

MAPHYSE: MODELO PARA AVALIAÇÃO DE SIMULADORES DE FÍSICA PARA FINS EDUCACIONAIS

MAPHYSE: MODEL FOR ASSESSING PHYSICS SIMULATORS FOR EDUCATIONAL PURPOSES

MAPHYSE: MODELO PARA LA EVALUACIÓN DE SIMULADORES DE FÍSICA CON FINES EDUCATIVOS

Manuel Joaquim Silva de Oliveira ¹
Roges Horácio Grandi ²
Raquel Salcedo Gomes ³
Leandro Krug Wives ⁴
José Valdeni de Lima ⁵

Manuscrito recebido em: 13 de abril de 2023.

Aprovado em: 13 de dezembro de 2023.

Publicado em: 27 de fevereiro de 2024.

Resumo

Os simuladores desempenham um papel crucial no processo de aprendizagem da Física, especialmente em instituições com limitações em equipamentos experimentais, instrumentos de medição ou materiais. A capacidade dos alunos de utilizar simulações para verificar se os resultados correspondem ao esperado facilita sua compreensão dos conceitos. Nesse contexto, é fundamental avaliar se os simuladores atendem aos requisitos necessários para a aprendizagem. Este artigo apresenta o MAPHYSE, um Modelo de Avaliação de Simuladores de Física para Fins Educacionais, desenvolvido com base em requisitos pedagógicos da Norma ISO/IEC 25010. O uso dessa norma buscou estabelecer objetivos pedagógicos claros, identificando características

¹ Doutor em Informática na Educação pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Professor na Universidade Pedagógica de Maputo. Integrante do grupo de Pesquisa Metodologias ativas Suportadas por Tecnologias Digitais.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1918-5351> Contato: moliveira@up.ac.mz / jocasiloliveira79@gmail.com

² Doutorando em Informática da Educação e Mestre em Ciência da Computação pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Arquiteto de Sistemas no Serviço Federal de Processamento de Dados. Integrante do grupo de pesquisa Trajetórias de aprendizagem em Hiperdocumentos Ubíquos.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9987-379X> Contato: roges.grandi@gmail.com

³ Doutora em Informática na Educação pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Docente no Programa de Pós-Graduação em Informática na Educação da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Integrante do grupo de pesquisa Trajetórias de aprendizagem em Hiperdocumentos Ubíquos.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9497-513X> Contato: raquel.salcedo@ufrgs.br

⁴ Doutor em Informática na Educação pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Docente no Programa de Pós-Graduação em Informática na Educação da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Integrante do grupo de pesquisa Trajetórias de aprendizagem em Hiperdocumentos Ubíquos.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8391-446X> Contato: leandro.wives@ufrgs.br

⁵ Doutor em Informática pela Université Joseph Fourier. Professor no Programa de Pós-Graduação em Informática na Educação da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Integrante do grupo de pesquisa Trajetórias de aprendizagem em Hiperdocumentos Ubíquos.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7266-4856> Contato: valdenilima@gmail.com

essenciais como adequação funcional e usabilidade. O modelo inclui critérios de avaliação e métricas mensuráveis, ajustados iterativamente com base em testes e feedbacks. Documentação abrangente e guias do usuário foram fundamentais, juntamente com processos de capacitação para implementação eficaz. A implementação do modelo em contextos educativos, com monitoramento contínuo, visa criar uma ferramenta robusta para avaliação abrangente da qualidade dos simuladores educacionais. A validação do modelo envolveu a avaliação de dois simuladores, indicando que o MAPHYSE oferece uma ampla gama de critérios para avaliar a qualidade dos simuladores, sendo uma ferramenta útil para escolas, professores e desenvolvedores na tomada de decisões e na melhoria contínua das ferramentas educacionais.

Palavras-chave: Simuladores de física; Modelos de referência de qualidade; Norma ISO/IEC 25010; Avaliação de qualidade de software.

Abstract

Simulators play a crucial role in the learning process of Physics, especially in institutions with limitations in experimental equipment, measurement instruments, or materials. The ability of students to use simulations to verify if the results match the expected facilitates their understanding of concepts. In this context, it is essential to assess whether simulators meet the necessary requirements for learning. This article presents MAPHYSE, a Model for Evaluating Physics Simulators for Educational Purposes, developed based on pedagogical requirements of ISO/IEC 25010. The use of this standard aimed to establish clear pedagogical objectives, identifying essential characteristics such as functional adequacy and usability. The model includes evaluation criteria and measurable metrics, iteratively adjusted based on tests and feedback. Comprehensive documentation and user guides were fundamental, along with training processes for effective implementation. The implementation of the model in educational contexts, with continuous monitoring, aims to create a robust tool for comprehensive assessment of the quality of educational simulators. The validation of the model involved the evaluation of two simulators, indicating that MAPHYSE offers a wide range of criteria to assess the quality of simulators, being a useful tool for schools, teachers, and developers in decision-making and continuous improvement of educational tools.

Keywords: Physics simulators; Quality reference models; ISO/IEC 25010 Standard; Software quality assessment.

Resumen

Los simuladores juegan un papel crucial en el proceso de aprendizaje de la Física, especialmente en instituciones con limitaciones en equipos experimentales, instrumentos de medición o materiales. La capacidad de los estudiantes de utilizar simulaciones para verificar si los resultados coinciden con lo esperado facilita su comprensión de los conceptos. En este contexto, resulta fundamental evaluar si los simuladores cumplen los requisitos necesarios para el aprendizaje. Este artículo presenta MAPHYSE, un modelo para la evaluación de simuladores de física con fines educativos, desarrollado con base en los requisitos pedagógicos de la norma ISO/IEC 25010. El uso de esta norma tuvo como objetivo establecer objetivos pedagógicos claros, identificando características esenciales como la adecuación funcional y la usabilidad. El modelo incluye criterios de evaluación y métricas medibles, ajustadas iterativamente en función de pruebas y comentarios. La documentación completa y las guías de usuario fueron fundamentales, junto con los procesos de capacitación para una implementación efectiva. La implementación del modelo en contextos educativos, con seguimiento continuo, tiene como objetivo crear una herramienta robusta para la

evaluación integral de la calidad de los simuladores educativos. La validación del modelo implicó la evaluación de dos simuladores, indicando que MAPHYSE ofrece una amplia gama de criterios para evaluar la calidad de los simuladores, siendo una herramienta útil para escuelas, docentes y desarrolladores en la toma de decisiones y mejora continua de herramientas educativas.

Palabras clave: Simuladores de física; Modelos de referencia de calidad; Norma ISO/IEC 25010; Evaluación de la calidad del software.

Introdução

Para compreender fenômenos físicos, é necessário realizar elevados níveis de abstração. Simuladores, compreendidos como representações computacionais de sistemas reais, podem apoiar a aprendizagem de fenômenos físicos (BASTOS; WILKINSON, 2010). Usualmente, eles são baseados em modelos semânticos determinísticos: para as mesmas entradas, esperam-se as mesmas saídas. Como recursos educacionais, podem despertar o interesse por fenômenos complexos e aumentar níveis de abstração. Podem, também, ajudar estudantes a concentrar-se nos princípios físicos envolvidos nos fenômenos, e não apenas em seus procedimentos matemáticos. Desenvolver atividades com simuladores envolve variados níveis de abstração, considerando-se uma estratégia pedagógica composta por quatro fases: motivação, pesquisa, formalização e transferência (Fernandéz, 2005, 2000).

Todavia, existe uma lacuna nos modelos para avaliação de simuladores, do ponto de vista da aprendizagem. Avaliar um software pedagógico é um processo complexo que demanda uma estratégia adequada (Silva *et al.*, 2016). Uma abordagem que habilita avaliações abrangentes de softwares é utilizar um modelo de referência como a Norma ISO/IEC⁶ 25010 (2011), a qual oferece um conjunto amplo de características e subcaracterísticas organizadas em três perspectivas da qualidade: interna, externa e em uso. Especialistas (em nosso caso, professores), avaliam simuladores do ponto de vista da qualidade externa e usuários (alunos), na perspectiva da qualidade em uso. Desenvolvedores podem receber feedbacks de professores e alunos, colaborando assim para os seus processos cíclicos de melhoria de qualidade interna.

⁶ *International Organization for Standardization/International Electrotechnical Commission.*

Realizada uma revisão sistemática da literatura⁷, foram encontrados modelos de avaliação pedagógica de softwares. Entretanto, não foi encontrado nenhum estudo específico relacionado à avaliação de simuladores de Física do ponto de vista da aprendizagem. Este fato motivou a criação do Modelo de Avaliação de Simuladores de Física para Fins Educacionais (MAPHYSE), o qual foi baseado nas perspectivas externa e em uso da Norma ISO/IEC 25010 (2011). Os processos de qualidade interna não foram incluídos, visto que o envolvimento direto de desenvolvedores nas avaliações poderiam criar vieses de aprovação.

Um processo para avaliar a adequação do MAPHYSE foi realizado utilizando-se três simuladores de Física. Com base na consistência dos processos de avaliação e nos relatórios produzidos, pode-se concluir que o modelo é adequado para avaliar simuladores de Física para fins educacionais. Os relatórios mencionados podem auxiliar professores de Física a entender com mais profundidade e amplitude se simuladores avaliados são adequados, ou não, para suas práticas pedagógicas.

Fundamentação teórica e trabalhos relacionados

É de grande valor que estudantes de Ciências Naturais compreendam corretamente, e com a maior antecedência possível, fenômenos, conceitos teorias, leis, nomenclaturas, unidades de medida e representações que sigam normas internacionais, evitando a abstração de conceitos alternativos, também conhecidos como conceitos espontâneos. A correta aprendizagem da Física é uma área que contém bastante dificuldades, sendo comum conceitos alternativos aprendidos limitarem o aprofundamento de variados domínios de conhecimento nessa disciplina (Conde, 2021).

Leão e Kalhil (2015) definem conceitos alternativos como conhecimentos que, apesar de não serem suportados por rigor científico, podem evoluir para conceitos mais precisos em acordo com as teorias e as leis que os descrevem.

Quando alunos tiverem formado conceitos alternativos em suas estruturas cognitivas, os professores devem ajudá-los a perceber significados consistentes sobre fenomenologia e ciência. Conhecimentos derivados de evoluções conceituais expandem a

⁷ Esta revisão foi realizada em dezembro de 2020.

capacidade de realizar experimentações e de construir conceitos apropriados sobre ambientes naturais, sociais e tecnológicos. Os professores devem prestar atenção nas complexidades inerentes dos conhecimentos sobre a natureza, tecnologias e sociedade, compreendendo que os estudantes os constroem gradualmente à medida que desenvolvem suas capacidades cognitivas (Schroeder, 2007). Queiroz e Lima (2007) afirmam que novos conhecimentos em ciências são produzidos por atos criativos da imaginação combinados com rigorosos mas variados métodos de pesquisa científica, sendo sua aquisição problemática, nunca trivial. Em acordo com Leão e Kalhil (2015), professores mediam aprendizagens sobre conceitos, discutindo conhecimentos científicos, extraíndo deduções de equações, compreendendo a energia, promovendo diálogos sobre os fenômenos naturais e entrando no mundo das ciências.

Simuladores de baixa qualidade tendem a exercer influências negativas na aprendizagem. Avaliações baseadas na ISO/IEC 25010 (2011) podem auxiliar instituições de ensino, professores e estudantes a avaliá-los apropriadamente na perspectiva dos objetivos de aprendizagem.

Norma ISO/IEC 25010:2011

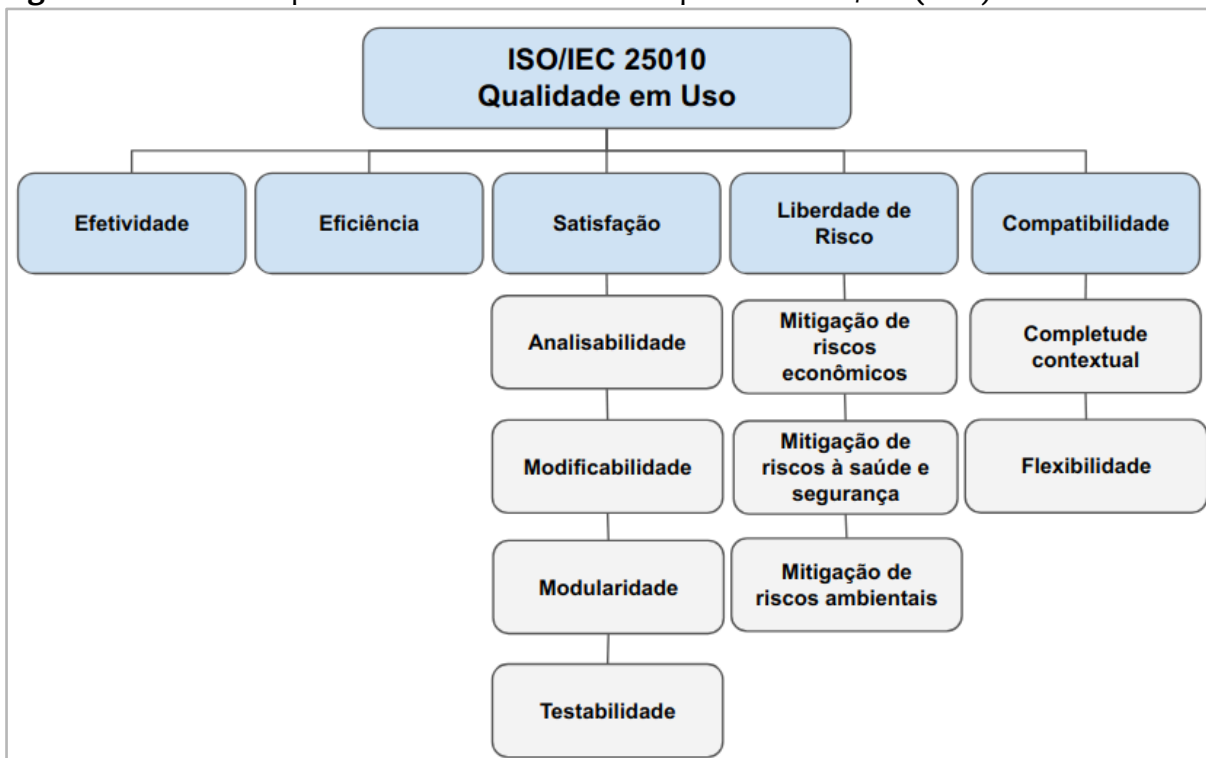
A ISO/IEC 25010 (2011) é uma norma internacional que define um conjunto amplo de características e subcaracterísticas para avaliar a qualidade de softwares em diferentes perspectivas. Usando processos internos de avaliação, desenvolvedores podem estimar a qualidade de seus produtos. Avaliações externas da qualidade são conduzidas por grupos de especialistas da área, podendo incluir, também, representantes da equipe de desenvolvimento. A qualidade em uso é principalmente mensurada por usuários (estudantes) e, complementarmente, avaliada por especialistas (professores).

A Norma agrupa tanto as características de qualidade interna quanto as de qualidade externa em 8 classes (Figura 1): adequação funcional, confiabilidade, usabilidade, eficiência de execução, manutenibilidade, portabilidade, compatibilidade e segurança, cada qual com seu conjunto de subcaracterísticas. Já as características de qualidade em uso possuem 5 grupos: efetividade, eficiência, satisfação, ausência de riscos e cobertura contextual, conforme mostra o diagrama hierárquico da Figura 2.

Figura 1: Modelo de qualidade interna e externa. Fonte: Adaptado de ISO/IEC (2011).



Figura 2: Modelo de qualidade em uso. Fonte: Adaptado de ISO/IEC (2011).



- Modelos para Avaliação de Simuladores de Física

Considerando um conjunto específico de critérios, um modelo de referência para avaliação de software é uma normatização para mensurar a qualidade de um produto de software. Uma revisão sistemática da literatura foi realizada para responder às seguintes questões de pesquisa: *Como avaliar a qualidade de simuladores de Física em um contexto educacional utilizando um modelo de avaliação maduro e internacionalmente reconhecido?* O contexto da busca foi definido por critérios PICOC⁸ (Petticrew; Roberts, 2008) conforme segue:

1. **População:** simuladores de Física.
2. **Intervenção:** avaliação de software baseada na Norma ISO/IEC 25010.
3. **Comparação:** características de qualidade.
4. **Resultados:** avaliação da qualidade de simuladores de Física.
5. **Contexto:** processos de ensino e aprendizagem de Física.

As palavras-chave selecionadas foram “25010”, “Física” e “Simulador”, em inglês, português e espanhol. Para o *Google Scholar*, a palavra-chave “Qualidade”, nos mesmos idiomas, foi adicionada para refinar as buscas (Figura 3).

Figura 3: Strings de Busca. Fonte: Os autores.

<p>Buscadores acadêmicos tradicionais:</p> <p>("25010" AND ("Physics" OR "Física") AND ("Simulator" OR "Simulador"))</p> <p>Google Scholar:</p> <p>("25010" AND ("Physics" OR "Física") AND ("Simulator" OR "Simulador") AND ("Quality" OR "Qualidade"))</p>
--

Definiu-se como critério único de inclusão ser um estudo relacionado à avaliação da qualidade de simuladores de física pela ISO/IEC 25010. Os critérios de exclusão definidos foram: i) estudos duplicados; ii) estudos em outros idiomas além dos definidos e iii) estudos não disponíveis para leitura. A data de publicação não foi utilizada com critério de exclusão. Na seleção preliminar, 31 estudos foram encontrados: 16 no Google Scholar, 7 na Scopus, 7

⁸ Population, Intervention, Comparison, Outcome, Context.

na SpringerLink, e 1 na ACM Digital Library. Nenhum estudo foi encontrado na El Compendex, na IEEE Digital Library, na ISI Web of Science, Science@Direct e nos Periódicos CAPES.

Seis estudos foram eliminados do Google Scholar por critério de duplicidade. As bases Scopus e SpringerLink encontraram exatamente os mesmos estudos, e as duplicatas foram também eliminadas. Todas publicações encontradas pela Scopus e pela ACM foram eliminadas, uma vez que o número “25010” não se referia à Norma 25010. Todos os estudos lidos do Google Scholar referenciavam a ISO/IEC 25010. Todavia, seis deles não eram sobre simuladores de Física. Apenas um artigo citou a norma e simuladores, porém sem foco no assunto.

Outro estudo apresentou pesquisas teóricas sobre modelos, técnicas e instrumentos de avaliação para softwares educacionais. Nenhum, entretanto, tratando diretamente da área da física, permanecendo assim os dois artigos sobre ISO/IEC 25010 e simuladores. Esses artigos são apresentados a seguir como trabalhos relacionados.

- Trabalhos Relacionados

Silva (2015) apresentou um sistema de aplicação de processos de enfermagem, os quais implementam um simulador de casos realistas. A Norma ISO/IEC 25010 foi utilizada para guiar os processos de validação conduzidos por uma equipe composta por 10 enfermeiros e 11 cientistas da computação.

Mathis *et al.* (2021) avaliaram a adequação do uso de realidade virtual (RV) para avaliar a usabilidade e a segurança de sistemas de autenticação do mundo real. Nesse processo, foi criada uma réplica virtual de um sistema de autenticação denominado CueAuth, um esquema de autenticação recentemente introduzido, reportando resultados de: (1) um estudo de usabilidade de desempenho do usuário em realidade virtual; (2) um estudo online sobre segurança avaliando a resistência do sistema na observação de avatares virtuais e (3) uma comparação entre os resultados obtidos no mundo virtual em os previamente reportados no mundo real. As análises dos resultados indicaram que a RV pode servir como uma plataforma adequada para avaliar esquemas de autenticação do mundo real centrados nos usuários, ressalvando que a utilização de tecnologias de RV podem modificar os experimentos.

Oliveira (2015) propôs um simulador para sistemas robóticos como uma alternativa para reduzir custos durante os estágios de desenvolvimento e, também, incrementar tanto a produtividade quanto a confiabilidade. Para avaliar a qualidade do simulador, ele solicitou a usuários que avaliassem seus atributos baseando-se na Norma 25010 usando questionários Likert de 5 níveis.

Siqueira (2022) reconhece o papel fundamental de validar simuladores e sua pesquisa objetivou desenvolver um modelo de avaliação para um simulador tático virtual em cursos para oficiais sobre operação de sistemas de mísseis e foguetes. A proposta é baseada em simuladores de lançamentos utilizados pelo exército brasileiro. O estudo apresentou uma análise minuciosa do processo de avaliação das provas táticas para cadetes das Agulhas Negras, destacando o uso de simulações como parte integrante desse processo.

Em Herpich *et al.* (2019), é apresentado o MAREA, um modelo para avaliar sistemas educacionais de realidade aumentada a partir dos seguintes critérios: a) usabilidade: baseada nas cinco dimensões da ISO/IEC 25020; b) engajamento: relacionada à qualidades externa e em uso; c) motivação: relacionada à qualidade em uso e d) aprendizagem ativa: inclui dimensões da efetividade, do sentir-se desafiado, da segurança e da complexidade.

Soad (2017) propôs um método de avaliação da aprendizagem para aplicativos móveis. Seu modelo de qualidade é dividido em três categorias: Técnica, Pedagógica e Social. A categoria técnica é baseada em características interna e externa da qualidade conforme a ISO/IEC 25010. Já as categorias Pedagógica e Social são especializações da adequação funcional e da qualidade em uso relacionadas a requisitos pedagógicos e sociais, respectivamente. Uma limitação desse modelo reside no foco em aplicações móveis. Visto que a adequação funcional é avaliada em três categorias - Técnica, Pedagógica e Social – a equipe responsável pela avaliação deve ter o cuidado com duplicidades e possíveis resultados conflitantes em diferentes categorias.

Os modelos mencionados focam diferentes áreas de avaliação e têm propósitos específicos em relação à usabilidade, à segurança, a simulações, à aprendizagem apoiada por dispositivos móveis. O MAPHYSE se destaca por avaliar simuladores de fenômenos físicos em processos educacionais baseando-se em uma abordagem ampla de critérios de avaliação, incluindo tanto professores (especialistas) quanto alunos (usuários).

Metodologia de desenvolvimento do MAPHYSE

A metodologia de desenvolvimento de um modelo de avaliação para simuladores, alinhado aos princípios da ISO/IEC 25010 seguiu uma abordagem estruturada. Inicialmente, os objetivos do modelo foram definidos para assegurar a qualidade, a usabilidade e a efetividade de simuladores educacionais de fenômenos físicos. Isto posto, os requisitos da ISO/IEC 25020 foram estudados e adaptados para esse contexto específico.

Foi necessário identificar as características de qualidade essenciais para fins educacionais. Adequação funcional e usabilidade são exemplos dessas características. A partir desse ponto, critérios de avaliação foram definidos, cada qual acompanhado de uma métrica mensurável para uma avaliação objetiva.

O modelo foi, então, construído organizando-se características, critérios e métricas de forma estruturada. Uma escala de pontuação foi estabelecida para cada métrica, provendo uma fundação sólida para as avaliações. O modelo foi submetido a testes usando simuladores existentes e foi coletado feedback de especialistas em software e em educação.

Ajustes e refinamentos foram realizados iterativamente, baseados nos resultados dos testes e nos feedbacks recebidos. Foi escrita, também, uma documentação ampla do modelo, incluindo orientações claras sobre sua aplicabilidade e guias para os usuários destacando as melhores práticas e dicas para aprimorar os simuladores. Para assegurar um uso mais efetivo do modelo, uma capacitação foi providenciada para os responsáveis por aplicar o modelo, assegurando uma compreensão apropriada dos critérios de avaliação.

O modelo de avaliação de simuladores de física para fins educacionais (MAPHYSE)

O MAPHYSE será detalhado nas subseções seguintes conforme as características de software definidas pela Norma ISO 25010. Cada item de avaliação foi associado a uma subcaracterística, identificado por uma referência única e classificado em quatro níveis. O **Nível 0 (não avaliado)** significa que o item foi desconsiderado para uma avaliação específica. O **Nível 1 (insatisfatório)** significa que o item foi avaliado com o índice mais baixo de avaliação. Nesse nível de avaliação, o simulador não atende integralmente os requisitos

ou necessidades relacionadas ao item. O **Nível 2 (satisfatório com restrições)** é o segundo nível do ranking. Significa que o simulador atende aos requisitos com restrições relacionados ao item. O **Nível 3 (satisfatório com restrições)** é o mais elevado de classificação. Significa que o simulador atendeu os requisitos e necessidades do item sem restrições.

Cada item de avaliação tem, também, um peso que varia de 1 a 3, que serve para enfatizar, ou não, a importância do item em relação aos objetivos de aprendizagem. O **Peso 1 (não muito relevante)** significa que uma possível avaliação baixa não compromete significativamente os compromissos com os objetivos de aprendizagem. O **Peso 2 (relevância média)** significa que uma possível avaliação baixa do item não deve comprometer significativamente os objetivos de aprendizagem. O **Peso 3 (muito relevante)** significa que uma possível avaliação baixa do item comprometerá significativamente os objetivos de aprendizagem.

Multiplicando o **Nível pelo Peso** gera-se a **taxa de avaliação do item**. Um simulador classificado como insatisfatório (Nível 1) em um ou mais itens muito relevantes (Peso 3) terá, em sua avaliação final, uma recomendação de cautela endereçada a instituições de ensino e a professores informando sobre potenciais impactos negativos nos objetivos de aprendizagem. Por outro lado, se todos itens muito relevantes forem mínima ou inteiramente satisfatórios (Níveis 2 ou 3), a avaliação final terá uma recomendação para uso, afirmando que o simulador atende a requisitos mínimos para adoção em atividades pedagógicas.

- Avaliação Interna da Qualidade

Visto que a avaliação interna da qualidade é realizada pela equipe de desenvolvimento e um dos objetivos do MAPHYSE é permitir a recomendação ou não de simuladores de Física em processos pedagógicos, evitou-se o uso da visão interna como precaução a possíveis conflitos de interesse.

- Avaliação Externa da Qualidade

As subcaracterísticas da **Adequação Funcional – completude funcional, correção e adequação** (S_{e1} .. S_{e3}) recebem peso 3 por sua relevância para os objetivos de aprendizagem(Tabela 1).

Tabela 1: Subcaracterísticas da Adequação Funcional. Fonte: Os autores.

Ref.	Peso	Requisitos de Qualidade
S_{e1}	$P_{e1} = 3$	Habilidade de simular todos os experimentos que os equipamentos físicos podem realizar.
S_{e2}	$P_{e2} = 3$	Os cálculos e as representações gráficas devem ser precisos.
S_{e3}	$P_{e3} = 3$	As simulações devem empoderar os estudantes para atingir os objetivos de aprendizagem.

Os itens de **Confiabilidade** estão listados na Tabela 2. **Maturidade** (S_{e4}) recebe o peso 2 vista sua relevância para a continuidade, especialmente durante períodos nos quais os estudantes são acompanhados por seus professores. A **tolerância a falhas, a recuperabilidade e a disponibilidade** (S_{e5} .. S_{e7}), apesar das suas respectivas relevâncias, tendem a comprometer menos do que uma baixa maturidade, recebendo peso 1.

TABELA 2: Subcaracterísticas de Confiabilidade. Fonte: Os autores.

Ref.	Peso	Requisito de Qualidade
S_{e4}	$P_{e4} = 0 2$	Seja tFE as falhas ocorridas durante as simulações. Se $tFE \leq 1\%$ então é satisfatório sem restrições. Se $1 < tFE \leq 2\%$ então é satisfatório com restrições Se $tFE > 2\%$ então é insatisfatório.
S_{e5}	$P_{e4} = 0 1$	Manter um nível de desempenho suficiente quando situações anômalas ocorrerem.
S_{e6}	$P_{e4} = 0 1$	Restaurar a normalidade operacional quando situações extremas de desestabilização ocorrerem.
S_{e7}	$P_{e4} = 0 1$	Estar operacional e disponível quando as atividades de aprendizagem forem executadas.

A **Capacidade de Aprender** (S_{e8}) trata do apoio do simulador à aprendizagem de conceitos-chave para o desenvolvimento de atividades educacionais. Dado que pode influenciar os objetivos de aprendizagem, recebe o peso 2. O **Reconhecimento de Adequação** (S_{e9}) mede o reconhecimento dos alunos de que o simulador os ajuda efetivamente a se apropriarem dos objetivos de aprendizagem desejados. Se compreenderem que o simulador não está os auxiliando em suas aprendizagens, não se sentirão encorajados a utilizá-lo. Por esse motivo, também recebe peso 2. O item **Operabilidade – Geral** (S_{e10}) refere-se à facilidade de se executar tarefas. A **Operabilidade – Idioma** (S_{e11}) averigua o uso da linguagem nativa pelos estudantes. S_{e10} e S_{e11} influenciam a capacidade de aprender e a motivação para seu uso efetivo, recebendo peso 2.

A **Estética da Interface do Usuário** (S_{e12}) avalia se o simulador é considerado prazeroso durante as interações, recebendo peso 1. A **Proteção contra Erros do Usuário**

(S_{e18}) mede a capacidade de evitar que os usuários cometam erros operacionais básicos que atrapalhem os processos. Se a interface falhar nessas verificações, as atividades de aprendizagem poderão atrasar ou ser de alguma forma difíceis, mas não impedirão que sejam executadas (peso 1).

A acessibilidade trata da inclusão digital na práxis pedagógica – dificuldades visuais, auditivas ou motoras, autismo, dislexia (S_{e13} , S_{e17}), entre outras. É um desafio constante e significativo (Nunes, 2020; OMS 2011). Autistas são favorecidos por textos e imagens renderizados em um espectro de cores que evita tons muito escuros, cores muito claras ou brilhantes. Para pessoas com dislexia, textos com alinhamento à esquerda, sem palavras sublinhadas e sem palavras maiúsculas favorecem a leitura. Textos, botões e outros elementos de telas favorecem pessoas com as mais diferentes deficiências quando escritos com tamanho adequado ou ajustável, orientações diretas, precisas, com significado denotativo, com fontes sem serifa, por tornarem a leitura mais compreensível para a maioria dos usuários (UFRGS, 2020; Britto et al., 2016; Campêlo, 2013). Os itens de acessibilidade foram considerados de média relevância ou muito relevantes (Pesos 2 ou 3), dada a sua importância para a inclusão educacional. Como um padrão, adotamos o Peso 2, dada a atual dificuldade do estado da arte da Engenharia de Software, em produzir simuladores de física efetivamente acessíveis (Tabela 3).

Tabela 3: Subcaracterísticas de usabilidade. Fonte: Os autores.

Ref.	Peso	Requisito de Qualidade
S_{e8}	$P_{e8} = 0 2$	Permitir que os principais conceitos sejam facilmente compreendidos permitindo aos alunos adquirir competências para realizar as experiências necessárias à sua aprendizagem.
S_{e9}	$P_{e9} = 0 2$	Ajudar os alunos a se apropriarem dos objetivos de aprendizagem desejados.
S_{e10}	$P_{e10} = 0 2$	Facilidade de uso na realização de atividades de aprendizagem.
S_{e11}	$P_{e11} = 0 2$	Operação na língua materna.
S_{e12}	$P_{e12} = 0 1$	Prazer e interações satisfatórias durante as atividades de aprendizagem.
S_{e13}	$P_{e13} = 0 2 3$	Necessidades de alunos/professores com dificuldades visuais – cegueira, baixa acuidade visual e daltonismo nas respectivas línguas maternas e nas línguas maternas.
S_{e14}	$P_{e14} = 0 2 3$	Necessidades dos alunos/professores com dificuldades auditivas – surdez e baixa capacidade auditiva – nas suas línguas maternas.
S_{e15}	$P_{e15} = 0 2 3$	Necessidades de alunos/professores com dificuldades motoras.
S_{e16}	$P_{e16} = 0 2 3$	Necessidades de alunos/professores autistas.
S_{e17}	$P_{e17} = 0 2 3$	Necessidades dos alunos disléxicos.
S_{e18}	$P_{e18} = 0 1$	Prevenção de erros operacionais básicos que possam dificultar os processos de aprendizagem.

A **Eficiência de Desempenho** está relacionada à capacidade do simulador de completar experimentos com recursos minimizados utilizados. O **Comportamento Temporal (S_{e19})** classifica o grau em que os tempos de resposta são satisfatórios. Se os tempos de resposta forem excessivos, os alunos podem ficar desanimados quanto ao seu uso. Por esses motivos, recebe peso 2. No MAPHYSE, a utilização de recursos é dividida em **Utilização de Recursos de Rede (Se20)** e **Armazenamento (Se21)** que medem, respectivamente, o grau de satisfação com o consumo de largura de banda da rede e o espaço de armazenamento requerido pelo simulador. Apesar da respectiva relevância em eficiência, um maior consumo de rede e amplo espaço de armazenamento geralmente não comprometem os experimentos. Portanto, recebem peso 1. A Capacidade (**S_{e22}**) mede o quanto os limites do simulador são suficientes para atingir os objetivos de aprendizagem. Por esse motivo, seu peso é 2 (Tabela 4).

Tabela 4: Subcaracterísticas de Eficiência de Desempenho. Fonte: Os autores.

Ref.	Peso	Requisito de Qualidade
S _{e19}	P _{e19} = 0 2	Seja t o tempo de resposta. Se $t \leq pTimeA$ então é satisfatório; se $pTimeA < t \leq pTimeB$ então é satisfatório com restrições; se $t > pTimeB$ então é insatisfatório.
S _{e20}	P _{e20} = 0 1	Seja b a largura de banda consumida para transmitir uma imagem. Se $b \leq pBandwidthA$ então é satisfatório; se $pBandwidthA < b \leq pBandwidthB$ então é satisfatório com restrições. Se $b > pBandwidthB$ então é insatisfatório.
S _{e21}	P _{e21} = 0 1	Seja s o espaço de instalação. Se $s \leq pSpaceA$ então é satisfatório; se $pSpaceA < s \leq pSpaceB$ é satisfatório comm restrições. Se $s > pSpaceB$ então é insatisfatório.
S _{e22}	P _{e22} = 0 2	Os limites computacionais devem ser suficientes para atingir os objetivos de aprendizagem.

Para avaliar a **Manutenibilidade**, geralmente é necessário acessar o código e a documentação técnica. Correções de defeitos são essenciais. Se o simulador apresentar um defeito e demorar para ser corrigido ou as correções forem insatisfatórias, os objetivos de aprendizagem podem ser comprometidos. Uma arquitetura de software coesa e desacoplada favorece os processos de análise, desenvolvimento e manutenção. Portanto, **analisabilidade, modificabilidade, modularidade e testabilidade (S_{e23}..S_{e26})** recebem peso 2. Possíveis contribuições para outros projetos proporcionados pela **Reusabilidade (S_{e27})** são importantes como paradigma, mas sua ausência não compromete diretamente os objetivos educacionais do simulador, recebendo peso 1 (Tabela 5).

Tabela 5: Subcaracterísticas de manutenibilidade. Fonte: Os autores.

Ref.	Peso	Requisito de Qualidade
Se23	Pe23 = 0 2	Esforço e tempo aceitáveis para detectar e depurar erros quando eles ocorrerem.
Se24	Pe24 = 0 2	Esforço e tempo aceitáveis para corrigir e evoluir o simulador.
Se25	Pe25 = 0 2	Características de coesão e de desacoplamento aceitáveis fornecidas pela arquitetura de software.
Se26	Pe26 = 0 2	Esforço e tempo aceitáveis para realizar testes de regressão.
Se27	Pe27 = 0 1	Capacidade aceitável de reutilizar partes do código.

A **Adaptabilidade (Se28)** permite que os alunos utilizem outras alternativas para as simulações. Contudo, a sua ausência não compromete os objetivos educativos (peso 1). A **Portabilidade** aborda a capacidade de ser transferido de um ambiente para outro. A **Instalabilidade (Se29)** é importante tanto para professores quanto para alunos utilizarem o simulador nos dispositivos que possuem. Caso não possam utilizar o simulador por falta de capacidade de instalação, poderá comprometer os objetivos educacionais desejados (peso 3). A **Substituibilidade (Se30)** é crucial quando você deseja trocar a plataforma de execução. Torna-se importante quando o novo simulador deve ter capacidade de realizar as mesmas atividades pedagógicas do anterior, recebendo peso 3 por estar diretamente relacionado aos objetivos educacionais (Tabela 6).

Tabela 6: Subcaracterísticas de portabilidade. Fonte: Os autores.

Ref.	Peso	Requisito de Qualidade
Se28	Pe28 = 0 1	Adaptar-se a outros ambientes sem configurações adicionais.
Se29	Pe29 = 0 3	Ser instalável nos dispositivos que professores e alunos precisam.
Se30	Pe30 = 0 3	Ser capaz de substituir outros simuladores nos mesmos dispositivos utilizados por professores e alunos, proporcionando as mesmas oportunidades de aprendizagem.

A **Compatibilidade** está relacionada à capacidade do simulador de trocar informações – **Interoperabilidade-Importação (Se32)** e **Interoperabilidade-Exportação (Se33)** – e de executar as funções exigidas compartilhando o mesmo ambiente. As operações de importação e exportação são importantes para possibilitar o reaproveitamento de experimentos em outros simuladores. Relevante, mas se não tiver essa capacidade não compromete os objetivos educacionais primários (peso 1). Por outro lado, se um simulador se desestabiliza na presença de outros sistemas ou, ao contrário, desestabiliza outros – subcaracterística **Coexistência (Se31)** – os objetivos de aprendizagem podem ser comprometidos, recebendo peso 2 (Tabela 7).

Tabela 7: Subcaracterísticas de Compatibilidade. Fonte: Os autores.

Ref.	Peso	Requisito de Qualidade
S _{e31}	P _{e31} = 2	Desempenhar suas funções sem afetar negativamente o desempenho de outros sistemas.
S _{e32}	P _{e32} = 1	Capacidade de importar informações de outros simuladores de acordo com os requisitos de importação estabelecidos.
S _{e33}	P _{e33} = 1	Capacidade de exportar informações de outros simuladores de acordo com os requisitos de exportação estabelecidos.

A **Segurança** lida com características de proteção para funções e dados. Quando exigidos, são altamente relevantes para garantir a confiança nos processos educacionais. Por esse motivo, todos os itens de segurança são pesados 3. A **Confidencialidade-Professores (S_{e34})** visa evitar o acesso não autorizado às funções e dados exclusivos dos professores. A **Confidencialidade-Alunos (S_{e35})** também visa impedir o acesso não autorizado no contexto dos alunos. A **Integridade (S_{e36})** trata da modificação inadequada de dados durante as comunicações. O Não-repúdio (**S_{e37}**) trata da comprovação da autoria das ações realizadas. A **Responsabilização (S_{e38})** da capacidade de auditar ações e Autenticidade (**S_{e39}**) é a capacidade de fornecer mecanismos de identificação de autores em processos institucionais (Tabela 8).

Tabela 8: Subcaracterísticas de segurança. Fonte: Os autores.

Ref.	Peso	Requisito de Qualidade
S _{e34}	P _{e34} = 0 3	Capacidade de evitar acesso não autorizado a funções e dados de acesso exclusivo aos professores.
S _{e35}	P _{e35} = 0 3	Capacidade de evitar acesso não autorizado a funções e dados de acesso exclusivo aos alunos.
S _{e36}	P _{e36} = 0 3	Capacidade de evitar alterações indevidas de dados durante as comunicações.
S _{e37}	P _{e37} = 0 3	Capacidade de informar a autoria de ações.
S _{e38}	P _{e38} = 0 3	Capacidade de rastrear ações.
S _{e39}	P _{e39} = 0 3	Capacidade de autenticar usuários de acordo com os requisitos de autenticidade estabelecidos.

- Avaliação da Qualidade em Uso

Avaliações de qualidade em uso podem ser úteis para gerar feedback que capacita os desenvolvedores a melhorar o simulador em ciclos evolutivos subsequentes. Essas melhorias podem incluir correções de bugs, refinamentos, alterações e inclusões de características. Por si só, a qualidade em uso não é suficiente para recomendar o uso ou uso não pedagógico do simulador. É necessário realizar, em conjunto, uma avaliação da qualidade interna, da qualidade externa ou de ambas para avaliar a adequação funcional.

A **Efetividade** (S_{u1}) mede o quanto o simulador ajuda efetivamente os alunos a atingir os objetivos de aprendizagem, a partir dos seus próprios pontos de vista. Uma vez que é alcançado o alcance de objetivos de aprendizagem significativos, tem peso 3. A **Eficiência do Tempo de Resposta** (S_{u2}) mede a satisfação com o tempo de resposta (Tabela 9).

Tabela 9: Subcaracterísticas de efetividade e eficiência. Fonte: Os autores.

Ref.	Peso	Requisito de Qualidade
S_{u1}	$P_{u1} = 0 3$	Capacidade de auxiliar efetivamente os aprendizes a alcançar os objetivos de aprendizagem estabelecidos.
S_{u2}	$P_{u2} = 0 1$	Os alunos devem estar satisfeitos com o tempo de resposta das características do simulador.

A **Satisfação** é uma característica relacionada às necessidades. Assim, a **Utilidade** (S_{u3}) deve ser medida no contexto da satisfação com o processo de aprendizagem quando atingem os objetivos de aprendizagem planejados. A **Confiança** (S_{u4}) apoia a confiança de que o simulador ajuda os alunos a atingir os objetivos de aprendizagem planejados. O **Prazer no Uso** (S_{u5}) mede o quanto os alunos acham prazeroso usar o simulador e quão satisfatórias são as interações. O item **Conforto** (S_{u6}) é uma medida do conforto físico vivenciado pelos alunos ao utilizar o simulador. A satisfação é importante para se sentir estimulado a continuar usando o simulador. Contudo, por se tratar de uma medida de contentamento e não de concretização de objetivos educativos em si, os seus itens de avaliação têm peso 2 (Tabela 10).

Tabela 10: Subcaracterísticas de satisfação. Fonte: Os autores.

Ref.	Peso	Requisito de Qualidade
S_{u3}	$P_{u3} = 0 2$	Os alunos devem ficar satisfeitos quando atingirem os objetivos de aprendizagem planejados com a ajuda do simulador.
S_{u4}	$P_{u4} = 0 2$	Os alunos devem confiar que o simulador os ajudará a atingir os objetivos de aprendizagem planejados.
S_{u5}	$P_{u5} = 0 2$	Os alunos devem considerar prazerosas as interações com o simulador.
S_{u6}	$P_{u6} = 0 2$	Os alunos devem considerar que as interações com o simulador proporcionam conforto físico.

A **Liberdade de Risco** está relacionada à minimização de riscos potenciais. A **Mitigação de Riscos Econômicos** (S_{u7}) é multifatorial. Os riscos são mitigados, por exemplo, quando: i) a licença de uso está fora de custos; (ii) os custos de formação são aceitáveis ou também inexistentes; (iii) quando o simulador puder ser utilizado por um longo período para compensar investimentos realizados. Este item pode pesar 2 ou 3, de

acordo com as capacidades e necessidades de cada instituição de ensino. Por padrão, definimos peso 2. A **Mitigação de Riscos de Saúde e Segurança (S_{u8})** visa minimizar os riscos à saúde por meio do desenvolvimento de interfaces ergonômicas. Por exemplo, em vez de oferecer apenas opções para mover gráficos com o mouse, opções de teclado também poderiam ser oferecidas em computadores desktop. A **Mitigação de Riscos Ambientais (S_{u9})** está relacionada à sustentabilidade influenciada pela eficiência energética e uso de recursos (Koçak *et al.*, 2015). A mitigação de riscos é relevante em qualquer projeto, incluindo a implementação de programas educacionais. Não é, contudo, tão expressivo quanto o cumprimento efetivo dos objetivos. Assim, as subcaracterísticas de ausência de riscos (Tabela 11) recebem peso 2.

Tabela 11: Subcaracterísticas de liberdade de riscos. Fonte: Os autores.

Ref.	Peso	Requisito de Qualidade
S _{u7}	P _{u7} = 0 2	Se a licença de utilização for gratuita: satisfatória; se pago uma única vez, com preço razoável: satisfatório com restrições; se pago mensalmente ou uma vez com preço inaceitável: insatisfatório.
S _{u8}	P _{u8} = 0 2	A ergonomia deve minimizar o risco de causar lesões por esforços repetitivos.
S _{u9}	P _{u9} = 0 2	O consumo de recursos de rede e de eletricidade deve ser minimizado.

A **Cobertura de Contexto** trata da capacidade de usar o simulador de forma eficaz e eficiente no contexto de uso especificado. A **Integralidade do Contexto (S_{u10})** mede a cobertura de contextos de aprendizagem mínimos para alcançar os objetivos educacionais. A **Flexibilidade (S_{u11})** complementa o S_{u10} ao medir a cobertura em contextos expandidos. O simulador deve possibilitar seu uso de forma eficaz nos contextos mínimos desejados para atingir os objetivos educacionais para oferecer diferentes oportunidades de aprendizagem. Por isso, recebe peso 3. A flexibilidade, embora relevante para fornecer alternativas aos alunos, que possam estimular a criatividade e o pensamento lateral, não é tão essencial quanto o alcance dos objetivos educacionais planejados, recebendo assim o peso 2 (Tabela 12).

TABELA 12. Subcaracterísticas de cobertura de contexto. Fonte: Os autores.

Tabela 11: Subcaracterísticas de liberdade de riscos. Fonte: Os autores.

Ref.	Peso	Requisito de Qualidade
S _{u10}	P _{u10} = 0 3	Oferecer contextos de experimentação necessários à consecução dos objetivos básicos de aprendizagem.
S _{u11}	P _{u11} = 0 2	Oferecer outros contextos de experimentação além daqueles necessários à consecução dos objetivos básicos de aprendizagem.

- Taxa de Avaliação da Qualidade Externa

Para avaliar a qualidade pela visão externa, a equipe avaliadora monta uma equação com os critérios que considera relevantes ou pode avaliar (Figura 4).

Figura 4: Cálculo da taxa de avaliação da qualidade externa (TQe). Fonte: Os autores.

$$SQ_e = \sum_{i=1}^{39} P_{ei} S_{ei} = P_{e1} S_{e1} + P_{e2} S_{e2} + P_{e3} S_{e3} + \dots + P_{e39} S_{e39}$$

$$PQ_e = \sum_{i=1}^{39} P_{ei} = P_{e1} + P_{e2} + P_{e3} + \dots + P_{e39}$$

$$TQ_e = SQ_e / 3 \times PQ_e$$

- Taxa de Avaliação da Qualidade em Uso

Similarmente, para realizar uma avaliação da qualidade em uso, a equipe de avaliação do simulador monta uma equação com os critérios que considera relevantes ou pode avaliar (Figura 5).

Figura 5: Taxa da qualidade em uso (TQu). Fonte: Os autores.

$$SQ_u = \sum_{i=1}^{11} P_{ui} S_{ui} = P_{u1} S_{u1} + P_{u2} S_{u2} + P_{u3} S_{u3} + \dots + P_{u11} S_{u11}$$

$$PQ_u = \sum_{i=1}^{11} P_{ui} = P_{u1} + P_{u2} + P_{u3} + \dots + P_{u11}$$

$$TQ_u = SQ_u / 3 \times PQ_u$$

- Taxa de Qualidade Global (TQg)

A taxa de qualidade global (QG) é a taxa ponderada de todas as avaliações realizadas. Caso alguma avaliação não tenha sido realizada, seus fatores são zerados nas equações apresentadas na Figura 6.

Figura 6: Taxa geral da qualidade (TQg). Fonte: os autores.

$$\text{Sejam: } SQ_g = SQ_e + SQ_u \text{ e } PQ_g = PQ_e + PQ_u$$

$$\text{A Taxa de Qualidade geral será: } TQ_g = SQ_g / 3 \times PQ_g$$

- Completude das Avaliações

A taxa de completude da avaliação é determinada pelo número de itens avaliados (n) sobre o total de itens avaliáveis. As avaliações de qualidade internas e externas possuem 34 itens disponíveis, enquanto as avaliações de qualidade em uso possuem 12. As taxas de completude das avaliações estão expressas na Figura 7.

Figura 7: Taxas de completude das avaliações. Fonte: Os autores.

Sejam:
Nea o total de itens de qualidade externa avaliados.
Nep = 39 o total de itens de avaliação da qualidade externa disponíveis.
A taxa de completude de uma avaliação da qualidade externa é calculada por **TCe = Nea/Nep**
Sejam:
Nua o total de itens de qualidade em uso avaliados.
Nup = 11 o total de itens de avaliação da qualidade em uso disponíveis.
A taxa de completude de uma avaliação da qualidade em uso é calculada por **TCu = Nua/Nup**
Sejam:
Nga = (Nea+Nua) o total geral de itens de qualidade avaliados.
Ngp = (Nep+Nup) = 50 o total geral de itens de avaliação da qualidade disponíveis.
A taxa geral de completude é calculada por **TCg = Nga/Ngp**

- Suficiência de Fatores para Avaliação e Adequação Funcional

Uma avaliação é considerada suficiente se todos os itens de adequação funcional forem avaliados visto que, para fazer uma recomendação pedagógica, é necessário avaliar se o simulador possui capacidade funcional para auxiliar no alcance dos objetivos educacionais desejados. Caso contrário, a avaliação é considerada insuficiente. Um simulador é considerado funcionalmente adequado se todos os itens de adequação forem avaliados com pontuação igual a 2 (satisfatório com restrições) ou igual a 3 (satisfatório sem restrições).

- Classificação por Estrelas

Se a avaliação for suficiente, a qualidade do simulador poderá ser classificada em uma escala de zero a cinco estrelas (Figura 8), de acordo com a adequação funcional e o resultado do Índice Geral de Avaliação da Qualidade (**TQg**). É importante destacar que, para

um coordenador de curso ou para um professor – decisor quanto à adoção ou não de determinado simulador em um curso ou turma – é importante conhecer não apenas a classificação de qualidade calculada para o simulador, mas também a taxa de completude da avaliação realizada. Quanto maior a taxa de completude, mais abrangente será a avaliação realizada.

Figura 8: Pseudocódigo do cálculo de classificação por estrelas. Fonte: Os autores.

```
Se a avaliação é insuficiente
Então Estrelas = não classificado
Senão Se o simulador não tiver funcionalidade adequada
    Então Estrelas = 0
    Senão Estrelas = TQg / 20 (arredondando-se para uma casa decimal)
```

Avaliação da qualidade externa de simuladores de física

Antes da avaliação dos simuladores propriamente ditos, os professores teceram comentários sobre o modelo de avaliação. Apesar do pequeno número de professores avaliadores no modelo (2 professores), foi possível verificar que o resultado foi satisfatório, pois é consenso entre os professores que o MAPHYSE atende às expectativas para avaliação de simuladores/laboratórios virtuais. A Tabela 13 apresenta os comentários dos professores sobre o modelo de avaliação do simulador proposto para esta pesquisa.

TABELA 13: Comentários gerais dos professores sobre o MAPHYSE

Professor	Comentário
A	Muito interessante. Eu nunca havia avaliado um simulador antes. É bom ter um modelo para avaliação do simulador. Atende aos objetivos de avaliação de um simulador.
B	O modelo MAPHYSE permite a avaliação de laboratórios virtuais e, conseqüentemente, fornece feedback ao professor quanto à sua qualidade.

As avaliações dos simuladores de física apresentadas nesta seção foram realizadas por meio de processos de avaliação dos aspectos de qualidade externa e qualidade em uso, contando com uma equipe interdisciplinar composta por um professor de física e um de Ciência da Computação, ambos com 15 anos de experiência docente (Figura 9).

Figura 9: Parâmetros MAPHYSE para avaliação da qualidade. Fonte: Os autores.

```
pLang = Português Brasileiro; qMe = 100 execuções; pTimeA = 3s; pTimeB = 5s;
pSpaceA = 1MB; pSpaceB = 2MB
```

As Tabelas A1 e A2 (Apêndice A) listam, respectivamente, as subcaracterísticas de qualidade externa selecionadas e as não selecionadas nesta avaliação. Quanto à qualidade em uso, as tabelas A3 e A4 (Apêndice A) listam, respectivamente, as subcaracterísticas selecionadas e não selecionadas nesta avaliação. Considerando os itens com peso maior que zero, os índices de completude desse processo de avaliação são apresentados na Figura 10.

Figura 10: Cálculos de taxas de completude. Fonte: Os autores.

Nea=18, Nep=39, Nua=4, Nup=11, Nga=Nea+Nua=22, Ngp=Nep+Nup=50
A taxa de completude da:
- qualidade externa é calculada por $TCe = Nea/Nep = 18/39 = 46.2$
- qualidade em uso é calculada por $TCu = Nua/Nup = 4/11 = 36.4$
- qualidade geral é calculada por $TCg = Nga/Ngp = 22/50 = 44.0$

- O Aplicativo *Physic Virtual Lab*

Para o presente estudo foram analisados três simuladores do aplicativo móvel educacional *Physic Virtual Lab (PVL)*⁹, disponível para plataforma Android. Esta aplicação foi selecionada pela sua completude: um conjunto composto por 67 simulações de fenômenos físicos e experimentos. Nesta aplicação, as simulações estão distribuídas nas seguintes áreas: espelhos e lentes, mecânica, eletricidade e magnetismo, ondas e termodinâmica. O aluno pode alterar parâmetros ou mover objetos e perceber os resultados. Equações dos experimentos são fornecidas para melhor compreensão. Sendo todos simuladores pertencentes à mesma aplicação, as Tabelas A5 e A6 (Anexo A) apresentam, respectivamente, subcaracterísticas comuns de qualidade externa e em uso.

- Simulador *Net Vector*

Por definição, um vetor é uma entidade matemática representada por um segmento reto orientado. O comprimento deste segmento de linha representa o módulo vetorial; o suporte reto do segmento determina sua direção. A orientação do segmento de reta indica a direção que deve ser representada por meio de uma seta (Souza, 2015).

⁹ Instalável via Google Play Store.

O simulador Net Vector mostrado na Figura 11 (esquerda) é recomendado para estudos de mecânica. Propõe-se ilustrar a representação de um vetor com suas componentes nos quatro quadrantes. Existem dois botões deslizantes para alterar os tamanhos dos vetores verde e azul e mais dois para alterar seus ângulos (*ângulos dos vetores verde e azul*). O vetor representado na Figura 11 (direita) tem sentido oblíquo e sentido da esquerda para a direita, de baixo para cima.

Os relatórios de avaliação das subcaracterísticas de qualidade externa e qualidade em uso deste simulador são apresentados, respectivamente, nas tabelas A7 e A8 (Anexo A). A Figura 12 apresenta os cálculos dos índices de qualidade.

Figura 11: Simulador Net Vector (esquerda). Source: PVL. Um vetor (direita). Fonte: Souza (2015)

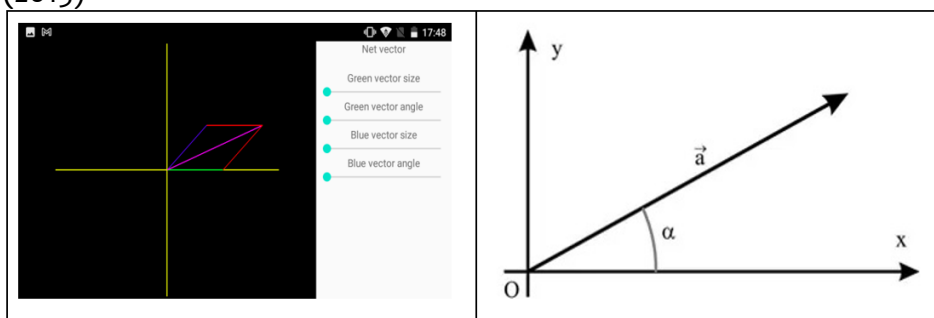


Figura 12: Taxas de qualidade do Simulador Net Vector. Fonte: Os autores.

SQe = 73; PQe = 38; TQe = 64.0; SQu = 17; PQu = 9; TQu = 63.0;
 SQg = 90; PQg = 47; TQg = 63.8
 Stars = 0

Os problemas de precisão observados nos sub-relatos da Tabela A7 (Apêndice A) são graves problemas de qualidade que têm o potencial de reforçar conceitos alternativos em vez de conceitos científicos. Assim como no simulador, as projeções vetoriais são encontradas no espaço. Um risco significativo no contexto de aprendizagem é que os alunos possam confundir as projeções dos vetores que deveriam estar nos eixos do Sistema Ortogonal Cartesiano e não no espaço. Outro problema está relacionado ao próprio conceito de vetor quanto à sua direção, módulo e ângulo, que não ficam claros no simulador. Pelo critério de adequação funcional, o simulador Net Vector possui, portanto, zero estrelas, não sendo recomendado seu uso nas escolas em seus processos de ensino e aprendizagem. Nas demais subcaracterísticas de qualidade avaliadas também não há tratamento de acessibilidade.

- Simulador de Vetores de Campo Elétrico para Cargas de Fontes Negativas e Positivas

Outro experimento em Eletricidade e Magnetismo é a visualização de cargas elétricas, o que não pode ser realizado através de um experimento real. Só podemos visualizar o efeito do comportamento das cargas elétricas. Para entender melhor o campo elétrico, utilizamos alguns modelos de representação das linhas de força que são linhas imaginárias traçadas de modo que sua tangente, em qualquer ponto, aponte na direção do vetor do campo elétrico naquele ponto. A proximidade entre eles está relacionada com a intensidade do campo elétrico naquela região do espaço. Quanto mais próximas estiverem as linhas do campo elétrico, mais intenso será o campo elétrico naquela região e vice-versa.

O simulador de Vetores de Campo Elétrico para Cargas de Fonte Negativas e Positivas (EFVNPSC¹⁰), cuja captura de tela é mostrada na Figura 13 (lado esquerdo), utiliza o modelo de linha imaginária para representar o campo elétrico. Possui duas cargas elétricas: uma negativa (esquerda) e outra positiva (direita). Dentre elas estão representadas as linhas de campo elétrico. À direita estão botões que controlam a intensidade das cargas negativas e positivas e a distância de separação entre elas, variando assim a configuração das linhas de representação do campo elétrico.

Por convenção, as linhas de potência ou de campo (imaginárias) possuem o mesmo significado dos vetores de campo elétrico e possuem como características as seguintes propriedades (Figura 13, lado direito): a) saem de cargas positivas e chegam a cargas negativas; b) a linha de força é tangente ao vetor campo elétrico em cada um de seus pontos; c) por um ponto de um campo elétrico não pode passar duas linhas de energia. Portanto, duas linhas de energia não podem se cruzar, e d) a intensidade do campo elétrico é proporcional à concentração das linhas de energia.

Os relatórios de avaliação das subcaracterísticas de qualidade externa e qualidade em uso deste simulador são apresentados, respectivamente, nas tabelas A9 e A10 (Anexo A). A Figura 14 apresenta os cálculos dos índices de qualidade.

¹⁰ Acrônimo em inglês.

Figura 13: Simulador de linhas de campos elétricos (esquerda). Fonte: PVL. Linhas de campos elétricos para duas cargas distintas (direita). Fonte: Moraes et al. (2019)

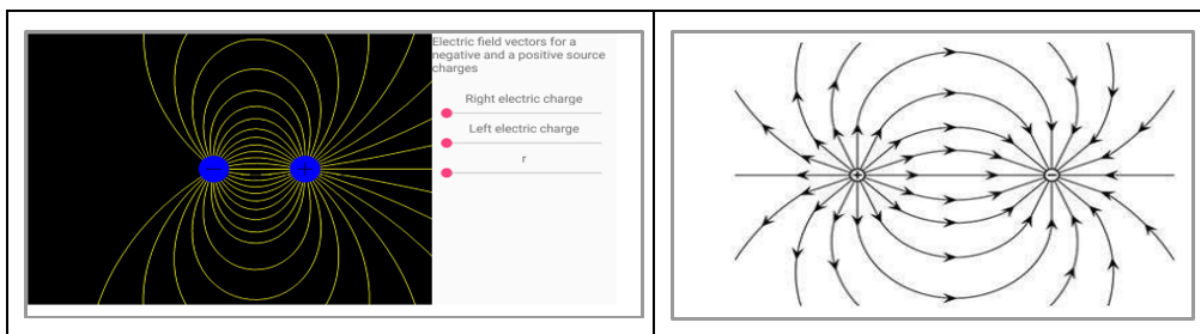


Figura 14: Taxa de qualidade EFVNPSC. Fonte: Os autores.

$SQ_e = 83$; $PQ_e = 38$; $TQ_e = 72.8$; $SQ_u = 20$; $PQ_u = 9$; $TQ_u = 74.1$;
 $SQ_g = 103$; $PQ_g = 47$; $TQ_g = 73.0$
Stars = 3.7

Este simulador foi avaliado como adequado com restrições, avaliado em 3,7 estrelas. Apesar dos problemas de precisão e capacidade observados, o EFVNPSC pode ser recomendado para atividades pedagógicas. Sempre que utilizar este simulador nas aulas, recomenda-se que o professor fique atento às características das linhas de energia. Só assim o aluno poderá compreender melhor como é a força de interação entre as cargas em termos de direção e também compreenderá melhor a orientação do campo elétrico em qualquer região do espaço onde o efeito deste se faça sentir. Por outro lado, o aluno deve compreender que, para cargas iguais, o número de linhas de campo elétrico deve ser sempre o mesmo para cada uma das cargas. Existem também oportunidades para melhorias na acessibilidade.

Considerações Finais

As avaliações realizadas com base no MAPHYSE permitem-nos afirmar que a norma ISO/IEC 25010 apoia a criação de modelos de referência muito completos para avaliação de qualidade externa e em uso. Além disso, é viável selecionar itens de qualidade a serem avaliados, desde que incluam uma adequação funcional, uma vez que o software deva oferecer as funcionalidades a que se propõe.

Equipes interdisciplinares podem usar o MAPHYSE para avaliar vários simuladores de Física. Como essas avaliações são realizadas pelos mesmos critérios e, conseqüentemente, com a mesma completude, permite aos educadores tomar decisões mais fundamentadas, criteriosas de adotar simuladores nos processos educacionais em que atuam. Além disso, permite que os desenvolvedores de simuladores *recebam análises de feedback qualificadas* que fornecem melhorias e correções.

Em relação aos simuladores avaliados, conclui-se que o Net Vector não é recomendado para fins didáticos, pois pode reforçar concepções alternativas sobre o conteúdo trabalhado. Embora suscetível de recomendação, o outro também apresenta oportunidades de melhoria, especialmente em relação à adequação funcional, capacidade e acessibilidade.

Nos trabalhos futuros, estão previstos dois conjuntos de ações. Uma delas é avaliar mais simuladores baseados no MAPHYSE. A outra é aumentar a abrangência da avaliação de simuladores já avaliados e recomendados (ou seja, aqueles com três ou mais estrelas) com pesquisas presentes em sala de aula.

Por fim, entende-se que assim como a norma ISO/IEC 25010 possibilitou a criação do MAPHYSE, é possível criar modelos de referência para avaliação da qualidade interna, externa e em uso para avaliações de outras categorias de software com base nesta Norma.

Referências

BASTOS, L.; WILKINSON, R. Análise Estatística de Simuladores. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE PROBABILIDADE E ESTATÍSTICA, 19, 2010, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: UNICAMP, 2010.

BRITTO, T. C. P. **GAIA**: uma proposta de guia de recomendações de acessibilidade web com foco em aspectos do autismo. 2016. 257 f. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2016.

CAMPÊLO, R. A. **Acessibilidade para portadores de dislexia em um ambiente virtual de aprendizagem móvel**. 2013. 231 f. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013.

CONDE, B. J. M. **Das concepções alternativas às concepções científicas com metodologias ativas de aprendizagem e utilização de simuladores**: uma intervenção didática para a aprendizagem da Física do som. 2021. 152 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Sociais) - Instituto Politecnico de Leiria Leiria, Portugal, 2021.

DA SILVA, R. S. et al. Avaliação de Software Educativo: a complexidade de escolher uma abordagem adequada. In: CONGRESSO REGIONAL SOBRE TECNOLOGIAS NA EDUCAÇÃO, 1, 2016, Natal. **Anais...** Natal: UFRN, 2016.

DE MENEZES LEÃO, N. M.; KALHIL, J. B. Concepções alternativas e os conceitos científicos: uma contribuição para o ensino de ciências. **Latin-American Journal of Physics Education**, v. 9, n. 4, p. 12, 2015.

DE OLIVEIRA, L. B. R. **Architectural design of service-oriented robotic systems**. 2015. 187 f. Tese (Doutorado em Ciência da Computação) - Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

FERNÁNDEZ, J. L. S. **Estudio de la influencia de un entorno de simulación por ordenador en el aprendizaje por investigación de la Física en Bachillerato**. Salamanca: Secretaría General Técnica. Subdirección General de Información y Publicaciones, 2005. 167 p.

FERNÁNDEZ, J. L. S. Informática y enseñanza de las ciencias. In: TEIXEIRA, P. et al. (Org.). **Didáctica de las Ciencias Experimentales: teoría y práctica de la enseñanza de las ciencias**. Barcelona: Paidós, 2000. p. 339-360.

HERPICH, F. et al. Modelo de avaliação de abordagens educacionais em Realidade Aumentada Móvel. **RENOTE**, v. 17, n. 1, p. 355-364, 2019.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION/INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **ISO/IEC 25010: Systems and software engineering-Systems and software Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE) - System and software quality models**. Genebra: ISO/IEC, 2011.

KOÇAK, S. A.; ALPTEKIN, G. I.; BENER, A. B. Integrating Environmental Sustainability in Software Product Quality. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON REQUIREMENTS ENGINEERING FOR SUSTAINABLE SYSTEMS, 4, 2015, Ottawa. **Proceedings...** Ottawa: [s.n.], 2015. p. 17-24.

MATHIS, F.; VANIEA, K.; KHAMIS, M. Replicueauth: Validating the use of a lab-based virtual reality setup for evaluating authentication systems. In: CONFERENCE ON HUMAN FACTORS IN COMPUTING SYSTEMS, 7, 2021, Yokorama. **Anais...** Yokorama: [s.n.], 2021. p. 1-18.

MORAES, I. P.; ALVES, R.; DE NOVAIS, E. R. P. Experimento para visualização das linhas de campo elétrico. **Scientia Plena**, v.15, n.7, 2019.

NUNES, M. S. C. **Desafios da inclusão na práxis pedagógica: saberes e fazeres em ciência da informação**. São Paulo: ABECIN Editora, 2020.

PETTICREW, M.; ROBERTS, H. **Systematic reviews in the social sciences: a practical guide**. Hoboken: John Wiley & Sons, 2008.

QUEIROZ, G. R. P. C.; BARBOSA-LIMA, M. D. C. A. Conhecimento científico, seu ensino e aprendizagem: atualidade do construtivismo. **Ciência & Educação** (Bauru), v.13, n.3, p.273-291, 2007.

SCHROEDER, E. Conceitos espontâneos e conceitos científicos: o processo da construção conceitual em Vygotsky. **Atos de pesquisa em educação**, v.2, n.2, p.293-318, 2007.

SILVA, C. L. D. **Desenvolvimento de um software para implantação do processo de enfermagem**. 2015. 114 f. Dissertação (Mestrado em Enfermagem) – Universidade do Vale do Rio Sinos, Porto Alegre, 2015.

SIQUEIRA, I. C. **Proposta de modelo de avaliação no Simulador Virtual Tático com base nos simuladores utilizados no Exército Brasileiro**. 2022. 61 f. Monografia (Especialização em Operação do Sistema de Mísseis e Foguetes) – Centro de Instrução de Artilharia de Mísseis e Foguetes, Formosa, 2022.

SOAD, G. W. **Avaliação de qualidade em aplicativos educacionais móveis**. 2017. 147 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

SOUZA, N. L. de. Grandezas escalares e vectoriais, 2015. Disponível em: <http://educacao.globo.com/fisica/assunto/mecanica/grandezas-escalares-e-vetoriais.html>. Acessado em: 15 abr. 2023.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL. Acessibilidade digital: tipo de fonte. UFRGS: CPD, 2020. Disponível em: <https://www.ufrgs.br/acessibilidadedigital/tipo-de-fonte>.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. World report on disability 2011. Geneva: World Health Organization, 2011.

APÊNDICE A – Tabelas de Avaliação de Qualidade de Simuladores

Fonte: Os autores.

Tabela A1: Subcaracterísticas de qualidade externa selecionadas.

Ref.	Peso	Ref.	Peso	Ref.	Peso	Ref.	Peso
Se1	3	Se8	1	Se14	2	Se19	2
Se2	3	Se10	2	Se15	2	Se21	1
Se3	3	Se11	2	Se16	2	Se22	2
Se4	3	Se12	2	Se17	2	Se29	3
		Se13	2	Se18	1		

Tabela A2: Subcaracterísticas de qualidade externa não selecionadas.

Ref.	Justificativas de Não Seleção (Peso Zero)
Se5 .. Se7, Se20	Os simuladores não possuem mecanismos de tolerância a falhas, não fornecem roteiro de testes, não dependem de funcionalidades remotas, não possuem consumo de largura de banda.
Se9, Se23 .. Se30, Se31 .. Se39	Qualidade no uso, importação/exportação de dados, comunicação com servidores, adaptabilidade, capacidade de substituição e capacidade de coexistência sem escopo.

Tabela A3: Subcaracterísticas de qualidade em uso selecionadas.

Ref.	Weight	Ref.	Weight	Ref.	Weight	Ref.	Weight
Su4	2	Su7	2	Su10	3	Su11	2

TABELA A4: Subcaracterísticas de qualidade em uso não selecionadas.

Ref.	Justificativas de Não Seleção
Su1, Su2, Su4 .. Su6, Su8, Su9	Eficácia, eficiência na utilização, requisitos de utilidade, prazer e conforto, avaliação de ergonomia, eficiência energética e consumo de rede não abrangidos.

Tabela A5: Relatório de avaliação das subcaracterísticas externas de qualidade comuns a todos os simuladores.

Avals.	Observações
Se11 = 1	Os simuladores oferecem apenas o idioma inglês.
Se13 = 1	Somente idioma inglês e sem verbalização sobre os efeitos físicos, não oferecendo acessibilidade para deficientes visuais.
Se14 = 2	Os simuladores não necessitam de capacidade auditiva. Assim, atende às necessidades de pessoas surdas ou com baixa acuidade auditiva, a menos que tenham necessidades conjuntas de acessibilidade visual ou auditiva.

$S_{e21} = 3$	O aplicativo exigiu em média 0,13 MB por simulador, abaixo do limite de 1 MB estabelecido em pEspacoA.
$S_{e29} = 2$	Disponível apenas para Android (não disponível para iOS).

Tabela A6: Relatório de avaliação das subcaracterísticas de qualidade em uso comuns a todos os simuladores.

Evals.	Observações
$S_{u4} = 3$	No dia 7 de janeiro de 2021, os simuladores foram avaliados com 4,1 estrelas na loja de aplicativos, indicando confiança em sua capacidade de auxiliá-los em suas respectivas atividades de aprendizagem.
$S_{u7} = 3$	Aplicativo gratuito.

Tabela A7: Relatório de Avaliação Externa de Qualidade do Simulador Net Vector.

Avals.	Observações
$S_{e1} = 1$	Não projeta o vetor nos eixos, não apresentando variações de tamanhos e ângulos.
$S_{e2} = 1$	Não mostra valores de módulo e ângulo.
$S_{e3} = 1$	Não atinge os objetivos de aprendizagem.
$S_{e4} = 3$	Em 100 execuções do simulador realizadas não houve falhas.
$S_{e8} = 3$	Os conceitos-chave permitem ao usuário entender como manipular o simulador com facilidade.
$S_{e10} = 3$	É fácil de usar e operar.
$S_{e12} = 3$	Possui uma interface amigável e padronizada.
$S_{e15} = 1$	Não oferece alternativas para pessoas com dificuldades motoras utilizarem botões deslizantes.
$S_{e16} = 1$	O espectro de cores apresenta cores muito intensas, não recomendadas para pessoas autistas.
$S_{e17} = 3$	A interface é simples, com botões deslizantes comuns. Os textos curtos injustificados são adequados para disléxicos.
$S_{e18} = 3$	Evita que os alunos cometam erros operacionais porque é simples de manipular.
$S_{e19} = 3$	O tempo de resposta é satisfatório (em torno de 2s para abertura da simulação) e quase instantâneo na manipulação de botões.
$S_{e22} = 2$	Não permite exercitar ângulos negativos ou maiores que 360 graus.

Tabela A8: Net Vector Quality Assessment Report

Avals.	Observações
$S_{u10} = 1$	Compromete os objetivos de aprendizagem.
$S_{u11} = 1$	Não oferece características adicionais para complementar a aprendizagem.

Tabela A9: EFVNPSC External Quality Assessment Report

Avals.	Observações
$S_{e1} = 3$	Ilustra o modelo de representação de forças elétricas através de linhas imaginárias.
$S_{e2} = 2$	A direção das linhas do campo elétrico não é mostrada. Também não consegue representar a proporcionalidade da intensidade do campo elétrico com a concentração das linhas de energia. Portanto, necessita de ajustes de precisão.
$S_{e3} = 2$	Permite que os objetivos de aprendizagem sejam parcialmente alcançados.
$S_{e4} = 3$	Em 100 execuções realizadas não houve registros de falhas.
$S_{e8} = 3$	Permite ao aluno compreender facilmente os principais conceitos e como manipular o simulador.
$S_{e10} = 3$	É fácil de usar porque sua interface é baseada em botões de arrastar.
$S_{e12} = 3$	É agradável e simples de usar e observar os fenômenos.
$S_{e15} = 1$	Não oferece alternativas para pessoas com dificuldades motoras utilizarem botões deslizantes.
$S_{e16} = 1$	O espectro de cores apresenta cores muito intensas, não recomendadas para pessoas autistas.
$S_{e17} = 3$	A interface é simples, com botões deslizantes comuns. Os textos curtos injustificados são adequados para disléxicos.
$S_{e18} = 3$	Evita que os alunos cometam erros operacionais porque é simples de manipular.
$S_{e19} = 3$	O tempo de resposta é satisfatório (em torno de 2s para abertura da simulação) e quase instantâneo na manipulação de botões.
$S_{e22} = 1$	Para exercitar campos elétricos é necessário medir cargas positivas/negativas em Coulombs e seus submúltiplos. Os raios são medidos em metros e seus submúltiplos. O simulador não informa as unidades de medida. Portanto, não é viável avaliar a capacidade do simulador.

Tabela A10: Relatório de qualidade em uso do EFVNPSC

Avals.	Observações
$S_{u10} = 2$	O simulador oferece contextos de experimentação necessários que nos permitem atingir parcialmente os objetivos educacionais.
$S_{u11} = 1$	O simulador não oferece outros contextos de experimentação além dos necessários para a consecução dos objetivos de aprendizagem.

[4] Endereços: < <http://portal.acm.org>, www.engineeringvillage.com, <https://scholar.google.com.br>, <http://ieeexplore.ieee.org>, <http://www.isiknowledge.com>, www.sciencedirect.com, www.scopus.com, <http://link.springer.com>, www.periodicos-capes-gov-br.ezl.periodicos.capes.gov.br >