

STATPHYSICS LAB: PRODUTO EDUCACIONAL PARA O ENSINO DE FÍSICA EXPERIMENTAL E ESTATÍSTICA POR MEIO DE UM LABORATÓRIO VIRTUAL GAMIFICADO

STATPHYSICS LAB: AN EDUCATIONAL PRODUCT FOR THE TEACHING OF EXPERIMENTAL PHYSICS AND STATISTICS THROUGH A GAMIFIED VIRTUAL LABORATORY

STATPHYSICS LAB: PRODUCTO EDUCATIVO PARA LA ENSEÑANZA DE FÍSICA EXPERIMENTAL Y ESTADÍSTICA A TRAVÉS DE UN LABORATORIO VIRTUAL GAMIFICADO

Michel Felipe Lima de Araújo¹, Danilo Sande², Maxson Souza Vieira³, Eduardo Cezar Barbosa de Barros Aragão⁴, Rafael Cardoso Toledo⁵, William Emanuel Silva Santos Viana⁶, Tiago Franca Paes⁷, Lucas Brito de Santana⁸

DOI: 10.54899/dcs.v23i93.6628

Recibido: 14/07/2026 | Aceptado: 07/08/2026 | Publicación en línea: 14/08/2026.

RESUMO

Este artigo apresenta o StatPhysics Lab, um produto educacional digital desenvolvido para apoiar o ensino de física experimental e estatística no nível superior. Trata-se de um laboratório virtual gamificado, acessível diretamente pelo navegador, sem necessidade de instalação, que reúne 68 laboratórios de física organizados em cinco categorias curriculares, dez simuladores de estatística experimental, um glossário interativo de conceitos fundamentais e um sistema de avaliação adaptativa composto por um banco de 1.170 questões. O ambiente incorpora elementos de gamificação, como sistema de pontos de experiência (XP), níveis de progressão, conquistas e desafio diário, com o objetivo de aumentar o engajamento e a persistência dos estudantes. A fundamentação pedagógica articula teorias construtivistas, aprendizagem ativa e o papel formativo da experimentação no ensino de ciências. O objetivo central do trabalho é apresentar o design pedagógico e a arquitetura do ambiente como infraestrutura tecnológica aberta, descrevendo sua fundamentação, reconhecendo as limitações do formato e apontando caminhos

¹ Pós-Doutor em Ensino de Ciências Naturais e Matemática, Universidade Estadual de Santa Cruz, Ilhéus, Bahia, Brasil. E-mail: michellfisico@gmail.com

² Pós-Doutor em Ciências Educacionais, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Baiano, Itaberaba, Bahia, Brasil. E-mail: danilosandesantos@gmail.com

³ Doutor em Engenharia e Tecnologias Espaciais, Instituto Federal da Bahia, Jequié, Bahia, Brasil. E-mail: maxson.vieira@ifba.edu.br

⁴ Doutor em Física de Plasma, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, São Paulo, Brasil. E-mail: cumbucocezar@gmail.com

⁵ Pós-doutor em Engenharia e Tecnologia Espaciais, Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu, Paraná, Brasil. E-mail: toledo.rc@gmail.com

⁶ Doutor em Engenharia da Nanotecnologia, Universidade Federal do Vale do São Francisco, Salvador, Bahia, Brasil. E-mail: williamvianaprof@gmail.com

⁷ Doutor em Engenharia e Tecnologia Espaciais, Universidade Federal da Bahia, Salvador, Bahia, Brasil. E-mail: tfpaes@ufba.br

⁸ Mestre em Física, Universidade do Estado da Bahia, Ipiaú, Bahia, Brasil. E-mail: lucassantana@uneb.br

para a avaliação empírica de seus efeitos sobre a aprendizagem. A contribuição reside na integração, em um único ambiente aberto, de experimentação virtual, letramento estatístico, avaliação adaptativa e gamificação, base sobre a qual futuras investigações sobre aprendizagem em laboratórios virtuais podem se apoiar.

Palavras-chave: Laboratório Virtual. Física Experimental. Estatística. Gamificação. Produto Educacional.

ABSTRACT

This paper presents StatPhysics Lab, a digital educational product designed to support the teaching of experimental physics and statistics at the undergraduate level. It is a gamified virtual laboratory, accessible directly through the browser without any installation, featuring 68 physics laboratories organized into five curricular categories, ten experimental statistics simulators, an interactive glossary of fundamental concepts, and an adaptive assessment system comprising a bank of 1,170 questions. The environment incorporates gamification elements such as experience points (XP), progression levels, achievements and daily challenges, aiming to increase student engagement and persistence. The pedagogical framework draws on constructivist theories, active learning and the formative role of experimentation in science education. The main goal of this work is to present the pedagogical design and the architecture of the environment as an open technological infrastructure, describing its foundations, acknowledging the limitations of the format and outlining directions for the empirical evaluation of its effects on learning. The contribution lies in integrating virtual experimentation, statistical literacy, adaptive assessment and gamification into a single open environment, providing a basis for future research on learning in virtual laboratories.

Keywords: Virtual Laboratory. Experimental Physics. Statistics. Gamification. Educational Product.

RESUMEN

Este artículo presenta el StatPhysics Lab, un producto educativo digital desarrollado para apoyar la enseñanza de la física experimental y la estadística en la educación superior. Se trata de un laboratorio virtual gamificado, accesible directamente desde el navegador, sin necesidad de instalación, que reúne 68 laboratorios de física organizados en cinco categorías curriculares, diez simuladores de estadística experimental, un glosario interactivo de conceptos fundamentales y un sistema de evaluación adaptativa compuesto por un banco de 1.170 preguntas. El entorno incorpora elementos de gamificación, como puntos de experiencia (XP), niveles de progresión, logros y desafío diario, con el objetivo de aumentar la participación y la persistencia de los estudiantes. La fundamentación pedagógica articula teorías constructivistas, aprendizaje activo y el papel formativo de la experimentación en la enseñanza de las ciencias. El objetivo central del trabajo es presentar el diseño pedagógico y la arquitectura del entorno como infraestructura tecnológica abierta, reconociendo las limitaciones del formato y señalando caminos para la evaluación empírica de sus efectos sobre el aprendizaje. La contribución reside en la integración, en un único entorno abierto, de experimentación virtual, alfabetización estadística, evaluación adaptativa y gamificación.

Palabras clave: Laboratorio Virtual. Física Experimental. Estadística. Gamificación. Producto Educativo.



INTRODUÇÃO

A experimentação ocupa papel central na formação científica. Mais do que ilustrar conceitos teóricos, o laboratório de física ensina o estudante a conviver com a incerteza das medidas, a tratar dados de forma rigorosa e a questionar os limites dos modelos que aprende na sala de aula. Meta-análises e revisões sistemáticas recentes indicam que os estudantes aprendem mais quando assumem papel ativo na construção do conhecimento, e a atividade experimental é um dos caminhos mais diretos para provocar esse envolvimento (Theobald *et al.*, 2020; Lombardi *et al.*, 2021). Essas sínteses também apontam que estratégias como aprendizagem ativa, simulações computacionais e feedback imediato produzem ganhos consistentes quando integradas a objetivos pedagógicos claramente definidos (Banda; Nzabahimana, 2021; Zainuddin *et al.*, 2020).

No contexto brasileiro, porém, o laboratório presencial enfrenta obstáculos persistentes: falta de equipamentos, turmas numerosas, carga horária reduzida e, em cursos a distância ou híbridos, a impossibilidade física de acesso ao espaço laboratorial. Esse cenário foi agravado pela pandemia de COVID-19, que acelerou a adoção de tecnologias digitais no ensino e deixou evidente a necessidade de recursos virtuais robustos que permitissem ao estudante praticar a ciência experimental de forma autônoma (Moreira; Schlemmer, 2020).

Paralelamente, a literatura em ensino de ciências evidencia uma lacuna igualmente grave: a ausência de letramento estatístico adequado entre estudantes de física. A análise de dados experimentais exige familiaridade com conceitos como incerteza da medida, propagação de erros, distribuições de probabilidade e intervalo de confiança, temas frequentemente negligenciados nos cursos de graduação ou tratados de forma isolada da prática experimental. Mesmo entre os instrutores de laboratório há divergência sobre como ensinar incerteza de medida nos cursos introdutórios, o que ajuda a explicar a persistência do problema (Pollard *et al.*, 2021).

O StatPhysics Lab surge como resposta a esses dois desafios: um laboratório virtual que integra física experimental e estatística, disponível no navegador sem instalação, enriquecido por uma camada de gamificação voltada a sustentar a participação regular dos estudantes. Este artigo

descreve o produto, seus fundamentos pedagógicos, sua estrutura funcional e discute seu potencial como recurso complementar ao laboratório presencial.

REFERENCIAL TEÓRICO

A Experimentação no Ensino de Física

A experimentação cumpre funções complementares no ensino de física: ilustra fenômenos que dão concretude a conceitos abstratos, treina o raciocínio quantitativo e forma uma postura científica de questionamento sistemático. Sem a experiência de medir, errar e analisar, a física se reduz a matemática aplicada; sem teoria, o laboratório vira atividade sem propósito. O equilíbrio entre as duas dimensões é o que sustenta uma formação científica sólida.

Nessa perspectiva, os simuladores computacionais assumem papel complementar ao laboratório real: permitem controlar variáveis com precisão, repetir medidas inúmeras vezes, inserir ruído estatístico realista e visualizar distribuições de dados impossíveis de construir manualmente em um tempo de aula. Revisões recentes da literatura sobre simulações interativas no ensino de física indicam que esses ambientes, quando bem projetados, produzem ganhos consistentes de compreensão conceitual (Banda; Nzabahimana, 2021), e experiências brasileiras confirmam esse potencial em diferentes níveis de ensino (Araújo *et al.*, 2021). Resta, porém, um problema que a simples disponibilidade do recurso não resolve: manter o estudante retornando ao ambiente virtual com regularidade. É desse problema que trata a gamificação.

Gamificação na Educação

Gamificação é o uso de elementos característicos de jogos, tais como pontos, progressão, desafios, recompensas e feedback imediato, em contextos que não são jogos, com o objetivo de aumentar motivação e engajamento. A meta-análise de Sailer e Homner (2020) encontrou efeitos positivos da gamificação sobre resultados de aprendizagem cognitivos, motivacionais e comportamentais. Na mesma direção, a revisão sistemática de Zainuddin *et al.* (2020) associa sistemas de pontos, conquistas e placares a maior engajamento e melhor desempenho, embora alerte para o efeito novidade quando o desenho do jogo não conversa com os objetivos de aprendizagem.

A eficácia da gamificação depende, portanto, do alinhamento entre as mecânicas do jogo e os objetivos pedagógicos. Recompensar quantidade sem qualidade pode desviar o foco da aprendizagem profunda. O StatPhysics Lab procurou reduzir esse risco ao vincular a progressão de XP tanto à realização de simulações quanto ao desempenho em questões conceituais e analíticas de exigência cognitiva crescente. Esse vínculo entre recompensa e desempenho conduz ao terceiro pilar da fundamentação do produto: o papel da atividade do estudante e do retorno imediato sobre o que ele produz.

Aprendizagem Ativa e Feedback Imediato

A aprendizagem ativa propõe que o estudante aprenda fazendo, testando hipóteses e refletindo sobre os resultados. A revisão de Lombardi *et al.* (2021), conduzida por equipes de pesquisa de diferentes disciplinas científicas, conclui que o benefício do envolvimento ativo aparece de forma consistente em várias áreas e formatos de curso. A meta-análise de Theobald *et al.* (2020) acrescenta um resultado de equidade: metodologias ativas reduzem as taxas de reprovação e estreitam diferenças de desempenho de estudantes sub-representados em ciências, tecnologia, engenharia e matemática. Sistemas de avaliação adaptativa, que ajustam a dificuldade das questões ao perfil do estudante, potencializam essa dinâmica (Martin *et al.*, 2020).

O sistema de quiz do StatPhysics Lab opera em três níveis (conceitual, interpretação de dados e análise crítica), com feedback instantâneo após cada resposta, o que o situa em linha com essas recomendações da literatura.

METODOLOGIA

Este trabalho caracteriza-se como um relato de desenvolvimento de produto educacional, de natureza aplicada e caráter descritivo. O percurso compreendeu três etapas: (i) definição dos princípios pedagógicos a partir da literatura sobre experimentação, gamificação e aprendizagem ativa, sintetizada no referencial teórico; (ii) desenvolvimento iterativo do ambiente virtual, com ciclos de implementação, teste e refinamento das funcionalidades; e (iii) descrição sistemática do produto resultante, apresentada na seção de resultados. Não houve coleta de dados com participantes humanos nesta etapa da pesquisa.

Do ponto de vista tecnológico, o StatPhysics Lab é uma aplicação de página única escrita

em JavaScript com a biblioteca React e empacotada com a ferramenta Vite. Os gráficos são renderizados como elementos vetoriais SVG por meio da biblioteca Recharts, o que preserva a nitidez em qualquer resolução de tela. As simulações não dependem de um motor de física de terceiros: os modelos analíticos de cada experimento e a geração de ruído pseudoaleatório que reproduz a incerteza instrumental foram implementados diretamente em JavaScript e são executados no navegador do usuário. O sistema é distribuído como aplicativo web progressivo (PWA), com manifesto e service worker, o que permite a instalação em computadores e celulares e o uso sem conexão após o primeiro acesso. O progresso do estudante é mantido localmente no navegador e, quando o usuário se autentica em seu perfil, sincronizado na nuvem, o que permite a continuidade do trabalho entre dispositivos. A interface é hospedada como site estático em rede de distribuição de conteúdo. O ambiente oferece ainda recursos de acessibilidade, um modo projetor voltado à apresentação em sala de aula e a exportação de roteiros e dados em PDF.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Visão Geral do Produto

O StatPhysics Lab (disponível em <https://statphysics-lab.pages.dev>) é um laboratório virtual desenvolvido em tecnologia web, acessível por qualquer navegador moderno, sem necessidade de instalação ou cadastro institucional. O produto foi concebido e implementado pelo autor deste trabalho e destina-se a alunos, professores e curiosos da ciência experimental, especialmente no nível superior.

A arquitetura do sistema organiza-se em quatro módulos principais (Conceitos, Simulador de Física, Simulador de Estatística e Quiz), articulados por uma camada transversal de gamificação. O acesso é individualizado por perfil de usuário, com registro de progresso persistente. A Tabela 1 resume os componentes do produto, descritos em detalhe nas subseções seguintes.

Tabela 1. Componentes do StatPhysics Lab e seus quantitativos.

Componente	Descrição	Quantitativo
Glossário e fórum	Verbetes interativos com status de leitura e fórum de discussão com grupos de acesso por PIN	28 verbetes
Laboratórios de física	Simuladores com animação, coleta de medidas com ruído instrumental, análise estatística e roteiros com Modo POE, da cinemática à física moderna	70 laboratórios
Simuladores de estatística	Visualização dinâmica de teoremas-limite, estimação e inferência, análise de medidas e visualização de dados	10 simuladores
Quizzes	Quizzes temáticos sobre banco de questões em três níveis, com feedback imediato e questões adicionais criadas pelo professor	80 quizzes; 1.170 questões
Desafios	Desafio do Chefão, com questões em três níveis progressivos, e Desafio Diário com registro de sequência de dias consecutivos	90 questões; 1 questão/dia
Gamificação	Pontos de experiência, níveis de progressão temáticos e conquistas, sincronizados ao perfil do usuário na nuvem	20 conquistas
Atividades avaliativas	Atividades criadas e liberadas pelo professor, com correção automática e nota imediata	variável
Acessibilidade e apoio	Recursos de acessibilidade, modo projetor para uso em sala e exportação de roteiros e dados em PDF	não se aplica

Fonte: elaborada pelo autor.

Módulo Conceitos: Glossário Interativo

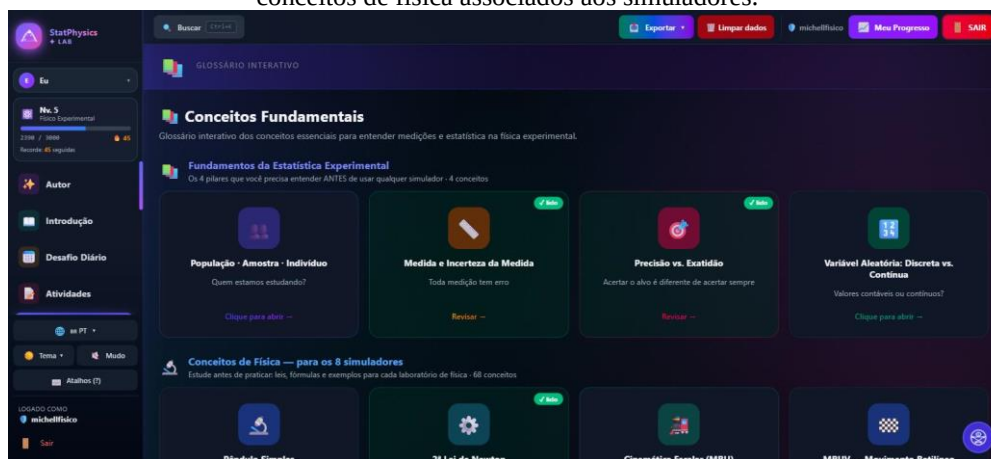
O glossário interativo reúne 28 conceitos organizados em três categorias. A primeira, "Fundamentos da Estatística Experimental", abrange quatro tópicos essenciais: População, Amostra e Indivíduo; Medida e Incerteza da Medida; Precisão versus Exatidão; e Variável Aleatória (Discreta versus Contínua). Esses conceitos são apresentados como pré-requisito explícito para o uso dos simuladores, em consonância com a posição, corrente na literatura sobre laboratórios introdutórios, de que o letramento estatístico deve anteceder, e não suceder, a prática experimental (Pollard *et al.*, 2021).

A segunda categoria, "Conceitos de Física", contém 14 tópicos, um para cada laboratório virtual, permitindo ao estudante revisar a fundamentação teórica específica antes de iniciar a simulação correspondente. A terceira categoria engloba 10 conceitos adicionais de estatística aplicada, aprofundando temas como Algarismos Significativos, Histograma e Teorema Central do Limite.

Cada verbete é apresentado em card interativo, com status de leitura (lido / a revisar / a

ler), favorecendo a metacognição e o planejamento autônomo do estudo. A seção integra ainda um fórum de discussão com grupos de acesso por PIN, o que permite ao professor organizar turmas e mediar conversas sobre os conceitos e experimentos. A Figura 1 apresenta a tela do glossário interativo.

Figura 1. Tela do módulo Conceitos: glossário interativo com os fundamentos da estatística experimental e os conceitos de física associados aos simuladores.



Fonte: elaborada pelo autor.

Módulo Simulador de Física: Laboratórios Dinâmicos

O módulo de física disponibiliza 68 laboratórios virtuais, organizados em cinco categorias que espelham a estrutura curricular dos cursos de física do ensino superior: Física 1, dedicada à mecânica e gravitação (24 simuladores); Física 2, a fluidos e termodinâmica (17); Física 3, a eletromagnetismo (10); Física 4, a óptica e ondas (5); e Física Moderna (12). Entre os experimentos clássicos estão pêndulo simples, 2ª Lei de Newton, cinemática escalar (MRU), MRUV, energia mecânica, lançamento oblíquo, sistema massa-mola, colisões, hidrostática, campo gravitacional, princípio de Pascal, equação da continuidade e equação de Bernoulli. A Figura 2 mostra a tela de seleção dos laboratórios.

Figura 2. Tela de seleção dos laboratórios experimentais, organizados por categoria curricular, com opção de download dos roteiros em PDF.

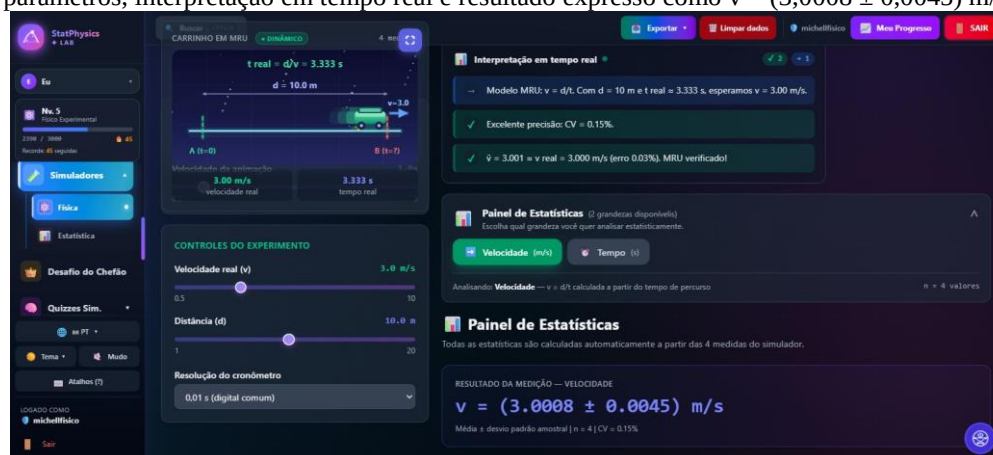


Fonte: elaborada pelo autor.

Cada laboratório inclui visualização animada, controles interativos, coleta de medidas e análise estatística completa, além de um roteiro experimental estruturado como guia do professor, com indicação de nível de ensino, duração estimada da aula, o que observar, o que medir e questões para discussão. O conjunto completo de roteiros pode ser baixado em PDF. Outro recurso relevante é o Modo POE (Predict, Observe, Explain), que solicita ao estudante uma previsão antes de executar a simulação, estratégia que a pesquisa recente associa a ganhos de desempenho, atitude e retenção na aprendizagem de ciências (Erdem Özcan; Uyanik, 2022).

Cada simulador gera medições com ruído realista, que reproduz a incerteza instrumental de equipamentos reais. O usuário pode, inclusive, escolher a resolução do cronômetro (digital fino, digital comum ou analógico) e observar seu efeito sobre a dispersão dos dados. O estudante coleta dados, monta tabelas, calcula médias e desvios, e verifica se os resultados são compatíveis com o modelo teórico esperado, reproduzindo o ciclo completo da atividade experimental: formulação de hipótese, coleta de dados, análise estatística e conclusão. A Figura 3 ilustra o laboratório de cinemática escalar em execução, com o painel de interpretação em tempo real e o resultado da medição expresso com incerteza.

Figura 3. Laboratório de Cinemática Escalar (MRU) em execução: animação do experimento, controles de parâmetros, interpretação em tempo real e resultado expresso como $v = (3,0008 \pm 0,0045) \text{ m/s}$.

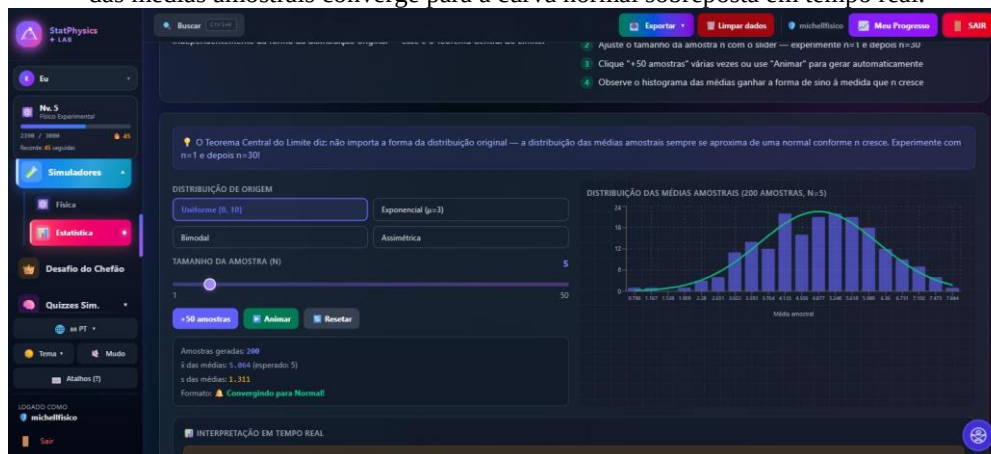


Fonte: elaborada pelo autor.

Módulo Simulador de Estatística

O módulo de estatística é composto por dez simuladores organizados em quatro categorias didáticas (teoremas-limite, estimação e inferência, análise de medidas e visualização de dados), voltados à compreensão intuitiva de conceitos probabilísticos e estatísticos frequentemente abstratos para estudantes de física: Teorema Central do Limite, Lei dos Grandes Números, Intervalo de Confiança, Regra 68-95-99,7, Algarismos Significativos, Histograma, entre outros. Cada simulador permite ao usuário manipular parâmetros e observar em tempo real como os resultados se alteram, favorecendo a construção de uma intuição quantitativa que dificilmente emerge apenas da leitura de fórmulas. A Figura 4 mostra o simulador do Teorema Central do Limite após a geração de 200 amostras.

Figura 4. Simulador do Teorema Central do Limite: a partir de uma distribuição uniforme de origem, o histograma das médias amostrais converge para a curva normal sobreposta em tempo real.



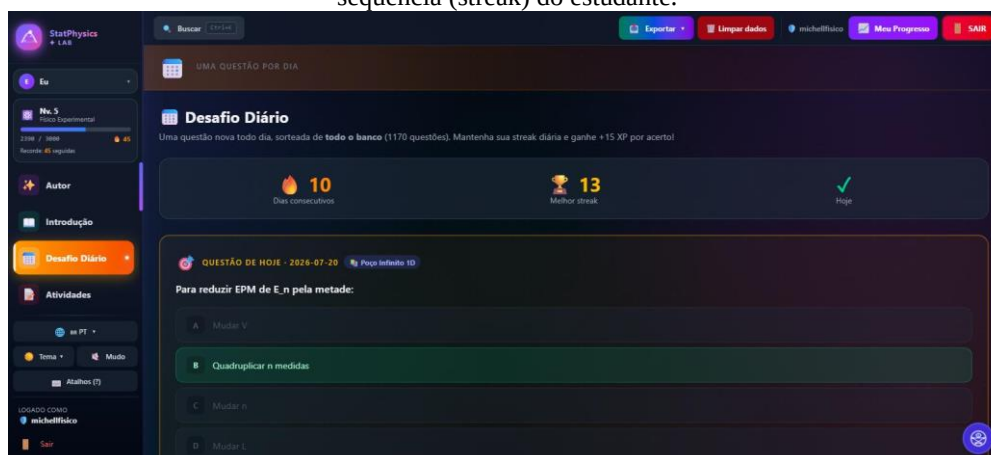
Fonte: elaborada pelo autor.

Módulo Quiz: Avaliação Adaptativa

O sistema de avaliação é composto por um banco de 1.170 questões distribuídas em 78 quizzes temáticos, organizadas em três níveis de complexidade cognitiva: (i) conceitual, que verifica a compreensão de definições e princípios; (ii) interpretação de dados, com análise de tabelas, gráficos e resultados experimentais; e (iii) análise crítica, que exige julgamento de procedimentos, identificação de fontes de erro e avaliação de conclusões. Após cada resposta, o sistema fornece feedback imediato com explicação da alternativa correta, favorecendo a aprendizagem a partir do erro. O professor pode acrescentar questões próprias ao banco, e um desafio de longo percurso, o Desafio do Chefão, reúne 90 questões em três níveis progressivos de dificuldade.

O Desafio Diário (Figura 5) sorteia uma questão do banco a cada dia, incentivando o retorno regular à plataforma por meio de uma mecânica de sequência diária (streak). O estudante acumula +15 XP por questão respondida corretamente e perde a sequência caso deixe de acessar a plataforma em algum dia.

Figura 5. Tela do Desafio Diário, com a questão do dia sorteada do banco de 1.170 itens e os indicadores de sequência (streak) do estudante.

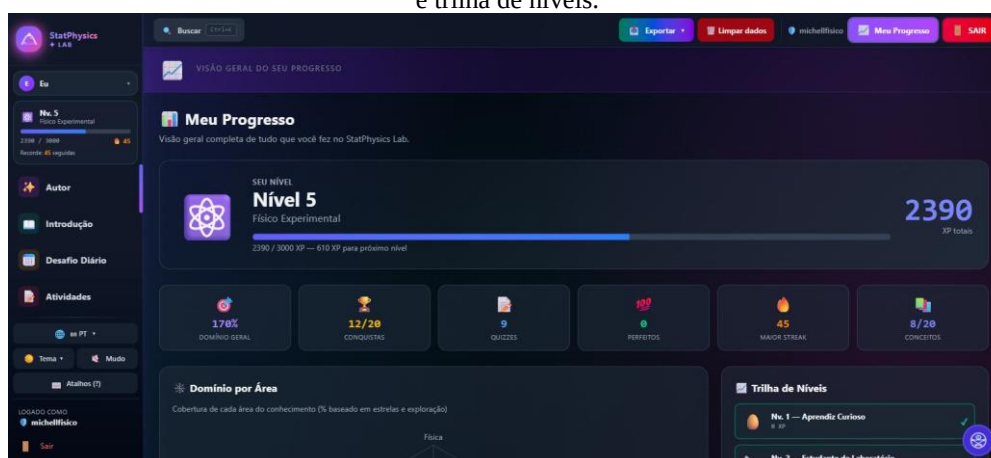


Fonte: elaborada pelo autor.

Sistema de Gamificação

A camada de gamificação do StatPhysics Lab articula os seguintes elementos: sistema de pontos de experiência (XP), que acumula ao longo do uso de todos os módulos; níveis de progressão nomeados de forma temática, do Aprendiz Curioso ao Físico Experimental; 20 conquistas desbloqueáveis por marcos de desempenho; maior streak registrada; e um painel de progresso por área (física e estatística) que exhibe a cobertura percentual de cada domínio com base em estrelas e exploração. O painel "Meu Progresso" (Figura 6) consolida todas essas métricas em uma visão geral do desempenho individual, e o conjunto é sincronizado ao perfil do usuário na nuvem, preservando a trajetória do estudante entre sessões e dispositivos.

Figura 6. Painel "Meu Progresso": nível do estudante, XP acumulado, conquistas, quizzes realizados, maior streak e trilha de níveis.



Fonte: elaborada pelo autor.

Para o docente, o módulo "Atividades" permite criar e abrir atividades avaliativas específicas para turmas, com correção automática e nota disponível imediatamente após a realização, dispensando a prova em papel. A função "Exportar" possibilita a exportação dos dados de progresso, facilitando análises externas e registros institucionais.

Alcance e Limitações do Produto

O StatPhysics Lab se diferencia da maior parte dos recursos digitais disponíveis para o ensino de física: ao contrário de simuladores que apenas reproduzem fenômenos, o produto combina a prática experimental, por meio de simuladores com ruído realista, o letramento estatístico, por meio do glossário e dos simuladores estatísticos, e a avaliação formativa, por meio do quiz adaptativo, tudo sustentado por uma estrutura motivacional de gamificação.

Essa integração é pedagogicamente relevante porque enfrenta uma lacuna conhecida: incerteza e estatística costumam ser tratadas como formalismo dissociado da prática, e não como ferramentas que dão sentido à medida, dificuldade reconhecida inclusive por quem ensina nos laboratórios introdutórios (Pollard *et al.*, 2021). Ao apresentar esses conceitos como pré-requisito explícito para os simuladores e ao gerar dados com ruído nos próprios experimentos virtuais, o StatPhysics Lab promove uma experiência em que estatística e física coexistem de forma indissociável.

A gamificação, por sua vez, atende à demanda por engajamento em contextos onde o laboratório virtual compete com diversas outras demandas na atenção do estudante. A streak diária, em particular, incentiva a regularidade do estudo, e a meta-análise de Latimier, Peyre e Ramus (2021) mostra forte benefício da prática de recuperação espaçada no tempo sobre a retenção, em comparação com a prática concentrada. O banco extenso de questões (1.170 itens) confere robustez ao desafio diário, reduzindo a probabilidade de repetição e mantendo a novidade como fator motivador.

O produto apresenta limitações que precisam ser explicitadas. A principal é a ausência, até o momento, de estudos controlados sobre seu impacto na aprendizagem: as impressões de uso disponíveis vêm de adoção espontânea, sujeita a viés de seleção, e não permitem afirmar ganhos conceituais ou atitudinais. Há também limitações inerentes ao formato: o laboratório virtual não desenvolve habilidades de manipulação de instrumentos reais, e o ruído gerado computacionalmente, por mais realista que seja, é um modelo simplificado das fontes de erro

presentes em uma bancada. Por fim, a própria gamificação carrega um risco conhecido: recompensas externas podem deslocar a motivação do estudante do conteúdo para a pontuação, efeito que a literatura recomenda monitorar (Zainuddin *et al.*, 2020).

Essas limitações delineiam a agenda de pesquisa. A etapa seguinte prevista é a avaliação formal do produto em delineamento quase-experimental, com pré e pós-teste, grupo de comparação e instrumentos validados, incluindo o cálculo de ganho normalizado de aprendizagem. Estudos futuros também podem explorar as variáveis de processo registradas pela própria plataforma, como regularidade de acesso, sequências diárias e trajetórias de erro no banco de questões, além do uso do módulo de atividades por professores em turmas reais. A experiência em dispositivos móveis, embora funcional, ainda pode ser aprimorada para garantir acessibilidade plena em telas menores.

CONCLUSÃO

O StatPhysics Lab configura-se como um produto educacional que responde a desafios reais do ensino de física experimental no Brasil: escassez de infraestrutura laboratorial, ensino de estatística dissociado da prática e dificuldade de manter os estudantes ativos em ambientes virtuais. A integração entre simuladores físicos com ruído realista, módulos de letramento estatístico, avaliação adaptativa e gamificação representa uma contribuição ao campo dos laboratórios virtuais para o ensino de ciências.

A disponibilização gratuita, sem instalação, diretamente no navegador, reduz barreiras de acesso tanto para estudantes quanto para docentes de instituições com infraestrutura limitada. O módulo de atividades da turma abre, ainda, possibilidades de uso em práticas híbridas e a distância, permitindo que o professor acompanhe o progresso dos alunos de forma sistemática.

Espera-se que este artigo contribua para a difusão do recurso na comunidade de ensino de física e estimule pesquisas futuras sobre seu impacto em variáveis como aprendizagem conceitual, letramento estatístico, engajamento e persistência. O produto está disponível em <https://statphysics-lab.pages.dev> e permanece em desenvolvimento ativo. Além de disponibilizar um recurso educacional aberto, este trabalho contribui ao integrar, em um único ambiente, experimentação virtual, letramento estatístico, avaliação adaptativa e gamificação, oferecendo uma infraestrutura aberta para futuras investigações sobre aprendizagem em laboratórios virtuais e para o desenvolvimento de novos recursos educacionais digitais.

REFERÊNCIAS

ARAÚJO, E. S. *et al.* O uso de simuladores virtuais educacionais e as possibilidades do PhET para a aprendizagem de Física no Ensino Fundamental. **Revista de Ensino de Ciências e Matemática**, São Paulo, v. 12, n. 3, 2021. DOI: <https://doi.org/10.26843/rencima.v12n3a22>.

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**, v. 17, 023108, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.17.023108>.

ERDEM ÖZCAN, G.; UYANIK, G. The effects of the "Predict-Observe-Explain (POE)" strategy on academic achievement, attitude and retention in science learning. **Journal of Pedagogical Research**, v. 6, n. 3, p. 103-111, 2022. DOI: <https://doi.org/10.33902/JPR.202215535>.

LATIMIER, A.; PEYRE, H.; RAMUS, F. A meta-analytic review of the benefit of spacing out retrieval practice episodes on retention. **Educational Psychology Review**, v. 33, n. 3, p. 959-987, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10648-020-09572-8>.

LOMBARDI, D. *et al.* The curious construct of active learning. **Psychological Science in the Public Interest**, v. 22, n. 1, p. 8-43, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1177/1529100620973974>.

MARTIN, F. *et al.* Systematic review of adaptive learning research designs, context, strategies, and technologies from 2009 to 2018. **Educational Technology Research and Development**, v. 68, p. 1903-1929, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11423-020-09793-2>.

MOREIRA, J. A.; SCHLEMMER, E. Por um novo conceito e paradigma de educação digital online. **Revista UFG**, Goiânia, v. 20, n. 26, 2020. DOI: <https://doi.org/10.5216/revufg.v20.63438>.

POLLARD, B. *et al.* Introductory physics lab instructors' perspectives on measurement uncertainty. **Physical Review Physics Education Research**, v. 17, 010133, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.17.010133>.

SAILER, M.; HOMNER, L. The gamification of learning: a meta-analysis. **Educational Psychology Review**, v. 32, p. 77-112, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10648-019-09498-w>.

THEOBALD, E. J. *et al.* Active learning narrows achievement gaps for underrepresented students in undergraduate science, technology, engineering, and math. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, Washington, v. 117, n. 12, p. 6476-6483, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1916903117>.

ZAINUDDIN, Z. *et al.* The impact of gamification on learning and instruction: a systematic review of empirical evidence. **Educational Research Review**, v. 30, 100326, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.edurev.2020.100326>.