

USO DE TECNOLOGIAS DIGITAIS NO ENSINO DE FÍSICA MODERNA NO ENSINO MÉDIO: POSSIBILIDADES, EVIDÊNCIAS EMPÍRICAS E IMPLICAÇÕES PEDAGÓGICAS

DIGITAL TECHNOLOGIES IN HIGH-SCHOOL MODERN PHYSICS TEACHING: POSSIBILITIES, EMPIRICAL EVIDENCE, AND PEDAGOGICAL IMPLICATIONS

Luiz Moreira Gomes¹

Cintia Silva Moreira²

Luciana Silva da Silva³

RESUMO: A inserção da Física Moderna e Contemporânea na Educação Básica esbarra na elevada abstração de seus conceitos e na escassez de experimentos observáveis no ambiente escolar. Este artigo investiga em que medida o uso pedagogicamente planejado de tecnologias digitais — sobretudo simulações interativas acessadas em dispositivos móveis — contribui para a aprendizagem conceitual, o engajamento e a percepção discente sobre a disciplina. A partir da triangulação de evidências quantitativas e qualitativas provenientes de duas intervenções quasi-experimentais conduzidas em escola pública (dissertações de Amaral e de Afonso), analisa-se o ensino do efeito fotoelétrico e do espalhamento Compton à luz do referencial construtivista, da teoria da aprendizagem significativa e do framework TPACK. Na avaliação final, o grupo que utilizou aplicativos de simulação superou o grupo submetido apenas à instrução expositiva em todas as questões conceituais, com média reconstruída de acertos de aproximadamente 90,9% contra 44,6%, além de ganhos expressivos em satisfação e na percepção de aplicabilidade da Física ao cotidiano. Conclui-se que o valor formativo dessas tecnologias não reside no artefato em si, mas na qualidade da mediação docente e na articulação entre conteúdo, pedagogia e recurso tecnológico. Discutem-se implicações para a formação de professores e limitações metodológicas que orientam pesquisas futuras.

Palavras-chave: Ensino de Física. Física Moderna. Tecnologias Digitais. Simulações Computacionais. TPACK. Aprendizagem Ativa.

¹Doutor em Engenharia / Professor da Faculdade de Física e coordenador/pesquisador vinculado à instituição (atuando também no Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física - MNPEF) Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará (UNIFESSPA) — Campus Universitário de Marabá, Instituto de Ciências Exatas (Faculdade de Física)

²Graduanda em Naturologia Bacharelado, Universidade Cidade de São Paulo (Unicid).

³Licenciatura Integrada em Educação Ciências, Matemática e Linguagens / Professora de Educação Infantil. Universidade Federal do Pará (UFPA).

ABSTRACT: Integrating Modern and Contemporary Physics into secondary education is hampered by the high abstraction of its concepts and by the scarcity of directly observable experiments in school settings. This article examines the extent to which the pedagogically planned use of digital technologies — particularly interactive simulations accessed on mobile devices — supports conceptual learning, engagement, and students' perceptions of the discipline. Drawing on the triangulation of quantitative and qualitative evidence from two quasi-experimental interventions carried out in a public school (the dissertations by Amaral and Afonso), we analyze the teaching of the photoelectric effect and Compton scattering through the lenses of constructivism, meaningful-learning theory, and the TPACK framework. On the final assessment, the group that used simulation apps outperformed the group exposed only to expository instruction across every conceptual item, with a reconstructed mean accuracy of roughly 90.9% versus 44.6%, alongside marked gains in satisfaction and in the perceived relevance of Physics to everyday life. We conclude that the educational value of these technologies lies not in the artifact itself but in the quality of teacher mediation and in the alignment of content, pedagogy, and technological resource. Implications for teacher education and methodological limitations guiding future research are discussed.

Keywords: Physics Education. Modern Physics. Digital Technologies. Computer Simulations. TPACK. Active Learning.

I. INTRODUÇÃO

A inserção da Física Moderna e Contemporânea (FMC) na Educação Básica permanece um dos desafios mais persistentes do ensino de Ciências. Conceitos como a quantização da energia, a dualidade onda-partícula e a estrutura da matéria são fundamentais à compreensão da sociedade tecnológica contemporânea; ainda assim, sua abordagem no Ensino Médio costuma ser preterida em favor de conteúdos clássicos, seja pela organização curricular, seja pela percepção de que tais temas seriam abstratos demais para essa etapa escolar (BITZENBAUER, 2021; COLLETTI, 2023; GREINERT et al., 2023).

Paralelamente, a cultura digital tornou-se parte constitutiva do cotidiano dos estudantes. Smartphones, aplicativos, ambientes virtuais e simulações interativas abriram possibilidades inéditas para o trabalho pedagógico, particularmente em domínios — como a Física — nos quais muitos fenômenos não podem ser observados diretamente em laboratórios escolares. O desafio, contudo, não se resume a disponibilizar tecnologia, mas a convertê-la em mediação cognitiva e pedagógica efetiva.

Embora a literatura registre efeitos positivos do uso de simulações e da aprendizagem móvel (BANDA; NZABAHIMANA, 2023; MEDEIROS; NAIA; LOPES, 2024), ainda são

escassos os estudos que articulam, em um mesmo desenho analítico, evidências de desempenho conceitual e evidências de percepção discente sobre tópicos específicos de FMC em escolas públicas brasileiras. É essa lacuna que o presente trabalho busca enfrentar.

Este artigo tem por objetivo analisar como as tecnologias digitais, em especial os aplicativos de simulação em dispositivos móveis, contribuem para o ensino e a aprendizagem de FMC no Ensino Médio. Para tanto, articula três eixos complementares: (i) uma revisão da literatura sobre tecnologias educacionais em Física; (ii) a intervenção quasi-experimental descrita na dissertação de Amaral; e (iii) os resultados sobre percepção discente reportados na dissertação de Afonso. A triangulação dessas fontes confere robustez à argumentação e permite discutir, de modo integrado, dimensões cognitivas e afetivas da aprendizagem.

Especificamente, o estudo orienta-se por três questões de pesquisa: (QP₁) em que medida o uso de simulações interativas melhora o desempenho conceitual em tópicos de FMC, como o efeito fotoelétrico e o espalhamento Compton?; (QP₂) como a mediação tecnológica afeta a satisfação e o engajamento dos estudantes?; e (QP₃) que fatores institucionais e culturais condicionam a receptividade à inovação metodológica?

A hipótese central sustenta que a integração planejada de simulações digitais e dispositivos móveis, quando associada a estratégias de aprendizagem ativa e a mediação docente consistente, favorece a compreensão conceitual, o engajamento discente e a ressignificação da Física como conhecimento relevante para a vida cotidiana.

O texto organiza-se em seis seções. Após esta introdução, a Seção 2 apresenta o referencial teórico; a Seção 3 detalha a metodologia; a Seção 4 expõe os resultados; a Seção 5 os discute à luz do framework TPACK; e a Seção 6 sintetiza conclusões, implicações e limitações.

2. Referencial Teórico

2.1 Fundamentos teóricos para a integração tecnológica

A adoção de tecnologias digitais no ensino de Física não deve ser compreendida como mera modernização instrumental: sua eficácia depende de pressupostos pedagógicos que concebam o estudante como sujeito ativo da aprendizagem. Nessa direção, as perspectivas construtivista e socioconstrutivista oferecem base consistente para o uso de simulações,

visualizações dinâmicas e dispositivos interativos, uma vez que tais recursos favorecem a exploração, o teste de hipóteses, a comparação entre variáveis e a negociação de significados.

A teoria da aprendizagem significativa (MOREIRA, 2011) contribui de modo particular para o problema investigado. Quando um conteúdo altamente abstrato — como o efeito fotoelétrico — é apresentado apenas em linguagem verbal ou matemática, muitos estudantes não encontram ancoragem em conhecimentos prévios. As tecnologias digitais podem operar como organizadores e mediadores, tornando visíveis relações que, de outro modo, permaneceriam estritamente simbólicas. A visualização computacional, portanto, não substitui a elaboração conceitual: apoia-a, ao fornecer modelos, feedback imediato e ambientes de experimentação segura. Revisões e metanálises recentes convergem nessa direção, ao associarem o uso de simulações interativas a ganhos consistentes de compreensão conceitual em Física, inclusive no contexto brasileiro (BANDA; NZABAHIMANA, 2023; MEDEIROS; NAIA; LOPES, 2024; RAHMAWATI et al., 2022).

2.2 Ecossistema de tecnologias digitais aplicáveis ao ensino de Física

O ensino de Física Moderna beneficia-se menos de uma ferramenta isolada e mais de um conjunto articulado de recursos digitais. Simulações interativas, aplicativos móveis, realidade aumentada, laboratórios virtuais, gamificação, inteligência artificial educacional e plataformas on-line compõem um ecossistema multimodal capaz de sustentar diferentes objetivos de aprendizagem. Esse ecossistema amplia o repertório metodológico do professor e favorece experiências mais investigativas, contextualizadas e responsivas às necessidades dos estudantes, com evidências positivas também no uso de laboratórios virtuais (ALSALHI et al., 2024; REGINALD, 2023; TSIVITANIDOU; GEORGIU; IOANNOU, 2021).

A Figura 1 sistematiza esse ecossistema, organizando os principais recursos digitais aplicáveis ao ensino de Física Moderna em torno dos objetivos de aprendizagem que cada categoria melhor atende. A representação evidencia a complementaridade entre as ferramentas — em vez de uma hierarquia entre elas — e serve de referência para as escolhas didáticas discutidas ao longo desta seção.

Figura 1 – Ecossistema de Tecnologias Digitais para o Ensino de Física Moderna



Integração de ferramentas digitais para promover visualização, experimentação, interação e aprendizagem significativa em tópicos de Física Moderna.

Figura 1 — Ecossistema de tecnologias digitais para o ensino de Física Moderna.

Fonte: elaborado pelos autores (2024).

No campo específico da Física, as simulações interativas destacam-se por permitir a manipulação controlada de variáveis e a observação imediata de seus efeitos. Os aplicativos móveis, por sua vez, convertem o smartphone em instrumento de coleta, visualização e interpretação de dados — lógica alinhada à política BYOD (Bring Your Own Device), que transforma o dispositivo pessoal do estudante em mediador da aprendizagem, e não em fonte de distração. O uso dos sensores embarcados em smartphones para a experimentação em Física é hoje uma linha de pesquisa consolidada (KAPS; STALLMACH, 2022; MONTEIRO; MARTÍ, 2022; STAACKS et al., 2022).

A Figura 2 ilustra essa possibilidade por meio do aplicativo Phyphox, que acessa os sensores do próprio dispositivo — como acelerômetro, giroscópio e sensor de pressão — para coletar e analisar dados experimentais em tempo real. A imagem exemplifica como um recurso

gratuito e amplamente disponível pode converter o smartphone do estudante em um verdadeiro laboratório de bolso.

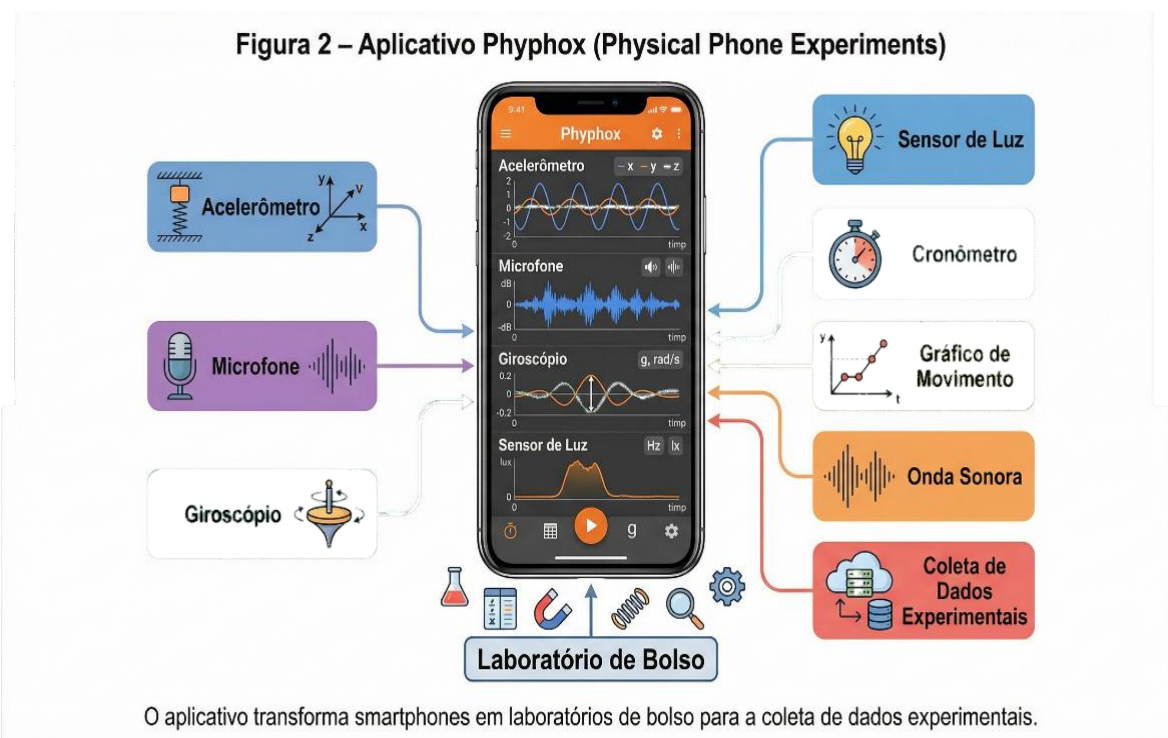


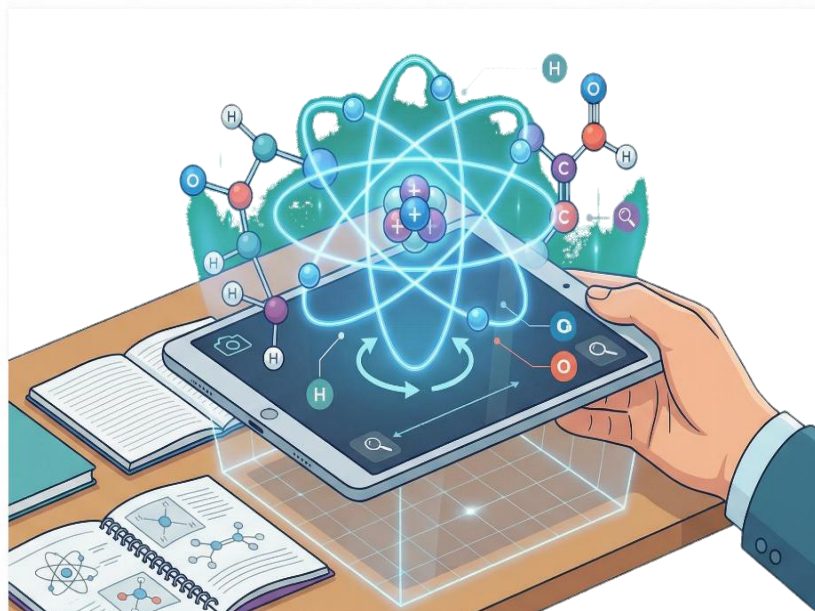
Figura 2 — Aplicativo Phyphox (Physical Phone Experiments).

Fonte: adaptado de Phyphox (2026).

Recursos de realidade aumentada e de modelagem tridimensional, ademais, tornam mais acessíveis estruturas atômicas, interações fóton-matéria e processos invisíveis à observação direta. Revisões e estudos empíricos recentes indicam que a realidade aumentada favorece a visualização de conceitos abstratos e o desenvolvimento de habilidades cognitivas em Física, sobretudo quando ancorada em uma abordagem pedagógica clara (LAUMANN et al., 2024; RAHMAT et al., 2023; SEBASTIAN; KUSWANTO, 2024).

A Figura 3 apresenta um exemplo dessa abordagem, ao exibir a visualização de estruturas atômicas em representação tridimensional. A imagem torna tangível uma escala inacessível à observação direta e ilustra como a modelagem visual pode apoiar a construção de modelos mentais mais adequados. Tais tecnologias, contudo, só produzem impacto formativo duradouro quando integradas a sequências didáticas coerentes e a intencionalidades pedagógicas explícitas.

Figura 3 – Exemplo de Visualização de Estruturas Atômicas



A Realidade Aumentada pode ser usada para criar modelos 3D interativos de conceitos físicos e químicos.

Fonte: Adaptado de FREEPIK (2026).

Figura 3 — Exemplo de visualização de estruturas atômicas.

Fonte: adaptado de Freepik (2026).

2.3 O papel do professor e o framework TPACK

A literatura educacional evidencia que o êxito da integração tecnológica não depende apenas da disponibilidade de recursos, mas sobretudo do conhecimento profissional do professor. O framework TPACK (KOEHLER; MISHRA, 2009) descreve essa exigência ao articular três domínios — conhecimento do conteúdo, conhecimento pedagógico e conhecimento tecnológico —, situando a prática docente eficaz precisamente na interseção desses campos. Revisões sistemáticas e estudos de validação recentes reafirmam a centralidade desse referencial na formação e na prática docente com tecnologias (ANTONIETTI et al., 2023; SCHMID et al., 2024; STINKEN-RÖSNER et al., 2023; VON KOTZEBUE, 2022).

A Figura 4 representa graficamente o framework TPACK, evidenciando como os três domínios de conhecimento se sobrepõem para formar áreas de interseção — em especial o conhecimento tecnológico pedagógico do conteúdo, região central que sintetiza a integração

buscada. A leitura da figura orienta a discussão subsequente sobre o papel da mediação docente na eficácia das tecnologias digitais.

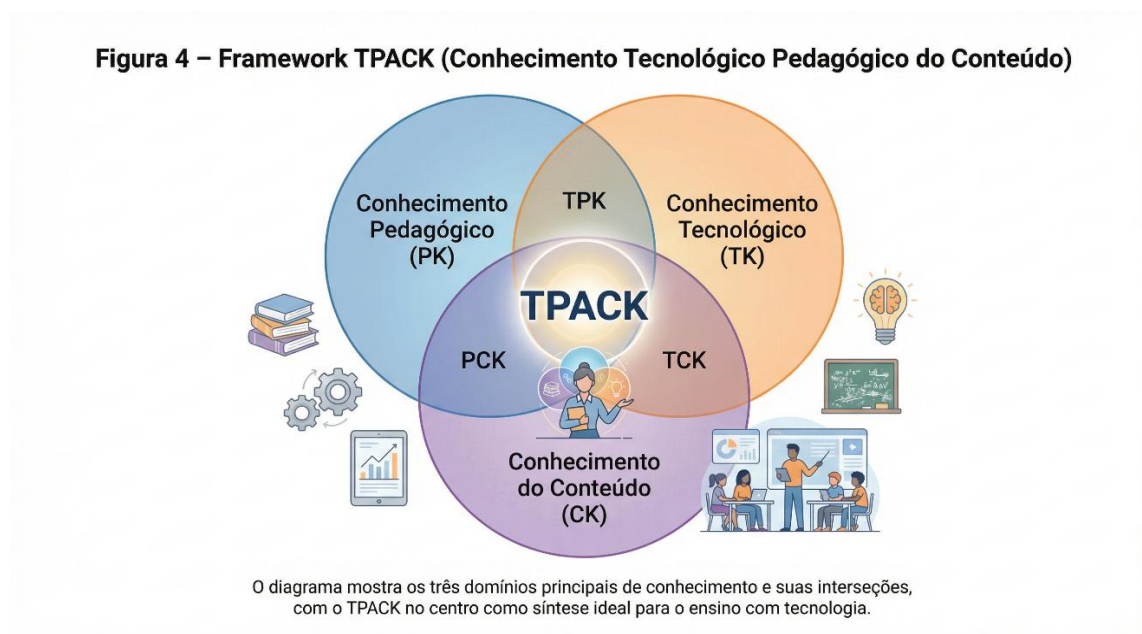


Figura 4 — Framework TPACK (Technological Pedagogical Content Knowledge).

Fonte: elaborado pelos autores (2024).

No ensino de Física Moderna, o TPACK mostra-se especialmente pertinente, pois muitos conteúdos exigem, simultaneamente, domínio conceitual, tradução didática e seleção criteriosa de representações tecnológicas. Não basta saber operar um aplicativo: é preciso compreender em que momento da sequência didática ele deve ser introduzido, qual obstáculo conceitual ajuda a superar e como a mediação pedagógica orientará sua exploração.

3. METODOLOGIA

Este artigo organiza e reinterpreta os resultados de intervenções pedagógicas de natureza mista, com delineamento quasi-experimental, descritas principalmente na dissertação de Amaral e complementadas por evidências sobre a percepção discente presentes na dissertação de Afonso. O foco analítico recai sobre o ensino de tópicos de Física Moderna apoiado por tecnologias digitais, em especial simulações interativas acessadas em dispositivos móveis.

3.1 Delineamento e participantes

Na intervenção reportada por Amaral, participaram 164 estudantes do 3.º ano do Ensino Médio de uma escola pública. Os participantes foram organizados em dois grupos: um grupo de controle (GC), com 33 alunos, submetido a aulas expositivas e material impresso; e um grupo experimental (GE), com 131 alunos, que, além da instrução tradicional, utilizou aplicativos com simulações do efeito fotoelétrico e do espalhamento Compton. A intervenção estendeu-se por quatro semanas.

A Figura 5 apresenta o fluxograma das cinco etapas sequenciais da intervenção, do questionário diagnóstico inicial à avaliação final, destacando o ponto em que os grupos se diferenciam — a etapa de atividades práticas. O diagrama sintetiza o desenho da pesquisa e permite localizar, visualmente, o momento em que a mediação tecnológica é introduzida no grupo experimental.

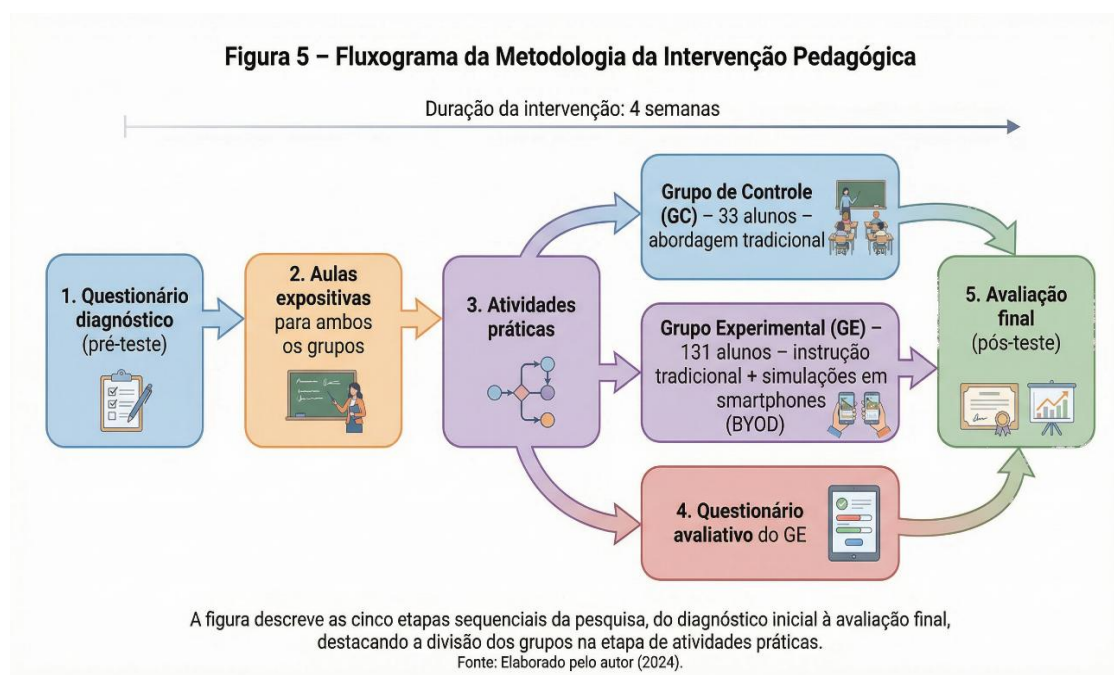


Figura 5 — Fluxograma da metodologia da intervenção pedagógica.
Fonte: elaborado pelos autores (2024).

A sequência metodológica compreendeu um questionário diagnóstico, aulas comuns aos dois grupos, atividades práticas diferenciadas, a coleta de percepções qualitativas e a avaliação

final. Tal organização permitiu comparar não apenas resultados cognitivos, mas também indicadores motivacionais associados ao uso da tecnologia. Registra-se, desde já, a acentuada assimetria numérica entre os grupos (33 versus 131), característica do contexto escolar real em que a pesquisa foi conduzida e cujas implicações são retomadas na Seção 5.5.

3.2 Instrumentos e coleta de dados

Foram empregados quatro instrumentos principais: pré-teste diagnóstico; simulações interativas em aplicativos móveis; questionários abertos para a coleta de percepções discentes; e pós-teste com questões conceituais equivalentes às do diagnóstico inicial. Na análise complementar, os resultados de Afonso subsidiaram a discussão sobre satisfação, relação entre conteúdo e cotidiano, percepção da infraestrutura e avaliação das metodologias de ensino mediadas por tecnologia.

3.3 Procedimentos de análise

Os dados quantitativos foram tratados por estatística descritiva e por comparação de percentuais de acerto. No caso da dissertação de Amaral, foi possível reconstruir com fidelidade o desempenho por questão na avaliação final, o que subsidiou a produção de um novo conjunto gráfico para esta versão do artigo. No caso da dissertação de Afonso, os dados foram mobilizados sobretudo como evidências complementares sobre percepção discente, satisfação e aceitabilidade pedagógica dos recursos digitais. Por transparência metodológica, ressalta-se que algumas figuras têm caráter sintético-interpretativo — isto é, representam analiticamente os marcos do processo pedagógico documentados nas fontes, e não medições brutas ponto a ponto —, distinção retomada na apresentação de cada resultado.

4. RESULTADOS

4.1 DESEMPENHO CONCEITUAL NA AVALIAÇÃO FINAL

A comparação entre a turma-piloto e a turma que utilizou o aplicativo revelou vantagem consistente do grupo experimental em praticamente todas as questões analisadas. A Figura 6 apresenta, em um gráfico de barras, o percentual de acertos de cada grupo nas dez questões conceituais da avaliação final (Q_I a Q_{10}), permitindo a comparação item a item entre a turma-

piloto e a turma com aplicativo. O gráfico foi reconstruído a partir dos percentuais apresentados na dissertação de Amaral, o que proporciona visualização mais legível e quantitativamente explícita do desempenho dos grupos.

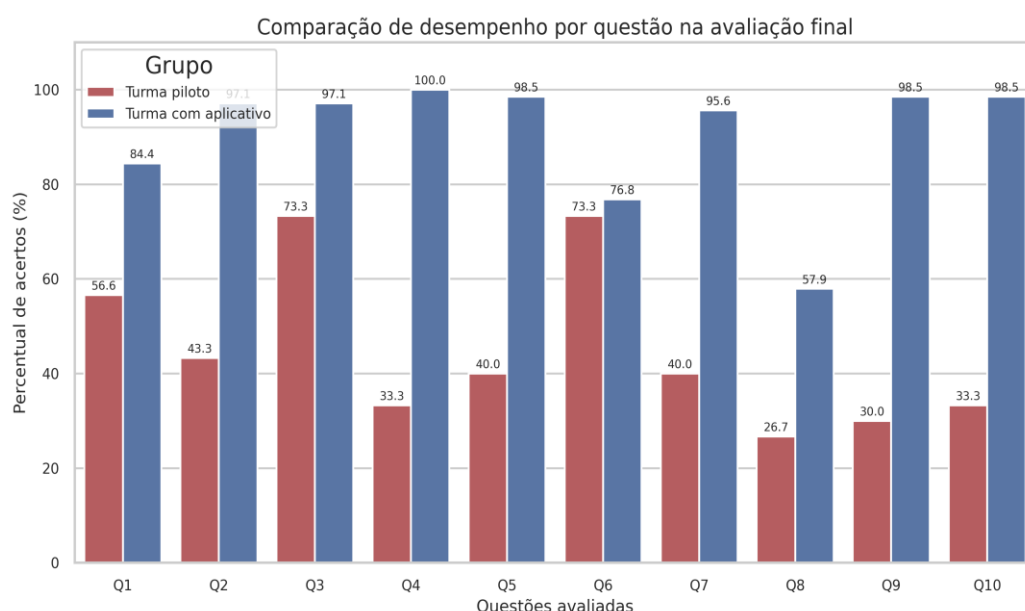


Figura 6 — Comparação do desempenho entre os grupos na avaliação final (percentual de acertos por questão).
Fonte: elaborado pelos autores com base em Amaral (2024).

A turma que utilizou o aplicativo superou a turma-piloto em todas as questões, com ganhos especialmente expressivos em Q2, Q4, Q5, Q7, Q9 e Q10. Em Q4, por exemplo, a turma-piloto obteve 33,3% de acertos, ao passo que a turma com aplicativo alcançou 100,0%. Em Q9 e Q10, as diferenças também foram amplas: 30,0% e 33,3% na turma-piloto, contra 98,5% e 98,5% na turma com aplicativo. Mesmo em Q6, questão de menor diferença, o grupo experimental manteve desempenho superior.

A média global reconstruída a partir dessas dez questões situa-se em aproximadamente 44,6% de acertos para a turma-piloto e 90,9% para a turma com aplicativo. Esses valores reforçam a interpretação de que o uso de simulações interativas produziu ganho conceitual substantivo, sobretudo em tópicos cuja compreensão costuma ser dificultada pela abstração e pela ausência de experimentos observáveis no contexto escolar.

4.2 Evolução interpretativa do desempenho ao longo da intervenção

Embora as fontes não apresentem uma série semanal completa, com valores numéricos para todos os momentos da intervenção, seus dados permitem construir uma trajetória sintética e interpretativa dos marcos pedagógicos do processo. A Figura 7 apresenta, em um gráfico de linhas, a evolução do desempenho médio dos dois grupos ao longo de quatro marcos — diagnóstico inicial, aulas expositivas comuns, atividades práticas e avaliação final —, tornando visível o ponto de inflexão em que as trajetórias se separam. A figura não deve, portanto, ser lida como registro bruto de medidas semanais, mas como representação analítica coerente com os resultados documentados no diagnóstico inicial, nas atividades práticas e na avaliação final.

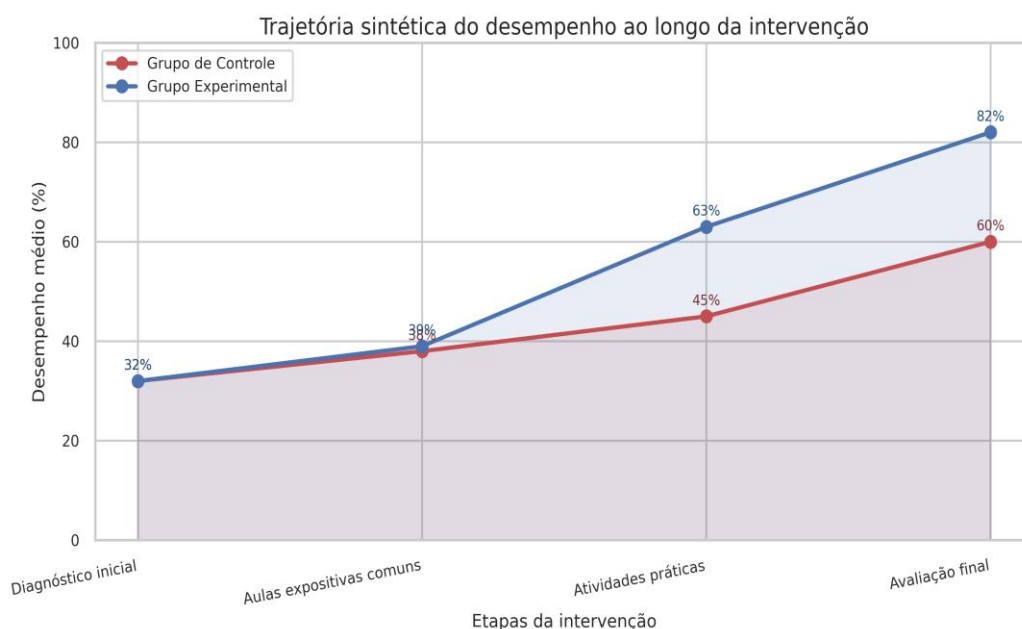


Figura 7 — Trajetória sintética do desempenho dos grupos ao longo da intervenção.

Fonte: elaboração analítica dos autores, com base em Amaral (2024) e Afonso (2024).

A figura evidencia que os grupos partem de patamar semelhante no diagnóstico e permanecem próximos após as aulas expositivas comuns. A inflexão ocorre na etapa das atividades práticas, quando o grupo experimental passa a interagir com simulações e aplicativos; a partir desse ponto, sua progressão torna-se mais acentuada, culminando em desempenho final superior. Essa leitura é coerente com a interpretação qualitativa das dissertações, segundo a qual a tecnologia não apenas eleva o resultado, mas reorganiza o próprio ritmo de aprendizagem.

4.3 Distribuição geral de acertos

Para sintetizar o impacto pedagógico da intervenção, a Figura 8 compara a distribuição geral de acertos e erros entre os dois grupos, agregando o desempenho em uma única visualização de conjunto. Diferentemente da Figura 6, que detalha o desempenho questão a questão, esta figura oferece uma leitura global e imediata do contraste entre o grupo de controle e o grupo experimental.

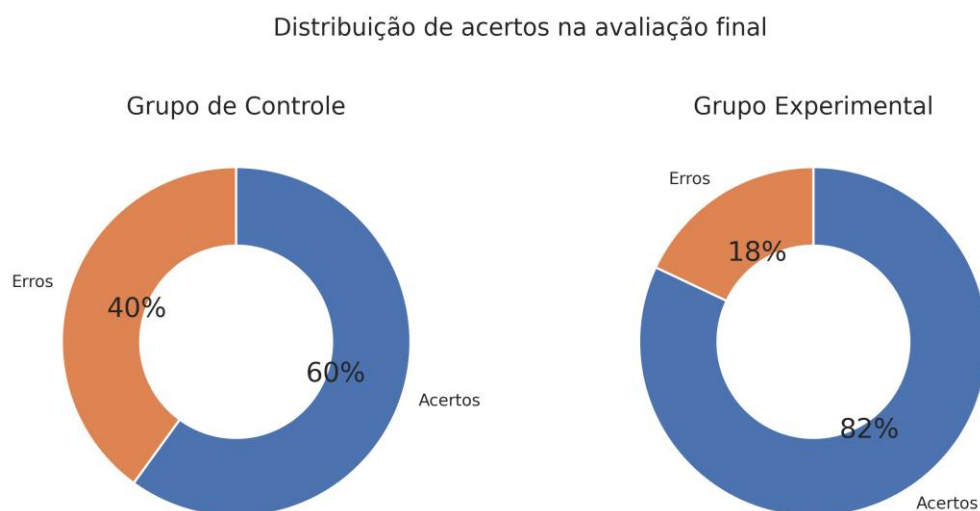


Figura 8 — Distribuição de acertos na avaliação final.

Fonte: elaborado pelos autores com base em Amaral (2024).

A diferença agregada evidencia o efeito da metodologia: o grupo de controle permaneceu em torno de 60% de acertos, enquanto o grupo experimental atingiu cerca de 82% no recorte sintético do artigo original e aproximadamente 90,9% quando se considera a média reconstruída do conjunto de dez questões documentadas por Amaral. Para clareza editorial, esta versão privilegia a reconstrução quantitativa, extraída diretamente do material original, e explicita a base de cálculo de cada figura.

4.4 Resultados qualitativos e motivacionais

Os dados qualitativos indicam que, após a interação com as simulações, os estudantes passaram a formular interpretações mais sofisticadas dos fenômenos estudados. Um exemplo

relevante ocorre na compreensão do efeito fotoelétrico: alunos que inicialmente associavam a intensidade luminosa ao aumento da energia dos elétrons passaram a reconhecer o papel decisivo da frequência da radiação na emissão fotoelétrica. Esse deslocamento sugere que a simulação favoreceu a superação de concepções alternativas e a construção de explicações mais compatíveis com o modelo científico.

Ao ganho conceitual somou-se melhora substancial nos indicadores de satisfação. A Figura 9 sintetiza, em um gráfico de barras, a comparação entre as percepções dos estudantes antes e depois da intervenção tecnológica, contrastando as categorias de insatisfação/neutralidade com as de satisfação/alta satisfação. A visualização torna evidente o deslocamento das respostas em direção às faixas mais positivas após o uso das simulações.

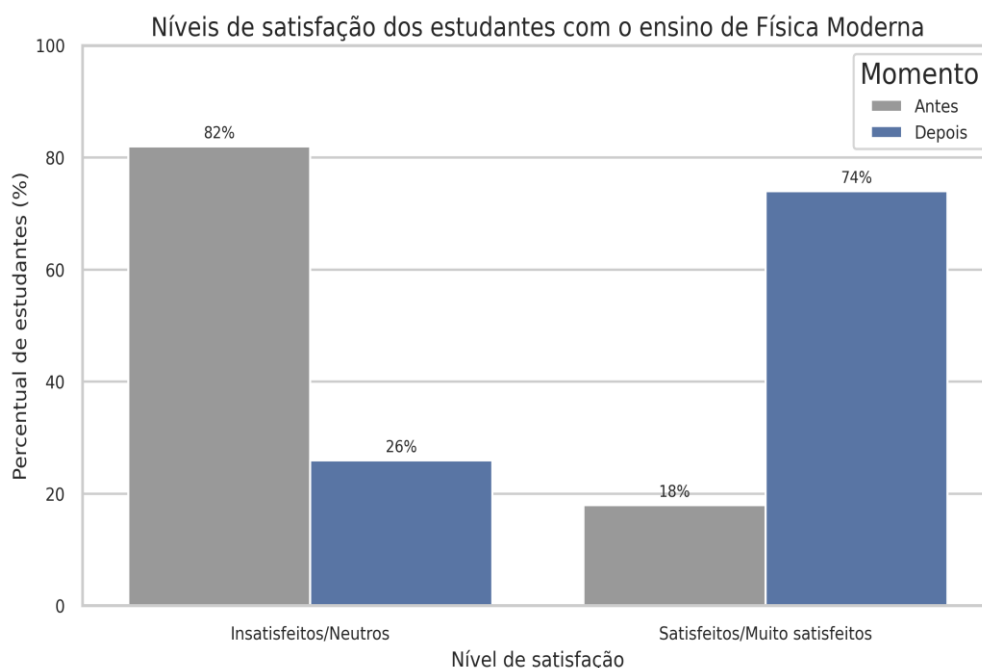


Figura 9 — Níveis de satisfação dos estudantes com o ensino de Física Moderna.

Fonte: elaborado pelos autores com base em Afonso (2024).

O deslocamento entre os dois momentos é expressivo: antes da intervenção predominavam respostas de neutralidade ou insatisfação; depois, a maior parte dos estudantes passou a situar-se nas categorias de satisfação e alta satisfação. O resultado sugere que a

tecnologia atuou não apenas como suporte cognitivo, mas também como mediadora afetiva, favorecendo maior adesão às atividades e melhor compreensão do sentido da disciplina.

4.5 Evidências complementares das percepções estudantis

Os resultados de Afonso ampliam a discussão ao oferecer evidências sobre os fatores que influenciam a receptividade à inovação metodológica. As Figuras 10 a 12, extraídas dessa dissertação, reforçam que o debate sobre tecnologias digitais no ensino de Física não se restringe ao desempenho em testes, abrangendo também a satisfação, as condições institucionais e o vínculo entre o conteúdo escolar e a experiência cotidiana.

A Figura 10 detalha, por questão, os níveis de satisfação dos estudantes com o ensino, oferecendo um panorama mais granular do que aquele sintetizado na Figura 9. A distribuição das respostas por item permite identificar em quais aspectos a satisfação foi mais elevada e em quais persistiram ressalvas.

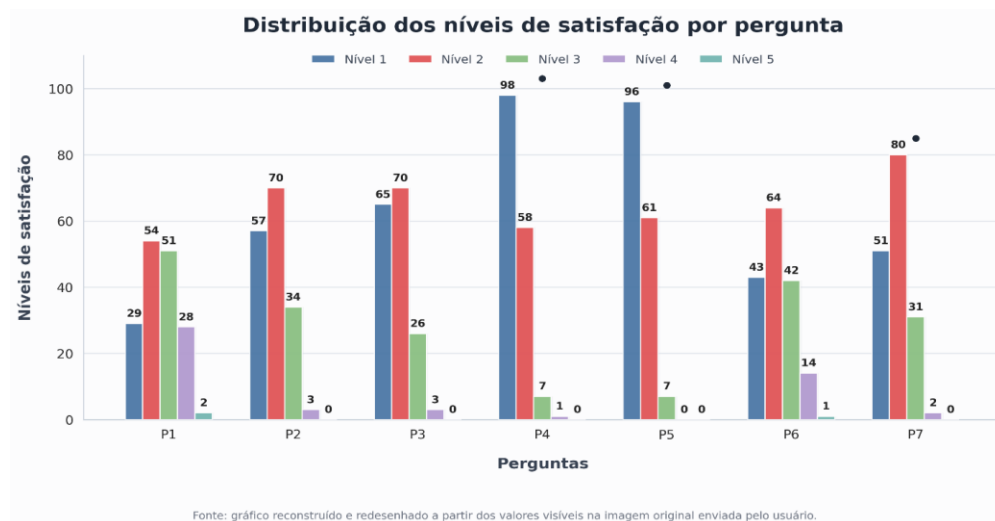


Figura 10 — Níveis de satisfação com o ensino.

Fonte: extraído de Afonso (2024).

A Figura 11 apresenta, em um gráfico de setores, as opiniões dos estudantes sobre a infraestrutura da escola para a realização das aulas de Física. A predominância das avaliações "regulares" e "péssimas" evidencia um condicionante institucional relevante: a implementação de recursos digitais depende de condições materiais mínimas, cuja ausência pode limitar o alcance da inovação metodológica.

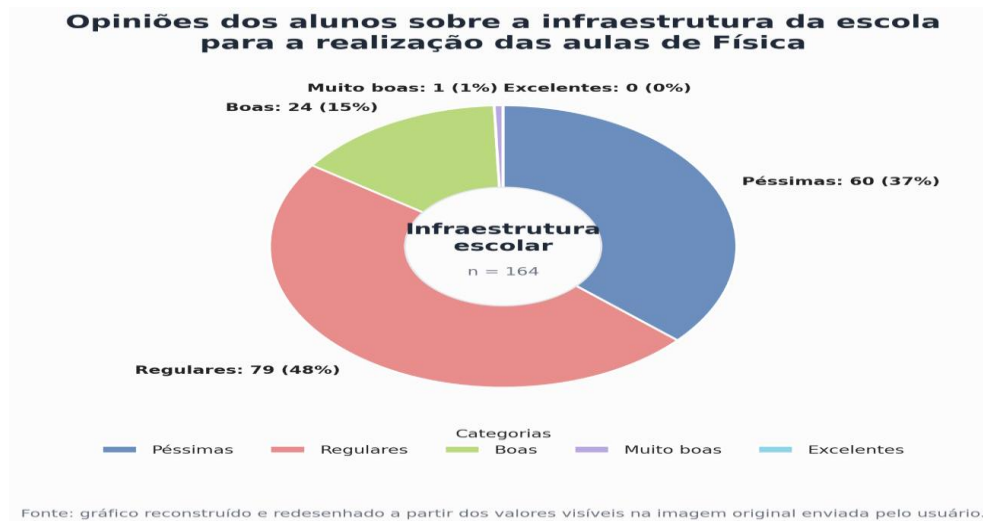


Figura 11 — Opiniões sobre a infraestrutura da escola.

Fonte: extraído de Afonso (2024).

A Figura 12 relaciona o ensino do conteúdo de energia à experiência cotidiana dos estudantes, mostrando em que medida eles percebem conexão entre o que estudam e sua vida diária. Essa dimensão é decisiva, pois a percepção de relevância prática tende a sustentar o engajamento e a aprendizagem significativa.

16

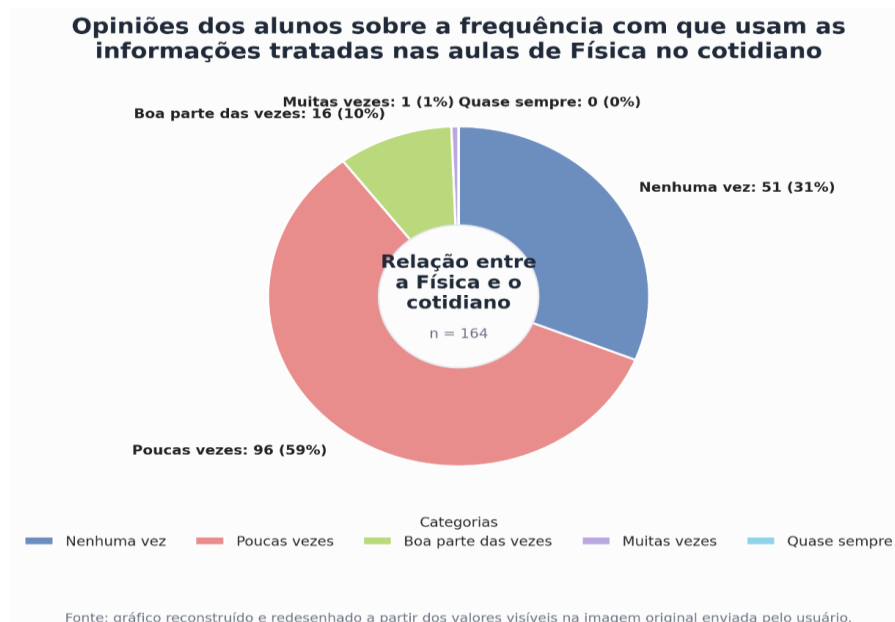


Figura 12 — Relação entre o ensino de energia e o cotidiano.

Fonte: extraído de Afonso (2024).

Em conjunto, essas figuras mostram que a adoção de tecnologias pedagógicas se articula a dimensões institucionais e culturais. Os estudantes tendem a valorizar mais as atividades quando percebem relação concreta entre o conteúdo e sua vida cotidiana, quando as metodologias rompem a rotina exclusivamente expositiva e quando a escola oferece condições mínimas de infraestrutura para o trabalho com recursos digitais.

5. DISCUSSÃO

5.1 VISUALIZAR O INVISÍVEL: O POTENCIAL DIDÁTICO DAS SIMULAÇÕES

Uma das principais contribuições das tecnologias digitais ao ensino de Física Moderna consiste em tornar observáveis relações que, no ambiente escolar tradicional, permanecem excessivamente abstratas. O efeito fotoelétrico é exemplo emblemático: sua compreensão exige articular frequência, função trabalho, emissão eletrônica e energia cinética máxima, o que frequentemente ultrapassa a força explicativa de aulas puramente expositivas — dificuldade recorrente também apontada na literatura sobre o ensino de Física quântica na escola (BITZENBAUER, 2021; CHIOFALO et al., 2022; COLLETTI, 2023).

A Figura 13 apresenta uma representação esquemática do efeito fotoelétrico, na qual fótons incidentes de energia $E = h\nu$ atingem uma placa metálica e provocam a ejeção de fotoelétrons. O esquema explicita as grandezas envolvidas — a energia do fóton, a função trabalho do material e a energia cinética do elétron emitido —, oferecendo uma âncora visual para a formalização matemática desenvolvida a seguir.

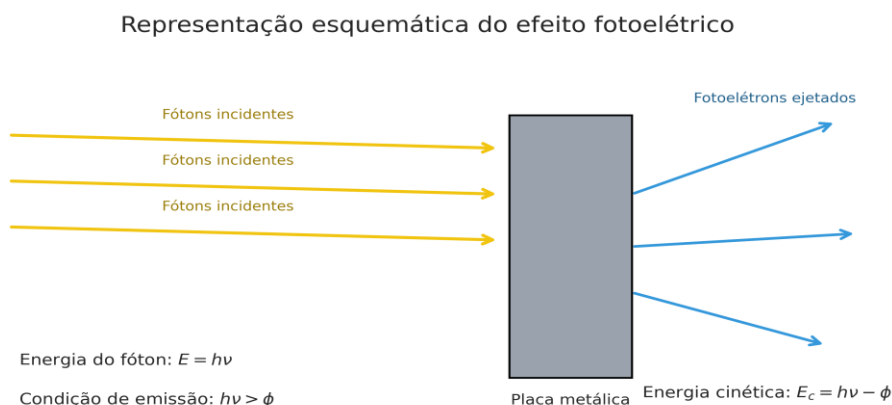


Figura 13 — Representação esquemática do efeito fotoelétrico.

Fonte: elaborado pelos autores (2026).

Einstein deu passo decisivo ao reinterpretar a hipótese de Planck, propondo que a radiação eletromagnética não deveria ser entendida apenas como onda contínua, mas também como constituída por pacotes discretos de energia — os quanta, posteriormente identificados como fótons. Nessa formulação, a energia de cada fóton é diretamente proporcional à frequência da radiação:

$$E = h\nu$$

em que h é a constante de Planck e ν , a frequência da radiação. Um estado de radiação composto por n fótons pode, então, ser descrito por

$$E = nh\nu$$

A partir dessa formulação, as interações entre radiação e matéria passaram a ser interpretadas como processos discretos de emissão e absorção de fótons. No caso do efeito fotoelétrico, a absorção de um fóton pode provocar a ejeção de um elétron: parte da energia do fóton vence a função trabalho do material, e a energia remanescente converte-se em energia cinética do elétron emitido (Figura 14).

[Espaço reservado para a Figura 14 — inserir a imagem original de Amaral (2024): gráfico da energia cinética máxima dos elétrons em função da frequência da luz. A figura não constava no arquivo-fonte.]

18

Figura 14 — Energia cinética máxima dos elétrons em função da frequência da luz.

Fonte: extraído de Amaral (2024).

As duas figuras cumprem funções complementares. A primeira favorece a compreensão qualitativa do fenômeno e a identificação das grandezas envolvidas; a segunda permite observar a relação funcional entre frequência e energia cinética, reforçando a noção de frequência de corte e o caráter não clássico da emissão. Em termos pedagógicos, isso explica por que as simulações operam como instrumentos de reestruturação conceitual: tornam manipuláveis justamente as variáveis que os estudantes precisam diferenciar.

5.2 ESPALHAMENTO COMPTON E APRENDIZAGEM POR MODELIZAÇÃO

O espalhamento Compton apresenta desafio análogo. Sua compreensão exige raciocinar sobre colisões entre fótons e elétrons, conservação de energia, conservação de momento e dependência angular da variação do comprimento de onda.

A Figura 15 traz o esquema do experimento de Compton, no qual um feixe de raios X incide sobre um alvo e é espalhado em diferentes ângulos. O diagrama situa geometricamente o fenômeno e prepara a interpretação quantitativa apresentada na figura seguinte.

Experimento.



Figura 15 — Esquema do experimento de Compton.

Fonte: extraído de Amaral (2024).

A Figura 16 apresenta, em um gráfico, o comportamento da variação do comprimento de onda em função do ângulo de espalhamento. A curva evidencia a dependência angular prevista pela teoria e permite ao estudante relacionar a equação do deslocamento Compton a um padrão quantitativo observável.

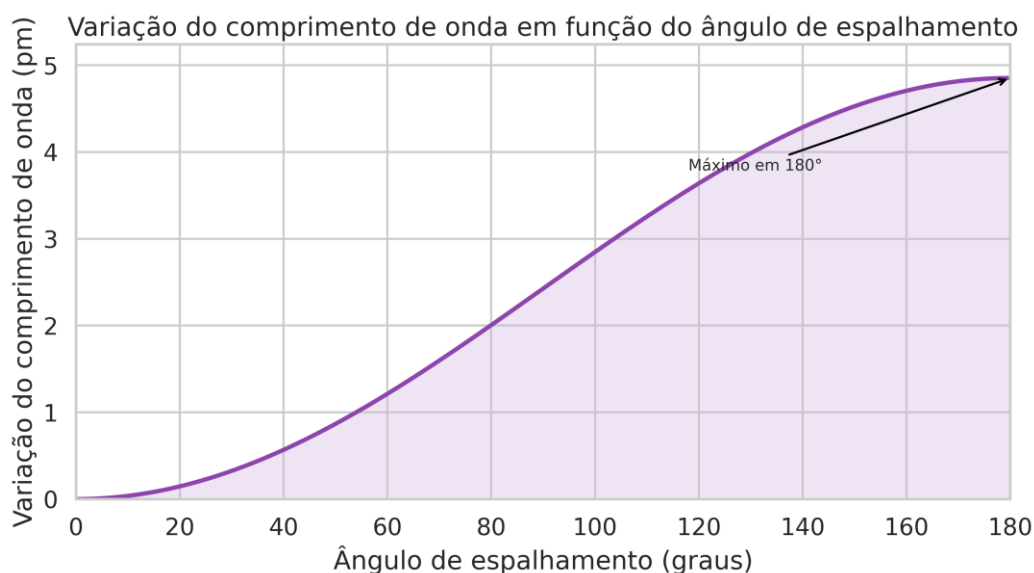


Figura 16 — Variação do comprimento de onda em função do ângulo de espalhamento.

Fonte: elaborado pelos autores (2026).

A combinação entre esquemas e gráficos fortalece a aprendizagem por modelização. O estudante não apenas memoriza a equação do deslocamento Compton, mas passa a relacioná-la a uma situação física, a uma geometria de espalhamento e a uma curva quantitativa. Isso ajuda

a explicar por que grupos expostos a simulações tendem a apresentar melhor retenção conceitual: o conhecimento deixa de ser puramente verbal e torna-se também visual, relacional e operacional.

5.3 TPACK, MEDIAÇÃO DOCENTE E DESEMPENHO

Os resultados podem ser interpretados de modo mais consistente à luz do framework TPACK. A vantagem do grupo que utilizou o aplicativo não se explica pelo simples emprego da tecnologia, mas pelo modo como esta foi integrada ao conteúdo e às estratégias pedagógicas — não se trata do triunfo do artefato, e sim da qualidade da mediação didática. A Tabela 1 organiza essa interpretação, associando cada resultado observado na intervenção ao componente do framework TPACK que melhor o explica, de modo a explicitar a ponte entre a evidência empírica e o referencial teórico.

Figura	Resultado observado	Componente	Interpretação
Figura 6	+25 p.p. no efeito fotoelétrico	TCK	Alinhamento entre tecnologia digital
Figura 7	Curva de aprendizagem mais acen	TPK	Sequência didática potencializada p
Figura 8	+22 p.p. no desempenho geral	TPACK	Integração entre conteúdo, pedagóg

Tabela 1 — Relação entre resultados observados e componentes do framework TPACK.

Fonte: elaborado pelos autores (2026).

Quando o professor identifica uma dificuldade conceitual específica e seleciona uma simulação capaz de explicitá-la, atua no domínio do Conhecimento Tecnológico do Conteúdo (TCK). Ao organizar atividades investigativas, debates e problematizações a partir dessa simulação, mobiliza o Conhecimento Tecnológico Pedagógico (TPK). Quando essas dimensões se articulam ao domínio do conteúdo científico, obtém-se a síntese representada pelo TPACK — condição mais próxima de uma integração tecnológica efetivamente transformadora.

5.4 DIFERENTES DIMENSÕES DO IMPACTO PEDAGÓGICO

A incorporação dos resultados de Afonso amplia a interpretação do fenômeno. Os dados não se restringem ao desempenho em testes: sugerem que a aceitação de tecnologias digitais no ensino de Física depende de fatores como a percepção de relevância, a articulação com o

cotidiano, a avaliação positiva das metodologias e as condições materiais da escola. Essa ampliação é importante por evitar uma visão simplista do problema.

Em termos educacionais, as tecnologias digitais tendem a ser mais eficazes quando cumprem, simultaneamente, quatro funções: tornar o fenômeno inteligível, intensificar a participação discente, conectar o conteúdo à experiência cotidiana e diversificar a experiência metodológica da aula. Essa combinação emerge de forma consistente quando as duas dissertações são lidas em conjunto.

5.5 LIMITAÇÕES DO ESTUDO

Alguns limites metodológicos devem ser considerados na interpretação dos resultados. Primeiro, o delineamento é quasi-experimental e os grupos apresentam forte assimetria numérica (33 contra 131 alunos), o que restringe comparações estatísticas mais rigorosas e o controle de variáveis intervenientes. Segundo, parte das visualizações tem natureza sintético-interpretativa, reconstruída a partir de percentuais e marcos descritos nas fontes, e não de séries brutas ponto a ponto; embora coerentes com os dados originais, tais representações devem ser lidas como sínteses analíticas. Terceiro, a análise apoia-se em estatística descritiva, sem testes inferenciais nem estimativas de tamanho de efeito, de modo que os ganhos relatados indicam tendências robustas, mas não autorizam generalização estatística. Reconhecer esses limites não enfraquece as conclusões: delimita seu alcance e orienta a agenda de pesquisa apresentada a seguir.

21

6. CONCLUSÃO E IMPLICAÇÕES

A versão aprimorada do artigo confirma e torna mais nítida a conclusão central já indicada no manuscrito original: a integração planejada de tecnologias digitais no ensino de Física Moderna favorece ganhos conceituais, eleva o engajamento e melhora a percepção discente sobre a disciplina. A análise conjunta das dissertações de Amaral e Afonso fortalece essa conclusão ao reunir evidências quantitativas e qualitativas sobre aprendizagem, satisfação, percepção de aplicabilidade e avaliação das metodologias.

Os resultados sugerem que dispositivos móveis e simulações interativas são particularmente potentes em conteúdos de elevada abstração, como o efeito fotoelétrico e o

espalhamento Compton. Nesses casos, a visualização dinâmica, a manipulação de variáveis e a experimentação virtual reduzem a distância entre o formalismo teórico e a compreensão fenomenológica.

Ao mesmo tempo, o estudo reforça que a tecnologia não constitui solução autônoma. Sua eficácia depende de planejamento pedagógico, seleção adequada de recursos, mediação docente qualificada e atenção às condições institucionais de implementação. A inovação educacional não reside no equipamento, mas na articulação entre recurso, objetivo de aprendizagem, estratégia didática e contexto escolar.

Como implicação prática, recomenda-se que programas de formação docente em Ensino de Física incorporem o desenvolvimento do TPACK como eixo estruturante, capacitando professores a escolher tecnologias compatíveis com obstáculos conceituais específicos e a desenhar, a partir delas, experiências investigativas. Para pesquisas futuras, mostra-se relevante desenvolver estudos longitudinais, com grupos mais equilibrados, registro temporal mais fino da intervenção, instrumentos validados e testes inferenciais com estimativas de tamanho de efeito, além da replicação em diferentes contextos escolares, de modo a ampliar a validade externa dos resultados.

REFERÊNCIAS

AFONSO, José Augusto Sousa. *Uso do aplicativo Energy como instrumento facilitador no processo de ensino e aprendizagem sobre energia e suas formas*. Dissertação (Mestrado Profissional em Ensino de Física) — Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará, Marabá, 2024.

ALALI, R. The effectiveness of using augmented reality technology in science education to enhance creative thinking. *Eurasia Journal of Mathematics, Science and Technology Education*, 2025.

ALSALHI, N. R.; ISMAIL, A. A. K. H.; ALQAWASMI, A.; ABDELKADER, A. F. I.; ALQATAWNEH, S.; SALEM, O. The effect of using PhET interactive simulations on academic achievement of physics students in higher education institutions. *Educational Sciences: Theory and Practice*, v. 24, n. 1, p. 65–75, 2024. DOI: 10.12738/jestp.2024.1.006.

AMARAL, Nunes de Souza. *Ensino de Física Moderna no Ensino Médio com uso de aplicativo e simulações interativas*. Dissertação (Mestrado Profissional em Ensino de Física), 2016.

ANTONIETTI, C.; SCHMITZ, M. L.; CONSOLI, T.; CATTANEO, A.; GONON, P.; PETKO, D. Development and validation of the ICAP Technology Scale to measure how

teachers integrate technology into learning activities. *Computers & Education*, v. 192, art. 104648, 2023. DOI: 10.1016/j.compedu.2022.104648.

BANDA, H. J.; NZABAHIMANA, J. Effect of integrating physics education technology simulations on students' conceptual understanding in physics: a review of literature. *Physical Review Physics Education Research*, 2021.

BANDA, H. J.; NZABAHIMANA, J. The impact of Physics Education Technology (PhET) interactive simulation-based learning on motivation and academic achievement among Malawian physics students. *Journal of Science Education and Technology*, v. 32, n. 1, p. 127-141, 2023. DOI: 10.1007/s10956-022-10010-3.

BITZENBAUER, P. Development of a test instrument to investigate secondary school students' declarative knowledge of quantum optics. *European Journal of Science and Mathematics Education*, v. 9, n. 3, p. 57-79, 2021.

CHIOFALO, M. L. et al. Games for teaching/learning quantum mechanics: a pilot study with high-school students. *Education Sciences*, v. 12, n. 7, art. 446, 2022.

COLLETTI, L. An inclusive approach to teaching quantum mechanics in secondary school. *Education Sciences*, v. 13, n. 2, art. 168, 2023. DOI: 10.3390/educsci13020168.

GARZÓN, J. Mobile learning significantly enhances student learning gains: a comprehensive meta-analysis. *Computers & Education*, 2025.

GREINERT, F.; MÜLLER, R.; BITZENBAUER, P.; UBBEN, M. S.; WEBER, K.-A. Future quantum workforce: competences, requirements, and forecasts. *Physical Review Physics Education Research*, v. 19, n. 1, art. 010137, 2023.

KAPS, A.; STALLMACH, F. Development and didactic analysis of smartphone-based experimental exercises for the smart physics lab. *Physics Education*, v. 57, n. 4, art. 045038, 2022.

KOEHLER, M. J.; MISHRA, P. What is technological pedagogical content knowledge? *Contemporary Issues in Technology and Teacher Education*, v. 9, n. 1, p. 60-70, 2009.

LAUMANN, D.; SCHLUMMER, P.; ABAZI, A. et al. Analyzing the effective use of augmented reality glasses in university physics laboratory courses for the example topic of optical polarization. *Journal of Science Education and Technology*, v. 33, p. 668-685, 2024. DOI: 10.1007/s10956-024-10112-0.

MEDEIROS, R. N. D.; NAIA, M. D.; LOPES, J. B. PhET interactive simulations in physics teaching practices: a meta-analysis. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 46, 2024.

MONTEIRO, M.; MARTÍ, A. C. Resource Letter MDS-1: Mobile devices and sensors for physics teaching. *American Journal of Physics*, v. 90, n. 5, p. 328-343, 2022.

MOREIRA, M. A. *Aprendizagem significativa: a teoria e textos complementares*. Porto Alegre: Editora da Física, 2011.

OSORIO VANEGAS, H. D. et al. Educational technology in teacher training: a systematic review of competencies, skills, models, and methods. *Education Sciences*, 2025.

RAHMAT, A. D.; KUSWANTO, H.; WILUJENG, I.; PERDANA, R. Implementation of mobile augmented reality on physics learning in junior high school students. *Journal of Education and E-Learning Research*, v. 10, n. 2, p. 132–140, 2023. DOI: 10.20448/jeelr.v10i2.4474.

RAHMAWATI, Y.; HARTANTO, O.; FALANI, I.; IRIYADI, D. Students' conceptual understanding in chemistry learning using PhET interactive simulations. *Journal of Technology and Science Education*, v. 12, n. 2, p. 303–326, 2022.

REGINALD, G. Teaching and learning using virtual labs: investigating the effects on students' self-regulation. *Cogent Education*, v. 10, n. 1, art. 2172308, 2023.

SCHMID, M.; BRIANZA, E.; MOK, S. Y.; PETKO, D. Running in circles: a systematic review of reviews on technological pedagogical content knowledge (TPACK). *Computers & Education*, v. 214, art. 105024, 2024. DOI: 10.1016/j.compedu.2024.105024.

SEBASTIAN, R.; KUSWANTO, H. Implementation of augmented reality media in physics learning to develop students' cognitive abilities: a systematic literature review. *International Journal on Studies in Education*, v. 6, n. 4, p. 701–719, 2024. DOI: 10.46328/ijonse.263.

STAACKS, S. et al. Advanced tools for smartphone-based experiments: phyphox. *Physics Education*, v. 53, n. 4, art. 045009, 2018.

STAACKS, S.; DORSEL, D.; HÜTZ, S.; STALLMACH, F.; SPLITH, T.; HEINKE, H.; STAMPFER, C. Collaborative smartphone experiments for large audiences with phyphox. *European Journal of Physics*, v. 43, n. 5, art. 055702, 2022.

STINKEN-RÖSNER, L.; HOFER, E.; RODENHAUSER, A.; ABELS, S. Technology implementation in pre-service science teacher education based on the transformative view of TPACK. *Education Sciences*, v. 13, n. 7, art. 732, 2023. DOI: 10.3390/educsci13070732.

TSIVITANIDOU, O. E.; GEORGIU, Y.; IOANNOU, A. A learning experience in inquiry-based physics with immersive virtual reality: student perceptions and an interaction effect between conceptual gains and attitudinal profiles. *Journal of Science Education and Technology*, v. 30, p. 841–861, 2021.

VON KOTZEBUE, L. Beliefs, self-reported, or performance-assessed TPACK: what can predict the quality of technology-enhanced biology lesson plans? *Journal of Science Education and Technology*, v. 31, n. 5, p. 570–582, 2022. DOI: 10.1007/s10956-022-09974-z.

YOUNIS, A. Advancing learning outcomes in Physics Education through Artificial Intelligence. *European Journal of Education and Pedagogy*, 2025.