividade consistiu em usar um laser pointer para medir a espessura de diferentes grafites e fios de cabelo através da difração e interferência. Esse tipo de atividade também oferece uma ferramenta para realizar medidas de objetos cuja dimensão seja da ordem do comprimento de onda da luz usada, trazendo um tipo de aplicação além de apenas um estudo sobre difração.

### 3.5. Interferência

A interferência luminosa, fenômeno fundamental no estudo da óptica, é explorada em diversos artigos que abordam desde experimentos didáticos até aplicações avançadas. Essa rica narrativa destaca a evolução e compreensão crescentes da natureza ondulatória da luz ao longo do tempo.

No artigo [117], o espelho de Lloyd [118] emerge como um método prático de ensino de óptica no Ensino Médio, utilizando um laser diodo para observar franjas de interferência e comprovar a natureza ondulatória da luz. Este experimento, mais simples que o de dupla fenda de Young, proporciona uma compreensão fundamental das franjas, baseando-se na fórmula  $R = \lambda D / 2D$  onde  $D$  é a distância horizontal entre a fonte e o anteparo,  $d$  é a distância vertical, e  $\lambda$  é o comprimento de onda da luz. O experimento de dupla fenda de Young [119], comumente utilizado em laboratórios de física de graduação para demonstrar a natureza ondulatória da luz, é apresentado em [120] com uma alternativa de baixo custo e automatizada para medição da intensidade luminosa em tempo real. Em vez de utilizar kits comerciais mais caros, foi implementado um dispositivo que utiliza um resistor dependente de luz posicionado na cabeça de uma impressora matricial. O movimento da cabeça é controlado por um Arduino, que também coleta os dados e os envia para um computador. O padrão de interferência obtido pelo dispositivo está em concordância com um modelo que leva em consideração o grau de coerência da fonte de luz e o tamanho efetivo relacionado à área de captação de luz do resistor. O aparato permite análise quantitativa dos dados obtidos a partir dos padrões de luz medidos e é adequado para uso em laboratórios de física de graduação.

Em [121, 122], os autores a partir de uma famosa aula de Feynman [123], com o auxílio de ferramenta software e experimentos virtuais disponíveis na rede, tais como PhET [124] ou desenvolvidas com os alunos de ensino médio, investigam o problema da dualidade onda/partícula. Em [121] através de exemplos o foco é na natureza corpuscular da matéria e da luz, mas experimentos como o experimento de dupla fendas de Young colocam em crise esta visão sugerindo uma teoria ondulatória para explicar fenômenos de interferência observados em laboratório. Já em [122], a natureza quântica da luz é observada com aplicativos virtuais e discutida introduzindo o formalismo de Dirac. O dualismo onda/partícula é discutido em termos tanto da interpretação dualista realista objetiva como da interpretação de Copenhagen.

Avançando para uma montagem mais complexa, o interferômetro de Michelson, os autores demonstram em [125] uma abordagem prática ao experimento com materiais acessíveis, adicionando complexidade à medição experimental do comprimento de onda de um laser diodo. Diante dos desafios contemporâneos, a “Simulação interativa do interferômetro de Michelson usando o GeoGebra” destaca a adaptação do ensino óptico para ambientes virtuais, substituindo experimentos de laboratório durante períodos de isolamento social [126]. Duas aplicações altamente tecnológicas da natureza ondulatória da luz são apresentadas em [127, 128]. No primeiro artigo, a partir de um interferômetro de Michelson com LED de larga banda coerente comercial, os autores através da técnica tomográfica reconstroem imagens topográficas para identificar assinaturas falsas, ampliando as aplicações práticas da óptica para o ambiente forense. No segundo, A correlação entre o experimento de Young e a litografia interferométrica destaca aplicações tecnológicas avançadas da interferência luminosa, evidenciando a constante relação entre fenômenos ópticos e avanços tecnológicos. Adentrando o campo dos fenômenos ópticos não lineares em [129], um experimento explora um efeito óptico não linear, utilizando um laser para demonstrar a automodelação espacial de fase e oferecendo uma transição natural para a análise de fenômenos não lineares. Enfim, a incursão nos algoritmos quânticos ocorre com a realização experimental da simulação do algoritmo de Deutsch [130] com o interferômetro de Mach-Zehnder. Este estudo destaca a convergência entre óptica moderna e computação quântica, enfatizando a aplicação prática de princípios quânticos em experimentos ópticos.

### 3.6. Polarização

A polarização da luz é um fenômeno óptico fundamental que desempenha papel crucial em diversos contextos científicos e tecnológicos. Este fenômeno refere-se à orientação preferencial das ondas de luz em um plano específico, conferindo-lhes propriedades únicas. Enquanto a luz natural vibra em todas as direções

perpendicularmente à sua propagação, a polarização ocorre quando essa vibração é direcionada de maneira específica, notavelmente influenciando intensidade, cor e comportamento da luz em interações com diferentes substâncias. Com aplicações desde experimentos didáticos até tecnologias avançadas, a compreensão da polarização da luz é crucial na formação acadêmica e no desenvolvimento de inovações científicas e industriais.

Em [131], o experimento consiste em iluminar um material birrefringente, que atua como polarizador, com a luz azul do céu. A técnica proporciona uma alternativa para visualizar os efeitos da luz polarizada do céu azul para espalhamento Rayleigh, evidenciando o padrão colorido resultante da birrefringência do material transparente. Ao observar o padrão colorido, os estudantes são estimulados a compreender conceitos fundamentais sobre polarização e a natureza da luz branca. A técnica demonstra sensibilidade a diferentes níveis de luz polarizada, permitindo observações do céu em diferentes horários do dia e mesmo na presença de algumas nuvens. Utilizaram-se materiais simples e acessíveis, como plásticos transparentes, facilitando a realização do experimento e contribuindo para a compreensão dos alunos sobre polarização e a natureza da luz branca. Em [132], os autores estudam soluções líquidas, propondo experimentos para verificar o poder polarizador de soluções com açúcar e glicose, destacando a rotação da luz polarizada em materiais quirais. No artigo [133], os autores exploram a polarização da luz interagindo com nanoestruturas biológicas, analisando, através de uma lâmina de quarto de onda, a luz refletida para um escaravelho (*Phanaeus splendidus*). A estrutura helicoidal das camadas de quitina no exoesqueleto gera luz polarizada circularmente, resultando em fenômenos de iridescência.

O artigo [134] destaca a relevância das animações e simulações no ensino de física, usando o Mathematica® [135] para criar imagens animadas de ondas eletromagnéticas interagindo com polarizadores e meios ópticos, com aplicação prática pedagógica.

Os artigos [136–140] concentram-se na Lei de Malus ( $I = I_{MAX} \cos^2(\vartheta)$ ) [118, 119], abordando desde a construção de protótipos automatizados até a análise fotométrica e a eficiência espectral dos polarizadores. Em [136], descrevem um protótipo automatizado utilizando resíduos eletrônicos e materiais alternativos, com resultados consistentes. O artigo [137], semelhante, utiliza uma tela LCD de celular danificado para verificar a Lei de Malus, revelando pontos brilhantes e escuros conforme o ângulo da tela. O método acessível normaliza a intensidade média nas fotografias pela intensidade máxima, enriquecendo a compreensão da Lei de Malus. O [138] combina medidas fotométricas e de polarização com ferramentas disponíveis, confirmando a Lei de Malus. [139] foca no software de automatização e simulações para avaliar variações no experimento. Em [140], propõem experimento similar, adicionando análise da eficiência espectral dos

polarizadores com filtros de cor. [141] discute a polarização circular da luz em experimento com óculos de cinema tridimensional, explicando os efeitos visuais ao observar a própria imagem refletida em um espelho plano. O [142] reconstrói a partir do contexto histórico os esforços para se estabelecer o mecanismo do efeito magneto-óptico, na segunda metade do século XIX. A partir dos artigos científicos originais, publicados nos periódicos da época, o excuro histórico caracteriza como os cientistas buscaram inspiração inicial na lei de Biot da atividade óptica natural e na teoria da birrefringência circular de Fresnel. Daí surgiram as tentativas de descrição elastodinâmica do fenômeno. Os continuadores da obra eletromagnética de Maxwell, por sua vez, promoveram a transição para a fundamentação eletromagnética do mesmo e tal abordagem somente se tornou viável com a hipótese iônica da matéria e a descoberta do elétron, no encerramento do século. Usando o formalismo de Stokes (quadrimensional) que permite incluir luz não polarizada ou parcialmente polarizada, o trabalho [143] mostra a implementação de uma prática de laboratório utilizada para investigar os parâmetros de Stokes através da análise do comportamento da luz polarizada transmitida por elementos ópticos polarizantes. A prática, embasada em uma metodologia de aprendizagem por projeto, foi executada mediante a construção de um simulador de polarização. Esse simulador é composto por uma fonte de luz (laser de 670 nm) e diferentes elementos ópticos polarizantes, permitindo a investigação dos diversos estados de polarização da luz. A técnica demonstrou eficácia na determinação dos parâmetros mencionados e pode ser facilmente incorporada como um projeto experimental ao longo do semestre em laboratórios avançados de ensino de óptica, oferecendo suporte e ampliando os estudos teóricos do tema. Enfim, o artigo descreve como construir um laboratório experimental interdisciplinar sobre a polarização da luz, adaptável para estudantes de níveis básico, secundário e universitário. Os autores delinham exemplificações das atividades laboratoriais e introduzem novas ilustrações sobre as propriedades da luz polarizada. A característica proeminente desta proposta reside na ênfase da perspectiva artística no contexto da visualização científica e na abordagem interdisciplinar. Ademais, são apresentadas explicações elementares de fenômenos, frequentemente escassas na língua portuguesa, acompanhadas de uma breve incursão histórica.

### 3.7. Espalhamento

Quando a luz se propaga através de um meio, ela pode sofrer absorção, ser transmitida ou espalhada, um processo em que a interação da onda luminosa com moléculas ou partículas altera sua trajetória, propagando-se em múltiplas direções. A absorção ocorre quando átomos ou moléculas do material absorvem parte da energia da luz, afetando sua intensidade. O espalhamento, dependendo

do tamanho das partículas dispersoras e da frequência da luz incidente, pode variar, sendo o de Rayleigh o mais comum. Esses fenômenos, cruciais para a compreensão óptica, são frequentemente pouco explorados na física do ensino médio.

Os autores em [144] exploram o fenômeno da atenuação da luz em uma atividade laboratorial, empregando a metodologia dos Episódios de Modelagem e baseando-se na Lei de Beer-Lambert, visando elucidar como a poluição da água afeta a zona fótica dos oceanos. Esta abordagem destaca a importância de conectar conceitos ópticos a questões ambientais relevantes. Em [145], apresenta-se uma técnica inovadora de captura de imagem através de uma câmera de pixel único, iluminando a cena com um feixe modulado espacialmente e medindo a intensidade da luz dispersa, o que permite a obtenção de imagens no domínio de Fourier e sua posterior conversão para o domínio espacial via transformada rápida de Fourier (FFT). Esse método abre novas perspectivas para o ensino de óptica, demonstrando a aplicabilidade da física em tecnologias emergentes. Adicionalmente, [146] discute o uso de amplificadores sensíveis à fase (ASF) na medição da constante de Verdet em líquidos, um experimento que ressalta a intersecção entre óptica e eletrônica, enriquecendo o currículo de cursos avançados.

Os esforços para incorporar experimentos acessíveis e de baixo custo às salas de aula são complementados por [147], que revisita o espalhamento da luz em uma cuba d'água para simular a cor azul do céu e os tons vermelho e alaranjado do nascer e pôr do sol, conectando o aprendizado de óptica com fenômenos naturais observáveis.

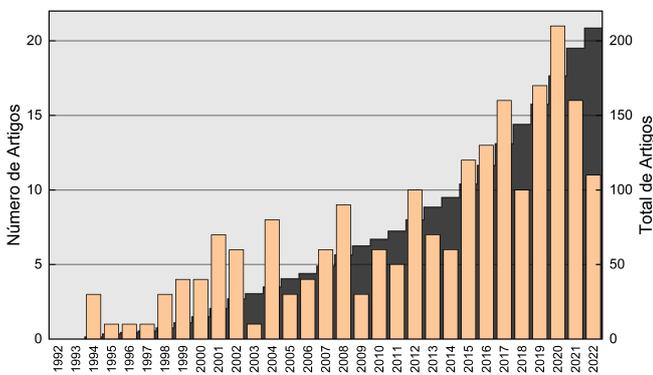
Por fim, [148] propõe um experimento com nanopartículas de prata em água para estudar a radiação dipolar e o Efeito Tyndall, oferecendo uma demonstração tangível e replicável de conceitos fundamentais de espalhamento de luz. Essa sequência de estudos e propostas pedagógicas não apenas preenche lacunas deixadas pelos livros-texto, mas também aponta falhas nos métodos tradicionais de ensino, propondo abordagens mais interativas e contextualizadas que encorajam os alunos a se tornarem agentes ativos em seu processo de aprendizagem.

## 4. Dados Quantitativos e Interpretação dos Resultados

A análise dos dados compilados (Tabela 1) revela uma tendência de crescimento expressivo na pesquisa sobre experimentação em óptica. Nos primeiros 11 anos analisados (1992 a 2002), foram publicados 30 artigos nesta área. No decênio seguinte (2003 a 2012), o número de publicações aumentou para 55, indicando um incremento de 83,3% em relação ao período anterior. Na sequência, os últimos 10 anos (2013 a 2022) registraram a publicação de 129 artigos sobre experimentação em óptica, um crescimento de 134,5% em comparação com o intervalo anterior. Importante ressaltar que a extensão

**Tabela 1:** Classificação dos artigos por tópico de estudo e ano de publicação.

Ano/Tema	92	93	94	95	96	97	98	99	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	Total
Natureza da luz				1	1				1	1	1	1	2			1	3	1	2	4	7	3	3	8	3	9	8	6	10	6	5	87
Reflexão						1			1	1			3		1	1	1					2	1	2	1		1		2		18	
Refração			1				1	2	2	2	1		1	1	2	1	3	1		1	1	2	1		3	3	1	3	4		2	39
Difração				1				2		2	3			1		2	1	1	1				1	1	3	2		2	2		27	
Interferência				1				1		1				2		1					1			1			4	2	2	1	18	
Polarização							1							1	1							1		1	2	2		1	2	2	16	
Espalhamento											1							1	2								1	1	2	1	9	
Total	0	0	3	1	1	1	3	4	4	7	6	1	8	3	4	6	9	3	6	5	10	7	6	12	13	16	10	17	21	16	11	215



**Figura 1:** Número total agregado (eixo esquerdo) e número total acumulado (eixo direito) de artigos publicados sobre experimentação em óptica, em função do ano de publicação.

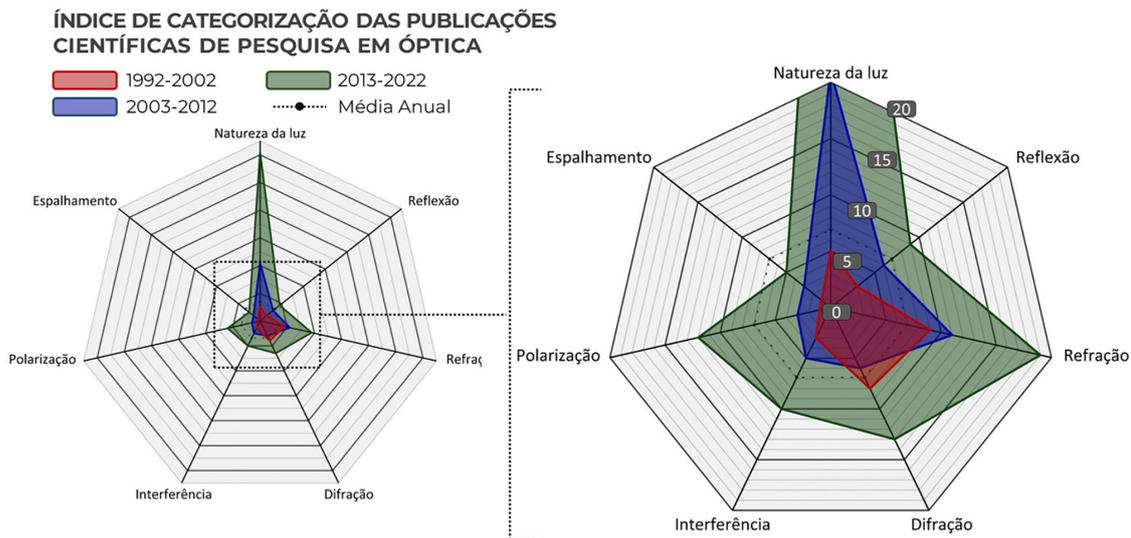
do primeiro período para 11 anos não compromete a análise geral do estudo, visto que os dois primeiros anos não apresentaram publicações significativas na área de óptica. Esta progressão quantitativa destaca não apenas o vigor da pesquisa em experimentação óptica, mas também a crescente valorização da experimentação como pedra angular no ensino da física.

A Figura 1 exibe uma representação gráfica da trajetória de publicações em experimentação óptica ao longo do tempo, ressaltando o crescimento acumulativo do número de artigos na margem direita do gráfico. Entre 1992 e o término de 2022, foram publicados um total de 214 artigos nesta esfera de estudo. A análise revela uma tendência ascendente na produção acadêmica na área, atingindo um ápice em 2020 com a publicação de 21 artigos. Esse incremento notável é atribuído ao advento da pandemia de COVID-19 nesse ano, que possivelmente incentivou diversos pesquisadores a divulgarem os achados de investigações previamente conduzidas. Este padrão de crescimento sublinha a dinâmica e a relevância contínua da experimentação em óptica dentro da comunidade científica, especialmente em face dos desafios impostos por circunstâncias globais extraordinárias. A capacidade de adaptação e a resiliência do campo, evidenciadas pelo aumento na publicação durante períodos de crise, refletem o papel vital da pesquisa e da inovação na superação de barreiras ao ensino e à aprendizagem presencial.

Adicionalmente, foi observado um aumento significativo no número de artigos que incorporam novas

tecnologias, cada vez mais acessíveis para aplicação em ambientes educacionais. Entre as inovações adotadas na pesquisa, destacam-se o uso de LEDs, apontadores a laser, sensores de luz, e computadores de placa única como *Raspberry Pi* e *Arduino*. Esse movimento ilustra uma clara inclinação para integrar avanços tecnológicos no ensino de óptica, visando tornar a experimentação mais interativa e acessível aos alunos.

A compilação e análise desses dados se fazem essenciais para apresentar aos novos pesquisadores o panorama atual da pesquisa em experimentação óptica. Isso possibilita a identificação de áreas pouco exploradas, orientando futuras investigações para preencher essas lacunas e promover o avanço do conhecimento no campo. Para facilitar a visualização e comparação das principais categorias temáticas identificadas na revisão bibliográfica, optou-se pela utilização de um gráfico radar (Figura 2), elaborado a partir do índice de categorização das publicações ao longo de três décadas. Este gráfico apresenta cada categoria como um eixo partindo do centro, onde o comprimento de cada eixo é proporcional ao número de publicações na respectiva categoria. As categorias representadas são: natureza da luz, reflexão, refração, difração, interferência, polarização e espalhamento. A escolha deste tipo de representação gráfica permite uma apreciação clara das áreas de maior e menor concentração de pesquisas, destacando visualmente as tendências e as potenciais lacunas no campo da óptica experimental. Com isso, observamos um incremento notável na categoria “natureza da luz” nos últimos vinte anos. Esse crescimento é atribuído principalmente ao emprego de novos sensores e plataformas que contribuíram para esclarecer diversos aspectos dessa categoria, elevando-a acima das demais em termos de volume de pesquisa. Por outro lado, a categoria “espalhamento” demonstrou um desenvolvimento mais lento, sugerindo a existência de áreas ricas e promissoras para investigação. Além disso, a complexidade inerente ao fenômeno do espalhamento, o que inclui a dependência do comprimento de onda da luz e do centro espalhador, pode ser um dos fatores que limitam a pesquisa nessa área, principalmente para alunos do ensino médio/fundamental. A última década se destacou pela atividade intensa em quase todas as categorias, com exceção de “espalhamento”, superando a média anual de publicações (6,9 artigos por ano) desde o início do levantamento em 1992.



**Figura 2:** Gráfico radar da distribuição quantitativa de publicações científicas em óptica, categorizadas pelas áreas temáticas abordadas no artigo ao longo de várias décadas.

## 5. Conclusões e Perspectivas

A investigação da trajetória da pesquisa em experimentação óptica desvenda um crescimento notável e um amplo espectro de interesses dentro da comunidade científica. Durante o período inicial de 1992 a 2002, o registro de 30 artigos publicados sinaliza o nascer de um campo promissor. Este número aumentou para 55 publicações na década subsequente (2003-2012), evidenciando uma escalada tanto no interesse quanto na produção acadêmica. Distintivamente, a última década (2013-2022) marca uma orientação dos pesquisadores para a especialização em tópicos particulares, com destaque pronunciado para o estudo da natureza da luz. Apesar da refração ter sido objeto de um enfoque ligeiramente superior em comparação a temas como a reflexão, a difração e a interferência, nenhum tópico demonstrou predominância absoluta. Por outro lado, a investigação sobre o espalhamento da luz emergiu como o menos abordado, revelando um volume de publicações que não atinge a média anual observada nos outros campos. Este panorama sugere uma evolução dinâmica e focada da pesquisa em óptica, evidenciando as mudanças nas prioridades e interesses dos cientistas ao longo do tempo.

Múltiplos fatores parecem ter moldado essa preferência temática na pesquisa óptica. Notadamente, a diminuição nos custos dos sensores de luz, que foram intensamente utilizados em pesquisas focadas na natureza da luz, emerge como um fator determinante para o aumento de interesse e de publicações nesta área específica durante a última década. A atenção dedicada ao ensino da natureza da luz e da refração, tanto em contextos educacionais quanto em suportes didáticos, também pode ter impulsionado a proeminência destes temas. Em contrapartida, a limitada cobertura do tema do espalhamento em materiais didáticos tradicionais

pode ter restringido a familiaridade dos estudantes com esse fenômeno, impondo barreiras à sua plena compreensão. Este cenário reflete como inovações tecnológicas e escolhas pedagógicas influenciam diretamente os contornos da pesquisa em óptica, destacando a interconexão entre os avanços materiais e os enfoques educacionais na modelagem das agendas científicas.

De forma intrigante, a ausência de revisões similares em outras disciplinas da física, conforme mencionado em [2], evidencia uma lacuna significativa na literatura acadêmica. Essa constatação ressalta a importância de ampliar o escopo dessas análises críticas para abranger áreas como a mecânica e o eletromagnetismo, as quais também têm experimentado um crescimento considerável no número de publicações. Além disso, a física moderna, especialmente nos domínios da relatividade e da mecânica quântica, emerge como um campo particularmente desprovido de revisões temáticas. Essa carência sugere uma oportunidade vital para aprofundar a compreensão e fomentar o avanço científico por meio da realização de estudos revisionais que abordem as fronteiras do conhecimento nessas áreas fundamentais da física.

Adicionalmente, a última década foi marcada por um esforço contínuo para promover a inclusão na ciência, refletindo o anseio por uma sociedade mais equitativa. Nesse contexto, as simulações digitais emergiram como uma ferramenta inovadora que abre novos caminhos para a experimentação, permitindo que estudantes de diversas formações investiguem fenômenos físicos de maneira virtual. Este avanço não só democratiza o acesso ao conhecimento científico, mas também expande as metodologias de ensino e aprendizagem em física. A revisão dos artigos revelou uma evolução significativa no uso das TDICs em práticas experimentais de óptica, evidenciando uma tendência crescente na adoção

de abordagens inovadoras que facilitam o aprendizado interativo e colaborativo. As diferentes metodologias aplicadas nas TDIC têm impactado variadamente os resultados de aprendizagem, com estudos mostrando melhorias notáveis na compreensão dos conceitos ópticos e no desenvolvimento de competências críticas entre os estudantes. Esta análise sugere que a integração efetiva das TDICs é crucial para o avanço do ensino de física, exigindo, contudo, uma implementação cuidadosa para alinhar as ferramentas tecnológicas com os objetivos educacionais e as necessidades dos alunos.

O objetivo deste estudo foi atualizar o panorama da pesquisa em experimentação óptica, identificando áreas carentes de investigação e orientando futuros estudos. A carência de revisões temáticas em segmentos específicos da física é uma preocupação que ressalta a necessidade de uma abordagem mais integrada e acessível na disseminação do conhecimento científico. Propõe-se, portanto, o estabelecimento de redes colaborativas entre pesquisadores e instituições educacionais, incentivando a produção e compartilhamento de revisões temáticas. Tais esforços são essenciais para preencher as lacunas existentes na literatura científica, promovendo uma visão mais holística da experimentação em física e catalisando progressos significativos no campo.

## Referências

- [1] M.S.T. Araújo e M.L.V.S. Abib, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **25**, 176 (2003).
- [2] J.L.P. Ribeiro e M.F.S. Verdeaux, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **34**, 4403 (2012).
- [3] G.C.S. Valadares, E.L.H. Ângulo e M.A.M. Oliveira, *Física na Escola* **19**, 136 (2021).
- [4] G.T. Nogueira e J.A. Hernandez, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **43**, e20210242 (2021).
- [5] A.A. Soares, L.E. Moraes e F.G. Oliveira, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* **32**, 915 (2015).
- [6] J.L.P. Ribeiro, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **39**, e4307 (2017).
- [7] PRISMA Statement, disponível em: <https://www.prisma-statement.org>.
- [8] L.F. Silva e R.N. Medeiros Júnior, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* **34**, 603 (2017).
- [9] M.V. Silveira e R.B. Barthem, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **38**, e4502 (2016).
- [10] F.R. Henrique, N.B. Tomazio, R.G.T. Rosa, A.M. Souza, C.P. D'Almeida, L.F. Sciuti, M.R. Garcia e L.D. Boni, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **41**, e20180223 (2019).
- [11] D. Soga, M.H. Ueno-Guimarães e M. Muramatsu, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **42**, e20190107 (2020).
- [12] A.S. Campos e T.N. Souza, *Física na Escola* **15**, 41 (2017).
- [13] R.P. Melo Júnior, G.K.V.R. Silva, E.K.S. Silfrônio, J.A.G.A. Lima, M.M. Moccelin, R.S. Roldan Filho e S.C.C. Silva, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* **32**, 287 (2015).
- [14] L.F. Santos e C.J. Pereira, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **35**, 2314 (2013).
- [15] D.N. Micha, G.M. Penello, R.M.S. Kawabata, T. Camarotti, G. Torelly e P.L. de Souza, *Física na Escola* **12**, 19 (2011).
- [16] G.F. Marranghello e D.B. Pavani, *Física na Escola* **12**, 20 (2011).
- [17] M.F. Parisoto e T.R. Hilger, *Física na Escola* **12**, 48 (2011).
- [18] M.V. Silveira, R.B. Barthem e A.C. Santos, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **41**, e20180084 (2018).
- [19] H.H. Buzzá, C.P. Campos, M.B. Requena, C.T. Andrade, C. Leite, T.C. Fortunato, M.D. Stringasci, M.C. Geralde, C.M. Faria, T.Q. Correa et al., *Física na Escola* **16**, 36 (2018).
- [20] A. Bertuola e K.V. Romão, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **40**, e1301 (2018).
- [21] A.J.J. Santos, M.R. Voelzke e M.S.T. Araújo, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* **29**, 1137 (2012).
- [22] S.S.M. Azevedo, M.C.R. Pessanha, D.U.S. Schramm e M.O. Souza, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **35**, 2403 (2013).
- [23] J.L.P. Ribeiro, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **37**, 3507 (2015).
- [24] M. Ortiz e A.M. Montecinos, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **37**, 1502 (2015).
- [25] D.O.S. Gomes, W.S. Santos, A.C.F. Santos e C.E. Aguiar, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **33**, 3307 (2011).
- [26] J.R. Chreim e R.L. Cavasso Filho, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **41**, e20180341 (2019).
- [27] D.G.G. Sasaki e V.L.B. Jesus, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **39**, e2403 (2017).
- [28] D.P. Munhoz, A.C.M. Stein-Barana e C.S. Leme, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* **29**, 130 (2012).
- [29] E.O. Carvalho e R.R. Souza, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **44**, e20220136 (2022).
- [30] L.F.G. Dib, E.A. Barbosa e F.T. Degasperi, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **42**, e20200084 (2020).
- [31] R.A. Montalvo e J.I. Choque, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **42**, e20190194 (2020).
- [32] E.S. Oliveira, I.S. Lima e G. Dutra, *Física na Escola* **13**, 10 (2012).
- [33] M. Farina, E. Negreiros, G. Mendes e E.E. Kurtenbach, *Física na Escola* **17**, 79 (2019).
- [34] G.K. Cruz, M.A. Viatroski, M.E.M. Levy, F.N. Siqueira, S.L. Gomez e C. Bonardi, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **40**, e3502 (2018).
- [35] L.P.C. Silva, C.E. Silva, A.M. Freitas e A.J. Santiago, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* **31**, 60 (2014).
- [36] M. Schivani, G.F. Souza e E. Pereira, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **40**, e2506 (2018).

- [37] O.H.M. Silva e C.E. Laburú, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* **32**, 246 (2015).
- [38] G.B. Santos e S.P. Cunha, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* **32**, 879 (2015).
- [39] M.C. Alcantara, M. Braga e M.F.S. Costa, *Física na Escola* **15**, 29 (2017).
- [40] F.F. Barroso, S.A. Carvalho, J.A.O. Huguenin e A.C. Tort, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **40**, e2501 (2018).
- [41] A.M. Souza e T.S. de Nazaré, *Física na Escola* **13**, 30 (2012).
- [42] A.G. Trogello, M.C.D. Neves e S.D.C.R. Silva, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* **32**, 223 (2014).
- [43] D.H.S. Araujo, L.R. Jesus, A.G. Santos e V. Soares, *Física na Escola* **15**, 35 (2017).
- [44] W.A.V. Souza e J.R. Pinheiro, *Física na Escola* **20**, 220708 (2022).
- [45] V.T.R.P. Gomes, P.H.D. Ferreira, F.A. Calvi e F. Ghiglieno, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **44**, e20220142 (2022).
- [46] T.C. Caetano, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **43**, e20210169 (2021).
- [47] T.C. Caetano, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* **39**, 439 (2022).
- [48] H.G. Gutierrez, M.S. Ribeiro, L.A.A. Pereira, G.K. Cruz, R.F. Turchiello e S.L. Gómez, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **39**, e3501 (2017).
- [49] M.M. Lopim, M.F.S. Costa, S.L. França, B. Gonçalves e B.F. Rizzuti, *Física na Escola* **16**, 40 (2018).
- [50] F.R. Longen e E.J. Gonçalves, *Física na Escola* **20**, 210807 (2022).
- [51] L.S. Pedroso, J.A. Macêdo, M.S.T. Araújo e M.R. Voelzke, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **38**, e2503 (2016).
- [52] P.H. Guadagnini, F.S. Rocha e V.E. Barlette, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **41**, e20180294 (2019).
- [53] L. Peralta, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **42**, e20200144 (2020).
- [54] T.Q. Costa e U.S. Cherpinski, *Física na Escola* **16**, 73 (2018).
- [55] P.J.P. Oliveira, E. Rodrigues Junior, J.C. Madureira, N.A. Silva e F.C. Marques, *Física na Escola* **18**, 30 (2020).
- [56] R.R. Barroso, A.L. Oliveira e V.L. Jesus, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **42**, e20200161 (2020).
- [57] D. Eberhardt, J.B. Rocha Filho, R.A. Lahm e P.B. Baitelli, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* **34**, 928 (2017).
- [58] L.F. Silva e A. Assis, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* **29**, 313 (2012).
- [59] J.F. Pavoni, W.F.P. Neves-Junior, M.A. Spiropulos e D.B. Araújo, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **36**, 4501 (2014).
- [60] R.L. Melhorato e G.T. Nicoli, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **34**, 3311 (2012).
- [61] J.R. Pimentel, F.D. Saad, P. Yamamura, C.H. Furukawa e V.H. Zumpano, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* **31**, 365 (2014).
- [62] N. Quinquilo, N. Quinquilo e M. Ribeiro, *Física na Escola* **17**, 50 (2019).
- [63] S.O.O. Cardoso e A.G. Dickman, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* **29**, 891 (2012).
- [64] F.F. Luiz, L.E.S. Souza e P.H. Domingues, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **38**, e2504 (2016).
- [65] N.D. Gomes, B.F. Magnani e L.G. Marcassa, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **42**, e20200151 (2020).
- [66] I.N. Oliveira, J.A.P. Ramos, W.L. Silva, V.D. Chaves e C.A.O. Melo, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* **37**, 828 (2020).
- [67] I.N. Oliveira, J.A.P. Ramos, W.L. Silva, V.D. Chaves e C.A.O. Melo, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **42**, e20190105 (2020).
- [68] M.A.S. Pessôa, F.M. Silva, M.P. Lima Jr, G. Galhardo, P.H.M. Olyntho e A.A.R. Neves, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **43**, e20210217 (2021).
- [69] J.J. Lunazzi e A.M. Souza, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **43**, e20200357 (2021).
- [70] V.L.B. Jesus e D.G.G. Sasaki, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **43**, e20210296 (2021).
- [71] J.W.C. Silva, K.S. Azevedo e G.F.B. Oliveira, *Física na Escola* **16**, 51 (2018).
- [72] F. Catelli, O. Giovaninni e F.S. Silva, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* **30**, 131 (2013).
- [73] A. Assis, J.M. Souza, J.L. Carneiro Junior e H.B. Oliveira, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* **32**, 809 (2015).
- [74] A.L. Junges, A.J. Bühler, N.T. Massoni e A.F.S. Siebeneichler, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* **37**, 849 (2020).
- [75] K.R. Alho, N. Figueiredo e J.R.N. Silva, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* **38**, 1199 (2021).
- [76] G.L.P. Renner, *Física na Escola* **15**, 58 (2017).
- [77] V.L.B. Jesus e D.G.G. Sasaki, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **35**, 1506 (2013).
- [78] W.L. Almeida, F.M.M. Luz, J.B. Silva, S.L.R. Silva e A.M. Brinatti, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* **30**, 396 (2013).
- [79] F.M. Laburú, O.H. Moura Silva e C.E. Laburú, *A Física na Escola* **19**, 23 (2021).
- [80] M.A.T. Rodrigues e L.F. Mackedanz, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **40**, e1502 (2018).
- [81] R.W. Pereira, L.A. Heidemann e E.A. Veit, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **43**, e20200486 (2021).
- [82] J.C. Ruiz Mendoza e M.H. Ramírez Díaz, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* **32**, 498 (2015).
- [83] J.L.P. Ribeiro, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **36**, 2501 (2014).
- [84] J.L.P. Ribeiro, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* **32**, 837 (2015).
- [85] J.L.P. Ribeiro, *A Física na Escola* **14**, 17 (2016).
- [86] O. Helene e A.F. Helene, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **33**, 3312 (2011).
- [87] G. Trierveiler e J. Flemming, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **41**, e20180105 (2018).
- [88] M.H. Gonçalves, L.E.E. Araujo e V. Rodrigues, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **42**, e20190095 (2020).
- [89] M.A.V. Macedo Junior e V.L.B. Jesus, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **39**, e3307 (2017).

- [90] M. Martinho e V. Soares, *A Física na Escola* **17**, 53 (2019).
- [91] J.L.P. Ribeiro, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **35**, 4309 (2013).
- [92] J.L.P. Ribeiro, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **36**, 2501 (2014).
- [93] D. Soga, D. Kohatsu e M. Muramatsu, *A Física na Escola* **16**, 78 (2018).
- [94] D. Soga, R.D. Paiva, M.H. Ueno-Guimarães e M. Muramatsu, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **39**, e4506 (2017).
- [95] J.P. Mannrich, *A Física na Escola* **20**, 210204 (2022).
- [96] M.P. Dorta, E.C.P. Sousa e M. Muramatsu, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **38**, e4503 (2016).
- [97] M.P. Martinho e V. Soares, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **39**, e3603 (2017).
- [98] F. Catelli e A. Mesquita, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **41**, e20180163 (2018).
- [99] J.L.P. Ribeiro, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **42**, e20200081 (2020).
- [100] J.L.P. Ribeiro, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* **33**, 275 (2016).
- [101] O.H.M. Silva, A.R. Almeida, F.V. Zaporolli e S.M. Arruda, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* **30**, 427 (2013).
- [102] A. Tavares, A. Silva e C. Chesman, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **44**, e20220084 (2022).
- [103] R.F. Turchiello e S.L. Gómez, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **38**, e3501 (2016).
- [104] L.G. Barros, A. Assis e R. Langhi, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* **33**, 1026 (2016).
- [105] A. Xavier, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* **34**, 621 (2017).
- [106] F. Catelli, O. Giovannini e S.F. Oliveira, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* **34**, 951 (2017).
- [107] E.G. Szigety, L.J. Bernal, L. Bilbao e G.H. Pérez, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* **37**, 263 (2020).
- [108] F. Savall-Alemany, J.L. Domènech-Blanco e J. Martínez-Torregrosa, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **36**, 4302 (2014).
- [109] A. Diestel, *Física na Escola* **17**, 68 (2019).
- [110] W.T. Jardim, *Física na Escola* **14**, 22 (2016).
- [111] T.D. Admiral, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **42**, e20200139 (2020).
- [112] C.B. Pereira, S.L.M. Berleze, W.A. Soares e J.P.M. Serbena, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **43**, e20200502 (2021).
- [113] M.A. Cavalcante, A.C. Teixeira e M. Balaton, *Física na Escola* **14**, 27 (2016).
- [114] A.L. Azevedo, A.K.S. Sousa e T.J. Castro, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **41**, e20180349 (2019).
- [115] J.P. Santos e S. Scarano Jr, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **43**, e20210206 (2021).
- [116] L.A. Souza, L. Silva, J.A.O. Huguenin e W.F. Balthazar, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **37**, 4311 (2015).
- [117] M.A. Cavalcante e E.S. Rodrigues, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **34**, 4310 (2012).
- [118] H.M. Nussenzveig, *Curso de Física Básica* (Blucher, São Paulo, 2010), v. 4.
- [119] D. Hallyday e R. Resnick, *Fundamentos de Física: Óptica e Física Moderna* (LTC, Rio de Janeiro, 2012).
- [120] C.G. Oliveira, M.R. Gumiero e V.R. Coluci, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **42**, e20200006 (2020).
- [121] D.C. Ferreira e M.P. Souza Filho, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* **33**, 697 (2016).
- [122] D.C. Ferreira e M.P. Souza Filho, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* **36**, 302 (2019).
- [123] R.P. Feynman, R.B. Leighton e M. Sands, *Lições de Física de Feynman: Mecânica Quântica* (Bookman, Porto Alegre, 2008), v. 3.
- [124] PhET, disponível em: [https://phet.colorado.edu/pt\\_BR](https://phet.colorado.edu/pt_BR).
- [125] L.G. Souza, L.R. Santiago e V.L.B. de Jesus, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **41**, e20190070 (2019).
- [126] N.L. Dias, G.S. Castro e A.A. Coelho, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **43**, e20210205 (2021).
- [127] L.A.S. Ribeiro, O. Negrini Neto e A.Z. Freitas, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **44**, e20210394 (2022).
- [128] J.W. Menezes e C. Valsecchi, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **42**, e20200204 (2020).
- [129] M.S. Ribeiro, G.K. Cruz, S.L. Gómez e R.F. Turchiello, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **41**, e20180211 (2018).
- [130] P.H. Grosman, D.G. Braga e J.A. Huguenin, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **41**, e20180201 (2018).
- [131] D. Soga, D.M. Faes e M. Muramatsu, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **41**, e20170338 (2019).
- [132] D. Soga, S.P. Toledo e M. Muramatsu, *Física na Escola* **15**, 45 (2017).
- [133] J. Flemming e C.A. Rosa, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **37**, 4309 (2015).
- [134] M.A.C. Santos, M.M. Passos, S.M. Arruda e R.C. Viscovini, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **38**, 1502 (2016).
- [135] *Wolfram Mathematica: Modern Technical Computing*, disponível em: <https://www.wolfram.com/mathematica/>.
- [136] T.D. Admiral, *A Física na Escola* **19**, 90 (2021).
- [137] G.H. França e J.V. Lopez, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **44**, e20210423 (2022).
- [138] L. Vertchenko e L. Vertchenko, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **38**, e3311 (2016).
- [139] I.N. Oliveira, W.L. Silva, J.A.P. Ramos, C.A.O. Melo, C. Takiya e V.D. Chaves, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **42**, e20200247 (2020).
- [140] J.L. Fabris, M. Muller e L.V.M. Fabris, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* **34**, 636 (2017).
- [141] J.L.P. Ribeiro e M.F.S. Verdeaux, *Física na Escola* **13**, 14 (2012).
- [142] B.C.S. Matos e M.C. Lima, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **44**, e20210395 (2022).

- [143] R.L.S. Lima, E.S. Silva, A.G. Rodrigues, P.T. Araujo e N.M. Barbosa Neto, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **42**, e20200153 (2020).
- [144] R. Weber, L.A. Heideman e E.A. Veit, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **42**, e20200229 (2020).
- [145] T.V. Alencar e E.J. Carvalho, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **43**, e20210043 (2021).
- [146] R.T. Augusto Filho, A.L.S. Romero, E.C. Barbano e L. Misoguti, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **43**, e20210198 (2021).
- [147] A.V. Andrade-Neto, B.P. Carneiro e M. Paixão, *A Física na Escola* **17**, 24 (2019).
- [148] L.A.A. Pereira, R.C. Garcia, S.L. Gómez e R.F. Turchiello, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **44**, e20220268 (2022).