

GAMELAB FISMAT: UM JOGO DIGITAL EDUCACIONAL PARA O ENSINO DE SISTEMAS QUÂNTICOS INTELIGENTES

GAMELAB FISMAT: AN EDUCATIONAL DIGITAL GAME FOR TEACHING INTELLIGENT QUANTUM SYSTEMS

GAMELAB FISMAT: UN JUEGO DIGITAL EDUCATIVO PARA LA ENSEÑANZA DE SISTEMAS CUÁNTICOS INTELIGENTES

Wagner Melo Nascimento¹

RESUMO: Este artigo apresenta o desenvolvimento e a análise do *GameLab FisMat*, um jogo digital educacional em formato de visual novel, com mecânicas de RPG em turnos, voltado à abordagem de conteúdos relacionados a sistemas quânticos inteligentes. A proposta parte do desafio de trabalhar conceitos de Física e Computação Quântica caracterizados por elevado grau de abstração e formalismo matemático. Metodologicamente, o projeto articula princípios de Design Centrado no Usuário, prototipagem iterativa, narrativa de horror cósmico e elementos de design de jogos, associados ao desenvolvimento de uma aplicação web. Foram estruturadas 84 questões conceituais, distribuídas em diferentes níveis de complexidade e integradas às mecânicas de combate e progressão do jogo, com retorno explicativo após as respostas. A implementação atual utiliza backend em Python com FastAPI, persistência em MongoDB e interface desenvolvida com HTML5, CSS3 e JavaScript. A seleção das questões incorpora números aleatórios de origem quântica obtidos por meio da API do Australian National University Quantum Random Number Generator (ANU QRNG), utilizados para determinar os índices das questões no dataset. Os resultados demonstram a implementação de um protótipo funcional, modular e responsivo, capaz de integrar conteúdo científico, narrativa, desafios conceituais, feedback e mecanismos de progressão. O software desenvolvido encontra-se formalmente registrado junto ao Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI). A etapa realizada permite analisar a viabilidade técnica e a coerência da proposta, mas não permite afirmar efeitos sobre aprendizagem, motivação ou engajamento. Estudos empíricos futuros serão necessários para avaliar sistematicamente seu potencial educacional.

Palavras-chave: Jogo digital educacional. Física Quântica. Computação Quântica. Sistemas Quânticos inteligentes. ANU QRNG.

¹Discente do Curso Bacharelado em Física de Materiais (POLI/UPE) e Mestrando no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas da Universidade de Pernambuco (PPGES/UPE) e Analista de Sistemas do Instituto Federal de Pernambuco (IFPE). Universidade de Pernambuco (UPE) e Instituto Federal de Pernambuco (IFPE).

ABSTRACT: This article presents the development and analysis of *GameLab FisMat*, an educational digital game in a visual novel format with turn-based RPG mechanics, aimed at addressing content related to intelligent quantum systems. The proposal stems from the challenge of working with concepts in Physics and Quantum Computing characterized by a high degree of abstraction and mathematical formalism. Methodologically, the project combines principles of User-Centered Design, iterative prototyping, cosmic horror narrative, and game design elements with the development of a web application. A total of 84 conceptual questions were structured and distributed across different levels of complexity and integrated into the game's combat and progression mechanics, with explanatory feedback provided after responses. The current implementation uses a Python backend with FastAPI, MongoDB for data persistence, and an interface developed with HTML5, CSS3, and JavaScript. Question selection incorporates quantum-origin random numbers obtained through the Australian National University Quantum Random Number Generator (ANU QRNG) API, which are used to determine question indices in the dataset. The results demonstrate the implementation of a functional, modular, and responsive prototype capable of integrating scientific content, narrative, conceptual challenges, feedback, and progression mechanisms. The developed software is formally registered with the Brazilian National Institute of Industrial Property (INPI). The current stage allows for the analysis of the technical feasibility and coherence of the proposal, but does not allow conclusions to be drawn regarding its effects on learning, motivation, or engagement. Future empirical studies will be necessary to systematically evaluate its educational potential.

Keywords: Educational digital game. Quantum Physics. Quantum Computing. Intelligent quantum systems. ANU QRNG.

RESUMEN: Este artículo presenta el desarrollo y análisis de *GameLab FisMat*, un juego digital educativo en formato de visual novel, con mecánicas de RPG por turnos, orientado al abordaje de contenidos relacionados con sistemas cuánticos inteligentes. La propuesta parte del desafío de trabajar conceptos de Física y Computación Cuántica caracterizados por un elevado grado de abstracción y formalismo matemático. Metodológicamente, el proyecto articula principios de Diseño Centrado en el Usuario, prototipado iterativo, narrativa de horror cósmico y elementos de diseño de juegos, asociados al desarrollo de una aplicación web. Se estructuraron 84 preguntas conceptuales, distribuidas en diferentes niveles de complejidad e integradas a las mecánicas de combate y progresión del juego, con retroalimentación explicativa después de las respuestas. La implementación actual utiliza un backend en Python con FastAPI, persistencia en MongoDB e interfaz desarrollada con HTML5, CSS3 y JavaScript. La selección de las preguntas incorpora números aleatorios de origen cuántico obtenidos mediante la API del Australian National University Quantum Random Number Generator (ANU QRNG), utilizados para determinar los índices de las preguntas en el dataset. Los resultados demuestran la implementación de un prototipo funcional, modular y responsivo, capaz de integrar contenido científico, narrativa, desafíos conceptuales, retroalimentación y mecanismos de progresión. El software desarrollado se encuentra formalmente registrado ante el Instituto Nacional de la Propiedad Industrial (INPI) de Brasil. La etapa desarrollada permite analizar la viabilidad técnica y la coherencia del diseño, pero no permite afirmar efectos sobre el aprendizaje, la motivación o el compromiso de los usuarios. Por lo tanto, serán necesarios estudios empíricos futuros para evaluar sistemáticamente su potencial educativo.

Palabras clave: Juego digital educativo. Física Cuántica. Computación Cuántica. Sistemas cuánticos inteligentes. ANU QRNG.

INTRODUÇÃO

A educação contemporânea em Ciências Exatas, particularmente nos campos da Física e da Computação Quântica, enfrenta o desafio de aproximar conhecimentos de elevada complexidade conceitual dos processos efetivos de aprendizagem. A necessidade de trabalhar conteúdos científicos avançados demanda estratégias pedagógicas capazes de promover maior participação dos estudantes e, simultaneamente, produzir evidências sobre a efetividade das práticas de ensino. Wieman (2007) defende, nesse sentido, a adoção de uma abordagem científica para a educação em Ciências, na qual métodos e estratégias pedagógicas sejam analisados sistematicamente quanto à sua efetividade, em vez de dependerem exclusivamente de práticas tradicionais ou de percepções intuitivas dos docentes.

No caso da Física Quântica, esse desafio é particularmente relevante em razão do grau de abstração de seus conceitos e da necessidade de articular formalismo matemático e interpretação física. Conceitos como superposição, emaranhamento, estados quânticos e operadores exigem a construção de representações que nem sempre encontram correspondência direta na experiência cotidiana dos estudantes. Soma-se a isso a necessidade de estabelecer relações entre estruturas matemáticas e fenômenos físicos, de modo que a manipulação formal não seja dissociada de sua interpretação. Nesse contexto, a perspectiva de modelagem proposta por Hestenes (1987) destaca a importância da construção e utilização de modelos como componente central do ensino de Física.

Os formalismos característicos da teoria quântica, como a álgebra linear sobre números complexos, os operadores hermitianos e os espaços de Hilbert, demandam do estudante a articulação entre diferentes níveis de representação matemática e física. Em ambientes digitais, essa articulação pode ser explorada por meio da combinação de texto, imagens, interfaces e interações. Entretanto, a utilização desses recursos não garante, por si só, resultados de aprendizagem. Seu planejamento deve estar subordinado aos objetivos instrucionais e considerar a organização coerente das diferentes representações, de modo a evitar processamento cognitivo desnecessário (Clark; Mayer, 2016; Mayer, 2009).

Diante desse cenário, o presente trabalho propõe o *GameLab FisMat*, um jogo digital educacional que combina narrativa de horror cósmico, mecânicas de RPG em turnos, desafios conceituais, feedback e elementos de design de jogos, tendo como foco conteúdos relacionados aos sistemas quânticos inteligentes. A proposta parte da hipótese de que uma experiência

interativa estruturada pode criar condições favoráveis à participação ativa do estudante, sem substituir o rigor conceitual necessário ao ensino de conteúdos científicos. Essa perspectiva encontra correspondência nos princípios de aprendizagem ativa discutidos por Mazur (1997) e Freeman et al. (2014), nos quais o envolvimento do estudante com questões conceituais e com processos de discussão constitui parte relevante da aprendizagem.

A narrativa de horror cósmico, inspirada na tradição lovecraftiana, constitui uma escolha de design destinada a contextualizar a experiência de aprendizagem. A representação do desconhecido e de fenômenos difíceis de compreender é utilizada como recurso metafórico para acompanhar a apresentação de conceitos científicos de elevada abstração. Essa escolha não é apresentada como evidência de eficácia pedagógica, mas como uma característica do protótipo cuja contribuição para a experiência e para a aprendizagem deverá ser posteriormente investigada.

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver, implementar e analisar uma estratégia instrucional baseada em um jogo digital educacional, com narrativa de horror cósmico, mecânicas de RPG em turnos e desafios conceituais, voltada ao ensino de sistemas quânticos inteligentes, explorando seu potencial de engajamento, compreensão conceitual e expansão pedagógica. Especificamente, busca-se mapear e traduzir conceitos fundamentais de sistemas quânticos inteligentes em questões conceituais organizadas por níveis de complexidade; projetar e implementar um protótipo funcional que integre narrativa, mecânicas de combate baseadas em questões conceituais e feedback; e analisar a coerência pedagógica e a viabilidade técnica do protótipo, bem como seu potencial de adaptação e expansão para outros conteúdos científicos, níveis educacionais e contextos acadêmicos.

A fundamentação teórica do *GameLab FisMat* estrutura-se em três eixos principais: ensino de Física Moderna, design de experiências interativas e sistemas quânticos inteligentes. Esses eixos são articulados por contribuições relacionadas à avaliação formativa, à motivação, à narrativa e à aprendizagem multimídia, estabelecendo uma base interdisciplinar para as decisões pedagógicas e de design adotadas no protótipo.

No ensino de Física, a participação ativa do estudante constitui uma alternativa às estratégias predominantemente expositivas. Em *Peer Instruction*, Mazur (1997) propõe uma dinâmica baseada na apresentação de questões conceituais, na reflexão individual e na discussão entre estudantes, utilizando o confronto entre diferentes interpretações como parte do processo de aprendizagem. Em uma análise mais ampla, Freeman et al. (2014) examinaram 225 estudos

sobre aprendizagem ativa em disciplinas de Ciências, Tecnologia, Engenharia e Matemática e identificaram desempenho superior em avaliações e menor probabilidade de reprovação em comparação com contextos de ensino predominantemente expositivo. Esses referenciais fundamentam a utilização de questões conceituais como elemento central da interação do estudante com os conteúdos no *GameLab FisMat*.

A perspectiva de modelagem apresentada por Hestenes (1987) complementa esse eixo ao propor a modelagem matemática do mundo físico como tema central da instrução. O autor argumenta que determinados conhecimentos factuais e procedimentais importantes não são explicitamente formulados e ensinados nos cursos tradicionais, defendendo uma abordagem na qual o desenvolvimento e a utilização de modelos ocupem posição central. No *GameLab FisMat*, essa perspectiva orienta a transformação de conceitos científicos em situações que demandam interpretação e tomada de decisão, evitando restringir a experiência à apresentação de procedimentos formais.

A avaliação formativa constitui outro fundamento da proposta. Nicol e Macfarlane-Dick (2006) relacionam práticas de avaliação e feedback ao desenvolvimento da autorregulação da aprendizagem, enquanto Shute (2008) destaca a importância de características como oportunidade, especificidade e utilidade do feedback formativo. No *GameLab FisMat*, esses princípios são incorporados ao retorno apresentado após as respostas, buscando fornecer ao jogador informações relacionadas ao conceito abordado, em vez de limitar o resultado à indicação de acerto ou erro.

Quanto ao design de jogos, Deterding et al. (2011) definem gamificação como a utilização de elementos de design de jogos em contextos que não são propriamente jogos. Embora essa definição não caracterize diretamente o *GameLab FisMat*, que é concebido como um jogo digital educacional, alguns elementos associados ao design de jogos e frequentemente empregados em estratégias gamificadas, como desafios, progressão, recompensas e rankings, são utilizados na organização da experiência. Nesse contexto, esses mecanismos são considerados recursos de interação vinculados aos objetivos do protótipo, sem que sua presença seja tomada como garantia de aprendizagem.

A Teoria da Autodeterminação, discutida por Ryan e Deci (2000), oferece um referencial para compreender a motivação a partir das necessidades psicológicas de autonomia, competência e relacionamento. No *GameLab FisMat*, escolhas, progressão e reconhecimento do desempenho constituem características que podem ser posteriormente analisadas à luz dessas

dimensões. Entretanto, não se pressupõe que tais mecanismos produzam efeitos motivacionais específicos, uma vez que essa relação deverá ser examinada empiricamente.

De forma complementar, Csikszentmihalyi (1990) caracteriza o *flow* como uma experiência de envolvimento associada, entre outros aspectos, à relação entre desafio e habilidade. A progressão dos desafios no *GameLab FisMat* é organizada de modo a estabelecer uma relação entre a dificuldade das questões e o avanço do jogador. Essa organização representa uma decisão de design inspirada nesse referencial, mas não permite afirmar a ocorrência efetiva de *flow* entre os usuários sem instrumentos específicos de avaliação.

No contexto científico do trabalho, os sistemas quânticos inteligentes são abordados a partir da convergência entre Física Quântica, Computação e Aprendizado de Máquina. Entre os fundamentos considerados estão os algoritmos quânticos variacionais, os sistemas quânticos abertos e o aprendizado de máquina quântico. McClean et al. (2016) analisam algoritmos híbridos quântico-clássicos nos quais circuitos quânticos parametrizados são combinados a procedimentos clássicos de otimização. Esses métodos constituem uma abordagem relevante para a exploração de recursos quânticos em processos de otimização e aprendizado.

O treinamento desses circuitos apresenta desafios específicos. McClean et al. (2018) investigaram o fenômeno denominado *barren plateaus*, no qual, para determinadas classes de circuitos parametrizados, os gradientes podem tornar-se exponencialmente pequenos à medida que aumenta o número de qubits, dificultando a otimização. Esse fenômeno integra o conjunto de conceitos científicos utilizados na elaboração dos desafios conceituais do *GameLab FisMat*.

Os sistemas quânticos abertos constituem outro componente da fundamentação científica. Breuer e Petruccione (2002) apresentam a base teórica para a descrição de sistemas quânticos que interagem com o ambiente, contemplando fenômenos como decoerência e dissipação. Essa abordagem permite considerar o papel das interações ambientais na descrição e no comportamento de sistemas quânticos físicos.

No aprendizado de máquina quântico, Benedetti et al. (2019) apresentam uma revisão de diferentes modelos e aplicações, abrangendo tarefas como classificação, redução ou análise de dimensionalidade e geração de dados. Entre essas abordagens, o quantum principal component analysis, proposto por Lloyd et al. (2013), constitui um exemplo de utilização de recursos quânticos para a análise de componentes principais. Esses trabalhos fornecem referências científicas para a seleção e organização dos conceitos relacionados ao aprendizado de máquina quântico incorporados aos desafios do jogo.

A dimensão narrativa da proposta é fundamentada na contribuição de Bruner (1997), que discute o papel da narrativa na construção, organização e atribuição de significado à experiência. No *GameLab FisMat*, esse princípio é explorado mediante uma narrativa progressiva que insere os conteúdos científicos em situações de investigação, confronto e descoberta. A narrativa, portanto, exerce função de contextualização e organização da experiência, sem que se atribua a ela, antecipadamente, um efeito específico sobre os resultados de aprendizagem.

A dimensão multimídia complementa essa organização narrativa. Mayer (2009) apresenta princípios relacionados à aprendizagem por meio de representações verbais e visuais, enfatizando a necessidade de controlar o processamento cognitivo desnecessário. Clark e Mayer (2016), por sua vez, destacam a importância do planejamento instrucional e da utilização criteriosa de recursos multimídia em ambientes digitais. No *GameLab FisMat*, esses princípios orientam a articulação entre texto, elementos visuais, interfaces e interações, buscando manter os recursos de apresentação subordinados aos objetivos educacionais.

Nesse conjunto, o horror cósmico funciona como uma estratégia narrativa específica do protótipo. A relação metafórica entre o desconhecido presente na ficção e a estranheza associada a determinados conceitos quânticos procura estabelecer uma linguagem capaz de contextualizar a experiência do estudante. Sua utilização, contudo, constitui uma hipótese de design, e sua efetiva contribuição para a aprendizagem, compreensão conceitual ou experiência dos usuários deverá ser objeto de investigação.

Como possibilidade de aplicação pedagógica, o *GameLab FisMat* também poderá ser integrado a metodologias ativas, incluindo uma organização de sala de aula invertida. Nesse arranjo, conteúdos introdutórios podem ser estudados previamente por meio de textos, vídeos ou simulações, enquanto os encontros presenciais ou síncronos são destinados à discussão conceitual, resolução de problemas e aplicação do conhecimento. Embora Freeman et al. (2014) e Mazur (1997) não tratem especificamente da sala de aula invertida, seus trabalhos fundamentam a relevância da participação ativa, da discussão conceitual e do uso de questões no processo de aprendizagem. Nesse contexto, o *GameLab FisMat* é concebido como um recurso complementar que poderá ser utilizado para a aplicação e discussão dos conceitos previamente estudados. Essa integração é apresentada como possibilidade de aplicação e investigação futura, e não como resultado pedagógico já demonstrado.

MÉTODOS

O desenvolvimento do *GameLab FisMat* foi conduzido como um processo iterativo de concepção, especificação, implementação, verificação e refinamento de um protótipo de jogo digital educacional voltado à abordagem de conteúdos de Física, Matemática e Computação Quântica. A metodologia adotada procurou articular três dimensões complementares: a organização dos conteúdos científicos, a construção da experiência interativa baseada em mecânicas de jogos e a implementação da infraestrutura computacional necessária ao funcionamento do sistema. O processo geral de desenvolvimento é apresentado na Figura 1, que sintetiza as etapas de concepção, implementação, testes e refinamento do protótipo.

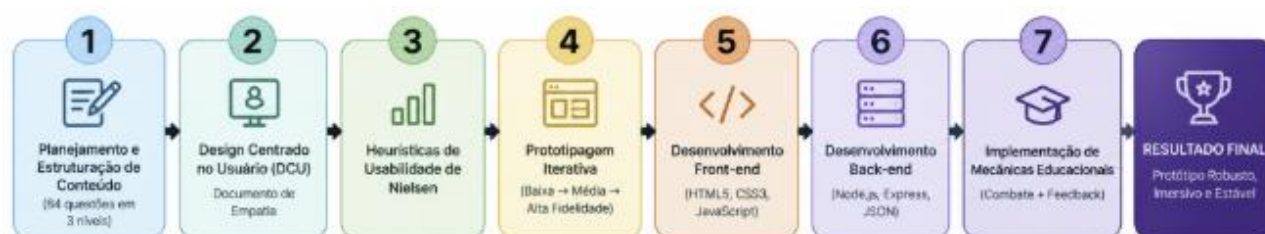


Figura 1: Fluxograma da metodologia de desenvolvimento adotada no projeto *GameLab FISMAT*, evidenciando as etapas de concepção, implementação, testes e refinamento do protótipo.

A organização do conteúdo científico foi realizada por meio de um conjunto estruturado de questões conceituais, denominado QUESTIONS_REAL, apresentado no projeto como um conjunto de 84 perguntas. Cada registro contém identificador, enunciado, alternativas, resposta correta, comentário explicativo e categoria temática, permitindo associar o conteúdo científico à lógica de avaliação e feedback do jogo. A estrutura contempla, entre outros temas, circuitos variacionais, métodos de otimização e arquitetura de circuitos quânticos. Na amostra apresentada, por exemplo, as questões abordam a função da camada de medição em circuitos variacionais, treinamento livre de gradiente e critérios para definição de templates de circuitos. Essa organização foi adotada para que a resolução de problemas conceituais não constituísse apenas uma atividade complementar, mas estivesse integrada à própria dinâmica de progressão do jogador.

A especificação funcional foi inicialmente estruturada por meio de um Documento de Requisitos de Software (DRS), que estabeleceu como elementos centrais o sistema de questões, a barra de sanidade, os combates em turnos, os registros de batalha, as estatísticas de desempenho e os mecanismos de progressão. Entre os requisitos funcionais foram definidos a apresentação das questões, o registro das respostas, a atualização da condição do jogador, o uso

de itens, o armazenamento do progresso, a apresentação das estatísticas e a disponibilização de ranking. O DRS foi utilizado como referência de projeto e não como evidência de funcionamento; dessa forma, a avaliação do atendimento aos requisitos foi realizada considerando a implementação efetivamente produzida no protótipo.

A experiência do jogador foi concebida a partir de uma abordagem de design centrada na interação, utilizando o Modelo de Empatia como instrumento de apoio à definição das situações, desafios e respostas esperadas durante a experiência. O modelo considera elementos como resolução de enigmas científicos durante batalhas, pistas, consequências associadas às respostas, efeitos sonoros, progressão narrativa, ansiedade diante dos desafios, curiosidade científica e satisfação decorrente do avanço no jogo. Esses elementos foram empregados como hipóteses de design para orientar a construção da experiência, não sendo interpretados como evidências empíricas sobre emoções, motivação ou aprendizagem dos usuários.

A estrutura narrativa foi organizada em quatro atos e seis arenas, utilizando o horror cósmico como elemento de contextualização dos desafios científicos. A progressão ocorre por meio de confrontos sucessivos entre personagens e entidades, nos quais a resolução das questões interfere no desenvolvimento da batalha e, conseqüentemente, na progressão narrativa. A proposta procura estabelecer uma relação funcional entre narrativa e conteúdo científico: o conhecimento não aparece apenas como informação apresentada ao jogador, mas como parte da ação necessária para superar os desafios. Essa integração é coerente com a utilização de desafios conceituais como mecanismo de interação, sem pressupor que a contextualização narrativa produza, por si só, ganhos educacionais.

A arquitetura computacional foi organizada segundo uma separação entre entidades de domínio e serviços responsáveis pela lógica e persistência dos dados, conforme apresentado na Figura 2. O modelo originalmente documentado apresenta elementos como Player, GameEngine, QuestionGenerator, DatabaseService e Ranking, estabelecendo um fluxo no qual a solicitação de uma questão é encaminhada à lógica do jogo, a resposta é avaliada, o resultado da rodada é registrado e as informações de progresso e pontuação são persistidas. Na implementação atual do protótipo, a camada de backend utiliza Python com FastAPI e persistência em MongoDB, enquanto a interface utiliza HTML5, CSS3 e JavaScript. Dessa forma, o requisito anteriormente especificado no DRS como Node.js e Express deve ser entendido como parte da especificação inicial do projeto e não como descrição da implementação

atual. Essa atualização é necessária para manter a correspondência entre a documentação e o sistema efetivamente desenvolvido.

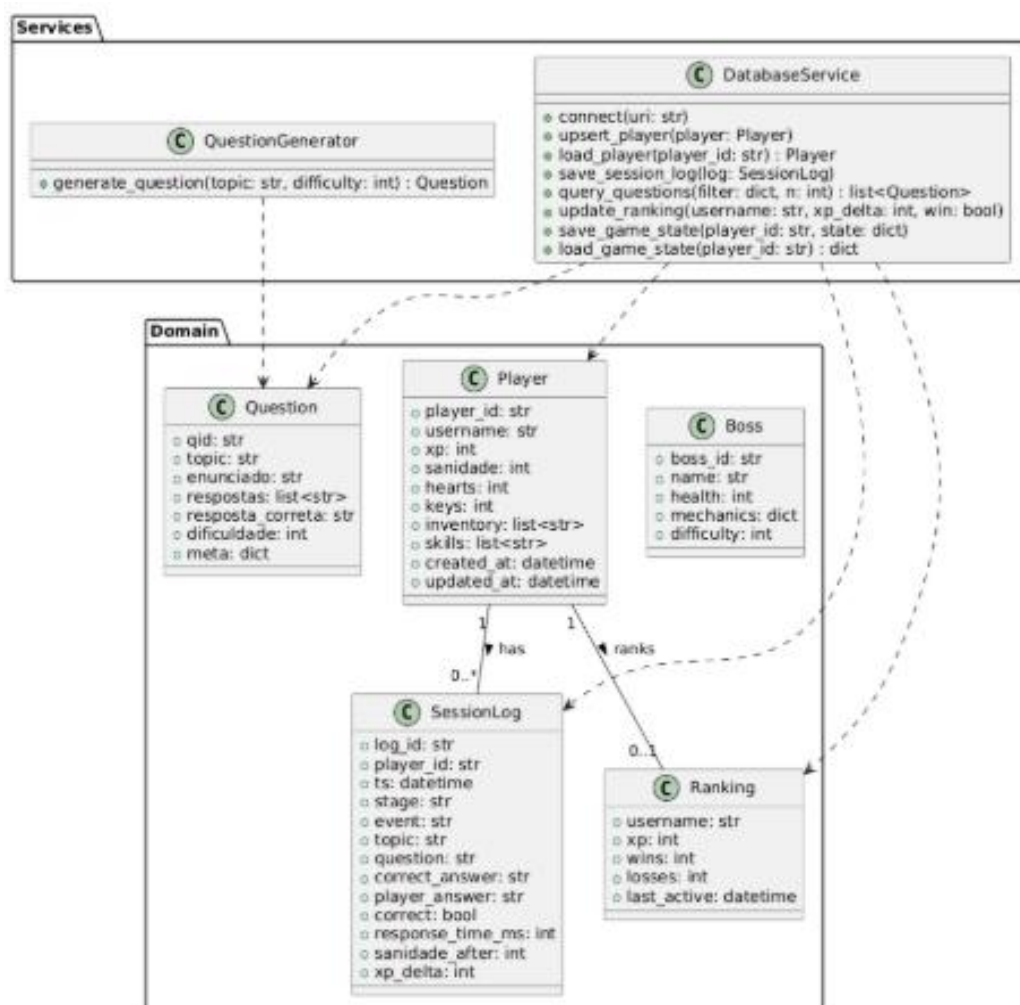


Figura 2: O diagrama apresentado descreve a arquitetura de classes do backend do *GameLab FisMat*, dividida em dois pacotes: *Domain* (camada de entidades do negócio) e *Services* (camada de serviços e persistência).

O conteúdo educacional foi organizado no dataset **QUESTIONS_REAL**, composto por 84 questões conceituais relacionadas aos conteúdos abordados pelo jogo. Cada registro contém informações necessárias à apresentação e avaliação da questão, incluindo identificador, enunciado, alternativas de resposta, indicação da alternativa correta, comentário explicativo e categoria temática. O quadro 1 apresenta uma amostra dos registros que compõem o dataset, evidenciando a estrutura utilizada para organizar os desafios conceituais.

Quadro 1 - Amostra das questões conceituais do dataset do *GameLab FisMat*.

I D	Questão Conceitual	Categoria	Alternativas	Resposta Correta	Comentário explicativo
1	Em um circuito variacional quântico aplicado à classificação de múltiplas classes, qual é o papel da camada de medição (<i>measurement layer</i>)?	Circuitos Variacionais	A, B, C, D	C) Converter os estados quânticos resultantes em probabilidades clássicas associadas às classes.	A camada de medição converte o estado quântico final em resultados clássicos que podem ser interpretados como probabilidades de cada classe.
2	O treinamento livre de gradiente em circuitos variacionais é vantajoso principalmente porque:	Otimização	A, B, C, D	A) Elimina o custo de cálculo do gradiente analítico ou numérico.	Métodos sem gradiente são úteis quando o gradiente é caro de computar ou ruidoso.
3	Na definição de templates de circuitos variacionais, um critério essencial é:	Arquitetura	A, B, C, D	C) Garantir expressividade suficiente com profundidade mínima.	O design deve equilibrar capacidade expressiva e viabilidade experimental.

A seleção das questões incorpora uma fonte externa de aleatoriedade de origem quântica por meio da API do Australian National University Quantum Random Number Generator (ANU QRNG). Os valores obtidos pelo serviço são processados pela aplicação para determinar os índices correspondentes às questões disponíveis no dataset. Dessa forma, a seleção dos desafios incorpora uma fonte externa de aleatoriedade de origem quântica ao fluxo computacional responsável pela seleção das questões.

Os testes realizados durante o desenvolvimento tiveram caráter predominantemente funcional e de integração, concentrando-se na verificação do fluxo de navegação, apresentação das questões, processamento das respostas, atualização dos estados da batalha, funcionamento dos mecanismos de progressão, comunicação entre a interface e o backend e persistência das informações. O procedimento de refinamento foi utilizado para corrigir inconsistências identificadas durante a implementação e aproximar o comportamento do protótipo dos requisitos estabelecidos. Não foram realizados, nesta etapa, experimentos controlados com estudantes, avaliações pré e pós-intervenção ou análises estatísticas destinadas a medir ganhos de aprendizagem, motivação ou retenção. Consequentemente, a metodologia permite avaliar a construção e o funcionamento do artefato, mas não sua eficácia educacional.

A avaliação do protótipo foi, portanto, organizada em três níveis: atendimento das funcionalidades previstas, coerência entre arquitetura, mecânicas e conteúdo científico e

potencial de utilização educacional. Essa distinção permite evitar a equivalência entre implementação técnica e validação pedagógica. Enquanto o primeiro nível pode ser verificado diretamente pelo funcionamento do sistema, os demais exigem análise adicional e, especialmente no caso da eficácia educacional, investigação empírica com usuários. O resultado dessa abordagem é um protótipo tecnicamente estruturado e passível de avaliação experimental em etapas posteriores.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

O desenvolvimento resultou em um protótipo funcional do *GameLab FisMat* capaz de integrar conteúdo científico, narrativa, interface gráfica, mecânicas de RPG em turnos e infraestrutura computacional para registro da interação do jogador. A sequência apresentada nas Figuras 3, 4 e 5 evidencia a organização da experiência desde a tela inicial, passando pela seleção das arenas, até a apresentação dos confrontos entre o personagem e as entidades. A tela inicial estabelece a identidade visual e a ambientação narrativa; a seleção de arenas organiza os confrontos e seus respectivos parâmetros; e a tela de apresentação do confronto introduz o contexto narrativo específico de cada embate. A integração dessas etapas indica que a narrativa não foi implementada como elemento independente da mecânica, mas como parte da sequência de interação que conduz o jogador até os desafios científicos.

12

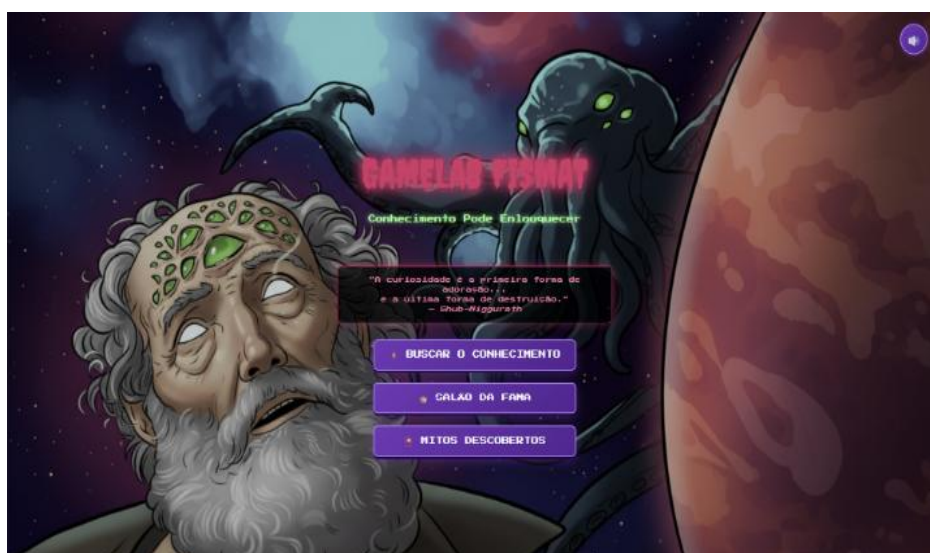


Figura 3: Tela inicial do *GameLab FISMAT*, apresentando o menu principal e a identidade visual do protótipo, que introduzem a ambientação narrativa do jogo.

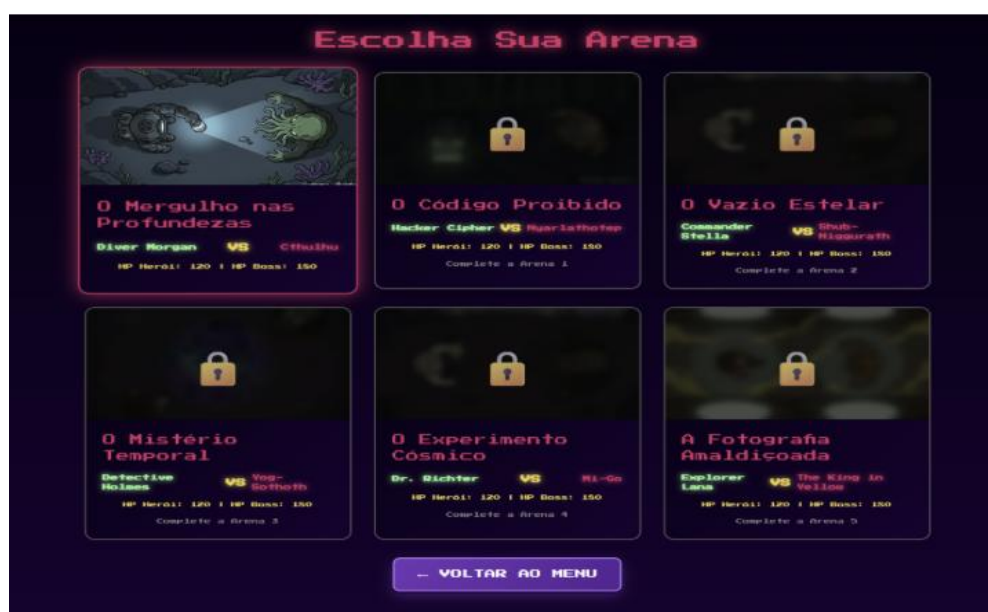


Figura 4: Tela de seleção de arenas, na qual são exibidos os pares herói-entidade, bem como os principais parâmetros associados aos combates conceituais.

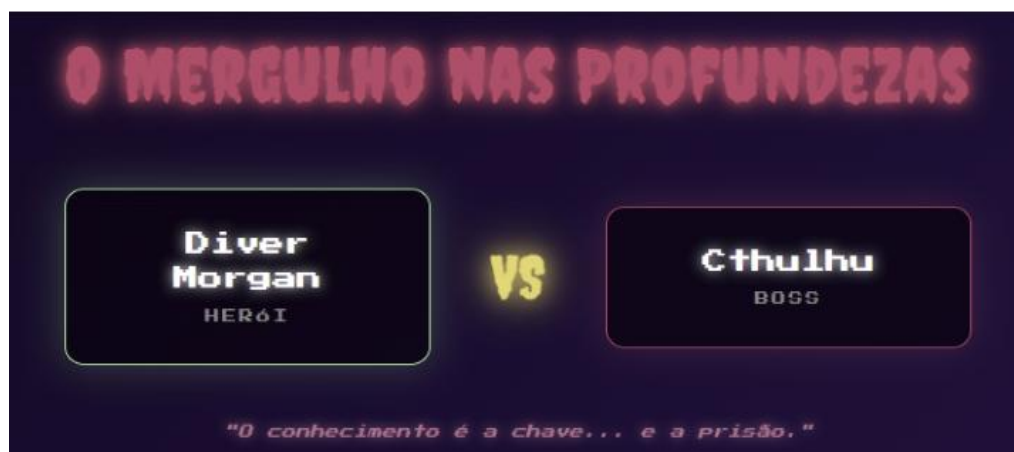


Figura 5: Tela de apresentação do confronto (*versus*), indicando o capítulo narrativo em curso e os personagens envolvidos no embate (herói *versus* entidade).

O principal resultado da implementação está na integração entre a resolução de questões conceituais e a mecânica de combate. Na Figura 6, a pergunta científica constitui o elemento por meio do qual o jogador realiza uma ação no combate, fazendo com que o desempenho conceitual produza consequências dentro do sistema de jogo. Essa estrutura aproxima a avaliação do conteúdo da própria atividade interativa: responder corretamente pode contribuir para a progressão do jogador, enquanto uma resposta incorreta produz consequências desfavoráveis. Do ponto de vista pedagógico, essa escolha é compatível com princípios de aprendizagem ativa e avaliação formativa, nos quais a participação do estudante e o retorno

sobre seu desempenho assumem papel relevante. Contudo, a implementação dessa estrutura demonstra apenas a existência do mecanismo; não permite concluir que ele produza efetivamente melhoria na aprendizagem.



Figura 6: Tela do modelo de combate mediado por perguntas conceituais, ilustrando a integração entre mecânicas de jogo e desafios de aprendizagem.

A presença de comentários associados às questões amplia essa possibilidade ao incorporar explicações após a resposta. No conjunto de dados, cada questão apresenta não apenas a alternativa correta, mas também um campo destinado ao comentário explicativo, como observado nas questões relacionadas à medição em circuitos variacionais, aos métodos de otimização e aos templates de circuitos. Dessa forma, a resposta deixa de funcionar exclusivamente como mecanismo de pontuação e passa a constituir uma oportunidade de retorno sobre o conteúdo. Essa característica aproxima o protótipo de uma estratégia de avaliação formativa, embora a qualidade e a efetividade desses comentários ainda devam ser avaliadas com estudantes em estudos posteriores.

A progressão também foi incorporada por meio de mecanismos de desempenho e coleção. A Figura 7 apresenta o Hall da Fama, destinado ao registro do desempenho e à classificação dos jogadores, enquanto a Figura 8 apresenta a coleção “Mitos Descobertos”, associada ao desbloqueio progressivo das entidades presentes na experiência. Esses mecanismos

estabelecem objetivos de curto e médio prazo e fornecem indicadores internos de progresso. Sob a perspectiva do design de jogos, tais elementos podem favorecer a percepção de progressão e competência; entretanto, não é metodologicamente adequado afirmar, a partir da implementação isolada, que tenham aumentado a motivação ou a persistência dos jogadores. Esses efeitos constituem hipóteses que deverão ser verificadas empiricamente.



Figura 7: Tela de registro de desempenho no Hall da Fama, apresentando o ranking de jogadores e funcionando como mecanismo de motivação e progressão.

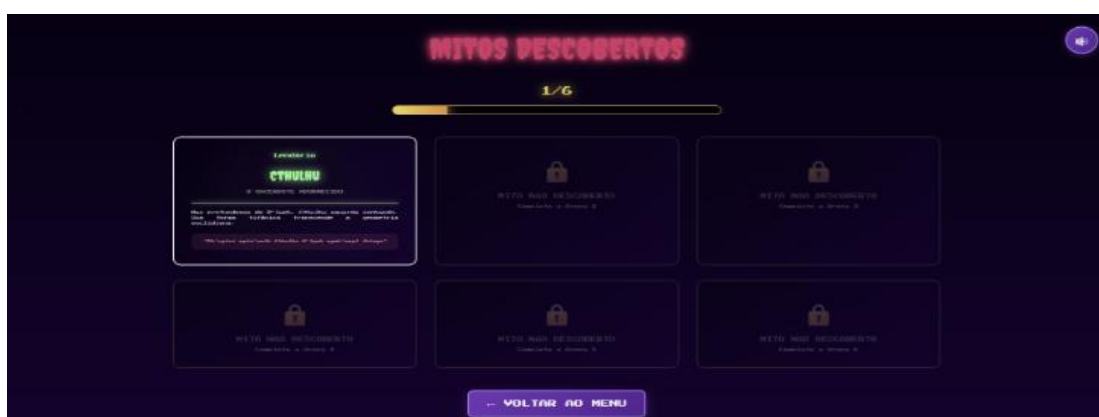


Figura 8: Tela da coleção Mitos Descobertos, que exhibe o progresso de desbloqueio das entidades cósmicas ao longo da experiência do jogador.

A relação entre narrativa e conteúdo científico constitui outro resultado relevante do protótipo. O jogo organiza os desafios em uma estrutura narrativa de horror cósmico, na qual o jogador enfrenta entidades e avança por diferentes arenas enquanto resolve questões relacionadas aos conteúdos científicos. A proposta transforma conceitos abstratos em desafios contextualizados dentro de uma sequência de acontecimentos, procurando reduzir a separação entre conteúdo, interação e narrativa. Essa estratégia é compatível com perspectivas que

reconhecem a importância da organização da experiência, da narrativa e da integração entre elementos verbais e visuais na construção de ambientes de aprendizagem. Entretanto, a contribuição específica da temática de horror cósmico para a compreensão dos conceitos científicos permanece uma questão em aberto. A ambientação constitui uma escolha de design do protótipo, e sua efetividade pedagógica não pode ser inferida apenas a partir de sua presença.

Do ponto de vista computacional, a implementação demonstrou a possibilidade de articular interface, lógica de aplicação, gerenciamento das questões e persistência dos dados em uma arquitetura organizada. O modelo arquitetural utilizado separa entidades relacionadas ao domínio das operações de serviço e persistência, enquanto o fluxo funcional prevê a solicitação das questões, avaliação das respostas, registro das interações, atualização da pontuação e retorno de informações ao jogador. Na implementação atual, essa organização é sustentada por um backend em Python/FastAPI e por MongoDB para persistência. O programa também foi registrado junto ao Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI), sob o Processo nº BR512025006376-8. O resultado demonstra viabilidade técnica para a construção do protótipo e cria uma base para sua evolução, mas não constitui, isoladamente, evidência de escalabilidade, desempenho em larga escala ou robustez para utilização institucional.

A integração com o ANU QRNG foi executada de forma funcional, permitindo que os valores obtidos do serviço externo fossem utilizados na determinação dos índices das questões selecionadas no dataset. O resultado demonstra a incorporação efetiva de uma fonte externa de aleatoriedade de origem quântica ao fluxo de seleção dos desafios do jogo.

A comparação entre os requisitos definidos no DRS e as funcionalidades implementadas permite identificar o nível de maturidade alcançado pelo protótipo. A exibição de questões, o processamento das respostas, a atualização das condições do jogador, o armazenamento de dados, a progressão e os mecanismos de desempenho constituem elementos centrais efetivamente incorporados à experiência. Por outro lado, alguns requisitos originalmente previstos devem ser considerados em diferentes níveis de implementação e maturidade. Em particular, a especificação inicial baseada em Node.js e Express não corresponde à arquitetura atual, que utiliza FastAPI, enquanto determinados recursos previstos no documento de requisitos permanecem dependentes de etapas futuras de desenvolvimento. O DRS, portanto, deve ser compreendido como um documento evolutivo, cuja versão inicial orientou o desenvolvimento, mas que precisa ser atualizado para representar fielmente o estado atual do sistema.

A análise conjunta dos resultados evidencia que a principal contribuição desta etapa não é a comprovação de eficácia pedagógica, mas a demonstração de viabilidade de uma abordagem interdisciplinar que articula Física, Computação, elementos de design de jogos e narrativa em um único artefato educacional. O protótipo materializa essa integração por meio de questões científicas incorporadas às batalhas, mecanismos de feedback, progressão narrativa, registro de desempenho e infraestrutura computacional para persistência das interações. A proposta também cria condições para que diferentes dimensões da experiência sejam posteriormente mensuradas, incluindo desempenho nas questões, tempo de resposta, progressão no jogo, percepção dos usuários e aprendizagem conceitual.

Nesse sentido, os resultados devem ser interpretados como evidências de implementação e coerência de projeto, e não como demonstração experimental de aprendizagem. A ausência de estudos controlados com estudantes constitui a principal limitação desta etapa e impede conclusões sobre ganhos de desempenho, retenção, motivação ou engajamento. A próxima fase deverá, portanto, deslocar a avaliação do funcionamento do artefato para sua utilização em contextos educacionais reais, utilizando instrumentos capazes de comparar o conhecimento antes e depois da intervenção, analisar o comportamento durante a interação e investigar a percepção dos estudantes sobre a experiência.

Como desdobramento, o protótipo poderá ser ampliado com mecanismos de autenticação, armazenamento mais estruturado dos dados, recursos de análise das interações, acompanhamento do desempenho pelo professor e integração com ambientes virtuais de aprendizagem. Também poderão ser investigadas estratégias adaptativas para ajustar a dificuldade das questões ao desempenho do jogador, bem como novas formas de organização didática, incluindo sua utilização como recurso complementar em atividades presenciais, aprendizagem baseada em problemas ou sala de aula invertida. Essas extensões, entretanto, devem ser consideradas propostas de continuidade e não resultados já demonstrados.

Assim, o *GameLab FisMat* apresenta, nesta etapa, um resultado tecnológico e metodológico consistente: a construção de um ambiente interativo no qual conteúdos científicos deixam de ocupar exclusivamente a função de material expositivo e passam a participar diretamente das regras de interação e progressão do jogo. A contribuição científica do trabalho está, portanto, na concepção e implementação dessa integração e na criação de uma infraestrutura que permite sua posterior avaliação experimental. A validação da efetividade educacional permanece como etapa necessária para determinar em que medida as escolhas de

narrativa, mecânica, feedback e organização dos conteúdos efetivamente contribuem para a aprendizagem dos estudantes.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O *GameLab FisMat* consolidou-se, nesta etapa, como um protótipo funcional de jogo digital educacional capaz de articular conteúdos científicos, narrativa e mecânicas interativas em uma mesma experiência. Sua principal contribuição está na incorporação dos conteúdos de Física à própria lógica de interação do jogo, de modo que a resolução de questões conceituais participa diretamente da progressão dos confrontos, enquanto mecanismos de feedback e registro de desempenho integram o conteúdo à dinâmica da experiência. A implementação também demonstrou a viabilidade técnica de combinar interface web, processamento de dados, persistência das interações e uma fonte externa de aleatoriedade de origem quântica, estabelecendo uma infraestrutura sobre a qual novas funcionalidades e conteúdos podem ser desenvolvidos. O software desenvolvido também foi formalmente registrado junto ao Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI).

Mais do que constituir uma aplicação tecnológica, o protótipo materializa uma proposta de integração entre diferentes dimensões do ensino de conceitos científicos: contextualização narrativa, interação, resolução de problemas e retorno sobre o desempenho. A utilização do horror cósmico como contexto ficcional amplia as possibilidades de representação dos conteúdos e confere unidade à experiência, enquanto a estrutura de progressão transforma os desafios conceituais em componentes necessários ao avanço no jogo. Entretanto, esses elementos devem ser compreendidos como escolhas de design e hipóteses pedagógicas. A implementação demonstra sua integração e coerência no artefato desenvolvido, mas não permite, isoladamente, determinar seus efeitos sobre aprendizagem, motivação, engajamento e retenção.

Essa distinção estabelece o principal limite e, simultaneamente, o principal caminho de continuidade do trabalho. A próxima etapa deverá deslocar o foco da validação do artefato para a investigação de sua utilização por estudantes em situações educacionais reais. Estudos exploratórios poderão inicialmente examinar a experiência de uso, a compreensão da narrativa, a adequação da dificuldade, a qualidade dos feedbacks e o desempenho nas questões. Posteriormente, delineamentos com avaliações pré e pós-intervenção e grupos de comparação poderão fornecer evidências mais robustas sobre possíveis efeitos educacionais. A partir desses

resultados, será possível aperfeiçoar tanto as estratégias de apresentação dos conteúdos quanto os mecanismos de interação empregados pelo jogo.

No desenvolvimento futuro, a evolução técnica poderá contemplar autenticação e gestão de usuários, maior estruturação dos dados, recursos de *learning analytics* e acompanhamento do desempenho por docentes, além da integração com ambientes virtuais de aprendizagem. No âmbito pedagógico, poderão ser investigados mecanismos adaptativos de dificuldade, expansão do conteúdo e diferentes formas de inserção do jogo em práticas de ensino, incluindo aprendizagem baseada em problemas e sala de aula invertida. Essas possibilidades não constituem resultados deste estudo, mas extensões decorrentes da infraestrutura e da proposta já estabelecidas. Assim, o *GameLab FisMat* oferece uma base concreta para investigar, em trabalhos futuros, em que condições a integração entre jogos digitais, narrativa e conteúdos de Física pode contribuir efetivamente para a aprendizagem de conceitos complexos, mantendo como princípio central a necessidade de que essa contribuição seja determinada por evidências empíricas e não apenas pela concepção do artefato.

REFERÊNCIAS

- BENEDETTI, M.** et al. A survey on quantum machine learning. *Nature Reviews Physics*, v. 1, n. 9, p. 500–510, 2019.
- BREUER, H. P.; PETRUCCIONE, F.** *The theory of open quantum systems*. Oxford University Press, 2002.
- BRUNER, J. S.** *Making stories: law, literature, life*. University Press, 1997.
- CLARK, R. C.; MAYER, R. E.** *E-learning and the science of instruction: Proven guidelines for consumers and designers of multimedia learning*. 4. ed. Wiley, 2016.
- CSIKSZENTMIHALYI, M.** *Flow: the psychology of optimal experience*. Harper & Row, 1990.
- DETERDING, S.** et al. From game design elements to gamefulness: defining "gamification". *Proceedings of the 15th International Academic MindTrek Conference*, p. 9–15, 2011.
- FREEMAN, S.** et al. Active learning increases student performance in science, engineering, and mathematics. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, v. 111, n. 23, p. 8410–8415, 2014.
- HESTENES, D.** Toward a modeling theory of physics instruction. *American Journal of Physics*, v. 55, n. 5, p. 440–454, 1987.

LLOYD, S. et al. Quantum principal component analysis. *Nature Physics*, v. 10, n. 9, p. 631–633, 2013.

MAZUR, E. *Peer instruction: a user's manual*. Prentice Hall, 1997.

MCCLEAN, J. R. et al. Barren plateaus in quantum neural network training landscapes. *Nature Communications*, v. 9, n. 1, p. 4812, 2018.

MCCLEAN, J. R. et al. The theory of variational hybrid quantum-classical algorithms. *New Journal of Physics*, v. 18, n. 2, p. 023023, 2016.

MAYER, R. E. *Multimedia learning*. 2. ed. Cambridge University Press, 2009.

NICOL, D.; MACFARLANE-DICK, D. Formative assessment and self-regulated learning: a model and seven principles of good feedback practice. *Studies in Higher Education*, v. 31, n. 2, p. 199–218, 2006.

RYAN, R. M.; DECI, E. L. Intrinsic and extrinsic motivations: classic definitions and new directions. *Contemporary Educational Psychology*, v. 25, n. 1, p. 54–67, 2000.

SHUTE, V. J. Focus on formative feedback. *Review of Educational Research*, v. 78, n. 1, p. 153–189, 2008.

WIEMAN, C. E. Why not try a scientific approach to science education? *Change Magazine*, v. 39, n. 5, p. 9–15, 2007.