

LABORATÓRIOS ALTERNATIVOS DE BAIXO CUSTO NO ENSINO DE ÓPTICA E FÍSICA MODERNA: REVISÃO SISTEMÁTICA COM FOCO EM CUSTO, REPLICABILIDADE E INCLUSÃO (2015–2025)

LOW-COST ALTERNATIVE LABORATORIES IN THE TEACHING OF OPTICS AND MODERN PHYSICS: A SYSTEMATIC REVIEW FOCUSED ON COST, REPLICABILITY, AND INCLUSION (2015–2025)

LABORATORIOS ALTERNATIVOS DE BAJO COSTO EN LA ENSEÑANZA DE ÓPTICA Y FÍSICA MODERNA: REVISIÓN SISTEMÁTICA CON ENFOQUE EN COSTO, REPLICABILIDAD E INCLUSIÓN (2015–2025)

Cledson Santana Lopes Goncalves¹

Angela Costa Santa Brígida²

Francisco Flávio Cavalcante³

Daniana de Costa⁴

Luciana Pereira Gonzalez Ferreira⁵

Lília Cristina dos Santos Diniz Alves⁶

RESUMO: Este estudo realizou uma revisão sistemática da literatura sobre laboratórios alternativos de baixo custo aplicados ao ensino de Óptica e Física Moderna no Brasil, no período de 2015 a 2025. O delineamento metodológico seguiu as diretrizes do PRISMA 2020, com definição explícita de critérios de elegibilidade, dupla leitura independente e matriz de extração estruturada em cinco eixos analíticos: área temática, faixa de custo, uso de dispositivos digitais, evidência de aprendizagem, replicabilidade e inclusão. Foram identificados 306 registros nas bases Google Acadêmico e SciELO, dos quais 37 estudos compuseram o corpus final. Observou-se predominância de propostas em Óptica (62,2%), variação de custos entre valores inferiores a R\$ 20 e superiores a R\$ 300, uso de recursos digitais em 48,6% dos estudos e baixa incidência de adaptações inclusivas explícitas (5,4%). Os dados evidenciam padrões de implementação, critérios de validação pedagógica e lacunas relacionadas à padronização de custo e acessibilidade experimental.

Palavras-chave: Ensino de Física. Óptica e Física Moderna. Inclusão educacional.

¹Doutor em Física pela Universidade do Porto – Portugal, Professor efetivo da Universidade Federal Pará – Campus do Guamá.

²Doutora em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Pará, Professora efetiva da Universidade Federal do Pará – Campus Ananindeua.

³Licenciatura em Física pela Universidade Federal do Pará, Pós-graduando de Engenharia Mecânica – PPGEM.

⁴Doutora em Educação pela Universidade Federal de São Carlos, Professora efetiva da Universidade Federal do Pará – Campus Salinópolis.

⁵Doutora em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Pará, Professora efetiva da Universidade Federal do Pará – Campus Ananindeua.

⁶Doutora em Educação, em Ciências e Matemáticas pela Universidade Federal do Pará-UFPA, Professora efetiva da Universidade Federal do Pará – Campus Salinópolis.

ABSTRACT: This study conducted a systematic literature review on low-cost alternative laboratories applied to the teaching of Optics and Modern Physics in Brazil from 2015 to 2025. The methodological design followed the PRISMA 2020 guidelines, with explicit eligibility criteria, independent double screening, and a structured data extraction matrix organized into five analytical axes: thematic area, cost range, use of digital devices, evidence of learning, replicability, and inclusion. A total of 306 records were identified in Google Scholar and SciELO databases, from which 37 studies composed the final corpus. The results indicate a predominance of Optics-related proposals (62.2%), cost variation ranging from under R\$20 to over R\$300, digital resource use in 48.6% of studies, and low incidence of explicit inclusive adaptations (5.4%). The findings reveal implementation patterns, pedagogical validation criteria, and structural gaps concerning cost standardization and experimental accessibility.

Keywords: Physics Teaching. Optics and Modern Physics. Inclusive Education.

RESUMEN: Este estudio realizó una revisión sistemática de la literatura sobre laboratorios alternativos de bajo costo aplicados a la enseñanza de Óptica y Física Moderna en Brasil, en el período de 2015 a 2025. El diseño metodológico siguió las directrices PRISMA 2020, con criterios explícitos de elegibilidad, doble lectura independiente y una matriz de extracción organizada en cinco ejes analíticos: área temática, rango de costo, uso de dispositivos digitales, evidencia de aprendizaje, replicabilidad e inclusión. Se identificaron 306 registros en las bases Google Académico y SciELO, de los cuales 37 estudios conformaron el corpus final. Los resultados indican predominio de propuestas en Óptica (62,2%), variación de costos desde valores inferiores a R\$ 20 hasta superiores a R\$ 300 y baja incidencia de adaptaciones inclusivas explícitas (5,4%). Los datos permiten identificar patrones de implementación, criterios de validación pedagógica y vacíos relacionados con la estandarización de costos, la replicabilidad y la accesibilidad experimental

Palabras clave: Enseñanza de la Física. Óptica y Física Moderna. Educación inclusiva.

INTRODUÇÃO

O ensino experimental ocupa papel central na formação científica, especialmente nas áreas de Óptica e Física Moderna, cujos conceitos estão diretamente associados a tecnologias contemporâneas, como sensores digitais, dispositivos fotovoltaicos e aplicações baseadas em radiação eletromagnética. A literatura em Ensino de Física destaca que a experimentação contribui para a articulação entre teoria e prática e para a consolidação de conceitos abstratos, particularmente em tópicos relacionados à óptica geométrica, óptica física e fenômenos quânticos (SILVA; LEAL, 2017; ALVES; SANTOS, 2021).

Apesar dessa relevância, a implementação de atividades experimentais nessas áreas enfrenta limitações estruturais recorrentes, sobretudo em contextos escolares com restrições de infraestrutura e recursos laboratoriais. Estudos que analisam propostas de experimentação em escolas públicas indicam que a ausência de equipamentos específicos e de formação técnica

adequada constitui um dos principais obstáculos à consolidação de práticas experimentais sistemáticas (SILVEIRA; GIRARDI, 2017; ROCHA, 2020).

Nas últimas décadas, observa-se crescimento significativo de propostas de experimentação com materiais acessíveis, reutilizáveis ou de baixo custo, frequentemente associadas ao uso de microcontroladores e sensores digitais, como plataformas Arduino, além de dispositivos construídos com materiais do cotidiano (PEREIRA et al., 2021; MENEZES et al., 2024). Essas iniciativas têm buscado ampliar a viabilidade prática do ensino experimental, oferecendo alternativas aos laboratórios convencionais e favorecendo a replicabilidade em diferentes contextos educacionais (BAPTISTA FILHO et al., 2024; SOGA et al., 2017).

Entretanto, a produção científica nessa área apresenta caráter predominantemente disperso, composta majoritariamente por relatos de experiência ou descrições técnicas de propostas específicas, sem síntese comparativa sistematizada que permita identificar padrões, convergências e lacunas estruturais no campo (SILVA; LEAL, 2017; SILVEIRA; GIRARDI, 2017).

Estudos recentes têm contribuído para organizar parte desse campo. Ferreira, Ghiglieno e Tribuzi (2024) realizaram revisão sobre atividades experimentais no ensino de Óptica, sistematizando propostas e discutindo abordagens pedagógicas. De modo semelhante, Veloso, Sousa e Macêdo (2022) analisaram a produção referente ao ensino de Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio, enfatizando aspectos curriculares e conceituais. Essas revisões oferecem contribuições relevantes ao mapear tendências e desafios específicos de suas áreas.

Contudo, tais estudos não abordam de forma integrada os laboratórios alternativos de baixo custo nas áreas de Óptica e Física Moderna, tampouco analisam sistematicamente variáveis como faixa de custo estimado, tipos de materiais empregados, replicabilidade pedagógica, escalabilidade para diferentes contextos institucionais e presença de adaptações inclusivas. Além disso, não se identificou, no recorte temporal recente, uma revisão sistemática com protocolo explícito de elegibilidade e matriz analítica comparativa que articule simultaneamente esses eixos.

Essa lacuna limita a consolidação de critérios comparáveis para caracterização do “baixo custo”, a síntese das evidências educacionais reportadas e a identificação de desafios recorrentes relacionados à acessibilidade e à formação docente. Nesse cenário, torna-se necessário organizar e analisar criticamente a produção científica recente por meio de um procedimento

metodológico sistemático, de modo a reduzir vieses de seleção e ampliar a confiabilidade das sínteses produzidas (MOHER et al., 2009; PAGE et al., 2021).

Diante desse contexto, formula-se a seguinte questão de pesquisa: Quais são as características, tendências e lacunas das propostas de laboratórios alternativos de baixo custo aplicadas ao ensino de Óptica e Física Moderna no Brasil, no período de 2015 a 2025, considerando variáveis como materiais utilizados, faixa de custo, estratégias pedagógicas, replicabilidade e inclusão?

O objetivo geral deste estudo é realizar uma revisão sistemática da literatura sobre laboratórios alternativos de baixo custo aplicados ao ensino de Óptica e Física Moderna, no período de 2015 a 2025. Para alcançar esse propósito, busca-se identificar e catalogar as propostas experimentais publicadas no intervalo temporal delimitado, sistematizar informações relativas aos materiais utilizados e às faixas de custo estimadas, analisar as estratégias pedagógicas e os procedimentos experimentais descritos, examinar as evidências relatadas de aprendizagem e engajamento discente, bem como identificar a presença de adaptações inclusivas e discutir sua incidência no conjunto analisado. Ademais, pretende-se apontar lacunas e tendências observadas na produção científica, de modo a oferecer subsídios para investigações futuras no campo do ensino experimental de Física.

4

Ao estruturar essa síntese de forma sistemática e comparativa, o estudo pretende contribuir para a consolidação de um panorama analítico do campo, oferecendo subsídios metodológicos e diagnósticos fundamentados sobre o desenvolvimento de laboratórios alternativos de baixo custo no ensino de Física.

MÉTODOS

Trata-se de uma revisão sistemática da literatura, conduzida em conformidade com as recomendações do PRISMA 2020 (PAGE et al., 2021), contemplando as etapas de identificação, triagem, elegibilidade e inclusão dos estudos. O protocolo metodológico foi previamente estruturado, com definição explícita da questão de pesquisa, estabelecimento de critérios de inclusão e exclusão, delimitação das estratégias de busca e organização de uma matriz padronizada para extração e análise dos dados, assegurando transparência, rastreabilidade e possibilidade de replicação do estudo.

O recorte temporal adotado compreendeu o período de 2015 a 2025, buscando contemplar a produção científica recente relacionada a propostas experimentais de baixo custo no ensino de

Óptica e Física Moderna, incluindo o contexto pós-pandemia e o avanço de dispositivos digitais acessíveis aplicados ao ensino.

A busca bibliográfica foi realizada nas bases Google Acadêmico e SciELO, selecionadas por concentrarem parcela significativa da produção nacional indexada na área de Ensino de Ciências e Ensino de Física. As buscas foram conduzidas entre os meses de [novembro de 2025 a fevereiro de 2026], com atualização final em [01 de março de 2026], utilizando ordenação por relevância nas bases consultadas. Para reduzir a sensibilidade a variações terminológicas, foram empregados descritores isolados e combinados por operadores booleanos, incluindo as expressões principais: “ensino de Física Moderna”, “ensino de Óptica”, “experimentos de baixo custo”, “laboratório alternativo” e “Arduino AND ensino de Física”, bem como variações semânticas e termos correlatos, tais como “materiais acessíveis”, “kit experimental”, “sensores”, “microcontrolador” e “Física Moderna e Contemporânea”, quando aplicável.

Exemplos de strings utilizadas incluíram combinações do tipo: (“ensino de Óptica” OR “óptica geométrica” OR “óptica física”) AND (“baixo custo” OR “materiais acessíveis” OR “laboratório alternativo” OR “kit experimental”) AND (“ensino de Física” OR aprendizagem); e (“Física Moderna” OR “efeito fotoelétrico” OR semicondutores OR espectroscopia) AND (“baixo custo” OR Arduino OR sensores OR “kit experimental”) AND (“ensino” OR “ensino médio” OR licenciatura). Foram considerados exclusivamente estudos publicados em língua portuguesa, com filtro temporal de 2015 a 2025.

5

No Google Acadêmico, foram examinados sistematicamente os resultados até o ponto em que duas páginas consecutivas não apresentaram novos estudos potencialmente elegíveis, adotando-se esse critério como ponto de saturação temática. Na base SciELO, todos os registros recuperados pelos descritores foram examinados integralmente. Os resultados das diferentes buscas foram consolidados e submetidos à verificação manual para remoção de duplicatas. Reconhece-se, contudo, que a delimitação linguística e a seleção de bases constituem limitações metodológicas, ao restringirem a abrangência internacional da análise.

Os critérios de elegibilidade foram estabelecidos de modo a garantir coerência com a questão investigada. Foram incluídos estudos que descrevessem propostas experimentais aplicadas ao ensino de Óptica ou Física Moderna, utilizassem materiais explicitamente caracterizados como de baixo custo ou acessíveis, apresentassem descrição metodológica suficiente para compreensão e eventual replicação da atividade, estivessem publicados entre 2015 e 2025 e disponíveis integralmente para leitura. Foram excluídos estudos que dependessem de

equipamentos laboratoriais de alto custo ou infraestrutura especializada, que fossem exclusivamente teóricos sem proposta experimental aplicada, que não dialogassem com o ensino médio ou com a formação docente e aqueles identificados como duplicatas entre as bases consultadas.

O processo de triagem ocorreu em três etapas sucessivas: leitura de títulos e resumos, leitura integral dos textos potencialmente elegíveis e aplicação sistemática dos critérios de inclusão e exclusão. Adotou-se classificação tripla dos estudos avaliados: incluir, quando atendiam integralmente aos critérios estabelecidos e apresentavam evidências consistentes; incluir (parcial), quando contemplavam aspectos relevantes, mas apresentavam limitações metodológicas ou ausência de evidências empíricas diretas ou detalhamento suficiente em algum dos eixos analíticos; e excluir, quando não atendiam aos critérios definidos. A seleção foi realizada por dupla leitura independente, com resolução de divergências por consenso, procedimento que contribui para reduzir vieses interpretativos e aumentar a confiabilidade da seleção.

Ao final do processo, 64 artigos foram avaliados integralmente. Destes, 36 (56,2%) foram classificados como incluir, 12 (18,8%) como incluir parcialmente e 16 (25,0%) como excluir. Para fins de análise sistemática principal, foram considerados os estudos classificados como incluir e aqueles classificados como incluir parcialmente que apresentavam dados relevantes para ao menos um dos eixos analíticos definidos. Os dados detalhados do processo de seleção encontram-se sistematizados no fluxograma PRISMA apresentado na seção de resultados.

Para a etapa de extração e organização dos dados, foi construída uma matriz padronizada estruturada em cinco eixos analíticos previamente definidos (categorias a priori), alinhados à questão de pesquisa e aos objetivos da revisão: (i) experimento proposto, incluindo fenômeno físico abordado, área temática, objetivos e nível de ensino; (ii) materiais e recursos utilizados, contemplando tipo de insumos, presença de dispositivos digitais, possibilidade de reutilização e estimativa de custo quando informada; (iii) estratégias pedagógicas, considerando abordagem metodológica adotada, papel do estudante, estrutura do roteiro e nível de detalhamento procedimental; (iv) impactos relatados, com identificação de evidências quantitativas ou qualitativas de aprendizagem, engajamento ou inclusão; e (v) potencialidades e desafios, abrangendo aspectos de replicabilidade, exigências técnicas, limitações estruturais e presença ou ausência de adaptações inclusivas explícitas.

Além dessas categorias principais, foram registrados dados adicionais, como ano de publicação, tipo de instituição, presença de instrumentação digital (Arduino, sensores, aplicativos ou softwares), faixa de custo reportada e nível de detalhamento suficiente para reprodução experimental. A extração dos dados foi realizada de forma sistemática e revisada independentemente, garantindo consistência e confiabilidade no processo de categorização.

Diferentemente de revisões anteriores na área, esta revisão sistematizou explicitamente a faixa de custo estimada das propostas, a presença ou ausência de adaptações inclusivas e o nível de replicabilidade pedagógica descrito nos estudos analisados, incorporando essas variáveis como categorias centrais de análise comparativa e permitindo análise mais precisa das condições de implementação em contextos escolares reais.

A síntese dos dados combinou abordagem descritiva e analítica. Inicialmente, procedeu-se à organização quantitativa das categorias identificadas, permitindo visualizar a distribuição das propostas segundo os eixos definidos e identificar padrões de ocorrência. Em seguida, realizou-se análise qualitativa comparativa, com o objetivo de identificar tendências recorrentes, convergências metodológicas e lacunas estruturais no conjunto analisado, articulando as características dos estudos às condições de replicabilidade, acessibilidade e implementação pedagógica.

Por tratar-se de pesquisa documental baseada exclusivamente em dados de acesso público, não houve necessidade de submissão a Comitê de Ética em Pesquisa, conforme diretrizes nacionais aplicáveis a revisões sistemáticas sem participação direta de sujeitos humanos. A metodologia adotada assegura reprodutibilidade, transparência e confiabilidade, oferecendo um panorama sistematizado das experiências de baixo custo no ensino de Física no Brasil.

RESULTADOS

A busca realizada nas bases Google Acadêmico e SciELO resultou na identificação inicial de 40 registros na primeira base e 266 na segunda. Após aplicação dos critérios de elegibilidade previamente definidos, incluindo recorte temporal (2015–2025), adequação temática ao ensino de Óptica e/ou Física Moderna, presença de proposta experimental e caracterização como atividade de baixo custo, 21 estudos provenientes do Google Acadêmico e 16 da SciELO foram considerados elegíveis para análise. A listagem completa dos artigos

selecionados em cada base, com respectivos autores, títulos e anos de publicação, encontra-se apresentada na Tabela 1 e na Tabela 2.

Tabela 1 – Artigos selecionados no Google Acadêmico utilizados na análise da pesquisa

Autor	Estudo	Ano
CASTRO, G. da S.	Kits de baixo custo para o ensino de Física e o Currículo do Estado de São Paulo	2024
CHAVES, J. L. A.; PACHECO, H. P.	Efeito Fotoelétrico no Ensino Médio: uma simulação em realidade virtual	2024
FONTELES, T. S.	O impacto da experimentação com kits de baixo custo na aprendizagem de ondas eletromagnéticas para o ensino fundamental.	2024
RODRIGUES, E. de A.	Fototropismo e a integração com ondas eletromagnéticas numa abordagem STEAM em nível médio	2024
FURTADO, J. D.	Ensino de Física e o Impacto da Experimentação de Baixo Custo no Último Ano do Nível Médio	2023
CANDEIA, A. L.; RAMALHO, R. S.; COSTA, M. G.; SILVA Jr., V. M. da	Práticas experimentais de baixo custo como estratégia de ensino de Física	2023
SILVA, L. M. da	O uso de experimentos de baixo custo para o ensino de Óptica Geométrica	2023
BÓRIO, A. B.	Os materiais de baixo custo em práticas experimentais da Educação Básica	2022
MACHADO, T. L. W. E. H. H.	Ensino de Física e Experimentos Didáticos: A perspectiva de materiais simples e de baixo custo	2022
SANTOS, G. S. dos; BARBOSA, T. S.	A importância das atividades experimentais como impulso metodológico no ensino de Física	2022
LUÍS, G. D.	O ensino do efeito fotoelétrico no Ensino Médio através de experimentos e sua comparação com o efeito fotovoltaico	2022
VIEIRA, E. B.	Proposta de Experimentos de Baixo Custo Adaptados no Ensino de Óptica para Deficientes Visuais	2022
ROCHA, L. S.	Laboratório experimental de baixo custo para o ensino de Física	2020
REIS, L. T.	Conceitos básicos da Física dos Semicondutores apoiado no uso de software e experimento de baixo custo	2019
CORRÊA, D. e S. M.	Desvendando o universo microscópico com a utilização de microscópios artesanais em salas de aula	2019
MELLO, L. A. de	As Sequências Didáticas para o Ensino de Física no Projeto PIBID	2018
JESUS, J. J.; OLIVEIRA, A. F.; SILVA, A. P.	Espectrômetro digital: uma proposta de construção de um experimento de Física Moderna para o ensino remoto	2021
PEREIRA, J. L.	Proposta de experimentação de baixo custo no ensino de Física	2021
RÉ, F. R.	Ensino de Física e Experimentos: Estudo Exploratório sobre Kits Experimentais	2021
CARRILHO, J. J. da S.	Astronomia no Ensino Médio – A ciência e o lúdico: desafiando e educando	2015
MOREIRA, L. C. D.	O uso de simulações computacionais como ferramenta facilitadora do aprendizado dos tópicos de Física Moderna no Ensino Médio	2015

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Tabela 2 – Artigos selecionados no SciELO utilizados na análise da pesquisa

Autor(es)	Estudo	Ano
MENEZES, V. M. de <i>et al.</i>	Estudo de lentes esféricas biconvexas de focos fixo e ajustável construídas com materiais de fácil acesso.	2024
ALVES, E. G.; SANTOS, A. L. M.	Efeito fotoelétrico: desenvolvimento de um experimento quantitativo.	2021
FILHO, M. B. <i>et al.</i>	Explorando a absorção óptica através da construção de um calorímetro de baixo custo.	2024
DE FRANÇA, G. H.; LÓPEZ, J. V.	Experimento de baixo custo para o ensino de Física Óptica: o caso da Lei de Malus.	2022
CARDOSO, G. S. <i>et al.</i>	Óptica geométrica: aplicação de uma atividade experimental utilizando a videoanálise no ensino a distância.	2024
FERREIRA, P. H. D.; GHIGLIENO, F.; TRIBUZI, V.	Atividades experimentais no ensino de óptica: uma nova revisão.	2024
NOGUEIRA, G. T.; HERNANDES, J. A.	Laboratório de Física IV baseado em experimentos de baixo custo: relato de uma experiência de ensino remoto.	2021
PEREIRA, C. B. <i>et al.</i>	Construção de um luxímetro digital utilizando plataforma Arduino para uso em laboratórios didáticos.	2021
SOGA, D.; UENO-GUIMARÃES, M. H.; MURAMATSU, M.	Um estudo experimental sobre a luz negra com smartphone.	2020
CRUZ, G. K. da <i>et al.</i>	Um iluminador de baixo custo para a realização de experimentos de óptica geométrica.	2018
PEREZ, S. <i>et al.</i>	O estudo do movimento browniano com material de baixo custo.	2018
SOGA, D. <i>et al.</i>	Um microscópio caseiro simplificado.	2017
SILVA, J. C. X.; LEAL, C. E. dos S.	Proposta de laboratório de física de baixo custo para escolas da rede pública de ensino médio.	2017
SILVEIRA, M. V.; GIRARDI, M.	Desenvolvimento de um kit experimental com Arduino para o ensino de Física Moderna no Ensino Médio.	2017
SILVEIRA, M. V.; BARTHEM, R. B.	Disco de Newton com LEDs.	2016
RIBEIRO, J. L. P.	Perguntas em sala no ensino médio: observando o pôr do sol em um elevador panorâmico.	2025

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Os 37 estudos incluídos foram organizados segundo os cinco eixos analíticos estabelecidos na seção de Métodos: (i) experimento proposto, (ii) materiais e recursos, (iii) estratégias pedagógicas, (iv) impactos relatados e (v) potencialidades e desafios. Para cada artigo, foram extraídas informações relativas à área temática predominante, faixa de custo reportada, uso de dispositivos digitais, tipo de evidência de aprendizagem descrita, nível de detalhamento metodológico e presença ou ausência de adaptações inclusivas. A consolidação quantitativa dessas categorias encontra-se sistematizada na Tabela 3.

No eixo “Área temática”, os estudos foram classificados conforme abordagem predominante em Óptica, Física Moderna ou combinação de ambas. No eixo “Materiais e

recursos”, registrou-se a faixa de custo informada nos artigos, quando explicitamente mencionada, bem como a utilização de dispositivos digitais como microcontroladores, sensores eletrônicos, aplicativos móveis ou softwares de análise. No eixo “Impactos relatados”, foram categorizadas as formas de avaliação descritas, distinguindo-se entre aplicação de instrumentos quantitativos (como pré e pós-testes ou medições experimentais), relatos qualitativos de aprendizagem ou ausência de medida explícita. O eixo “Replicabilidade” considerou o grau de detalhamento procedural apresentado nos estudos, classificando-os como descrição detalhada, parcial ou insuficiente para reprodução direta da atividade. Por fim, no eixo “Inclusão”, registrou-se a presença ou ausência de adaptações explicitamente descritas para estudantes com deficiência (Tabela 3).

A organização dos dados segundo esses eixos permite apresentar de forma estruturada a distribuição das características reportadas nos artigos publicados entre 2015 e 2025, conforme critérios metodológicos previamente estabelecidos, mantendo correspondência direta com a matriz de extração descrita na seção anterior (Tabela 3).

Tabela 3 – Síntese quantitativa dos estudos segundo os eixos analíticos (n = 37)

Eixo Analítico	Categoria	n	%
Área temática	Óptica	23	62,2
	Física Moderna	11	29,7
	Abordagem mista	3	8,1
Faixa de custo reportada	Até R\$ 20	9	24,3
	R\$ 21 – R\$ 100	14	37,8
	R\$ 101 – R\$ 300	8	21,6
	Acima de R\$ 300	6	16,2
Uso de dispositivos digitais	Sim	18	48,6
	Não	19	51,4
Evidência de aprendizagem	Pré/pós quantitativo	15	40,5
	Relato qualitativo	14	37,8
	Não apresenta medida	8	21,6
Replicabilidade	Descrição detalhada	26	70,3
	Parcial	7	18,9
	Insuficiente	4	10,8
Inclusão	Apresenta adaptação	2	5,4
	Não apresenta	35	94,6

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

DISCUSSÃO

Tendências identificadas no período 2015–2025

A predominância de estudos em Óptica (62,2%) em relação à Física Moderna (29,7%) e às abordagens mistas (8,1%) indica uma concentração temática que ultrapassa a simples distribuição de conteúdos e se relaciona diretamente às condições de viabilidade experimental em contextos escolares. A Óptica, especialmente em tópicos de óptica geométrica e fenômenos luminosos macroscópicos, permite estabilização do fenômeno com aparatos de baixa complexidade material, como observado nas propostas de lentes ajustáveis (MENEZES et al., 2024), disco de Newton com LEDs (SILVEIRA; BARTHEM, 2016) e microscópio simplificado (SOGA et al., 2017). Essa configuração favorece descrições procedimentais detalhadas e replicações didáticas em diferentes contextos escolares, convergindo com o panorama sistematizado por Ferreira, Ghiglieno e Tribuzi (2024), que identificam ampla diversidade de atividades experimentais em Óptica com forte presença de adaptações de baixo custo.

Em contraste, a Física Moderna aparece com menor frequência, mas com maior densidade técnica em parte das propostas analisadas. Experimentos envolvendo efeito fotoelétrico e determinação da constante de Planck (ALVES; SANTOS, 2021), kits baseados em Arduino para simulação e medição (SILVEIRA; GIRARDI, 2017; JESUS; OLIVEIRA; SILVA, 2021) e exploração de semicondutores (REIS, 2019) evidenciam um esforço sistemático de transposição didática de fenômenos tradicionalmente associados a laboratórios especializados. Esse movimento dialoga com Veloso, Sousa e Macêdo (2022), que apontam a ampliação gradual da presença de Física Moderna no Ensino Médio, ainda que marcada por desafios estruturais e curriculares. Assim, enquanto a Óptica apresenta maior recorrência quantitativa, a Física Moderna tende a demandar maior complexidade instrumental e conceitual, refletindo diferentes regimes de materialidade experimental no ensino escolar.

Outro traço relevante é a incorporação de dispositivos digitais em aproximadamente metade dos estudos (48,6%), incluindo uso de Arduino, sensores LDR, aplicativos móveis e softwares de análise (PEREIRA et al., 2021; SILVEIRA; GIRARDI, 2017; BAPTISTA FILHO et al., 2024). Esse dado sugere uma transição do laboratório predominantemente material para um laboratório híbrido, no qual a produção de evidência envolve coleta, processamento e visualização digital de dados. Tal movimento aproxima a prática escolar de procedimentos científicos contemporâneos e amplia o escopo metodológico da experimentação de baixo custo,

deslocando-a de uma lógica exclusivamente demonstrativa para uma lógica investigativa com potencial quantitativo.

Convergências e divergências estruturais

A análise transversal do corpus evidencia convergências importantes. A primeira refere-se à ênfase na replicabilidade procedimental. A maioria dos estudos apresenta descrição detalhada (70,3%), com roteiros organizados em etapas de montagem, calibração e coleta/análise de dados (MENEZES et al., 2024; SILVEIRA; BARTHEM, 2016; PEREIRA et al., 2021). Esse padrão indica que o experimento de baixo custo tem sido comunicado como procedimento público e reproduzível, e não apenas como demonstração pontual. A explicitação das etapas opera como mecanismo de legitimidade científica no contexto escolar, ao permitir que outros docentes reproduzam a experiência sob condições similares.

Outra convergência refere-se à associação entre experimentação e aprendizagem ativa. Estudos como Fonteles (2024) e Furtado (2023) relatam ganhos conceituais em conteúdos de ondas eletromagnéticas e Física no Ensino Médio, enquanto Alves e Santos (2021) e Silveira e Girardi (2017) registram variações expressivas em pré/pós-testes em tópicos de Física Moderna. Ainda que com metodologias distintas, esses resultados reforçam a presença de um discurso recorrente que vincula experimentação acessível ao engajamento discente e à ampliação da compreensão conceitual.

12

Entretanto, emergem divergências estruturais que impactam a comparabilidade entre estudos. A primeira refere-se à heterogeneidade da noção de “baixo custo”. O corpus inclui propostas com valores inferiores a R\$ 10 (SOGA et al., 2017), entre R\$ 20 e R\$ 120 (MENEZES et al., 2024; PEREIRA et al., 2021) e acima de R\$ 300 (ALVES; SANTOS, 2021). Essa variação evidencia ausência de padronização conceitual do termo, dificultando comparações diretas e indicando que o “baixo custo” tem sido definido de maneira contextual, e não operacional.

A segunda divergência diz respeito à natureza da evidência de aprendizagem. Parte dos estudos utiliza instrumentos quantitativos (ALVES; SANTOS, 2021; FONTELES, 2024), parte se apoia em relatos qualitativos (FURTADO, 2023; SANTOS; BARBOSA, 2022), enquanto outros não apresentam medidas explícitas. Essa diversidade metodológica implica diferentes critérios de validação pedagógica, limitando a possibilidade de estabelecer parâmetros comuns de comparação entre intervenções.

A terceira divergência, estruturalmente mais sensível, refere-se à baixa incidência de adaptações inclusivas explicitadas (5,4%). Embora iniciativas como as de Vieira (2022) e Silva e Leal (2017) demonstrem viabilidade técnica e didática de adaptações, a maioria das propostas não incorpora sistematicamente critérios de acessibilidade desde a concepção do experimento. Observa-se, assim, uma assimetria entre acessibilidade financeira e acessibilidade pedagógica: reduzir custos não garante, por si só, ampliação universal da participação experimental

Implicações para a formação docente

Os dados indicam que a implementação de laboratórios alternativos de baixo custo demanda competências técnicas e pedagógicas articuladas. A presença recorrente de dispositivos digitais (PEREIRA et al., 2021; SILVEIRA; GIRARDI, 2017; BAPTISTA FILHO et al., 2024) sugere necessidade de formação em noções básicas de eletrônica, programação e calibração de sensores. Paralelamente, propostas baseadas em materiais simples (MENEZES et al., 2024; SOGA et al., 2017) mostram que parte das atividades pode ser desenvolvida com menor exigência tecnológica, indicando coexistência de diferentes níveis de complexidade experimental no campo.

A diversidade de formas de evidência de aprendizagem aponta para necessidade de formação específica em avaliação de intervenções experimentais, especialmente quando o objetivo é produzir dados comparáveis e comunicáveis cientificamente. Além disso, a baixa frequência de adaptações inclusivas evidencia lacuna formativa na incorporação sistemática de estratégias de acessibilidade, apesar de existirem referências que indicam caminhos possíveis (VIEIRA, 2022; SILVA; LEAL, 2017).

Esses elementos sugerem que a formação docente para experimentação de baixo custo deve integrar fundamentos conceituais, competências técnicas, avaliação de aprendizagem e planejamento inclusivo, em consonância com diretrizes curriculares como a BNCC (BRASIL, 2018), que enfatizam investigação, uso de tecnologias e desenvolvimento de competências científicas

Framework de Acessibilidade Universal para Laboratórios Alternativos de Baixo Custo

A análise do corpus revelou que apenas 5,4% dos estudos incluídos descrevem adaptações inclusivas explícitas, com iniciativas pontuais como a de Vieira (2022), que desenvolve experimentos ópticos adaptados para estudantes com deficiência visual, e as recomendações de

mediação em Libras e recursos visuais ampliados discutidas por Silva e Leal (2017). Essa incidência reduzida não indica ausência de possibilidade técnica, mas evidencia que a dimensão inclusiva ainda não tem sido integrada como princípio estruturante no desenho dos laboratórios alternativos de baixo custo. Em termos analíticos, observa-se que a noção de democratização, amplamente associada ao “baixo custo”, tem sido predominantemente econômica, e não universal.

A partir dessa constatação, propõe-se um framework de acessibilidade universal que amplie a noção de “baixo custo” para além do critério monetário, incorporando acessibilidade como variável constitutiva do projeto experimental. Tal proposição não surge como recomendação normativa externa ao corpus, mas como resposta às assimetrias identificadas entre acessibilidade financeira e acessibilidade pedagógica. Se o objetivo dos laboratórios alternativos é ampliar o acesso à experimentação científica, a ausência de critérios estruturais de inclusão compromete parcialmente essa finalidade.

A primeira dimensão do framework refere-se à acessibilidade física. Nos estudos analisados, observa-se recorrente preocupação com materiais simples e reutilizáveis, como em Menezes et al. (2024), Silveira e Barthem (2016) e Soga et al. (2017), mas raramente com ergonomia, estabilidade mecânica ou adequação estrutural para diferentes perfis corporais. A acessibilidade física implica considerar contraste visual ampliado, sinalização tátil, estabilidade do aparato, organização espacial dos componentes e possibilidade de manipulação por estudantes com limitações motoras. Em experimentos ópticos que utilizam LEDs, discos giratórios ou lentes ajustáveis, por exemplo, o aumento de contraste, a marcação em relevo, a fixação adequada dos componentes e o posicionamento acessível dos controles podem ampliar significativamente a participação de estudantes com baixa visão ou dificuldades motoras, sem elevar substancialmente o custo do experimento. Trata-se, portanto, de incorporar princípios de design universal ao aparato experimental, e não apenas adaptar dispositivos já construídos.

A segunda dimensão envolve a acessibilidade sensorial, entendida como oferta de múltiplas modalidades de representação do fenômeno físico. Parte das propostas analisadas já utiliza feedback digital, como sensores e aplicativos (PEREIRA et al., 2021; SILVEIRA; GIRARDI, 2017; BAPTISTA FILHO et al., 2024), o que abre possibilidades concretas para integração de sinais sonoros, leitura automatizada de valores, vibração ou descrições estruturadas como formas complementares de percepção. Vieira (2022) demonstra que materiais táteis podem ser incorporados à exploração de fenômenos luminosos, permitindo que

estudantes com deficiência visual participem ativamente da investigação. De modo semelhante, Silva e Leal (2017) apontam que mediações em Libras e recursos visuais ampliados favorecem a compreensão de estudantes surdos. A acessibilidade sensorial, nesse sentido, desloca o experimento de uma dependência exclusiva da visão para um regime multimodal de produção de evidência, ampliando as formas pelas quais o fenômeno pode ser percebido, interpretado e validado.

A terceira dimensão refere-se à acessibilidade cognitiva, aspecto raramente explicitado nos artigos analisados, embora implicitamente presente em propostas que estruturam roteiros em etapas claras de montagem, calibração e coleta de dados (MENEZES et al., 2024; SILVEIRA; BARTHEM, 2016). A organização segmentada de procedimentos, o uso de linguagem clara, a presença de diagramas explicativos, esquemas funcionais e analogias conceituais contribuem para reduzir sobrecarga cognitiva e favorecer compreensão conceitual progressiva. Essa dimensão torna-se particularmente relevante em temas de maior abstração, como Física Moderna, em que fenômenos como efeito fotoelétrico, quantização ou semicondutores exigem mediações conceituais adicionais (ALVES; SANTOS, 2021; VELOSO; SOUSA; MACÊDO, 2022). Assim, acessibilidade cognitiva implica planejar o experimento como trajetória interpretativa estruturada, e não apenas como sequência técnica de procedimentos.

15

A quarta dimensão envolve a acessibilidade tecnológica, especialmente pertinente em um corpus no qual 48,6% dos estudos utilizam dispositivos digitais. A compatibilidade de softwares com leitores de tela, a possibilidade de execução offline, aspecto crucial em contextos com infraestrutura limitada, a documentação clara dos códigos e a simplificação de interfaces constituem elementos centrais dessa dimensão. Experimentos baseados em Arduino e sensores (SILVEIRA; GIRARDI, 2017; PEREIRA et al., 2021) podem incorporar comentários estruturados nos códigos, descrições acessíveis das variáveis e alternativas de visualização sonora ou textual dos dados sem comprometer a proposta original. Nesse sentido, a dimensão tecnológica articula inclusão digital e inclusão pedagógica, ampliando a acessibilidade não apenas ao fenômeno físico, mas também ao processo de coleta e análise de dados.

Ao integrar essas quatro dimensões desde a concepção do experimento, o laboratório alternativo deixa de ser apenas financeiramente acessível e passa a ser estruturalmente inclusivo. Esse deslocamento conceitual está alinhado a diretrizes curriculares como a BNCC (BRASIL, 2018), que enfatiza participação ativa, investigação e uso crítico de tecnologias, e

amplia a noção de democratização da experimentação científica para além do acesso material. Em vez de tratar a inclusão como adaptação posterior, o framework propõe incorporá-la como critério de design experimental, de modo que custo, replicabilidade e acessibilidade sejam considerados simultaneamente.

Dessa forma, a noção de “baixo custo” deixa de ser compreendida apenas como estratégia de redução de despesas e passa a constituir-se como categoria ampliada de equidade experimental. O experimento escolar, nesse modelo, não é apenas instrumento de demonstração conceitual, mas dispositivo de participação ampliada, no qual diferentes perfis sensoriais, cognitivos e tecnológicos podem produzir e interpretar evidências científicas. Tal perspectiva contribui para consolidar laboratórios alternativos de baixo custo não apenas como alternativa material, mas como estratégia pedagógica orientada por princípios de universalidade e participação ampliada.

Limitações da revisão e direções para novas pesquisas

A presente revisão apresenta limitações que devem ser consideradas na interpretação dos resultados. A restrição à língua portuguesa, embora tenha permitido priorizar a produção nacional e analisar com maior profundidade o contexto brasileiro, pode ter excluído debates internacionais relevantes sobre open hardware, *maker education* e experimentação acessível. Além disso, a busca concentrou-se nas bases Google Acadêmico e SciELO, o que, apesar de abranger parcela significativa da produção em Ensino de Física no Brasil, pode não contemplar integralmente estudos indexados em bases internacionais especializadas. Soma-se a isso a variabilidade na definição de “baixo custo”: a ausência de padronização nos valores reportados e nos critérios de cálculo, como custo total do kit, custo por componente ou reaproveitamento de materiais, dificulta comparações diretas entre propostas.

Por fim, não se pode desconsiderar o possível viés de publicação, uma vez que estudos com resultados positivos tendem a ser mais frequentemente divulgados, podendo subrepresentar dificuldades de implementação, limitações técnicas ou falhas experimentais.

A partir dessas limitações, delineiam-se algumas direções para pesquisas futuras. Torna-se necessária a construção de critérios operacionais mais precisos para caracterização de “baixo custo”, incorporando não apenas o valor monetário dos materiais, mas também aspectos como infraestrutura mínima requerida, manutenção, segurança e tempo de preparação docente. Também se recomenda a ampliação de estudos que utilizem instrumentos comparáveis de

avaliação da aprendizagem, favorecendo maior consistência analítica entre diferentes propostas experimentais.

Outra agenda relevante consiste no desenvolvimento sistemático de adaptações inclusivas integradas ao desenho experimental, ampliando iniciativas já identificadas na literatura, como as de Vieira (2022) e Silva e Leal (2017). Finalmente, a investigação de abordagens mistas que articulem Óptica e Física Moderna, com protocolos replicáveis e avaliação estruturada, apresenta-se como campo promissor, dada sua ainda baixa incidência no corpus analisado.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta revisão sistemática teve como objetivo mapear e analisar propostas experimentais de baixo custo aplicadas ao ensino de Óptica e Física Moderna no Brasil, no período de 2015 a 2025. A análise dos 37 estudos incluídos permitiu identificar padrões temáticos, metodológicos e estruturais que caracterizam o campo. Observou-se predominância de propostas em Óptica, recorrência de materiais acessíveis e crescente incorporação de dispositivos digitais, como Arduino e sensores (MENEZES et al., 2024; SILVEIRA; BARTHEM, 2016; PEREIRA et al., 2021). No âmbito da Física Moderna, verificaram-se iniciativas voltadas à transposição didática de fenômenos como efeito fotoelétrico e semicondutores, com variação significativa de custos e diversidade de estratégias de validação pedagógica (SILVEIRA; GIRARDI, 2017; ALVES; SANTOS, 2021).

17

O mapeamento evidenciou lacunas estruturais que delimitam o estágio atual da área. Destacam-se a ausência de critérios padronizados para definição operacional de “baixo custo”, a heterogeneidade na explicitação de instrumentos de avaliação da aprendizagem e a baixa incidência de adaptações inclusivas formalmente descritas, apesar da existência de iniciativas pontuais (VIEIRA, 2022; SILVA; LEAL, 2017). Também se verificou concentração temática em Óptica, com menor presença de abordagens integradas entre Óptica e Física Moderna, indicando potencial ainda pouco explorado para articulações conceituais mais amplas.

A partir desses achados, delineiam-se direções para o desenvolvimento do campo. Torna-se necessária a construção de parâmetros operacionais mais precisos para caracterização de baixo custo, incorporando não apenas o valor monetário dos materiais, mas também aspectos como infraestrutura mínima requerida, manutenção e tempo de preparação docente. Recomenda-se igualmente a ampliação de estudos que utilizem instrumentos comparáveis de

avaliação da aprendizagem, favorecendo maior consistência analítica entre propostas. Além disso, o desenvolvimento sistemático de experimentos concebidos com critérios explícitos de acessibilidade e replicabilidade, conforme discutido no framework proposto, apresenta-se como eixo estratégico para ampliação efetiva da participação escolar na experimentação científica.

A articulação entre experimentação material e instrumentação digital, identificada em parcela significativa dos estudos, indica expansão progressiva de abordagens híbridas. Essa tendência, entretanto, demanda protocolos metodológicos claros e condições formativas adequadas para sua consolidação em larga escala.

Ao consolidar estudos dispersos em diferentes bases e contextos, esta revisão contribui para a organização analítica da produção recente sobre laboratórios alternativos de baixo custo em Óptica e Física Moderna. Mais do que inventariar experiências, o estudo explicita critérios comparativos, custo, replicabilidade, evidência de aprendizagem e inclusão, que podem orientar investigações futuras e subsidiar o planejamento de propostas experimentais fundamentadas em parâmetros mais consistentes e transparentes.

AGRADECIMENTOS E FINANCIAMENTO

Agradecemos à Universidade Federal do Pará (UFPA) – Campus Salinópolis e à Pró-Reitoria de Extensão (PROEX/UFPA) pelo apoio institucional e financeiro à realização desta pesquisa. O estudo integra as ações do Grupo de Estudos Grupo de Estudos TEIA – Tecnologia, Ensino, Inovação e Acessibilidade (UFPA), que atua na formação docente, na pesquisa e no desenvolvimento de tecnologias educacionais acessíveis, voltadas à inclusão e à sustentabilidade na Amazônia.

REFERÊNCIAS

ALVES, E. G.; SANTOS, A. L. M. Efeito fotoelétrico: desenvolvimento de um experimento quantitativo. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, São Paulo, v. 43, n. 1, e20210146, 2021.

BAPTISTA FILHO, M. B. et al. Explorando a absorção óptica através da construção de um calorímetro de baixo custo. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, São Paulo, v. 46, n. 1, e20240205, 2024.

BRASIL. Base Nacional Comum Curricular. Brasília: Ministério da Educação; 2018; 600 p.

FERREIRA, P. H. D.; GHIglieno, F.; TRIBUZI, V. Atividades experimentais no ensino de óptica: uma nova revisão. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, São Paulo, v. 46, n. 1, e20240104, 2024.

FONTELES, Tiago Santos. O impacto da experimentação com kits de baixo custo na aprendizagem de ondas eletromagnéticas para o ensino fundamental. São Bernardo – MA: Curso de Licenciatura em Física, 2024. 50 p. Trabalho de Conclusão de Curso.

FURTADO, Jonas Diniz. Ensino de física e o impacto da experimentação de baixo custo no último ano do nível médio. Belém: Faculdade de Física, Instituto de Ciências Exatas e Naturais, Universidade Federal do Pará, 2023. 48 f. Trabalho de Conclusão de Curso.

VELOSO, Jardel de Carvalho; SOUSA, Maura Vieira do Santos; MACÊDO, Haroldo Reis Alves de. Sobre o ensino de física moderna e contemporânea no ensino médio: uma breve revisão bibliográfica. *EDUCA - Revista Multidisciplinar em Educação*, [S. l.], v. 9, p. 1–27, 2022.

JESUS, Jaykel Joana de; OLIVEIRA, Adhimar Flávio de; SILVA, Agenor Pina da. Digital spectrometer: a proposal to build a Modern Physics experiment for remote learning. *Research, Society and Development*, [S. l.], v. 10, n. 8, e51410817786, 2021.

MENEZES, Vivian Machado de; BRUNORO, Rayssa Predebon; MICHELETTO, Yasmine Miguel Serafini; SOUZA, Vitor Augusto Costa e; FREITAS, Andresa. Estudo de lentes esféricas biconvexas de focos fixo e ajustável construídas com materiais de fácil acesso. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, São Paulo, v. 46, n. 1, e20240244, 2024.

PEREIRA, C. B.; BERLEZE, S. L. M.; SOARES, W. A.; SERBENA, J. P. M. Construção de um luxímetro digital utilizando plataforma Arduino para uso em laboratórios didáticos. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, São Paulo, v. 43, n. 1, e20200502, 2021.

SILVA, José Carlos Xavier; LEAL, Carlos Eduardo dos Santos. Proposta de laboratório de física de baixo custo para escolas da rede pública de ensino médio. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, São Paulo, v. 39, n. 1, 2017..

SILVEIRA, M. V.; BARTHEM, R. B. Disco de Newton com LEDs. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, São Paulo, v. 38, n. 4, e4502, 2016.

SILVEIRA, Sérgio; GIRARDI, Maurício. Desenvolvimento de um kit experimental com Arduino para o ensino de Física Moderna no Ensino Médio. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, São Paulo, v. 39, n. 4, e4502, 2017.

SOGA, Diogo; PAIVA JR., Raul Dias; UENO-GUIMARÃES, Michele Hidemi; MURAMATSU, Mikiya. Um microscópio caseiro simplificado. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, São Paulo, v. 39, n. 4, e4506, 2017.

VIEIRA, E. B. Proposta de experimentos de baixo custo adaptado no ensino de óptica para deficientes visuais. Salgueiro: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sertão Pernambucano, Campus Salgueiro, 2022. Trabalho de Conclusão de Curso.