

**FÍSICA EXPERIMENTAL DE
BAIXO CUSTO COMO
ESTRATÉGIA
INTERDISCIPLINAR PARA A
MODELAGEM MATEMÁTICA
E O DESENVOLVIMENTO DO
PENSAMENTO CIENTÍFICO
NA EDUCAÇÃO BÁSICA**

**LOW-COST EXPERIMENTAL PHYSICS AS AN INTERDISCIPLINARY
STRATEGY FOR MATHEMATICAL MODELING AND THE DEVELOPMENT OF
SCIENTIFIC THINKING IN BASIC EDUCATION**

Ciências Exatas e da Terra, Ciências Sociais Aplicadas, Linguística &
Letras e Artes

• 13/09/2026

REGISTRO DOI: [10.70773/revistatopicos/789162357](https://doi.org/10.70773/revistatopicos/789162357)

Fernando Banen Calero¹

Lindonjonson Souza Feitosa²

Regivaldo Cláudio de Freitas³

José Rafael dos Santos⁴

Inaldo Jerfson Sobreira da Silva⁵

Agnaldo Braga Lima⁶

RESUMO

A experimentação ocupa posição histórica no ensino de Física, mas sua presença na Educação Básica ainda é condicionada por limitações de infraestrutura, disponibilidade de equipamentos, tempo pedagógico, formação docente e concepções didáticas que frequentemente reduzem o laboratório à demonstração de resultados previamente conhecidos. Nesse contexto, experimentos de baixo custo, construídos com materiais cotidianos, dispositivos reaproveitados, sensores simples, plataformas eletrônicas e tecnologias móveis, podem ampliar o acesso à atividade experimental e favorecer práticas de investigação articuladas à modelagem matemática. Este artigo analisa criticamente as contribuições da Física experimental de baixo custo para a construção do pensamento científico e para a integração entre Física e Matemática na Educação Básica, distinguindo a simples reprodução de fenômenos de práticas nas quais estudantes formulam problemas, produzem medidas, representam dados, constroem modelos, estimam parâmetros, analisam incertezas e confrontam previsões teóricas com resultados empíricos. Metodologicamente, desenvolveu-se uma revisão sistematizada qualitativa com síntese narrativa, fundamentada em revisões sistemáticas, metanálises, pesquisas em ensino de Física, estudos sobre aprendizagem por investigação, modelagem, atividades laboratoriais e utilização educacional de smartphones e sensores. Evidências consolidadas indicam que metodologias investigativas e formas de engajamento ativo podem favorecer aprendizagem conceitual, embora seus efeitos dependam da existência de orientação pedagógica adequada. Estudos recentes sobre sensores de smartphones ampliam essa perspectiva ao demonstrar sua capacidade de transformar dispositivos cotidianos em instrumentos de medida e de aproximar coleta experimental, produção de

gráficos e interpretação matemática. A literatura brasileira apresenta ainda experiências de construção de laboratórios, fotogates, experimentos ópticos e sistemas baseados em Arduino com custos reduzidos, demonstrando a viabilidade técnica de práticas experimentais em contextos de infraestrutura limitada. Entretanto, baixo custo não deve ser confundido com baixa exigência metodológica: resultados educacionais dependem da problematização, da qualidade das medidas, do tratamento das incertezas e da integração entre teoria, modelo e evidência. Conclui-se que a Física experimental de baixo custo pode funcionar como eixo interdisciplinar de elevada potência formativa quando organizada como processo de investigação e modelagem, possibilitando que a Matemática deixe de aparecer apenas como linguagem operacional de fórmulas e passe a desempenhar funções de representação, previsão, análise e validação de fenômenos físicos.

Palavras-chave: Ensino de Física; experimentação de baixo custo; modelagem matemática; pensamento científico; Educação Básica; interdisciplinaridade.

ABSTRACT

Experimental activities have historically occupied an important place in physics education, yet their presence in basic education remains constrained by infrastructure, equipment availability, instructional time, teacher preparation, and didactic approaches that often reduce laboratory work to the demonstration of previously known results. Within this context, low-cost experiments using everyday materials, reused devices, simple sensors, electronic platforms, and mobile technologies may broaden access to experimentation and support inquiry practices integrated with mathematical modeling. This article critically analyzes the contributions of low-cost experimental physics to the development

of scientific thinking and to the integration of physics and mathematics in basic education, distinguishing the mere reproduction of phenomena from practices in which students formulate problems, collect measurements, represent data, construct models, estimate parameters, analyze uncertainty, and compare theoretical predictions with empirical results. Methodologically, a qualitative systematized review with narrative synthesis was conducted, drawing on systematic reviews, meta-analyses, physics education research, studies on inquiry-based learning, modeling, laboratory activities, and the educational use of smartphones and sensors. Consolidated evidence indicates that inquiry-oriented and active-engagement approaches may improve conceptual learning, provided that appropriate instructional guidance is offered. Recent research on smartphone sensors further demonstrates the potential of everyday mobile devices as measurement instruments capable of connecting experimental data collection, graphical representation, and mathematical interpretation. Brazilian literature also describes low-cost laboratories, photogates, optical experiments, and Arduino-based systems, demonstrating the technical feasibility of experimental activities under limited infrastructure. Low cost, however, should not be confused with low methodological rigor: educational outcomes depend on problem formulation, measurement quality, uncertainty treatment, and integration among theory, models, and evidence. Low-cost experimental physics can therefore become a powerful interdisciplinary axis when organized as an inquiry and modeling process, enabling mathematics to move beyond the operational manipulation of formulas and assume functions of representation, prediction, analysis, and validation of physical phenomena.

Keywords: Physics education; low-cost experimentation;

mathematical modeling; scientific thinking; basic education; interdisciplinarity.

1. INTRODUÇÃO

O ensino de Física na Educação Básica apresenta uma dificuldade estrutural relacionada à necessidade de aproximar construções teóricas relativamente abstratas de fenômenos que fazem parte da experiência concreta dos estudantes. Movimento, força, energia, temperatura, eletricidade, som, luz e pressão são encontrados cotidianamente, mas a Física escolar procura compreendê-los por meio de sistemas conceituais, grandezas mensuráveis e modelos matemáticos que não se confundem com a percepção imediata. Essa passagem entre experiência e representação constitui parte essencial da atividade científica, porém pode desaparecer em práticas escolares excessivamente centradas na apresentação de fórmulas e na resolução algorítmica de exercícios. Quando isso ocorre, a Matemática tende a ser percebida como obstáculo externo à compreensão da Física, e o conhecimento físico pode parecer um conjunto de equações previamente estabelecidas cuja validade não precisa ser investigada. A experimentação oferece uma possibilidade de modificar essa relação porque permite produzir dados, confrontar previsões e tornar visível o processo mediante o qual quantidades matemáticas são associadas aos fenômenos. Seu potencial educativo, contudo, depende menos da presença física de equipamentos do que da natureza das atividades intelectuais desenvolvidas em torno deles.

A pesquisa em ensino de Física demonstrou há décadas que a simples exposição a aulas convencionais não garante a substituição de concepções intuitivas por estruturas conceituais cientificamente

adequadas. Hestenes, Wells e Swackhamer (1992), ao desenvolverem o *Force Concept Inventory*, contribuíram para explicitar a persistência de concepções alternativas sobre força e movimento mesmo depois de cursos formais de mecânica. Posteriormente, Hake (1998) analisou dados de 6.542 estudantes distribuídos por 62 cursos introdutórios e encontrou resultados substancialmente melhores nas turmas que empregavam estratégias de engajamento interativo em comparação às abordagens predominantemente tradicionais. Embora o estudo incluía populações do Ensino Médio e do Ensino Superior e não investigue especificamente experimentos de baixo custo, sua importância para o presente debate encontra-se na demonstração de que o envolvimento intelectual ativo do aprendiz constitui variável relevante para a aprendizagem conceitual. O laboratório, nessa perspectiva, precisa ser entendido menos como lugar físico e mais como espaço de atividade em que o estudante toma decisões, interpreta evidências e constrói relações entre grandezas.

Essa compreensão impede que experimentação seja tratada automaticamente como sinônimo de ensino ativo. Um experimento estruturado como receita rígida, no qual os estudantes recebem antecipadamente o objetivo, o procedimento, a equação a ser utilizada e o resultado esperado, pode exigir manipulação de objetos sem produzir investigação. Os alunos podem seguir etapas, registrar números e confirmar uma lei sem compreender por que determinadas grandezas foram medidas ou como os dados sustentam a conclusão apresentada. Hofstein e Lunetta (2004), em revisão influente sobre o laboratório no ensino de Ciências, argumentaram que os benefícios do trabalho experimental dependem da integração entre objetivos conceituais, procedimentos científicos, colaboração e reflexão. A simples

presença no laboratório não constitui garantia de compreensão. Essa conclusão permanece particularmente importante para propostas de baixo custo, pois substituir equipamentos industriais por materiais improvisados não altera a pedagogia quando o estudante continua executando instruções sem formular perguntas ou interpretar resultados.

A expressão “baixo custo” também necessita de precisão conceitual. Não se trata de defender a substituição universal de laboratórios equipados por materiais simples ou de sugerir que instrumentos de menor precisão sejam pedagogicamente superiores. Equipamentos especializados desempenham funções indispensáveis em determinadas práticas e permitem acesso a fenômenos que materiais cotidianos não conseguem medir adequadamente. A experimentação de baixo custo responde a outro problema: a possibilidade de ampliar a frequência, a capilaridade e a autonomia das experiências, utilizando materiais acessíveis para construir situações nas quais conceitos físicos e procedimentos de investigação possam ser explorados. Silva e Leal (2017), por exemplo, apresentaram uma proposta de laboratório destinado a escolas públicas de Ensino Médio utilizando materiais recicláveis e de baixo custo, contemplando fenômenos de mecânica, óptica, eletricidade, magnetismo, hidrostática, termologia e Física Moderna. O valor educacional da proposta está associado à possibilidade de tornar a experimentação viável em contextos nos quais a ausência de equipamentos comerciais costuma ser apresentada como justificativa para não realizar atividades práticas.

Diversos exemplos publicados na literatura brasileira mostram que essa estratégia pode avançar além da demonstração qualitativa. França e Lopez (2022) utilizaram componentes de dispositivos

eletrônicos em desuso, aplicativos e softwares gratuitos para investigar a Lei de Malus, conectando rotação dos polarizadores, intensidade luminosa e uma relação matemática passível de comparação experimental. Cavalcante e colaboradores desenvolveram sistemas baseados em Arduino para abordar tópicos de Física Moderna no Ensino Médio, enquanto instrumentos como fotogates de baixo custo permitem transformar movimentos cotidianos em séries temporais mensuráveis. A relevância dessas propostas para a modelagem matemática está justamente na existência de dados: o experimento deixa de ser apenas ilustração visual e passa a fornecer valores que podem ser organizados, representados graficamente, ajustados por funções e comparados com previsões.

As tecnologias móveis ampliaram profundamente esse horizonte. Smartphones modernos incorporam acelerômetros, giroscópios, magnetômetros, microfones, câmeras, sensores de luminosidade e, em determinados aparelhos, barômetros e outros dispositivos de medição. Aplicativos permitem registrar dados com resolução temporal elevada e exportá-los para planilhas ou ambientes de análise, transformando um objeto presente no cotidiano de grande parcela dos estudantes em plataforma experimental. A revisão sistemática de Ubben *et al.* (2023) examinou o uso de smartphones na educação científica e evidenciou a variedade de funções educacionais atribuídas aos dispositivos. No contexto brasileiro, Fiorentin, Alves e Pastorio (2025) localizaram inicialmente 278 trabalhos e analisaram 51 artigos de acesso aberto sobre smartphones no ensino de Física, observando predomínio de práticas experimentais e presença especialmente significativa no Ensino Médio e Superior. Uma revisão internacional de Choi, Noh e Choi (2025) identificou 86 publicações sobre experimentos com

sensores de smartphones e mostrou concentração em mecânica, aceleração, luz e som, ao mesmo tempo em que destacou a necessidade de mais pesquisas destinadas especificamente ao ambiente escolar.

Uma síntese ainda mais recente, conduzida por Revano e Antonio (2026), reuniu 14 estudos publicados entre 2015 e 2025, envolvendo 883 estudantes, e encontrou efeito positivo de magnitude média sobre a aprendizagem de Física associada a experimentos com sensores de smartphones. Embora os autores tenham identificado heterogeneidade de acordo com país, nível educacional e duração das intervenções, a análise reforça a hipótese de que instrumentos móveis podem favorecer aprendizagem quando utilizados para produzir e interpretar dados. Gasparini *et al.* (2026), em pesquisa publicada no *Physical Review Physics Education Research*, investigaram smartphones e tablets como ferramentas experimentais em aulas de Física, destacando seu potencial para conectar contextos cotidianos, motivação e múltiplas representações, como vídeos, tabelas e gráficos. Esses resultados não autorizam concluir que o smartphone seja intrinsecamente superior a outros instrumentos, mas indicam que a redução das barreiras de acesso à medição pode ampliar as oportunidades para práticas experimentais.

A conexão com a Matemática constitui um dos aspectos mais relevantes dessa transformação. A relação entre Física e Matemática frequentemente é apresentada aos estudantes de maneira já concluída: primeiro se introduz uma equação e, em seguida, aplica-se a fórmula a exercícios numéricos. Na atividade científica, entretanto, a relação é mais complexa. Grandezas são definidas, hipóteses são formuladas, variáveis são selecionadas, medidas

apresentam incerteza, dados são representados e modelos são construídos ou testados. Hestenes (1987) argumentou que a modelagem matemática do mundo físico deveria ocupar posição central no ensino da disciplina, e Halloun e Hestenes (1987) desenvolveram uma abordagem de instrução em mecânica orientada pela construção e utilização de modelos. Halloun (1996) aprofundou esse princípio ao apresentar a modelagem esquemática como estrutura epistemológica para aprendizagem significativa da Física, compreendendo modelar como selecionar, construir, analisar, validar e aplicar representações de sistemas físicos.

A literatura recente confirma que a Matemática exerce múltiplas funções na aprendizagem de Física e não pode ser reduzida à realização de cálculos. Palmgren, Kokkonen e Bruun (2025) realizaram revisão sistemática de 122 artigos publicados entre 2000 e 2023 sobre os papéis da Matemática na educação em Física e identificaram diferentes categorias relacionadas a raciocínio físico, solução de problemas, modelagem e experimentos. Essa multiplicidade é particularmente importante para a Educação Básica, porque a dificuldade dos estudantes com a formalização matemática pode ser intensificada quando símbolos são apresentados sem conexão com fenômenos e medidas. Uma experiência simples de queda, oscilação, movimento em plano inclinado, resfriamento ou propagação do som permite inverter parcialmente essa sequência: os alunos observam um fenômeno, definem grandezas, coletam dados, procuram regularidades e utilizam ferramentas matemáticas para organizar aquilo que ocorreu.

A modelagem matemática, portanto, não consiste apenas em ajustar uma função conhecida a números coletados. Modelar

significa escolher quais características do fenômeno serão representadas, formular pressupostos, construir relações, confrontar resultados e analisar os limites da representação utilizada. Uma esfera descendo um plano inclinado pode ser modelada inicialmente ignorando resistência do ar, deformações e irregularidades da superfície; quando os resultados divergirem das previsões, a discrepância poderá ser utilizada para discutir as simplificações do modelo. Essa dinâmica permite ensinar simultaneamente Física, Matemática e natureza da Ciência. O erro experimental deixa de aparecer exclusivamente como defeito e passa a desempenhar papel epistemológico: a distância entre dado e previsão pode revelar limitações da medida, do procedimento ou do próprio modelo.

A aprendizagem por investigação oferece um referencial complementar para compreender essa prática. Furtak *et al.* (2012), em metanálise de 37 estudos experimentais e quase-experimentais, encontraram efeito médio positivo de 0,50 para abordagens investigativas no ensino de Ciências. Entretanto, investigação não significa abandono da orientação pedagógica. Lazonder e Harmsen (2016), ao sintetizarem 72 estudos, encontraram efeitos positivos da orientação sobre atividades de aprendizagem, desempenho e resultados educacionais, mostrando que estudantes se beneficiam de apoio estruturado durante processos de investigação. A conclusão é importante porque propostas de experimentação de baixo custo podem cair no extremo oposto ao roteiro rígido: fornecer materiais e solicitar que estudantes “descubram” uma lei sem critérios, conhecimentos ou apoio suficientes. O desafio didático está em criar graus progressivos de autonomia, permitindo escolhas reais sem retirar os andaimes necessários.

No contexto brasileiro, a interdisciplinaridade entre Física e Matemática encontra respaldo também na organização curricular contemporânea da Educação Básica, que valoriza investigação, argumentação, análise de dados e utilização de modelos. A Base Nacional Comum Curricular enfatiza competências relacionadas ao raciocínio científico, à resolução de problemas e à utilização de conhecimentos matemáticos e científicos em situações contextualizadas (Brasil, 2018). Contudo, a interdisciplinaridade não se realiza apenas porque professores de duas disciplinas trabalham o mesmo tema no mesmo período. Uma integração substantiva ocorre quando conceitos e procedimentos de uma área tornam-se necessários para resolver problemas construídos na outra. A experiência física pode fornecer uma pergunta cuja resposta exige função, proporcionalidade, estatística, regressão ou análise gráfica, enquanto a Matemática deixa de operar exclusivamente sobre objetos abstratos e passa a participar de uma investigação empírica.

Essa articulação apresenta potencial especialmente relevante para a formação do pensamento científico. A Ciência escolar frequentemente é apresentada como conjunto de resultados consolidados, apagando processos de construção, controvérsia, incerteza e revisão. Um experimento simples pode tornar esses processos visíveis. Medidas repetidas não coincidem exatamente; gráficos apresentam dispersão; o resultado obtido não é idêntico ao valor do livro; um grupo pode produzir dados diferentes de outro; um modelo ajusta determinadas regiões e falha em outras. Quando esses eventos são tratados como parte da investigação, e não como inconvenientes a serem escondidos, o estudante aprende que evidência não corresponde a um número perfeito obtido uma única vez.

Diante desse cenário, a questão norteadora deste estudo é: **de que maneira a Física experimental de baixo custo pode funcionar como estratégia interdisciplinar para integrar modelagem matemática, investigação e desenvolvimento do pensamento científico na Educação Básica, e quais condições pedagógicas são necessárias para que experiências acessíveis ultrapassem a mera demonstração de fenômenos?** O objetivo geral consiste em analisar criticamente o potencial educacional da experimentação de baixo custo no ensino de Física. Como objetivos específicos, pretende-se discutir os fundamentos epistemológicos do laboratório escolar; examinar a relação entre experimentação e modelagem matemática; analisar evidências sobre aprendizagem investigativa e engajamento ativo; discutir a utilização de smartphones, Arduino e instrumentos acessíveis; identificar estratégias para trabalhar medidas, gráficos e incertezas; analisar limites relacionados a infraestrutura, formação docente e equidade; e propor uma perspectiva integrada em que experimentação, Matemática e pensamento científico componham uma única prática investigativa.

2. METODOLOGIA

O presente artigo foi desenvolvido como **revisão sistematizada qualitativa com síntese narrativa**, opção metodológica adotada em razão da heterogeneidade da literatura relacionada à Física experimental, à modelagem matemática e ao pensamento científico. O objeto de investigação combina diferentes tradições de pesquisa: estudos sobre laboratório didático, pesquisas em ensino de Física, trabalhos sobre *Modeling Instruction*, metanálises de aprendizagem investigativa, revisões sobre modelagem matemática, propostas de construção de equipamentos de baixo custo e investigações sobre sensores de smartphones. Esses estudos

não utilizam os mesmos desfechos ou desenhos metodológicos. Enquanto algumas pesquisas avaliam compreensão conceitual, outras analisam habilidades experimentais, motivação, produção de modelos, solução de problemas, desempenho matemático ou viabilidade técnica de instrumentos. Essa diversidade impede a construção de uma única estimativa quantitativa própria sem reunir indevidamente resultados de natureza distinta.

A busca bibliográfica foi atualizada até setembro de 2026 e orientada por combinações de descritores relacionados a “physics education”, “low-cost experiments”, “low-cost laboratory”, “experimental physics education”, “inquiry-based science”, “physics modeling”, “mathematical modeling”, “mathematics in physics education”, “scientific thinking”, “smartphone sensors”, “mobile devices physics experiment”, “Arduino physics education”, “hands-on science” e “basic education”. Foram priorizados artigos revisados por pares, revisões sistemáticas, metanálises e estudos publicados em periódicos especializados em ensino de Física, Educação em Ciências e Educação Matemática. A literatura brasileira foi incorporada para assegurar correspondência com as condições materiais da Educação Básica nacional, especialmente trabalhos da *Revista Brasileira de Ensino de Física* sobre laboratórios acessíveis, sensores, óptica, Arduino e instrumentos de medição.

Foram considerados elegíveis estudos que abordassem pelo menos uma das dimensões centrais da revisão: atividade experimental no ensino de Física ou Ciências; modelagem física ou matemática; aprendizagem por investigação; utilização de materiais ou instrumentos de custo reduzido; tecnologias móveis empregadas como ferramentas de medição; ou práticas destinadas a conectar experimentação a raciocínio científico. Estudos de Ensino Superior

foram incorporados de maneira seletiva quando abordavam princípios gerais de modelagem ou instrumentação que possuem implicações claras para a Educação Básica, mas suas conclusões não foram automaticamente generalizadas para estudantes escolares. Essa cautela é particularmente importante na literatura sobre smartphones, na qual parte considerável das experiências foi conduzida com universitários.

A síntese foi organizada em cinco eixos analíticos. O primeiro examina **experimentação e epistemologia escolar**, distinguindo demonstração, verificação e investigação. O segundo aborda **modelagem matemática e produção de representações**, enfatizando relações entre fenômeno, dados, função e modelo. O terceiro analisa **experimentação de baixo custo e tecnologias acessíveis**, incluindo materiais cotidianos, smartphones, Arduino e sensores. O quarto discute **pensamento científico e aprendizagem por investigação**, incorporando formulação de hipóteses, controle de variáveis, análise de incertezas e argumentação baseada em evidências. O quinto eixo reúne **condições de implementação**, como formação docente, planejamento interdisciplinar, acessibilidade, segurança e avaliação.

A análise também distinguiu diferentes significados de “baixo custo”. Materiais cotidianos e reciclados podem reduzir gastos, enquanto sensores presentes em smartphones diminuem a necessidade de aquisição de instrumentos específicos, mas dispositivos móveis não são universalmente acessíveis e podem introduzir desigualdades quando se pressupõe que todos os estudantes possuam aparelhos compatíveis. Plataformas como Arduino apresentam custo relativamente reduzido em comparação a determinados instrumentos comerciais, porém exigem componentes,

programação e formação técnica. Portanto, a expressão foi utilizada de maneira relacional e contextual, e não como sinônimo de custo zero.

Outro cuidado metodológico consistiu em diferenciar **viabilidade técnica** de **efetividade educacional**. Um artigo que demonstra que um fotogate barato mede intervalos de tempo com precisão suficiente prova a utilidade instrumental do dispositivo, mas não demonstra por si só que sua utilização melhora aprendizagem. Da mesma forma, uma proposta experimental visualmente atraente não constitui evidência de desenvolvimento do pensamento científico. Estudos de construção de equipamentos foram utilizados para mostrar possibilidades didáticas e tecnológicas, enquanto afirmações sobre aprendizagem foram fundamentadas prioritariamente em pesquisas educacionais, revisões ou metanálises.

A distinção entre **modelagem matemática** e **aplicação de fórmulas** também orientou a síntese. Seguindo a perspectiva de Hestenes (1987) e Halloun (1996), um modelo é compreendido como representação estruturada de um sistema físico empregada para descrição, explicação e previsão. Assim, utilizar $v = v_0 + at$ depois de receber todos os valores não caracteriza, isoladamente, uma atividade de modelagem. A experiência assume caráter modelizador quando estudantes precisam decidir quais grandezas são pertinentes, estabelecer relações, estimar parâmetros, confrontar os resultados com dados e avaliar o domínio de validade da expressão utilizada.

Foi igualmente preservada uma concepção ampla de pensamento científico. O termo não foi empregado como sinônimo de elevado

desempenho em prova de Física. Ele abrange atividades como formular perguntas investigáveis, construir hipóteses, selecionar variáveis, planejar medidas, representar dados, avaliar evidências, analisar incerteza, comparar modelos e revisar explicações. Essa compreensão dialoga com referenciais contemporâneos que tratam construção e uso de modelos, planejamento de investigações e utilização de Matemática como práticas constitutivas da Ciência, e não como atividades suplementares.

Não foi construído fluxograma PRISMA específico para este manuscrito. Embora tenham sido realizadas buscas bibliográficas estruturadas e utilizadas revisões sistemáticas publicadas como fontes centrais, não houve exportação integral dos registros, deduplicação formal, dupla triagem independente e documentação de exclusões em todas as bases consultadas. Por esse motivo, nenhuma quantidade artificial de artigos identificados ou excluídos foi criada. A denominação **revisão sistematizada qualitativa com síntese narrativa** expressa de maneira mais fiel o procedimento realizado e evita produzir a aparência de uma revisão sistemática estrita sem trilha auditável correspondente.

3. EXPERIMENTAÇÃO, MODELAGEM E CONSTRUÇÃO DO CONHECIMENTO FÍSICO

A atividade experimental possui valor educacional justamente porque permite explicitar uma característica fundamental da Física: suas construções teóricas mantêm relação sistemática com fenômenos mensuráveis. Essa afirmação não significa adotar uma concepção empirista segundo a qual leis seriam simplesmente “descobertas” pela observação neutra dos dados. Qualquer experimento pressupõe escolhas teóricas. Medir o período de um

pêndulo, por exemplo, exige reconhecer determinado movimento como oscilação, definir o que será considerado um ciclo, selecionar uma grandeza temporal e decidir quais condições poderão ser desprezadas. O dado não chega à sala de aula sem interpretação. Ensinar experimentação de maneira epistemologicamente rica significa mostrar justamente essa relação entre observação e construção conceitual.

Nesse sentido, existe diferença significativa entre demonstração e investigação. Uma demonstração pode possuir elevado valor didático quando o objetivo é tornar visível um efeito ou criar um problema. Observar interferência, indução eletromagnética ou expansão térmica pode estimular curiosidade e fornecer experiência concreta para discussão. O problema aparece quando toda atividade experimental é reduzida a demonstrações cujo resultado já é interpretado pelo professor. O estudante vê aquilo que deveria aprender, mas não participa da produção de razões que sustentam a explicação. A experimentação investigativa acrescenta uma dimensão de decisão: alguma parte do procedimento, da previsão, da análise ou da interpretação permanece aberta.

A metanálise de Furtak *et al.* (2012) ajuda a compreender por que essa abertura precisa ser cuidadosamente estruturada. Os autores analisaram 37 estudos experimentais e quase-experimentais e encontraram efeito médio positivo das estratégias investigativas, mas também identificaram diferentes graus de direcionamento docente. A conclusão não apoia uma pedagogia de descoberta completamente desassistida. Lazonder e Harmsen (2016), ao sintetizarem 72 estudos, mostraram que orientação adequada favorece tanto o desempenho durante a investigação quanto os resultados de aprendizagem. Na Educação Básica, essa evidência

sugere uma progressão: estudantes iniciantes podem receber maior apoio para delimitar variáveis e organizar medidas; à medida que desenvolvem competências, partes do processo podem se tornar mais abertas.

Uma atividade sobre pêndulo ilustra essa progressão. Em um roteiro fechado, o estudante mede cinco períodos, calcula uma média e substitui o valor em uma equação. Em uma proposta investigativa, pode receber a pergunta sobre quais fatores influenciam o período e discutir inicialmente comprimento, massa e amplitude. A turma constrói hipóteses, define quais variáveis serão mantidas constantes, realiza séries de medidas e representa resultados. A Matemática surge, então, da necessidade de comparar relações: período versus comprimento, período versus raiz quadrada do comprimento ou período ao quadrado versus comprimento. O gráfico passa a ter significado epistemológico, porque auxilia a decidir qual modelo descreve melhor os dados.

A linearização é um exemplo especialmente poderoso da integração entre Física e Matemática. Em uma cultura escolar centrada na execução algébrica, transformar $T = 2\pi\sqrt{L/g}$ em $T^2 = (4\pi^2 / g)L$ pode parecer apenas manipulação simbólica. Quando a transformação permite construir um gráfico linear e utilizar sua inclinação para estimar g , a álgebra passa a desempenhar função científica. A constante angular deixa de ser um coeficiente abstrato e se transforma em ponte entre representação matemática e propriedade física. A experiência pode ainda mostrar que o valor estimado não coincide exatamente com $9,8 \text{ m/s}^2$, abrindo espaço para discutir incerteza e aproximações.

Essa dinâmica corresponde à perspectiva proposta por Hestenes (1987), segundo a qual a modelagem matemática deveria constituir o núcleo da instrução em Física. O modelo não é apenas uma equação; envolve sistema, objetos, interações, variáveis, representações e condições de validade. Halloun (1996) descreve modelagem como processo que inclui seleção, construção, análise, validação e aplicação. Essas etapas podem ser adaptadas à Educação Básica sem exigir formalismo excessivo. Perguntar “em que situações esse modelo funciona?” já introduz uma reflexão sobre domínio de validade.

A revisão sistemática de Palmgren, Kokkonen e Bruun (2025), envolvendo 122 artigos sobre os papéis da Matemática no ensino de Física, reforça a multiplicidade dessas relações. Matemática participa da representação, do raciocínio, da experimentação e da solução de problemas, não sendo apenas ferramenta de cálculo. Essa conclusão ajuda a explicar uma dificuldade recorrente: estudantes podem conhecer procedimentos matemáticos e ainda não conseguir utilizá-los em Física porque não reconhecem o significado físico das operações. Um gráfico de velocidade versus tempo não deve ser tratado apenas como objeto cartesiano; sua inclinação e sua área carregam interpretações específicas.

Experimentos de baixo custo podem fornecer justamente o contexto no qual essas interpretações são construídas. Uma rampa confeccionada com materiais simples, uma esfera, uma fita métrica e um smartphone podem produzir dados suficientes para analisar movimento. A câmera permite extração de posição em diferentes instantes; um acelerômetro pode registrar componentes da aceleração; um fotogate artesanal pode fornecer intervalos de tempo. O equipamento não precisa reproduzir a precisão de um

laboratório profissional para que a investigação seja conceitualmente rica. Ao contrário, limitações de precisão podem ser utilizadas pedagogicamente para discutir resolução e erro.

A linguagem estatística assume importância nesse processo. Estudantes tendem a procurar “o valor certo” de uma medida e podem interpretar variação entre repetições como evidência de que fizeram algo errado. Introduzir médias, amplitude, desvio, resolução instrumental e barras de incerteza permite construir uma concepção mais realista da medição. Não é necessário iniciar com uma teoria estatística avançada. Já nos anos finais do Ensino Fundamental, pode-se comparar conjuntos de medidas e discutir qual resultado parece mais confiável; no Ensino Médio, a análise pode incorporar propagação simples de incertezas, regressão e resíduos.

A análise de resíduos é particularmente valiosa porque mostra que um bom ajuste não se resume a produzir uma curva visualmente próxima. Se os resíduos apresentarem padrão sistemático, o modelo pode estar deixando de representar algum aspecto do fenômeno. Essa discussão aproxima os estudantes de práticas científicas autênticas e mostra que Matemática não serve apenas para confirmar a teoria, podendo revelar inadequações.

A interdisciplinaridade adquire, assim, uma forma epistemicamente produtiva. Física fornece fenômenos e modelos; Matemática oferece formas de representar relações; Estatística auxilia a interpretar variabilidade; tecnologia permite coletar e processar dados; linguagem científica torna possível comunicar conclusões. O resultado não é apenas ensinar conteúdos de várias disciplinas

simultaneamente, mas construir uma tarefa que exige integração real entre elas.

4. EXPERIMENTAÇÃO DE BAIXO CUSTO E TECNOLOGIAS ACESSÍVEIS

A principal contribuição dos experimentos de baixo custo é reduzir a dependência de uma infraestrutura especializada para que estudantes realizem medições e manipulem sistemas físicos. Silva e Leal (2017) demonstraram que materiais recicláveis e componentes acessíveis permitem construir um conjunto amplo de atividades experimentais para o Ensino Médio. A proposta compreende diferentes áreas da Física e mostra que escassez de recursos financeiros não implica necessariamente ausência total de experiências práticas. Contudo, a qualidade pedagógica depende da utilização que se faz desses materiais. Um dispositivo construído pelos próprios estudantes pode possuir vantagem adicional ao tornar sua arquitetura compreensível, permitindo discutir como a medição é produzida.

Esse aspecto é frequentemente ocultado por equipamentos comerciais fechados. Um sensor digital pode apresentar um número no visor sem que o estudante compreenda o processo de transdução. Ao construir um fotogate utilizando um resistor dependente de luz e uma fonte luminosa, torna-se possível discutir simultaneamente detecção, tempo, eletricidade e instrumentação. O trabalho publicado em 2018 na *Revista Brasileira de Ensino de Física* sobre desenvolvimento e validação de fotogate de baixo custo mostra como instrumentos simples podem produzir medidas úteis e ser comparados a referências experimentais. A construção do

instrumento deixa de ser apenas solução econômica e passa a fazer parte da aprendizagem sobre como dados são gerados.

O Arduino acrescentou novas possibilidades a essa instrumentação. A plataforma permite conectar sensores, automatizar aquisição e produzir interfaces com computadores ou dispositivos móveis. No ensino de Física Moderna, foram desenvolvidos kits acessíveis destinados ao estudo do efeito fotoelétrico, mostrando que mesmo temas frequentemente apresentados apenas teoricamente podem receber componente experimental. A integração entre eletrônica, programação e Física também cria oportunidades para atividades interdisciplinares, desde que o aprendizado do código não se torne objetivo concorrente capaz de obscurecer o conceito físico.

Existe uma diferença importante entre utilizar uma plataforma pronta e compreender o princípio da medida. Quando um sensor de ultrassom fornece distância, o estudante pode simplesmente utilizar a coluna numérica produzida; alternativamente, pode estudar o princípio temporal pelo qual a distância é determinada. A profundidade apropriada depende do objetivo didático. Nem toda experiência precisa incluir engenharia completa do instrumento, mas é pedagogicamente importante evitar a naturalização dos dados como se fossem produzidos sem mediação tecnológica.

Os smartphones constituem um caso particularmente interessante porque aproximam instrumento científico e cotidiano. Ubben *et al.* (2023) mostram a variedade de usos desses dispositivos na educação científica, enquanto Fiorentin, Alves e Pastorio (2025) identificam forte presença de atividades experimentais na literatura brasileira. A possibilidade de medir aceleração, rotação, som, luminosidade e campo magnético permite abordar fenômenos diversos sem

aquisição de sensores individuais especializados. Além disso, os dados podem ser visualizados imediatamente em gráficos, reduzindo o intervalo entre fenômeno e representação.

Na mecânica, acelerômetros e giroscópios permitem investigar movimentos de elevadores, oscilações, rotações e sistemas em planos inclinados. O microfone pode ser empregado em medidas de frequência e fenômenos acústicos; a câmera possibilita análise de trajetória; o sensor de luminosidade contribui para óptica; magnetômetros podem mapear campos. A revisão de Choi, Noh e Choi (2025) mostra que mecânica, aceleração, luz e som se encontram entre as áreas mais exploradas na literatura. A concentração também revela lacunas: determinados sensores e domínios permanecem menos investigados, e a pesquisa com estudantes dos níveis escolares é menor do que aquela realizada com universitários.

A revisão de Revano e Antonio (2026) acrescenta evidência sobre aprendizagem ao sintetizar 14 estudos envolvendo 883 participantes e encontrar efeito positivo médio do uso de sensores de smartphones. Os autores identificaram variação associada ao contexto e à duração das intervenções, o que impede tratar o resultado como prova de benefício universal. A tecnologia pode reduzir obstáculos instrumentais, mas não substitui o desenho pedagógico. Gasparini *et al.* (2026) chegam a uma conclusão compatível ao discutir como dispositivos móveis podem integrar contextos autênticos, medições e múltiplas representações.

A multiplicidade representacional é especialmente relevante para modelagem. Um único experimento pode fornecer vídeo, gráfico temporal e tabela. Em uma experiência de oscilação, por exemplo, o

estudante pode observar visualmente o movimento, examinar o gráfico da aceleração e calcular o período. A coordenação entre essas representações exige raciocínio e pode ajudar a construir relações entre experiência sensível e abstração matemática.

Entretanto, a utilização de smartphones também apresenta problemas de equidade. Não se deve presumir que todos os estudantes possuam aparelhos compatíveis, bateria disponível, sensores equivalentes ou autorização familiar para uso. Em escolas públicas, uma proposta que exige um dispositivo por aluno pode aumentar desigualdades. A organização em grupos, utilização de aparelhos da escola ou empréstimo de equipamentos pode reduzir esse problema. O princípio do baixo custo precisa ser avaliado do ponto de vista institucional e coletivo, e não apenas pela existência do aparelho no mercado.

A variedade entre dispositivos também constitui fonte de incerteza experimental. Frequência de amostragem, calibração, posicionamento dos sensores e desempenho do software podem variar. Essas diferenças não necessariamente inviabilizam a atividade e podem, em alguns casos, enriquecer a discussão sobre instrumentos. Comparar medidas produzidas por aparelhos diferentes permite introduzir questões de calibração e reprodutibilidade.

Os materiais cotidianos apresentam problema semelhante. Uma régua, garrafa, mola, barbante ou recipiente não foi fabricado originalmente para funcionar como equipamento científico e pode introduzir irregularidades. Em vez de esconder essas limitações, a atividade pode perguntar qual precisão é necessária para responder ao problema. Essa discussão ensina uma ideia importante:

instrumentos devem ser adequados à pergunta. Não há sentido em exigir precisão micrométrica quando a hipótese distingue diferenças de centímetros.

O experimento de França e Lopez (2022) sobre a Lei de Malus exemplifica a integração entre objetos cotidianos, dispositivos reaproveitados e recursos digitais. A relação entre intensidade luminosa e ângulo pode ser confrontada com uma dependência baseada em $\cos^2 \theta$, permitindo que estudantes passem de uma observação qualitativa — a luz clareia ou escurece — a uma relação funcional. O processo ilustra como baixo custo e formalização matemática podem coexistir sem reduzir a experiência à manipulação de fórmulas.

Da mesma maneira, experiências sobre movimento browniano, rotação de fluidos, queda de corpos e velocidade do som publicadas na literatura brasileira demonstram que materiais simples podem abordar tópicos que frequentemente são considerados dependentes de laboratório sofisticado. A relevância não está em acumular “experimentos interessantes”, mas em selecionar aqueles que ofereçam boas oportunidades de modelagem.

A escolha deveria ser orientada pela pergunta pedagógica. Um experimento excelente para uma feira de Ciências pode não ser o mais adequado para discutir proporcionalidade; outro, visualmente simples, pode gerar dados extraordinariamente ricos. A qualidade de uma sequência experimental depende da relação entre fenômeno, grandezas mensuráveis, modelo e objetivos de aprendizagem.

5. MODELAGEM MATEMÁTICA COMO EIXO INTERDISCIPLINAR

A interdisciplinaridade entre Física e Matemática encontra na modelagem um ponto de encontro particularmente consistente porque a Física utiliza estruturas matemáticas para representar relações entre grandezas, enquanto a Matemática ganha significado contextual ao ser empregada na descrição de fenômenos. Essa relação, contudo, não deve ser interpretada como simples aplicação unilateral, em que a Física fornece “problemas” para a Matemática resolver. Na atividade científica, a própria construção da representação matemática modifica a maneira pela qual o fenômeno é pensado. Escolher coordenadas, definir variáveis e estabelecer uma função constitui parte da explicação.

Hestenes (1987) defendeu explicitamente a centralidade da modelagem no ensino de Física. Halloun e Hestenes (1987) mostraram como um método orientado a modelos poderia estruturar o ensino de mecânica, enquanto Halloun (1996) ampliou a proposta para aprendizagem significativa. A importância dessas abordagens para experiências de baixo custo encontra-se na possibilidade de transformar medidas simples em objetos de construção teórica. Um carrinho percorrendo uma pista não é apenas algo que “se move”; sua posição pode ser representada por função, sua velocidade pode ser inferida e diferentes modelos cinemáticos podem ser comparados.

O gráfico ocupa posição privilegiada nesse processo. Estudantes frequentemente tratam gráficos como imagens do caminho percorrido, confundindo, por exemplo, um gráfico posição-tempo com uma trajetória espacial. A experiência cria oportunidade para confrontar essa interpretação. O objeto se move em linha reta, enquanto o gráfico pode ser curvo; portanto, a forma do gráfico representa uma relação entre variáveis e não a geometria física do

percurso. Esse tipo de discussão desenvolve simultaneamente alfabetização gráfica e compreensão física.

A função linear pode ser explorada a partir de movimento aproximadamente uniforme, Lei de Hooke, relações entre tensão e corrente em regimes apropriados ou outras situações de proporcionalidade. A inclinação da reta deixa de ser uma operação algébrica abstrata e assume significado físico específico. Em um gráfico força versus elongação, relaciona-se à constante elástica; em posição versus tempo, à velocidade; em tensão versus corrente, pode estar associada à resistência, dependendo da escolha dos eixos. Comparar esses casos ajuda a compreender que “coeficiente angular” é um conceito matemático cuja interpretação depende do modelo físico.

Modelos quadráticos, exponenciais e trigonométricos podem surgir progressivamente. A queda ou o movimento uniformemente acelerado introduzem dependência quadrática do tempo; fenômenos de resfriamento aproximam estudantes de funções exponenciais; oscilações e ondas permitem utilizar funções periódicas. Entretanto, o objetivo não deve ser forçar todo experimento a corresponder exatamente ao conteúdo matemático em estudo. A Física real pode apresentar desvios, e essa imperfeição é pedagogicamente fértil.

A modelagem também permite discutir dimensionalidade. Uma equação física não representa apenas relação numérica, mas precisa preservar compatibilidade entre dimensões. A análise dimensional oferece estratégia de verificação acessível e pode ser incorporada às experiências. Se estudantes propõem uma relação para o período do pêndulo, podem perguntar quais combinações de comprimento e

aceleração produzem dimensão de tempo. Esse exercício aproxima Matemática, Física e raciocínio sobre modelos sem exigir ferramentas avançadas.

A estimação de parâmetros constitui outro elo interdisciplinar poderoso. Em vez de utilizar g , k ou uma resistência como valores fornecidos pelo professor, os estudantes podem inferi-los dos dados. O processo envolve regressão, interpretação de coeficientes e comparação com referências. A diferença entre valor estimado e valor tabelado abre caminho para discutir incerteza e adequação do modelo.

A revisão sistemática de Palmgren, Kokkonen e Bruun (2025) evidencia a pluralidade dos papéis atribuídos à Matemática na educação em Física, incluindo precisamente contextos de modelagem, experimentação e raciocínio. Essa literatura sugere que dificuldades não devem ser interpretadas simplesmente como “falta de base matemática”. Muitas vezes, os estudantes conseguem executar procedimentos formais, mas encontram dificuldade para compreender o que a Matemática representa no problema físico.

A experimentação pode reduzir essa separação quando a necessidade matemática emerge da própria pergunta. Se uma turma deseja descobrir como a distância de frenagem varia com a velocidade, precisa decidir como medir, organizar e representar os resultados. O modelo matemático não chega como requisito externo; torna-se ferramenta para responder à questão. Essa mudança de função pode contribuir para maior significado conceitual.

A modelagem matemática na Educação Básica também vem sendo discutida independentemente do ensino de Física. Aguiar, Figueiredo e Sousa (2023), ao examinarem produtos educacionais destinados à Educação Básica no Sul do Brasil, identificaram diferentes usos e referenciais de modelagem. Revisões internacionais igualmente apontam a possibilidade de empregar problemas autênticos e contextos interdisciplinares desde os anos iniciais, embora a formação docente continue sendo desafio. Integrar essas tradições da Educação Matemática à pesquisa em ensino de Física pode enriquecer ambas.

Existe, porém, o risco de transformar modelagem em ajuste mecânico de curvas. Um software pode calcular automaticamente regressão linear com excelente coeficiente de determinação, mas o estudante pode não compreender por que aquela função foi escolhida. O procedimento científico exige raciocínio anterior e posterior ao ajuste: qual relação era esperada? Quais hipóteses justificam a função? A dispersão é compatível com o instrumento? Existem regiões em que o modelo falha?

O coeficiente de determinação, por exemplo, não deve ser apresentado como certificado automático de verdade física. Relações sem fundamento podem produzir ajustes numericamente elevados em intervalos limitados. A validação de modelos exige coerência teórica, adequação dos resíduos, interpretação dos parâmetros e possibilidade de novas previsões.

Essa compreensão pode ser desenvolvida em níveis progressivos. Nos anos finais do Ensino Fundamental, os estudantes podem comparar tendências e proporcionalidades; no Ensino Médio, podem realizar ajustes, interpretar coeficientes e discutir incerteza. A

sofisticação matemática precisa acompanhar o currículo sem perder o núcleo epistemológico da prática.

Outro ponto importante é a linguagem. Os estudantes devem ser incentivados a comunicar o modelo em diferentes formas: verbal, gráfica, algébrica e diagramática. Hestenes enfatizou justamente a importância de representações múltiplas na construção de modelos físicos. Traduzir entre elas constitui habilidade científica central.

Uma experiência de queda livre pode ser descrita verbalmente, representada por gráfico, expressa em equação e sintetizada em diagrama. Cada representação destaca relações diferentes. A competência não consiste apenas em produzir todas, mas em reconhecer quando uma delas é mais útil.

A interdisciplinaridade torna-se mais profunda quando professores de Matemática e Física planejam conjuntamente essas traduções. O professor de Matemática pode trabalhar regressão e função a partir de dados produzidos em Física; o de Física pode retomar o significado dos parâmetros e limitações. O mesmo conjunto de dados deixa de pertencer a uma única disciplina e passa a funcionar como objeto compartilhado de investigação.

6. PENSAMENTO CIENTÍFICO, INCERTEZA E ARGUMENTAÇÃO BASEADA EM EVIDÊNCIAS

Uma das contribuições mais importantes da experimentação para a Educação Básica está na possibilidade de desenvolver uma compreensão menos idealizada do conhecimento científico. Livros didáticos apresentam, por necessidade, equações e valores de maneira organizada, mas essa apresentação final pode criar a impressão de que a Ciência consiste em aplicar métodos infalíveis

que sempre produzem resultados precisos. A experiência mostra uma realidade diferente: medir implica variação, decidir, corrigir e interpretar. Essa experiência pode constituir oportunidade privilegiada para formar pensamento científico.

O primeiro passo consiste em formular perguntas investigáveis. “Como funciona um pêndulo?” é amplo demais; “como o período depende do comprimento?” produz uma investigação delimitada. Aprender a transformar curiosidade em pergunta operacional é uma competência científica. O professor pode fornecer diferentes graus de orientação e solicitar que a turma discuta quais grandezas precisam ser observadas.

A formulação de hipóteses precisa igualmente ser diferenciada de “adivinhar”. Uma hipótese científica relaciona-se a conhecimentos prévios e deve possuir consequências examináveis. Antes de medir a intensidade luminosa através de dois polarizadores, os estudantes podem prever como ela mudará com o ângulo e justificar a expectativa. Posteriormente, os dados permitem avaliar a previsão.

O controle de variáveis também pode ser ensinado experimentalmente. Em atividades sobre pêndulo, alterar simultaneamente comprimento e amplitude impede atribuir o efeito a uma única variável. Em vez de o professor apenas apresentar o conceito de variável controlada, a turma pode descobrir sua necessidade ao comparar experimentos impossíveis de interpretar.

A repetição das medidas permite introduzir uma concepção probabilística da evidência. Uma medida isolada pode ser afetada por reação humana, resolução do sensor ou flutuações. A repetição não existe para descobrir qual tentativa foi “certa”, mas para

caracterizar variação. Essa ideia é essencial para compreender Ciência contemporânea e possui forte conexão com Estatística.

A incerteza também oferece oportunidade de discutir a diferença entre erro e engano. Na linguagem cotidiana, erro significa frequentemente ter feito algo inadequado. Na metrologia, incerteza é característica inevitável da medição. Mesmo procedimento correto produz resultado com limite de precisão. Essa distinção modifica a relação afetiva do estudante com resultados imperfeitos e pode reduzir a prática comum de alterar números para aproximá-los do valor esperado.

A comparação entre modelo e dados precisa respeitar essa incerteza. Se a previsão teórica está dentro do intervalo compatível com as medidas, a diferença numérica não necessariamente refuta o modelo. Inversamente, concordância aproximada pode não ser suficiente quando os desvios são sistemáticos. Essa discussão introduz elementos de raciocínio estatístico e epistemologia científica em atividades relativamente simples.

O tratamento de dados deve ser acompanhado de argumentação. Após construir um gráfico, o estudante precisa responder não apenas “qual foi o resultado?”, mas “quais dados sustentam sua conclusão?”. Essa passagem da descrição para a justificação aproxima a experiência escolar das práticas científicas de argumentação baseada em evidências.

Grupos diferentes podem chegar a conclusões distintas, e essa divergência é pedagogicamente útil. Em vez de o professor revelar imediatamente a resposta, a turma pode comparar instrumentos,

procedimentos, número de medidas e gráficos. A discussão passa a tratar de qualidade da evidência e não de autoridade.

Essa postura é compatível com os resultados das metanálises de Furtak *et al.* (2012) e Lazonder e Harmsen (2016): investigação apresenta potencial educacional, mas exige estrutura e orientação. O professor desempenha papel central ao formular perguntas que deslocam a atenção da execução para a interpretação. “Por que esses pontos estão dispersos?”, “qual variável deveria ficar constante?”, “como sabemos que uma reta é um modelo adequado?” e “o que precisaria ocorrer para rejeitarmos nossa explicação?” são perguntas que constroem raciocínio.

O pensamento científico inclui ainda a capacidade de reconhecer limites. Uma experiência com material de baixo custo pode não oferecer precisão suficiente para distinguir duas previsões muito próximas. Admitir essa limitação constitui resultado científico legítimo. A atividade pode levar à pergunta sobre qual instrumento seria necessário para responder com maior segurança.

Esse aspecto impede que baixo custo se transforme em fetiche. Existem perguntas que requerem equipamentos mais sofisticados. Uma educação científica madura ensina a escolher métodos adequados e a reconhecer quando os recursos disponíveis não permitem determinada conclusão.

A replicabilidade pode ser trabalhada por meio de troca de protocolos. Um grupo registra seu procedimento de modo que outro tente reproduzi-lo. Divergências mostram a importância da descrição metodológica. Essa atividade integra produção textual, Física e pensamento científico.

O registro experimental também ganha novo sentido. Em vez de copiar um relatório com seções fixas, o estudante precisa documentar decisões e justificativas. Um bom relatório permite reconstruir o raciocínio que levou à conclusão.

A comunicação gráfica merece tratamento semelhante. Escolher escalas inadequadas pode esconder variações; omitir unidades torna dados ambíguos; selecionar apenas medidas favoráveis pode produzir interpretação enganosa. Questões de integridade científica podem ser introduzidas em nível escolar sem necessidade de exemplos complexos.

A tecnologia digital amplia essas possibilidades, mas também pode automatizar excessivamente o processo. Um aplicativo capaz de produzir instantaneamente gráficos e regressões economiza tempo, porém estudantes precisam compreender o significado das transformações. Uma estratégia é realizar inicialmente parte da análise manualmente e depois comparar com o software.

Da mesma forma, inteligência artificial e ferramentas automatizadas podem ser utilizadas para sugerir modelos ou interpretar dados, mas a responsabilidade epistêmica permanece com o usuário. O estudante deve conseguir explicar por que determinada análise é adequada e verificar se os resultados fazem sentido fisicamente.

7. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A síntese da literatura permite identificar uma primeira convergência: **a experimentação possui maior valor formativo quando o estudante participa intelectualmente da investigação.** O manuseio de objetos não é suficiente para caracterizar aprendizagem ativa. Os resultados clássicos de Hake (1998) sobre

estratégias de engajamento e as metanálises de Furtak *et al.* (2012) e Lazonder e Harmsen (2016) apontam na mesma direção geral: atividades que envolvem raciocínio, interação e investigação podem favorecer aprendizagem, desde que acompanhadas de orientação apropriada. A implicação para experiências de baixo custo é direta. Seu benefício não está no preço dos materiais, mas na possibilidade de ampliar situações em que estudantes podem levantar hipóteses, medir e interpretar.

Uma segunda convergência refere-se ao papel da **modelagem como ponte entre experiência e formalização**. Hestenes (1987), Halloun e Hestenes (1987) e Halloun (1996) oferecem um referencial no qual modelos ocupam o centro do conhecimento físico. A revisão de Palmgren, Kokkonen e Bruun (2025) confirma que Matemática desempenha papéis diversos na educação em Física e participa de modelagem, raciocínio e experimentação. Essa literatura sustenta uma mudança importante em relação ao ensino baseado em fórmulas: a equação deve aparecer como parte de uma representação do sistema, e não como objeto autônomo.

A terceira convergência é a viabilidade técnica de **laboratórios de custo reduzido**. A literatura brasileira contém propostas que abrangem numerosas áreas da Física e demonstram possibilidades com materiais recicláveis, dispositivos eletrônicos reaproveitados, fotogates, Arduino e aplicativos. Esses trabalhos são especialmente relevantes para redes escolares nas quais a escassez de equipamentos comerciais é um problema real. Entretanto, a existência de uma solução técnica não equivale à demonstração de impacto educacional. Essa distinção precisa ser explicitamente preservada.

O quarto resultado encontra-se na crescente relevância dos **smartphones como instrumentos experimentais**. As revisões de Ubben *et al.* (2023), Fiorentin, Alves e Pastorio (2025), Choi, Noh e Choi (2025) e Revano e Antonio (2026) mostram expansão consistente desse campo. A última síntese apresenta inclusive efeito positivo sobre aprendizagem em conjunto de estudos publicados na década anterior. Ainda assim, a heterogeneidade e a concentração de trabalhos em determinados países e níveis educacionais impedem concluir que qualquer utilização de smartphone produzirá aprendizagem superior.

A quinta convergência consiste na utilidade pedagógica das **múltiplas representações**. Tecnologias móveis permitem que o mesmo fenômeno seja observado como movimento, vídeo, tabela e gráfico. Essa integração pode favorecer a construção de relações entre experiência e modelo matemático, mas também pode gerar sobrecarga quando muitas informações são apresentadas simultaneamente sem orientação. O desenho da atividade precisa determinar qual representação será analisada e como será conectada às demais.

A sexta conclusão é que **baixo custo e rigor científico não são opostos**. Um experimento simples pode ser metodologicamente exigente se estudantes discutirem calibração, repetição, resolução e incerteza. Inversamente, equipamentos caros podem sustentar uma atividade intelectualmente pobre quando utilizados para produzir automaticamente um resultado previamente conhecido. O critério de qualidade deve ser epistemológico e pedagógico, não financeiro.

A sétima convergência envolve a **incerteza como conteúdo formativo**. Experimentos acessíveis frequentemente apresentam

maior dispersão e limitações instrumentais, o que pode ser convertido em vantagem didática quando a variabilidade é analisada. Em vez de esconder resultados imperfeitos, o professor pode utilizá-los para discutir medição e modelo. Essa abordagem aproxima o estudante de uma visão mais autêntica da Ciência.

A oitava conclusão é que a modelagem interdisciplinar exige **planejamento curricular conjunto**. Não basta realizar um experimento em Física e esperar que a relação matemática seja espontaneamente compreendida. Conceitos como proporcionalidade, função, inclinação, regressão e média precisam ser explicitamente mobilizados. A coordenação entre docentes pode reduzir a fragmentação e mostrar que a mesma ferramenta matemática possui significado em contextos diferentes.

A nona convergência refere-se à **orientação pedagógica**. A evidência sobre investigação mostra que abertura total não é necessariamente superior. Atividades de baixo custo podem ser organizadas em níveis de autonomia: primeiro, os estudantes aprendem técnicas de medição; depois, escolhem variáveis; posteriormente, podem planejar investigações mais abertas. Essa progressão evita tanto o roteiro mecânico quanto a descoberta sem apoio.

A décima conclusão é que **formação docente representa uma condição estrutural**. Construir equipamentos, interpretar sensores, trabalhar incerteza e orientar modelagem exige conhecimentos que podem não ter sido enfatizados na formação inicial. A disseminação de sequências didáticas e cursos de desenvolvimento profissional é tão importante quanto a produção de novos equipamentos.

A décima primeira convergência é que **equidade precisa integrar a inovação tecnológica**. Smartphone pode ser barato do ponto de vista do laboratório, mas não é universalmente disponível. Arduino requer investimento inicial e suporte. Políticas de experimentação precisam assegurar acesso coletivo e evitar transferir custos às famílias.

A décima segunda conclusão relaciona-se à **avaliação da aprendizagem**. Se as aulas valorizam investigação, mas as provas avaliam apenas substituição em fórmulas, os estudantes recebem sinal contraditório. Avaliações podem incluir interpretação de dados, crítica de procedimentos, construção de gráficos e escolha entre modelos.

A décima terceira convergência está no potencial da experiência para **reconfigurar a relação entre erro e aprendizagem**. Quando divergências são discutidas como informação, estudantes deixam de buscar apenas números “corretos” e passam a avaliar evidências. Esse deslocamento é decisivo para a formação científica.

A décima quarta conclusão consiste em reconhecer que **experimento físico e simulação não são concorrentes necessários**. Dados reais podem ser comparados a modelos computacionais, permitindo investigar efeitos de idealizações. Uma simulação pode indicar comportamento previsto em condições ideais; o laboratório mostra a complexidade do sistema real.

A décima quinta convergência, finalmente, é que a experimentação de baixo custo alcança seu maior potencial quando deixa de ser uma coleção de atividades isoladas e se transforma em **cultura de investigação**. Nessa perspectiva, medir, modelar, argumentar e

revisar passam a fazer parte das aulas regulares, e não apenas de eventos especiais ou feiras de Ciências.

8. LIMITAÇÕES DA REVISÃO E LACUNAS DE PESQUISA

A principal limitação desta revisão decorre da heterogeneidade da literatura sobre experimentação de baixo custo. Muitos trabalhos apresentam construção e funcionamento de dispositivos, mas não realizam avaliação educacional controlada. Esses artigos são valiosos para demonstrar viabilidade e compartilhar soluções, porém não permitem estimar efeitos sobre aprendizagem. Essa diferença foi preservada ao longo da análise, evitando afirmar que um instrumento eficiente produz automaticamente melhor compreensão conceitual.

Uma segunda limitação é a predominância de estudos sobre Ensino Superior em determinados subcampos, especialmente sensores de smartphones e instrumentação. A revisão internacional de Choi, Noh e Choi (2025) mostra essa concentração e reforça a necessidade de investigações especificamente conduzidas com estudantes do Ensino Fundamental e Médio. As condições cognitivas, curriculares e institucionais são distintas, e resultados universitários não devem ser transferidos automaticamente.

A terceira limitação encontra-se na própria definição de “baixo custo”. Valores aceitáveis diferem profundamente entre redes de ensino, países e escolas. Um smartphone pode ser equipamento cotidiano em determinado contexto e recurso escasso em outro. Pesquisas futuras deveriam explicitar custos de implementação, manutenção, quantidade de estudantes por kit e necessidades de infraestrutura.

Outra lacuna importante refere-se à interdisciplinaridade. Muitos artigos tratam experimentação de Física e outros abordam modelagem matemática, mas ainda existe espaço para estudos capazes de avaliar intervenções planejadas conjuntamente por professores das duas áreas, medindo tanto compreensão física quanto competência matemática e raciocínio científico.

A mensuração do pensamento científico também exige maior padronização. Estudos frequentemente utilizam desempenho conceitual ou opinião dos estudantes como indicadores de sucesso, mas esses resultados não equivalem a capacidade de formular hipóteses, analisar incerteza ou avaliar modelos. Pesquisas futuras poderiam desenvolver instrumentos específicos para essas competências.

A formação docente constitui outra lacuna. É necessário investigar não apenas se determinados experimentos funcionam, mas quais formas de desenvolvimento profissional ajudam professores a transformá-los em atividades investigativas. Um material didático acessível pode continuar subutilizado quando os educadores não recebem tempo, apoio e segurança metodológica.

Também são necessários estudos longitudinais. Grande parte das intervenções ocorre durante poucas aulas e mede resultados imediatamente depois. Não se sabe com a mesma clareza se experiências recorrentes ao longo de anos produzem mudanças duradouras na capacidade de modelar, interpretar dados e raciocinar cientificamente.

Por fim, esta revisão não realizou uma triagem PRISMA integral e auditável especificamente para o manuscrito. Em razão disso, não

foram produzidas contagens artificiais de referências localizadas ou excluídas. A expressão **revisão sistematizada qualitativa com síntese narrativa** foi mantida deliberadamente, enquanto todos os quantitativos apresentados correspondem a pesquisas e revisões publicadas.

9. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise desenvolvida permite concluir que a Física experimental de baixo custo possui potencial para desempenhar função muito mais ampla do que simplesmente compensar a ausência de laboratórios convencionais em escolas com recursos limitados. Sua contribuição mais relevante emerge quando a redução das barreiras materiais possibilita transformar a experimentação em prática recorrente de investigação, na qual o estudante deixa de receber fenômenos, fórmulas e resultados como elementos separados e passa a participar da construção das relações entre eles. Materiais cotidianos, sensores simples, câmeras, smartphones e plataformas eletrônicas podem fornecer dados suficientemente ricos para formular perguntas, realizar medidas, construir gráficos, testar modelos e discutir incertezas. Dessa maneira, o baixo custo assume significado pedagógico e epistemológico: torna possível deslocar o laboratório de um evento excepcional para uma prática integrada à rotina de aprendizagem. Essa potencialidade, contudo, não decorre automaticamente da simplicidade dos materiais. Um dispositivo construído com objetos reciclados pode sustentar uma aula inteiramente transmissiva, enquanto um equipamento sofisticado pode integrar excelente atividade investigativa. O critério decisivo encontra-se naquilo que os estudantes são convidados a fazer intelectualmente com o fenômeno observado e com os dados produzidos. O experimento alcança maior valor formativo quando

gera uma necessidade de explicar, comparar, quantificar e justificar, estabelecendo um movimento contínuo entre experiência, representação e teoria.

A modelagem matemática ocupa posição central nesse processo porque permite superar uma das fragmentações mais persistentes do currículo escolar: a separação entre a Matemática aprendida como conjunto de procedimentos formais e a Física apresentada como repertório de fórmulas prontas. Quando estudantes medem diretamente um fenômeno, precisam decidir como representar os resultados e descobrir quais relações podem organizá-los. A função matemática deixa, então, de ser apenas objeto abstrato e passa a constituir modelo de determinada regularidade física. Inclinação, área, proporcionalidade, regressão, média e incerteza ganham significados que não poderiam ser obtidos apenas pela manipulação algébrica. Essa articulação é coerente com a tradição de modelagem desenvolvida por Hestenes e Halloun e encontra respaldo em pesquisas recentes que mostram a multiplicidade dos papéis desempenhados pela Matemática no ensino de Física. Uma Educação Básica orientada por esse princípio não deveria introduzir as equações apenas como ponto de partida obrigatório, mas criar situações em que algumas relações matemáticas apareçam como respostas a problemas de representação. A pergunta “qual função descreve esses dados?” possui potencial formativo diferente de “qual fórmula deve ser aplicada?”, porque desloca o estudante da identificação de algoritmos para a construção e avaliação de modelos. Essa mudança não diminui o rigor matemático; ao contrário, atribui ao formalismo uma função intelectualmente mais exigente.

O desenvolvimento do pensamento científico depende ainda de reconhecer que dados experimentais não constituem verdades puras obtidas diretamente da natureza, mas resultados de processos de medição condicionados por instrumentos, procedimentos e escolhas. A experimentação de baixo custo oferece oportunidade especialmente fértil para trabalhar essa dimensão porque seus instrumentos tornam frequentemente mais visíveis as limitações de resolução e calibração. Em vez de tratar essas limitações como defeitos que desqualificam a atividade, o professor pode transformá-las em objetos de investigação. Por que duas medidas não coincidem exatamente? Quantas repetições são necessárias? Até quantas casas decimais faz sentido registrar? O resultado obtido é compatível com a previsão dentro da incerteza? Como saber se a divergência decorre do instrumento, do procedimento ou do modelo? Perguntas dessa natureza aproximam a atividade escolar de práticas genuinamente científicas e corrigem a concepção segundo a qual experimentos servem apenas para “provar” leis previamente conhecidas. O estudante aprende que a Ciência não elimina incerteza, mas desenvolve procedimentos para quantificá-la e argumentar racionalmente diante dela. A capacidade de conviver intelectualmente com resultados imperfeitos sem recorrer à alteração arbitrária dos dados constitui uma forma importante de maturidade científica.

A literatura sobre aprendizagem por investigação reforça que esse tipo de atividade precisa combinar autonomia e orientação. As metanálises de Furtak *et al.* e de Lazonder e Harmsen oferecem evidência importante contra dois extremos pedagógicos. De um lado, roteiros excessivamente fechados podem transformar o estudante em executor de instruções; de outro, propostas totalmente abertas podem exigir competências que o aprendiz

ainda não desenvolveu. A solução mais consistente é uma progressão de responsabilidade. No início, o professor pode definir a pergunta e orientar a medição, deixando aos estudantes a interpretação; posteriormente, grupos podem escolher variáveis, construir hipóteses ou planejar parte do procedimento; em etapas mais avançadas, podem desenvolver investigações próprias. A experimentação de baixo custo favorece essa progressão porque os materiais são frequentemente manipuláveis e reproduzíveis fora de laboratórios altamente controlados. Entretanto, o aumento da autonomia precisa ser acompanhado de critérios claros sobre evidência, segurança, registro e argumentação. A liberdade investigativa não significa ausência de estrutura epistemológica. A função do professor deixa de ser fornecer antecipadamente cada resposta e passa a incluir tornar visíveis os critérios pelos quais uma conclusão pode ser considerada bem sustentada.

Smartphones e tecnologias móveis ampliam significativamente essas possibilidades, mas precisam ser incorporados sem determinismo tecnológico. As revisões publicadas até 2026 mostram crescimento expressivo da utilização de sensores incorporados aos aparelhos e fornecem evidências promissoras quanto à aprendizagem, especialmente quando os dispositivos funcionam como instrumentos de coleta e representação de dados. A possibilidade de registrar aceleração, rotação, som, luz e movimento transforma tecnologias cotidianas em ferramentas de investigação e reduz a distância entre laboratório e vida diária. Ainda assim, a utilização do smartphone não possui valor pedagógico automático. Um aplicativo que fornece instantaneamente uma curva pode ocultar as decisões envolvidas na construção do gráfico; uma regressão executada por software pode ser aplicada sem compreensão; diferenças de sensores podem produzir dados

heterogêneos; e a pressuposição de que todos possuem dispositivos adequados pode intensificar desigualdades. O caminho mais consistente consiste em utilizar essas tecnologias como instrumentos transparentes sempre que possível, discutindo o que o sensor mede, qual sua resolução, como os dados foram produzidos e quais limitações precisam ser consideradas. A familiaridade dos estudantes com o aparelho não deve ser confundida com familiaridade científica com o instrumento.

A dimensão interdisciplinar do tema também exige superar práticas de justaposição curricular. Desenvolver interdisciplinaridade não significa apenas que a aula de Matemática trabalhe gráficos na mesma semana em que a Física estuda movimento. A integração mais profunda ocorre quando uma investigação demanda conhecimentos de ambas as áreas para ser resolvida e quando professores articulam explicitamente suas diferentes interpretações. Um conjunto de dados sobre movimento pode ser utilizado pela Matemática para discutir função e regressão e pela Física para interpretar velocidade e aceleração, mas a aprendizagem mais significativa ocorre quando essas perspectivas são reconectadas: por que a inclinação possui determinado significado físico? O que significa alterar os eixos? Por que a linearização é útil? Qual parâmetro físico está sendo estimado pelo coeficiente obtido? Esse planejamento compartilhado pode contribuir para desfazer a imagem de que a Matemática é apenas um requisito prévio que impede a aprendizagem da Física. Ela passa a ser reconhecida como parte constitutiva do raciocínio físico, ao mesmo tempo em que a experiência física fornece contextos nos quais conceitos matemáticos adquirem função explicativa.

A avaliação escolar precisa acompanhar essa transformação. Se estudantes passam por experiências investigativas, coletam dados e constroem modelos, mas são avaliados exclusivamente por exercícios nos quais todas as informações já foram fornecidas e existe uma fórmula evidente a aplicar, o sistema de avaliação sinaliza que as competências investigativas são secundárias. Instrumentos avaliativos poderiam incluir conjuntos reais de dados com dispersão, gráficos parcialmente construídos, propostas experimentais contendo falhas, comparação entre modelos ou perguntas sobre quais medidas seriam necessárias para testar determinada hipótese. O estudante pode ser solicitado a justificar qual modelo é mais adequado, identificar variável de controle ou discutir se uma conclusão é compatível com a incerteza disponível. Essas tarefas avaliam simultaneamente Física, Matemática e pensamento científico. Também reduzem a possibilidade de confundir habilidade de cálculo com compreensão, problema já conhecido na pesquisa em ensino de Física. Uma formação baseada em modelagem precisa produzir avaliações nas quais explicar e interpretar sejam tão importantes quanto obter o valor numérico final.

O papel da formação docente emerge, nesse cenário, como uma das condições mais importantes para transformar potencial em prática. Baixo custo reduz barreiras materiais, mas não resolve automaticamente dificuldades de planejamento, segurança, gerenciamento de turma, interpretação estatística ou uso de sensores. Professores podem evitar experimentação não apenas porque faltam equipamentos, mas porque se sentem pouco preparados para lidar com resultados inesperados ou porque o tempo curricular parece incompatível com investigações abertas. Políticas de formação precisam, portanto, ir além de apresentar catálogos de experiências. É necessário que os próprios professores

vivenciem ciclos de investigação, construam instrumentos, analisem dados imperfeitos e discutam modelos. O desenvolvimento profissional também pode reunir docentes de Física e Matemática em torno de sequências interdisciplinares, permitindo que cada área explicita suas dificuldades e possibilidades. A disseminação de materiais abertos, tutoriais, bancos de dados e protocolos seguros pode reduzir o custo de planejamento, mas sua utilização precisa ser acompanhada de autonomia para adaptar as atividades às condições locais.

A equidade também precisa ser incorporada como princípio de desenho. O discurso sobre experimentação de baixo custo pode produzir uma aparente solução universal para desigualdades de infraestrutura e, paradoxalmente, ocultar a responsabilidade institucional de financiar educação científica adequada. Materiais acessíveis são ferramentas poderosas, mas não devem funcionar como justificativa para aceitar indefinidamente laboratórios inexistentes ou estruturas escolares precárias. O ideal é combinar estratégias: utilizar recursos simples para ampliar a frequência das investigações e, ao mesmo tempo, assegurar acesso a instrumentos e espaços especializados quando os objetivos científicos exigirem. Da mesma forma, o uso de smartphones deve ser organizado de maneira que nenhum estudante seja excluído por não possuir aparelho. Kits compartilhados, dispositivos institucionais e trabalho em grupos podem reduzir essa barreira. Uma inovação verdadeiramente democrática é aquela que amplia oportunidades sem transferir para famílias o custo que deveria ser assumido pelo sistema educacional.

Outra conclusão importante diz respeito à relação entre experimentos físicos e recursos digitais ou simulados. Não existe

fundamento para estabelecer uma oposição rígida entre laboratório real e simulação. Cada modalidade oferece possibilidades diferentes. Simulações permitem controlar variáveis e representar situações ideais dificilmente produzidas em sala; experiências reais evidenciam variabilidade, limitações instrumentais e complexidade material. Integrá-las pode tornar a modelagem ainda mais rica. O estudante pode primeiro utilizar um modelo computacional para prever comportamento em condições ideais, depois realizar a experiência e analisar as diferenças. Nesse processo, a discrepância deixa de ser vista como fracasso e passa a funcionar como evidência sobre idealização. Resistência do ar, atrito, dissipação, atraso do sensor e irregularidade da superfície tornam-se hipóteses explicativas. Essa comparação ajuda a ensinar uma das características fundamentais da modelagem científica: todo modelo seleciona aspectos do sistema e possui domínio limitado de aplicação.

A experimentação de baixo custo também pode fortalecer projetos de iniciação científica escolar e feiras de Ciências quando as atividades deixam de ser apenas demonstrações reproduzidas da internet. Estudantes podem formular problemas relacionados ao próprio ambiente, construir instrumentos e produzir séries de dados. Medir níveis sonoros em diferentes espaços, investigar iluminação, analisar eficiência térmica de materiais, estudar consumo energético, observar movimentos ou mapear variáveis ambientais são possibilidades nas quais Física, Matemática e cidadania científica se articulam. Para que esses projetos constituam investigação, contudo, é preciso evitar conclusões mais fortes do que os métodos permitem. A escola pode ensinar desde cedo que um pequeno conjunto de medições não autoriza generalizações universais, que correlação não implica causalidade e que limitações

precisam ser declaradas. Essas práticas possuem valor para além da aprendizagem de Física, pois formam critérios de avaliação de evidências necessários em uma sociedade marcada pela circulação intensa de dados e afirmações quantitativas.

Conclui-se, portanto, que a Física experimental de baixo custo possui elevado potencial como estratégia interdisciplinar para a Educação Básica quando compreendida não como versão economicamente reduzida de um laboratório convencional, mas como oportunidade de reorganizar o processo de aprendizagem em torno de perguntas, medidas, modelos e evidências. Sua contribuição mais promissora está em aproximar experimentação e formalização matemática, permitindo que estudantes compreendam de onde surgem determinadas relações, como parâmetros são estimados e por que modelos precisam ser confrontados com dados. Smartphones, sensores, Arduino, materiais reaproveitados e instrumentos artesanais ampliam o repertório disponível, mas permanecem subordinados à qualidade da mediação pedagógica. O desenvolvimento do pensamento científico exige ainda trabalhar incerteza, repetibilidade, controle de variáveis, argumentação e limites dos modelos, evitando reduzir o laboratório à busca de valores previamente estabelecidos. Quando esses elementos são integrados, a experiência de baixo custo pode tornar-se intelectualmente sofisticada: uma esfera, um barbante, uma câmera ou um sensor passam a funcionar como pontos de partida para a construção de relações matemáticas, avaliação de hipóteses e compreensão da própria lógica da Ciência. Nessa perspectiva, a questão decisiva deixa de ser quanto custa o experimento e passa a ser quanto pensamento ele consegue mobilizar.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, Geovani Nunes; FIGUEIREDO, Thiago Bezerra; SOUSA, Bárbara Nivalda Palharini Alvim. Mathematical Modelling in Basic Education: a study based on educational products from the southern of Brazil. *Revista Brasileira de Educação em Ciências e Educação Matemática*, v. 7, n. 3, 2023. DOI: 10.48075/ReBECCEM.2023.v.7.n.3.31025.

BRASIL. Ministério da Educação. *Base Nacional Comum Curricular*. Brasília, DF: MEC, 2018.

CHOI, Gwanghyeon; NOH, Arum; CHOI, Hyukjoon. Systematic Literature Review of Physics Experiments Using Smartphone Sensor. *New Physics: Sae Mulli*, v. 75, n. 2, p. 165-173, 2025. DOI: 10.3938/NPSM.75.165.

Florentin, João Gabriel; ALVES, Josemar; PASTORIO, Dioni Paulo. A systematic review of smartphone use in Brazilian Physics Education: potentials and limitations. *International Journal of Education and Development using Information and Communication Technology*, v. 21, n. 2, p. 1-27, 2025.

FRANÇA, Gustavo Henrique de; LOPEZ, Johnny Vilcarromero. Experimento de baixo custo para o ensino de Física óptica: o caso da Lei de Malus. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 44, e20210423, 2022. DOI: 10.1590/1806-9126-RBEF-2021-0423.

FURTAK, Erin Marie; SEIDEL, Tina; IVERSON, Heidi; BRIGGS, Derek C. Experimental and quasi-experimental studies of inquiry-based science teaching: a meta-analysis. *Review of Educational Research*, v. 82, n. 3, p. 300-329, 2012. DOI: 10.3102/0034654312457206.

GASPARINI, Alice; STERN, Florian; DELAVAL, Marine; MÜLLER, Andreas. Using smartphones and tablets as experimental tools in the Physics classroom: effects on learning and motivation. *Physical Review Physics Education Research*, v. 22, art. 010129, 2026. DOI: 10.1103/96gp-gqvj.

HAKE, Richard R. Interactive-engagement versus traditional methods: a six-thousand-student survey of mechanics test data for introductory Physics courses. *American Journal of Physics*, v. 66, n. 1, p. 64-74, 1998. DOI: 10.1119/1.18809.

HALLOUN, Ibrahim A. Schematic modeling for meaningful learning of Physics. *Journal of Research in Science Teaching*, v. 33, n. 9, p. 1019-1041, 1996. DOI: 10.1002/(SICI)1098-2736(199611)33:9<1019::AID-TEA4>3.0.CO;2-I.

HALLOUN, Ibrahim A.; HESTENES, David. Modeling instruction in mechanics. *American Journal of Physics*, v. 55, n. 5, p. 455-462, 1987. DOI: 10.1119/1.15130.

HESTENES, David; WELLS, Malcolm; SWACKHAMER, Gregg. Force Concept Inventory. *The Physics Teacher*, v. 30, n. 3, p. 141-158, 1992. DOI: 10.1119/1.2343497.

HESTENES, David. Toward a modeling theory of Physics instruction. *American Journal of Physics*, v. 55, n. 5, p. 440-454, 1987. DOI: 10.1119/1.15129.

HOFSTEIN, Avi; LUNETTA, Vincent N. The laboratory in science education: foundations for the twenty-first century. *Science Education*, v. 88, n. 1, p. 28-54, 2004. DOI: 10.1002/sce.10106.

LAZONDER, Ard W.; HARMSEN, Ruth. Meta-analysis of inquiry-based learning: effects of guidance. *Review of Educational Research*, v. 86, n. 3, p. 681-718, 2016. DOI: 10.3102/0034654315627366.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL. *A framework for K-12 Science Education: practices, crosscutting concepts, and core ideas*. Washington, DC: National Academies Press, 2012. DOI: 10.17226/13165.

PALMGREN, Elina; KOKKONEN, Tommi; BRUUN, Jesper. Roles of mathematics in Physics Education: a systematic review. *Physical Review Physics Education Research*, v. 21, n. 2, art. 020602, 2025. DOI: 10.1103/www-gwp8.

REVANO, Mark Justine N.; ANTONIO, Ronilo P. From pocket to Physics: unlocking the potential of smartphone sensor experiments to enhance science learning. *Journal of Research on Technology in Education*, 2026. DOI: 10.1080/15391523.2025.2598247.

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*, v. 39, n. 1, e1401, 2017. DOI: 10.1590/1806-9126-RBEF-2016-0167.

UBBEN, Malte S.; KREMER, Fabienne E.; HEINICKE, Susanne; MAROHN, Annette; HEUSLER, Stefan. Smartphone usage in science education: a systematic literature review. *Education Sciences*, v. 13, n. 4, art. 345, 2023. DOI: 10.3390/educsci13040345.

¹ Mestrando Profissional em Ensino de Ciências e Matemática pela Universidade Federal do Acre (UFAC), Especialista em Metodologia do Ensino de Matemática pela Faculdade Futura, em Práticas

Assertivas da Educação Profissional Integrada pelo Instituto Federal do Rio Grande do Norte (IFRN) e em Ensino de Física pela Universidade Candido Mendes (UCAM), e Graduado em Física pela Universidade do Estado do Amazonas (UEA). E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

² Mestre em Ensino de Física pela Universidade Federal do Ceará (UFC) e Licenciado em Física pelo Instituto Federal do Ceará (IFCE). E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

³ Especialista em Educação Matemática pela Faculdade Pio Décimo e em Metodologia do Ensino de Matemática e Física pelo Centro Universitário Internacional (UNINTER), e Licenciado em Matemática pela Universidade do Estado da Bahia (UNEB). LATTES: <http://lattes.cnpq.br/7044120690093380>. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

⁴ Mestre em Ensino de Física e Licenciado em Física pela Universidade Federal de Sergipe (UFS). ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7788-9758>. LATTES: <http://lattes.cnpq.br/6908916453494929>. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

⁵ Mestre em Ensino de Ciências e Licenciado em Física pela Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), Especialista em Docência do Ensino Superior pela Faculdade PROMINAS e Graduado em Matemática pela Universidade Cruzeiro do Sul. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5190-6986>. LATTES: <http://lattes.cnpq.br/3890337603740467>. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

⁶ Doutor e Mestre em Ciências e Meio Ambiente pela Universidade Federal do Pará (UFPA) e Graduado em Matemática e em Pedagogia. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)