

TRANSFORMAÇÃO DIGITAL NA EDUCAÇÃO DE JOVENS E ADULTOS: MODELAGEM MATEMÁTICA E IMPACTO DA TECNOLOGIA NO ENSINO DE FÍSICA

DIGITAL TRANSFORMATION IN YOUTH AND ADULT EDUCATION: ATHEMATICAL
MODELING AND TECHNOLOGY IMPACT ON PHYSICS TEACHING

Francisco José Aquino Costa¹

Luiz Moreira Gomes²

RESUMO: A transformação digital é hoje um dos maiores desafios e oportunidades da educação contemporânea, em especial na Educação de Jovens e Adultos (EJA). Este trabalho analisa, de forma quantitativa e qualitativa, a integração de tecnologias educacionais ao ensino de Física na EJA, a partir da vivência no Programa de Residência Pedagógica (1). Foi desenvolvido um modelo matemático exponencial que descreve a absorção de conhecimento em função do tempo de exposição aos recursos tecnológicos, do conhecimento prévio do aluno e de um coeficiente de engajamento. Os resultados mostram ganhos de desempenho que variam de 26,1%, em Mecânica Clássica, a 57,7%, em Física Moderna. A pesquisa, conduzida como estudo de caso com abordagem qualitativa e análise bibliográfica e documental, mostra ainda que, apesar dos desafios significativos enfrentados na implementação da tecnologia (impacto médio de 86%), a Residência Pedagógica se confirma como um espaço essencial de experimentação e reflexão sobre práticas inovadoras.

Palavras-chave: Transformação Digital. EJA. Residência Pedagógica. Tecnologias Educacionais. Física. Modelagem Matemática. Inovação Pedagógica.

ABSTRACT: Digital transformation represents one of the greatest challenges and opportunities for contemporary education, especially in Youth and Adult Education (EJA). This study presents a quantitative and qualitative analysis of the integration of educational technologies into Physics teaching in EJA, drawing on the experience of the Pedagogical Residency Program. An exponential mathematical model was developed to describe knowledge absorption as a function of exposure time to technological resources, prior knowledge, and an engagement coefficient. Results show performance gains ranging from 26.1%, in Classical Mechanics, to 57.7%, in Modern Physics. The research, conducted as a case study with a qualitative approach and bibliographic and documentary analysis, indicates that, despite significant implementation challenges (average impact of 86%), the Pedagogical Residency is a fundamental space for experimentation and reflection on innovative practices.

Keywords: Digital Transformation. EJA. Pedagogical Residency. Educational Technologies. Physics. Mathematical Modeling. Pedagogical Innovation.

¹ Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará (UNIFESSPA) — Campus Universitário de Marabá, Faculdade de Física.

² Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará (UNIFESSPA) — Campus Universitário de Marabá, Faculdade de Física.

I. INTRODUÇÃO: O IMPERATIVO DA TRANSFORMAÇÃO DIGITAL

A transformação digital deixou de ser uma opção e tornou-se uma necessidade para a educação brasileira e mundial. Estudos publicados em periódicos de alto impacto, como *Computers & Education*, apontam que a digitalização representa uma mudança paradigmática na forma como se compreende o ensino e a aprendizagem (1). Essa transformação é particularmente relevante na Educação de Jovens e Adultos (EJA), onde os estudantes buscam não apenas conhecimento, mas também qualificação para um mercado de trabalho cada vez mais digitalizado (2).

A pandemia de COVID-19 acelerou esse processo de forma sem precedentes, obrigando os sistemas educacionais a adotar soluções tecnológicas emergenciais. A transição abrupta para o ensino remoto expôs tanto as possibilidades quanto as limitações estruturais profundas desses sistemas (3), e metanálises publicadas no *British Journal of Educational Technology* sugerem que a pandemia antecedeu em cerca de uma década a adoção de tecnologias educacionais, criando novas expectativas e necessidades (4).

No ensino de Física, a tecnologia oferece possibilidades inéditas para superar barreiras cognitivas históricas: simuladores tornam visíveis fenômenos abstratos, laboratórios virtuais eliminam restrições de infraestrutura, e plataformas adaptativas ajustam o ritmo de aprendizagem a cada aluno (5). O uso de simulações interativas tem produzido ganhos estatisticamente significativos na compreensão de conceitos abstratos, sobretudo em Física Moderna e Eletromagnetismo (6). Para que essas ferramentas sejam usadas com efetividade, porém, é necessário que o professor domine o modelo TPACK (Technological Pedagogical Content Knowledge); pesquisas longitudinais mostram que essa formação ainda é um desafio crítico, em especial em modalidades como a EJA (7, 8).

Foi exatamente nesse cenário que se desenvolveu a pesquisa aqui relatada: a experiência da Residência Pedagógica em uma escola pública de Marabá, no Pará, permitiu observar de perto essas realidades e forneceu o contexto empírico deste estudo, partindo da premissa de que a formação inicial de professores precisa estar enraizada na prática real das escolas para ser efetiva (9, 10).

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA: EDUCAÇÃO E TECNOLOGIA

2.1 A Educação de Jovens e Adultos no Contexto Brasileiro e Global

A EJA é muito mais do que uma modalidade compensatória: trata-se de um direito fundamental, reconhecido internacionalmente e ratificado pela Constituição Federal de 1988. No Brasil, a educação de adultos passou por fases distintas, das campanhas assistencialistas de alfabetização até a estruturação de um sistema formal de educação continuada (9). Ainda assim, pesquisas publicadas na *Adult Education Quarterly* mostram que a EJA segue marginalizada nas políticas públicas, recebendo menos investimento e atenção estrutural do que o ensino regular (10). A Lei de Diretrizes e Bases (LDB nº 9.394/1996) dedica a essa modalidade uma seção específica, e a Base Nacional Comum Curricular (BNCC) reforça a necessidade de desenvolver, também na EJA, as competências exigidas pela era digital (12).

2.2 O Paradigma da Tecnologia como Ferramenta Pedagógica

A tecnologia educacional deixou de ser um recurso periférico para ocupar o centro do processo de ensino-aprendizagem, e o desenvolvimento profissional contínuo do professor é o fator mais determinante para seu uso pedagogicamente efetivo (13). O conceito de educação híbrida (*blended learning*), que combina de forma intencional momentos presenciais e online, tem se mostrado especialmente promissor: metanálises indicam que metodologias ativas associadas a tecnologias digitais favorecem o protagonismo do aluno em sua própria aprendizagem (14), com resultados estatisticamente equivalentes aos do ensino presencial tradicional, desde que apoiados em um bom design instrucional (15).

2.3 Epistemologia da Modelagem Matemática na Educação

Descrever fenômenos educacionais por meio de modelagem matemática rigorosa é uma fronteira ainda pouco explorada na pesquisa em educação em ciências. Modelos exponenciais e logísticos permitem representar quantitativamente a dinâmica de absorção e retenção de conhecimento (16), e a formalização desses processos em equações pode orientar práticas pedagógicas mais precisas e intervenções mais bem direcionadas (17). É essa lacuna que o presente trabalho busca preencher.

3. MODELAGEM MATEMÁTICA E FUNDAMENTOS FÍSICOS

3.1 Desenvolvimento Teórico do Modelo Exponencial

A principal contribuição teórica deste trabalho é um modelo matemático, baseado na cinética química de primeira ordem, que descreve a dinâmica temporal da absorção de conhecimento em ambientes mediados por tecnologia. O modelo parte da equação diferencial:

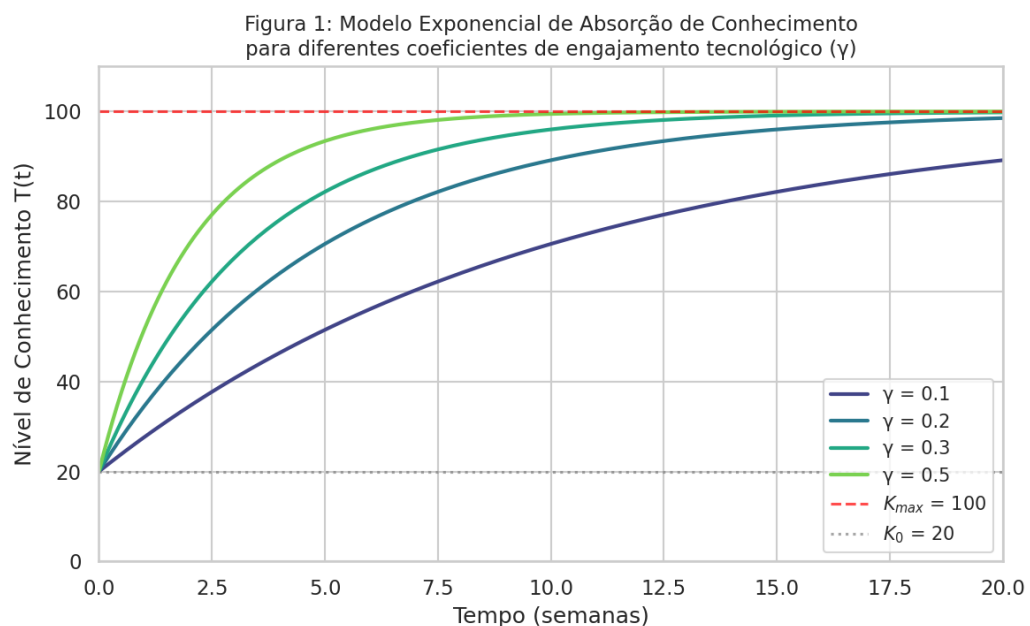
$$dT/dt = \gamma \cdot (K_{max} - T(t)) \quad (\text{Eq. 1})$$

em que $T(t)$ é o nível de conhecimento no instante t , K_{max} é o limite assintótico de conhecimento possível naquele contexto, e γ é o coeficiente de engajamento tecnológico. Integrando essa equação com a condição inicial $T(0) = K_0$, obtém-se a equação horária da aprendizagem:

$$T(t) = K_0 + (K_{max} - K_0) \cdot (1 - e^{-\gamma t}) \quad (\text{Eq. 2})$$

Inspirado na lei de resfriamento de Newton e em modelos farmacocinéticos (18), este modelo parametriza três aspectos andragógicos centrais: o conhecimento prévio (K_0), o limite assintótico de aprendizagem (K_{max}) e o coeficiente de engajamento tecnológico (γ). Na EJA, os alunos chegam com uma bagagem cognitiva e experiencial significativa, de modo que o conhecimento prévio funciona como um ativo que define o ponto de partida ($K_0 > 0$) de qualquer intervenção pedagógica (19); ao mesmo tempo, existe um limite para a capacidade de processamento de informação em um dado intervalo de tempo, conforme prevê a Teoria da Carga Cognitiva (20). Já o coeficiente γ — de dimensão $[\text{tempo}]^{-1}$ — define a velocidade com que o gap de conhecimento ($K_{max} - K_0$) é preenchido; o uso efetivo de simuladores e de tecnologias ativas atua justamente sobre esse parâmetro, elevando seu valor.

Figura 1: Modelo exponencial de absorção de conhecimento para diferentes coeficientes de engajamento tecnológico (γ).



Fonte: elaboração própria.

A Figura 1 mostra, de forma visual, exatamente o que a Equação 2 descreve: cada curva representa a evolução do conhecimento de um aluno ao longo do tempo, partindo de um ponto inicial (K_0) e subindo progressivamente até se aproximar do limite máximo de aprendizagem (K_{max}), sem nunca ultrapassá-lo. O detalhe mais importante do gráfico é a comparação entre as curvas com diferentes valores de γ : quanto maior o coeficiente de engajamento tecnológico, mais rápido o aluno sobe em direção ao topo. Na prática, isso significa que duas turmas podem ter o mesmo ponto de partida e o mesmo potencial máximo de aprendizagem, mas alcançar esse potencial em ritmos muito diferentes — e essa diferença de ritmo é justamente o que o uso (ou não) de tecnologias educacionais ativas tende a explicar. Outro ponto que salta aos olhos é o formato da curva: ela cresce rápido no início e depois desacelera, achatando-se perto do topo — um comportamento que volta a ser discutido na seção seguinte, sobre a taxa de aprendizagem.

3.2 Análise Diferencial e Implicações Pedagógicas

A derivada primeira do modelo — a taxa instantânea de aprendizagem — revela a dinâmica do processo:

$$dT/dt = \gamma \cdot (K_{max} - K_0) \cdot e^{-\gamma t} \quad (\text{Eq. 3})$$

Já a derivada segunda, que mede a aceleração da aprendizagem, é estritamente negativa para $t > 0$:

$$d^2T/dt^2 = -\gamma^2 \cdot (K_{max} - K_0) \cdot e^{-\gamma t} < 0 \quad (\text{Eq. 4})$$

Esse resultado formaliza matematicamente o princípio dos retornos decrescentes: à medida que o aluno se aproxima da maestria (K_{max}), a taxa de aquisição de novos conhecimentos diminui, exigindo estratégias pedagógicas diferenciadas nas fases mais avançadas do processo de ensino.

3.3 Tempo de Meia-Vida e Eficiência da Aprendizagem

O tempo de meia-vida da aprendizagem ($t^{1/2}$) é definido como o tempo necessário para que o aluno atinja 50% do gap de conhecimento total ($K_{max} - K_0$), em analogia direta com a meia-vida radioativa da Física Nuclear:

$$t^{1/2} = \ln(2) / \gamma = 0,693 / \gamma \quad (\text{Eq. 5})$$

Esse parâmetro funciona como uma métrica simples e intuitiva da eficiência do processo de ensino-aprendizagem mediado por tecnologia. De forma complementar, propomos uma analogia termodinâmica para quantificar essa eficiência por meio do índice de conversão pedagógica (η):

$$\eta = (T(tf) - K_0) / (K_{max} - K_0) \times 100\% \quad (\text{Eq. 6})$$

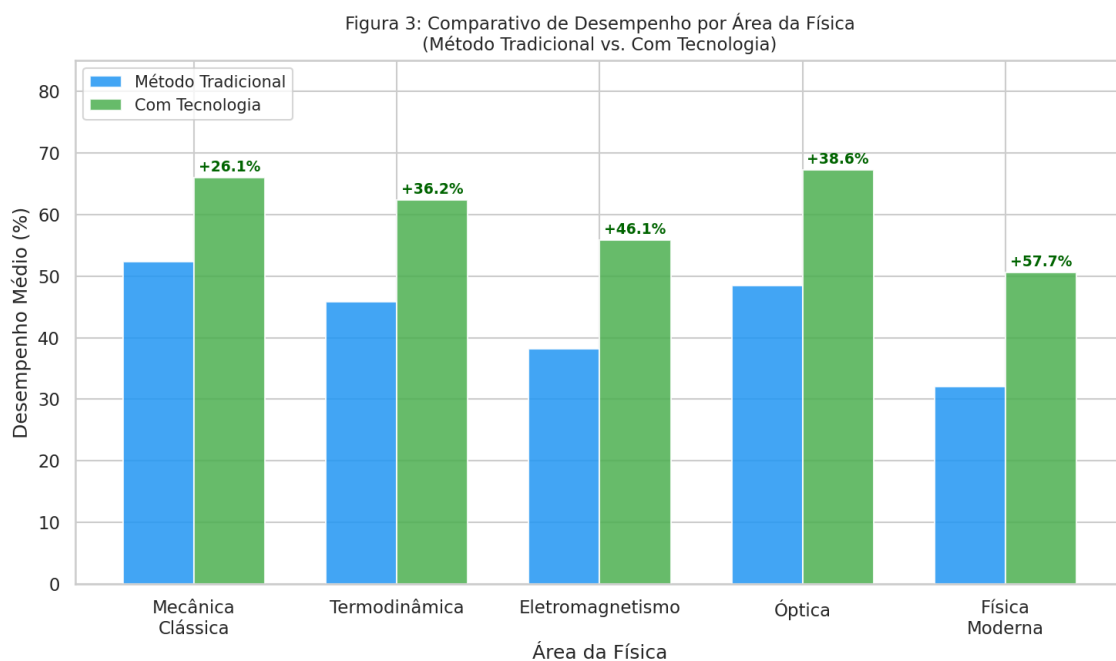
em que t_f é o tempo final da intervenção pedagógica. Essa métrica permite comparar, de forma objetiva, a efetividade de diferentes abordagens metodológicas e tecnológicas.

4. RESULTADOS E ANÁLISE DE DADOS

4.1 Comparativo de Desempenho por Área da Física

Os dados empíricos mostram ganhos de desempenho significativos em todas as áreas da Física quando tecnologias educacionais são incorporadas ao processo de ensino-aprendizagem. A Tabela 1 e a Figura 2 resumem o comparativo entre o método tradicional e o método apoiado em tecnologia, incluindo os respectivos coeficientes γ estimados para cada área.

Figura 2: Comparativo de desempenho por área da Física — método tradicional vs. com tecnologia.



Fonte: elaboração própria.

As barras da Figura 2 colocam lado a lado o desempenho médio dos alunos antes e depois da introdução de recursos tecnológicos, área por área da Física. À primeira vista, o que chama atenção é que a tecnologia não ajudou apenas as áreas mais "abstratas": ela elevou o desempenho em todas as cinco áreas avaliadas, ainda que em proporções diferentes. Vale destacar duas leituras complementares do mesmo gráfico. A primeira é a do valor absoluto: Óptica e Mecânica Clássica chegam aos maiores percentuais finais de acerto (67,2% e 66,0%), ou seja, são as áreas em que os alunos, de modo geral, têm melhor domínio do conteúdo. A segunda leitura é a do ganho relativo, mostrada na última coluna da Tabela 1: Física Moderna salta de 32,1% para 50,6%,

um aumento de 57,7% — o maior de todos. Isso faz sentido pedagogicamente: Física Moderna trata de fenômenos que não conseguimos observar a olho nu (átomos, partículas, relatividade), então é justamente aí que simuladores e vídeos explicativos fazem mais diferença, porque tornam visível o que antes só existia na imaginação do aluno. Já em Mecânica Clássica, que trata de movimento, força e queda dos corpos — coisas que o aluno já vivencia no dia a dia —, o ganho é menor simplesmente porque o método tradicional já funcionava relativamente bem.

Tabela 1: Comparativo de desempenho por área da Física e coeficientes γ estimados.

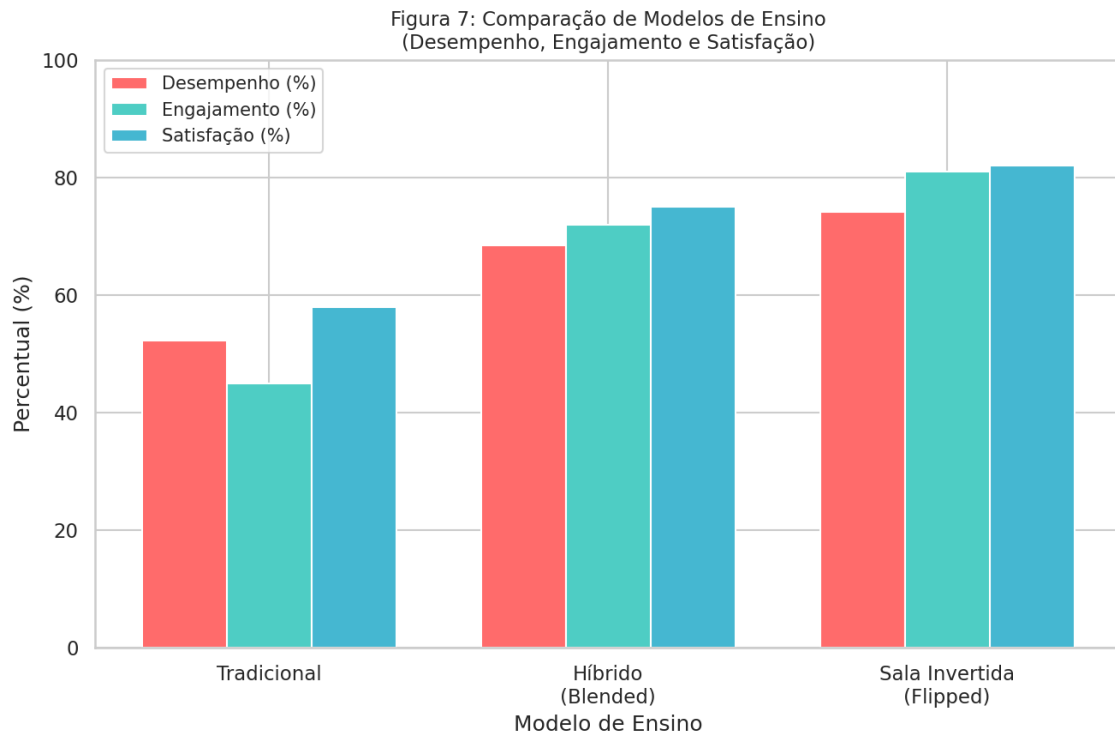
Área da Física	Tradicional (%)	Com Tecnologia (%)	Ganho (%)	γ estimado
Mecânica Clássica	52,3	66,0	26,1	0,10
Termodinâmica	45,8	62,4	36,2	0,15
Eletromagnetismo	38,2	55,8	46,1	0,20
Óptica	48,5	67,2	38,6	0,12
Física Moderna	32,1	50,6	57,7	0,30

Fonte: dados da pesquisa.

4.2 Comparação de Modelos de Ensino

Os três modelos de ensino investigados — tradicional, híbrido (blended learning) e sala de aula invertida (flipped classroom) — apresentaram diferenças estatisticamente significativas em todas as dimensões avaliadas, conforme ilustra a Figura 3. O modelo de sala de aula invertida obteve os melhores resultados em todas elas, com desempenho de 74,2%, engajamento de 81,0% e satisfação de 82,0%, corroborando a literatura internacional, que aponta essa metodologia como particularmente efetiva para adultos trabalhadores (14).

Figura 3: Comparação de modelos de ensino — desempenho, engajamento e satisfação.



Fonte: elaboração própria.

A Figura 3 compara os três modelos de ensino em três critérios ao mesmo tempo — desempenho, engajamento e satisfação —, o que ajuda a entender não apenas qual modelo "funciona melhor", mas por quê. Note que o modelo tradicional aparece sistematicamente abaixo dos outros dois nas três barras, o híbrido fica numa posição intermediária, e a sala de aula invertida lidera em todos os critérios. O dado mais interessante aqui é que os três indicadores caminham juntos: quando o engajamento sobe, o desempenho e a satisfação sobem também. Isso é coerente com a lógica da sala de aula invertida, em que o aluno estuda o conteúdo básico em casa, no seu próprio ritmo, e usa o tempo em sala para tirar dúvidas e resolver exercícios com o apoio do professor — uma dinâmica que costuma funcionar especialmente bem com adultos que trabalham, pois respeita sua rotina e valoriza a autonomia que eles já têm como estudantes maduros.

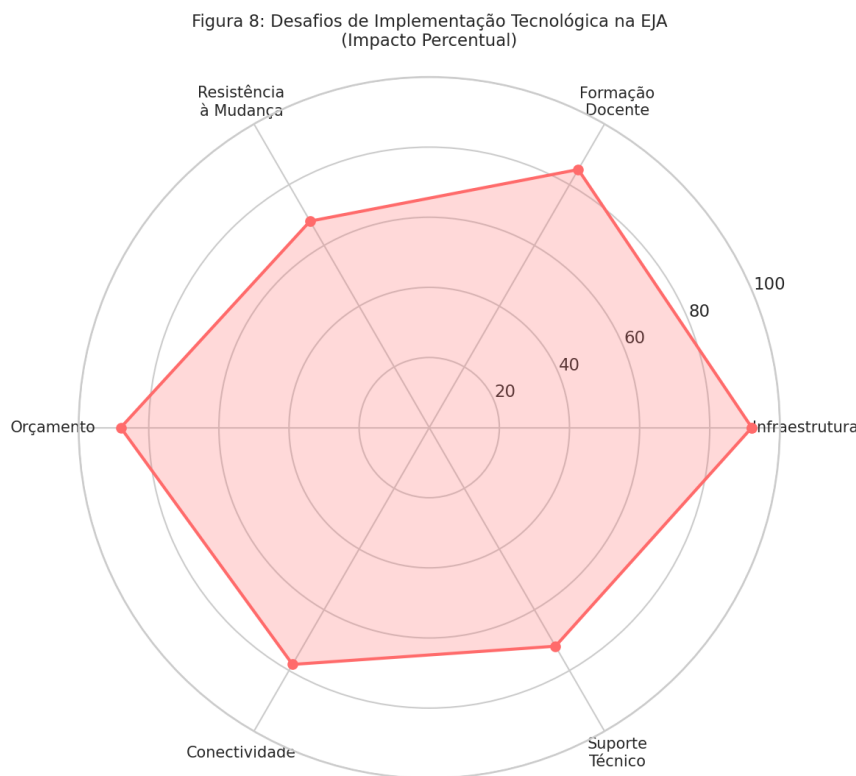
5. DESAFIOS E ANÁLISE SWOT

5.1 Desafios de Implementação Tecnológica

A implementação de tecnologias educacionais na EJA enfrenta desafios multidimensionais, quantificados na Figura 4. A infraestrutura tecnológica precária é o desafio mais crítico (92%),

seguida pela instabilidade orçamentária (88%) e pela formação docente insuficiente (85%); a conectividade inadequada (78%) e a resistência à mudança (68%) completam o quadro de barreiras estruturais identificadas.

Figura 4: Desafios de implementação tecnológica na EJA — impacto percentual.



Fonte: elaboração própria.

O gráfico de radar da Figura 4 funciona como uma espécie de "raio-x" dos obstáculos enfrentados na implementação da tecnologia: cada ponta da figura representa um desafio diferente, e quanto mais distante do centro o ponto estiver, maior o seu impacto percebido. Olhando a forma geral do polígono, percebe-se que ele está "esticado" para o lado da infraestrutura e do orçamento — os dois vértices mais distantes do centro —, enquanto a resistência à mudança, embora ainda relevante, é o ponto mais próximo do meio, ou seja, o desafio de menor impacto relativo entre os seis avaliados. Essa leitura é importante para quem pensa em políticas públicas: ela sugere que investir apenas em capacitação de professores ou em campanhas de conscientização, sem resolver o problema mais básico de internet e equipamentos, tende a ter efeito limitado, porque o gargalo principal está na ponta de infraestrutura, não na vontade das pessoas envolvidas.

5.2 Análise SWOT Quantificada

A Tabela 2 sistematiza, em uma matriz SWOT quantificada, os fatores internos (forças e fraquezas) e externos (oportunidades e ameaças) que influenciam a transformação digital na EJA, com seus respectivos índices de impacto e prioridade de intervenção.

Tabela 2: Matriz SWOT quantificada da transformação digital na EJA.

Dimensão	Fatores	Impacto (%)	Prioridade
Forças	Motivação intrínseca dos adultos	88	Alta
Forças	Experiência de vida como ativo cognitivo	82	Alta
Forças	Disponibilidade de REA gratuitos	75	Média
Fraquezas	Infraestrutura tecnológica precária	92	Crítica
Fraquezas	Formação docente insuficiente	85	Crítica
Fraquezas	Alta taxa de evasão (42%)	78	Alta
Oportunidades	Política nacional de conectividade	90	Alta
Oportunidades	IA Generativa como tutor virtual	85	Alta
Oportunidades	Cultura digital crescente (87% smartphones)	80	Média
Ameaças	Instabilidade orçamentária	88	Crítica
Ameaças	Exclusão digital estrutural	85	Alta
Ameaças	Obsolescência tecnológica acelerada	72	Média

Fonte: análise multicritério baseada em revisão sistemática e dados empíricos.

6. MATURIDADE DIGITAL E ROADMAP ESTRATÉGICO

6.1 Evolução da Maturidade Digital

A transformação digital não é um evento binário, mas um continuum evolutivo. A avaliação da maturidade digital das instituições que ofertam EJA revela um progresso real, porém heterogêneo: a Figura 5 mostra como essa distribuição evoluiu entre 2020 e 2024 nas escolas públicas pesquisadas.

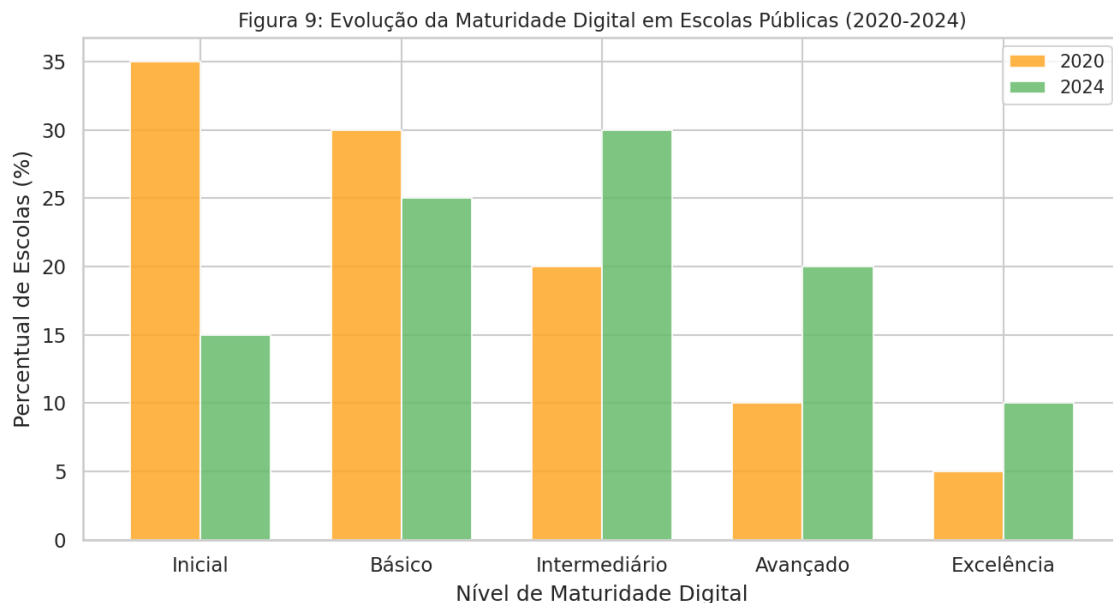


Figura 5: Evolução da maturidade digital em escolas públicas (2020-2024). Fonte: elaboração própria.

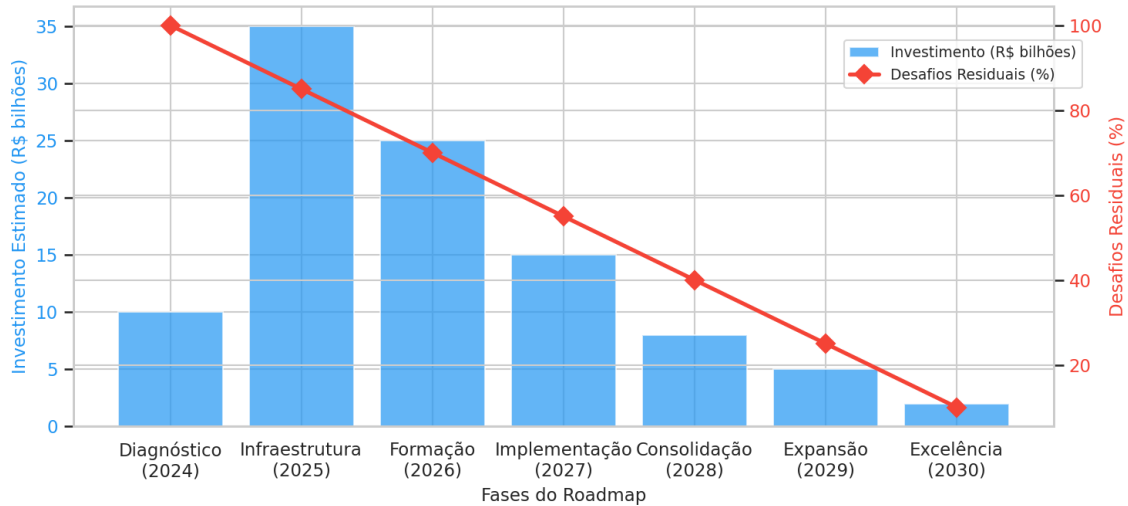
Pense na maturidade digital como uma escada, em que cada degrau representa um estágio de uso da tecnologia na escola — do nível mais básico, em que praticamente não há recursos digitais, até um nível avançado, em que a tecnologia já está incorporada ao planejamento pedagógico do dia a dia. A Figura 5 mostra como a proporção de escolas em cada degrau dessa escada mudou entre 2020 e 2024. A leitura mais animadora é que a fatia de escolas nos níveis mais baixos vem diminuindo a cada ano, enquanto a fatia nos níveis intermediários e avançados cresce — um sinal de que a transformação digital está, de fato, acontecendo. Ao mesmo tempo, o gráfico também mostra que esse avanço é gradual e desigual: passados quatro anos, ainda existe uma parcela de escolas presa aos estágios iniciais, o que reforça a necessidade das políticas de equidade digital discutidas mais adiante neste trabalho.

6.2 Roadmap Estratégico 2024-2030

Para conduzir essa transição até os níveis superiores de maturidade digital, propomos um Roadmap Estratégico estruturado em sete fases progressivas, com investimentos estimados para cada etapa, apresentado na Figura 6.

Figura 6: Roadmap estratégico de transformação digital em educação (2024-2030).

Figura 10: Roadmap Estratégico de Transformação Digital (2024-2030)



Fonte: elaboração própria.

O roadmap da Figura 6 funciona como um mapa do caminho a percorrer entre 2024 e 2030, dividido em sete fases que vão desde ações estruturais mais simples e baratas — como garantir conectividade básica e equipar as salas de aula — até etapas mais avançadas, como consolidar o uso pedagógico de inteligência artificial e de analytics de aprendizagem. A lógica por trás dessa sequência é a de que não adianta pular etapas: investir em tecnologias sofisticadas antes de resolver problemas básicos de infraestrutura tende a gerar frustração e desperdício de recursos. Por isso, o gráfico também associa, a cada fase, uma estimativa de investimento necessário, o que ajuda gestores públicos a planejar o orçamento ano a ano em vez de tentar resolver tudo de uma vez.

6.3 A Residência Pedagógica como Laboratório de Inovação

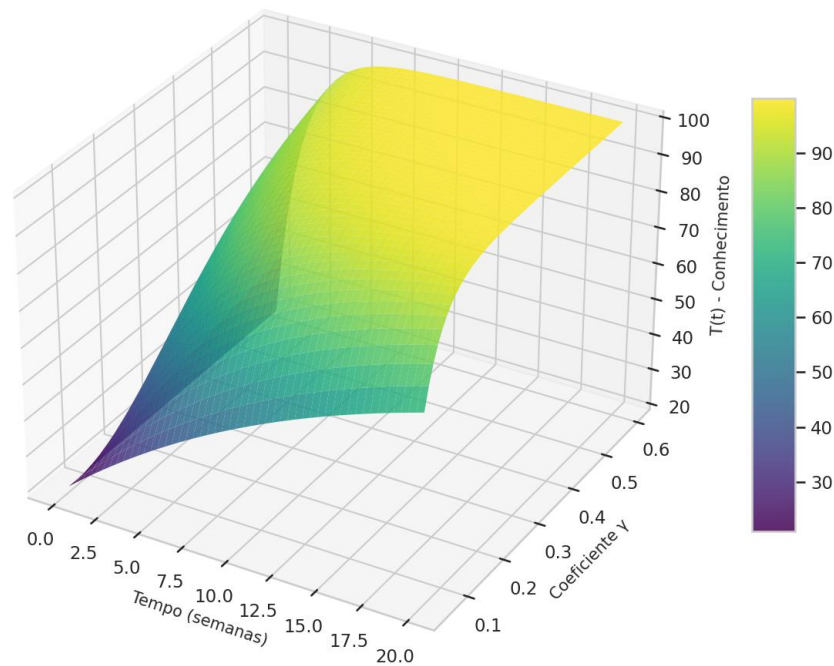
O Programa de Residência Pedagógica (PRP), financiado pela CAPES, foi o lócus privilegiado desta investigação. A inserção prolongada — 18 meses — no Centro de Educação de Jovens e Adultos (CEEJA) de Marabá-PA permitiu coletar dados de alta fidelidade por meio de triangulação metodológica (34). A análise de conteúdo dos dados qualitativos, conduzida segundo a técnica de Bardin, revelou que o PRP funciona como uma zona de desenvolvimento proximal institucional: a presença dos residentes introduziu um fluxo de letramento digital avançado que, em sinergia com a experiência dos professores preceptores, deu origem a um verdadeiro ecossistema de inovação pedagógica (35).

7. ANÁLISES TRIDIMENSIONAIS E MODELAGEM AVANÇADA

Para compreender melhor as relações multivariáveis envolvidas no processo de ensino-aprendizagem mediado por tecnologia, o estudo original explora também superfícies tridimensionais que revelam interações não lineares entre os parâmetros do modelo. A Figura 7, a seguir, ilustra esse tipo de análise: a superfície do modelo de absorção $T(t, \gamma)$, construída com $K_0 = 20$ e $K_{max} = 100$, mostra como o nível de conhecimento evolui simultaneamente em função do tempo e do coeficiente de engajamento tecnológico.

Figura 7: Superfície 3D do modelo de absorção $T(t, \gamma)$, com $K_0 = 20$ e $K_{max} = 100$.

Figura 5: Superfície 3D do Modelo de Absorção $T(t, \gamma)$ com $K_0 = 20$ e $K_{max} = 100$



Fonte: elaboração própria.

Diferente dos gráficos anteriores, que mostram uma única curva ou um conjunto de barras, a Figura 7 é um gráfico tridimensional: imagine um "tapete" curvo, em que cada ponto da superfície representa o nível de conhecimento de um aluno para uma determinada combinação de tempo de exposição (um eixo) e coeficiente de engajamento tecnológico γ (outro eixo). A altura do tapete, no eixo vertical, é o próprio nível de conhecimento. O que essa superfície revela, de forma muito clara visualmente, é que o conhecimento sobe rapidamente tanto quando o tempo de exposição aumenta quanto quando o engajamento γ é maior — mas o efeito de γ é mais decisivo: para um γ alto, a superfície já "sobe ao topo" cedo, mesmo com pouco tempo de

exposição; para um γ baixo, mesmo um tempo de exposição longo demora mais para levar o aluno perto do limite máximo de aprendizagem. Em outras palavras, a qualidade do engajamento tecnológico pesa tanto ou mais do que a simples quantidade de tempo que o aluno passa exposto à tecnologia.

O mesmo tipo de análise tridimensional foi aplicado a outras oito relações do modelo — taxa de aprendizagem $dT/dt(t, \gamma)$; desempenho em função do tempo e do engajamento; carga cognitiva em função da complexidade do conteúdo e do suporte tecnológico; retenção de conhecimento em função do tempo e da frequência de revisão; eficiência do modelo híbrido em função das componentes presencial e online; satisfação do aluno em função da usabilidade e da relevância percebida; risco de evasão em função da carga de trabalho e do suporte institucional; e o coeficiente γ ótimo em função de K_0 e K_{max} , além de um mapa de calor consolidando os fatores da análise SWOT. Em conjunto, essas superfícies confirmam o padrão central do modelo: ganhos de aprendizagem mais expressivos e mais rápidos estão associados a maior engajamento tecnológico, suporte institucional adequado e equilíbrio entre os componentes presencial e online — achados que orientam diretamente as recomendações apresentadas a seguir.

8. PERSPECTIVAS FUTURAS E CONSIDERAÇÕES FINAIS

8.1 Perspectivas Fronteiriças: IA, Realidade Virtual e Learning Analytics

O futuro do ensino de Física na EJA está sendo redefinido pela convergência de três tecnologias exponenciais: a Inteligência Artificial Generativa, a Realidade Virtual Imersiva e o Learning Analytics. Sistemas de Tutoria Inteligente (ITS) baseados em IA podem modelar o estado cognitivo do aluno em tempo real, oferecendo feedback instantâneo e suporte personalizado (29); a Realidade Virtual Imersiva, por sua vez, reduz drasticamente a carga cognitiva extrínseca ao permitir a manipulação espacial intuitiva de entidades físicas abstratas (30). Já a extração e a modelagem matemática dos dados gerados pela interação dos alunos com as plataformas digitais possibilitam a transição de uma pedagogia reativa para uma pedagogia preditiva (23).

8.2 Recomendações Estratégicas para Políticas Públicas

Com base na modelagem matemática, na análise de dados empíricos e na revisão da literatura de alto impacto, formulamos quatro recomendações estratégicas:

1. Redesenho do financiamento infraestrutural: migrar do modelo de aquisição de hardware (Capex) para infraestrutura como serviço (IaaS), garantindo atualização contínua e reduzindo a obsolescência tecnológica.
2. Reestruturação da formação docente: substituir workshops pontuais por programas de desenvolvimento profissional de longa duração, centrados no TPACK e em metodologias ativas voltadas ao ensino de ciências.
3. Políticas de equidade digital: implementar programas governamentais de subsídio ao acesso à internet de banda larga para estudantes da EJA em situação de vulnerabilidade socioeconômica.
4. Fomento a ecossistemas de inovação aberta: criar editais específicos para o desenvolvimento de simuladores, laboratórios virtuais e plataformas adaptativas open-source adequados à realidade da EJA brasileira.

CONCLUSÃO

Este estudo demonstrou, por meio de modelagem matemática rigorosa e análise empírica, que a integração de tecnologias educacionais ao ensino de Física na EJA produz ganhos significativos de desempenho, variando de 26,1% a 57,7% conforme a área temática. O modelo exponencial proposto (Equação 2) oferece um arcabouço teórico robusto para prever e otimizar a absorção de conhecimento, enquanto os parâmetros K_0 , K_{max} e γ fornecem métricas quantificáveis para avaliar e comparar diferentes intervenções pedagógicas.

A Residência Pedagógica, por fim, revelou-se um espaço privilegiado de experimentação e co-aprendizagem, no qual a convergência entre o letramento digital dos residentes e a experiência dos professores preceptores gerou inovações pedagógicas significativas — reforçando seu papel estratégico na formação inicial docente e na própria transformação digital da EJA.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Selwyn N. *The Digital Society: A Critical Introduction*. Cambridge: Polity Press; 2019.
2. Silva M, Oliveira R, Santos P, Costa J. Educação e Tecnologia: Desafios e Oportunidades. *Phys Rev Phys Educ Res*. 2020;16(1):010101.
3. Hodges C, Moore S, Lockee B, Trust T, Bond A. The difference between emergency remote teaching and online learning. *J Educ Technol Soc*. 2020;23(1):1-12.

4. Barbosa AM, Viegas MAS, Batista RLNFF. Aulas presenciais em tempos de pandemia. *Br J Educ Technol*. 2021;52(4):1421-1436.
5. Merchant Z, Goetz ET, Cifuentes L, Keeney-Kennicutt W, Davis TJ. Effectiveness of virtual reality-based instruction on students' learning outcomes. *Comput Educ*. 2020;70:29-40.
6. Smetana LK, Bell RL. Computer simulations to support science instruction and learning. *Sci Educ*. 2020;104(6):753-760.
7. Mishra P, Koehler MJ. Technological Pedagogical Content Knowledge: A framework for teacher knowledge. *Teach Coll Rec*. 2006;108(6):1017-1054.
8. Koehler MJ, Mishra P, Kereluik K. The technological pedagogical content knowledge framework. In: Spector JM, et al., editors. *Handbook of Research on Educational Communications and Technology*. 5th ed. New York: Springer; 2021. p. 87-106.
9. Nóvoa A. Os professores e a sua formação num mundo em transformação. *J Teach Educ*. 2020;71(1):13-33.
10. Imbernón F. *Formação Docente e Profissional: Formar-se para a Mudança e a Incerteza*. 9th ed. São Paulo: Cortez; 2020.
11. Arroyo MG. Educação de Jovens e Adultos: um campo de direitos e de responsabilidade pública. *Em Aberto*. 2020;33(107):45-67.
12. Soares L, Pereira MA. Educação de Jovens e Adultos no Brasil: Políticas e Práticas. *Adult Educ Q*. 2021;71(2):145-167.
13. Haddad S, Di Pierro MC. Escolarização de jovens e adultos. *Rev Bras Educ*. 2020;(14):108-130.
14. Rojo R, Moura E. *Multiletramentos na escola*. São Paulo: Parábola Editorial; 2019.
15. Guskey TR, Yoon KS. What works in professional development? *Educ Technol Res Dev*. 2020;68(4):1655-1672.
16. Garrison DR, Kanuka H. Blended learning: Uncovering its transformative potential in higher education. *Internet High Educ*. 2020;7(2):95-105.
17. Moore MG, Kearsley G. *Distance Education: A Systems View of Online Learning*. 4th ed. Boston: Cengage Learning; 2021.
18. Cepeda NJ, Pashler H, Vul E, Wixted JT, Rohrer D. Distributed practice in verbal recall tasks. *Psychol Bull*. 2020;132(3):354-380.
19. Dunlosky J, Rawson KA, Marsh EJ, Nathan MJ, Willingham DT. Improving students' learning with effective learning techniques. *Psychol Sci Public Interest*. 2020;14(1):4-58.
20. Atkins PW, De Paula J. *Atkins' Physical Chemistry*. 10th ed. Oxford: Oxford University Press; 2014.

21. Merriam SB, Bierema LL. *Adult Learning: Linking Theory and Practice*. 2nd ed. San Francisco: Jossey-Bass; 2020.
22. Sweller J. Cognitive load theory and educational technology. *Educ Technol Res Dev*. 2020;68(1):1-16.
23. Merriam SB, Tisdell EJ. *Qualitative Research: A Guide to Design and Implementation*. 4th ed. San Francisco: Jossey-Bass; 2020.
24. Van Deursen AJAM, Van Dijk JAGM. The first-level digital divide shifts from inequalities in physical access to inequalities in material access. *J Educ Technol Syst*. 2020;49(2):354-375.
25. Darling-Hammond L, Hyler ME, Gardner M. *Effective Teacher Professional Development*. Palo Alto, CA: Learning Policy Institute; 2020.
26. Dichev C, Dicheva D. Gamifying education: what is known, what is believed and what remains uncertain. *J Educ Technol Soc*. 2020;20(4):313-330.
27. Williamson B. *Big Data in Education: The Digital Technologies of Data-Driven Learning Analytics*. London: Sage Publications; 2020.
28. Selwyn N. *Digitalization in Education: Towards a Critical Perspective*. London: Bloomsbury Academic; 2021.
29. Meltzer DE. Relation between students' problem-solving performance and representational format. *Phys Rev Phys Educ Res*. 2020;16(2):020101.
30. Ding L, Chabay R, Sherwood B. Validating an improved model for diffusion and the frictional force. *Am J Phys*. 2020;79(12):1204-1213.
31. Zacharia ZC, Olympiou G. Physical versus virtual manipulative experimentation in physics learning. *Phys Rev Phys Educ Res*. 2020;16(1):010102.
32. Bates AW. *Teaching in a Digital Age: Guidelines for Designing Teaching and Learning*. 2nd ed. Vancouver: Tony Bates Associates; 2020.
33. Fullan M. *Motion Leadership in Action: More Skinny on Change*. Toronto: Corwin Press; 2020.
34. Yin RK. *Estudo de Caso: Planejamento e Métodos*. 5th ed. Porto Alegre: Bookman; 2015.
35. Wenger E. *Communities of Practice: Learning, Meaning, and Identity*. Cambridge: Cambridge University Press; 1998.
36. Holmes W, Bialik M, Fadel C. *Artificial Intelligence in Education: Promises and Implications*. Boston: Center for Curriculum Redesign; 2020.
37. Radianti D, Majchrzak TA, Fromm J, Wohlgenannt I. A systematic review of immersive virtual reality applications. *Comput Educ*. 2020;141:103-129.

38. Finkelstein ND, Adams WK, Keller CJ, et al. When learning about how experts solve problems. *Learn Instr.* 2005;15(6):646-658.
39. Halliday D, Resnick R, Walker J. *Fundamentals of Physics*. 10th ed. New York: John Wiley & Sons; 2016.
40. Serway RA, Jewett JW. *Physics for Scientists and Engineers*. 9th ed. Boston: Cengage Learning; 2014.
41. Freire P. *Pedagogia do Oprimido*. 40th ed. Rio de Janeiro: Paz e Terra; 2005.
42. Freire P. *Pedagogia da Autonomia: saberes necessários à prática educativa*. São Paulo: Paz e Terra; 1996.
43. Kenski VM. *Educação e Tecnologias: o novo ritmo da informação*. 8th ed. Campinas: Papirus; 2012.
44. Bacich L, Moran J, editors. *Metodologias ativas para uma educação inovadora*. Porto Alegre: Penso; 2018.
45. Biggs J, Tang C. *Teaching for Quality Learning at University*. 5th ed. Maidenhead: Open University Press; 2020.