

InteraVerso: Um ambiente de simulação baseado em Matter.js para o estudo de dinâmica gravitacional no ensino de Física

Maria Isabelly de Brito Rodrigues¹,
José Nilton Silva Lima¹,
Iallen Gabio de Sousa Santos¹

¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia (IFPI)
Av. Rio dos Matos, s/n – Germano, 64260-000 – Piripiri – PI – Brasil

isabellybrt77@gmail.com, jniltonsilval35@gmail.com, iallen@ifpi.edu.br

Abstract. *This article presents InteraVerso, a simulation environment based on the Matter.js physics engine, developed to facilitate the study of gravitational interactions. The tool enables the simulation of interacting celestial bodies, providing a clear visualization of concepts such as gravitational force and orbital motion. The application was evaluated by physics teachers, who highlighted its didactic and pedagogical relevance. The results indicated its potential to complement traditional teaching practices.*

Resumo. *Este artigo apresenta o InteraVerso, um ambiente de simulação baseado no motor de física Matter.js, desenvolvido para facilitar o estudo das interações gravitacionais. A ferramenta permite a simulação de corpos celestes em interação, proporcionando uma visualização clara de conceitos como força gravitacional e movimento orbital. A aplicação foi avaliada por professores de física, que destacaram sua relevância didático-pedagógica. Os resultados indicaram potencial para complementar práticas pedagógicas tradicionais.*

1. Introdução

O estudo da gravitação e do movimento de corpos celestes apresenta desafios pedagógicos significativos, especialmente quando se avança além dos sistemas simples com soluções analíticas conhecidas. Enquanto o problema de dois corpos, resolvido elegantemente pelas Leis de Kepler e pela Gravitação Universal de Newton, serve como base introdutória, a complexidade aumenta exponencialmente com a adição de mais corpos ao sistema. Esse crescimento de complexidade atinge seu pico no chamado Problema dos Três Corpos, que se tornou um dos sistemas dinâmicos mais estudados e desafiadores da Física [Poincaré 1890].

Diante das limitações das soluções analíticas para sistemas múltiplos, a modelagem computacional emerge como ferramenta essencial tanto para pesquisa quanto para ensino. No contexto da modelagem computacional, métodos numéricos e simulações computacionais são amplamente empregados para analisar a evolução temporal de sistemas gravitacionais [Press et al. 2007]. Neste contexto, a utilização da biblioteca *Matter.js* permite a implementação de interações gravitacionais personalizadas, possibilitando a observação dos efeitos dinâmicos em ambientes simulados.

A principal motivação para este trabalho surge da necessidade de explorar alternativas didáticas que transcendam as abordagens analíticas tradicionais, combinando rigor científico com recursos pedagógicos inovadores. Neste contexto, o objetivo geral

desta pesquisa é proporcionar a visualização intuitiva de fenômenos gravitacionais, permitindo que estudantes e professores de Física explorem interativamente as dinâmicas inerentes às interações entre corpos celestes. Os objetivos específicos visam superar as limitações dos métodos convencionais mediante a integração de simulações computacionais com *Matter.js*, além de desenvolver algoritmos de visualização dinâmica que permitam a manipulação em tempo real de parâmetros orbitais e validar a eficácia pedagógica do sistema mediante avaliações quantitativas e qualitativas com professores de Física.

Visando alcançar estes objetivos, este trabalho propõe o sistema *InteraVerso*. Este sistema disponibiliza atualmente três modos de simulação: Movimento de Rotação e Translação de Corpos Celestes em torno do Sol, Interação entre Dois Corpos Celestes e o Problema dos Três Corpos. Para todas as simulações, implementou-se um tratamento para colisões e limites, prevenindo sobreposições e garantindo que os corpos permaneçam dentro do domínio de simulação.

A validação do sistema desenvolvido foi realizada por meio de um formulário online direcionado a professores de Física, utilizando o método *Customer Satisfaction Score* (CSAT) para quantificar o nível de satisfação em relação à usabilidade e potencial didático das simulações [IBM 2024]. Os resultados demonstraram que 100% dos docentes aprovaram a ferramenta, atestando sua eficácia pedagógica.

Este trabalho está organizado da seguinte forma: A Seção 2 apresenta o referencial teórico, abordando os fundamentos da mecânica celeste que embasam o desenvolvimento do sistema. A Seção 3 apresenta o *InteraVerso* e o seu desenvolvimento, incluindo a implementação das interações gravitacionais utilizando a biblioteca *Matter.js*. A Seção 4 apresenta os resultados e discussões, com foco na validação do sistema através de pesquisa com professores de física. Por fim, a Seção 5 traz as conclusões e perspectivas de trabalhos futuros, destacando a aplicabilidade pedagógica da ferramenta no ensino de gravitação.

2. Referencial Teórico

2.1. Lei da Gravitação Universal

Para compreendermos as interações entre corpos celestes sob a influência da força gravitacional, é fundamental considerar as contribuições de Johannes Kepler no que diz respeito à descrição das trajetórias dos planetas do Sistema Solar em torno do Sol [Tipler and Mosca 2009]. As leis de Kepler são essenciais para entender as simulações, pois fornecem a base teórica para compreender o movimento de rotação e translação de corpos celestes, bem como suas interações gravitacionais.

A Primeira Lei, conhecida como Lei das Órbitas, estabelece que os planetas descrevem órbitas elípticas ao redor do Sol, com este ocupando um dos focos da elipse. A Segunda Lei, ou Lei das Áreas, demonstra que a linha que conecta um planeta ao Sol varre áreas iguais em intervalos de tempo iguais, o que explica por que a velocidade orbital é maior no periélio e menor no afélio. A Terceira Lei de Kepler correlaciona o período orbital de um planeta com o semi-eixo maior de sua órbita, estabelecendo uma relação matemática que permite uma compreensão da dinâmica entre corpos celestes [Halliday et al. 2011]. Em termos matemáticos, essa relação pode ser expressa como $T^2 = Cr^3$, onde $C = (4\pi^2 / GM)$.

Nesse contexto, a Figura 1 ilustra essa situação, mostrando o Sol posicionado no centro da órbita, enquanto o planeta segue uma trajetória circular ao seu redor. O vetor R indica o raio do planeta em relação ao centro do sistema, enquanto o vetor unitário \hat{r} aponta na direção radial. A força gravitacional F no ponto P , representada por um vetor direcionado para o centro da órbita e a velocidade tangencial pelo vetor \vec{v} , evidencia a natureza atrativa da gravidade, que mantém o planeta em movimento orbital.

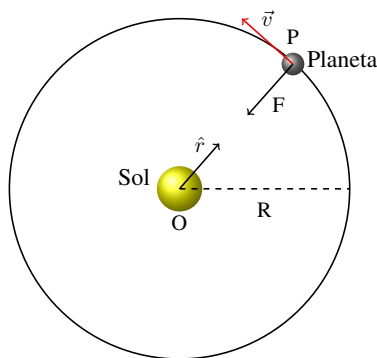


Figura 1. Representação de um planeta em órbita circular em torno do sol. Fonte: Adaptado de [Nussenzveig 2013].

Esse comportamento orbital é regido pela *Lei de Newton da Gravitação* (mais conhecida como Lei da Gravitação Universal), que estabelece a força de atração entre dois corpos massivos. Conforme ilustrado na Figura 1, a força gravitacional F atuante sobre o planeta é sempre direcionada para o centro de massa do sistema (neste caso, o Sol), com magnitude proporcional ao produto das massas M e m e inversamente proporcional ao quadrado da distância R entre eles. O vetor unitário \hat{r} indica a direção radial do sistema, enquanto o sinal negativo na eq. 1 reforça o caráter atrativo da interação.

$$\mathbf{F} = -G \frac{Mm}{R^2} \hat{r} \quad (1)$$

Esta lei mostra que a força gravitacional entre dois corpos é proporcional ao produto de suas massas e inversamente proporcional ao quadrado da distância entre eles [Nussenzveig 2013]. Embora esse sistema simplificado ofereça uma visão clara da dinâmica gravitacional, a introdução de um terceiro corpo torna os cálculos significativamente mais complexos, levando a comportamentos caóticos e imprevisíveis.

Nessa perspectiva, o Problema de Três Corpos revela-se um desafio na física, onde a interação gravitacional entre três corpos massivos gera movimentos caóticos, dependentes das condições iniciais [Nussenzveig 2013]. A análise simplificada de um planeta de massa desprezível em órbita circular ao redor do Sol oferece um ponto de partida valioso para entender sistemas mais complexos, destacando a intrincada natureza da mecânica celeste e a necessidade de abordagens numéricas e aproximadas quando soluções analíticas exatas são inalcançáveis.

2.2. A importância da Experimentação e Simulação no ensino de Física

A experimentação e a simulação desempenham um papel fundamental no ensino de Física, proporcionando aos alunos uma compreensão mais concreta e interativa dos conceitos abstratos da disciplina. Neste contexto, discutir a importância da experimentação

e da simulação no ensino de Física é fundamental para compreender como elas transformam a aprendizagem em uma experiência mais engajadora. Nesta perspectiva, [Spessatto De Maman and Neide 2023] destaca que

[...] disponibilizar diferentes recursos para a resolução de uma situação problema pode ser uma forma de instigar a evocação do pensamento meta-cognitivo, pois o aluno precisa tomar uma decisão de escolha de estratégia com base em seus conhecimentos sobre o tema e sobre as possibilidades que o recurso pode lhe proporcionar para a resolução do desafio proposto. [Spessatto De Maman and Neide 2023, p. 15].

[Costa and Lourdes 2020] defende que a simulação e a experimentação, quando integradas a uma abordagem histórico-didática, são ferramentas essenciais para o ensino de Física, especialmente em tópicos complexos como a Teoria Eletrofraca. Em sua pesquisa, o autor destaca que as simulações computacionais de experimentos históricos não apenas tornam conceitos abstratos mais tangíveis, mas também contextualizam o desenvolvimento científico.

Segundo [Cassal et al. 2021], a experimentação e a simulação computacional são fundamentais para renovar o ensino de Física, especialmente em conteúdos complexos. O estudo demonstra que a abordagem tradicional, baseada em memorização, é pouco eficaz, enquanto a criação de simulações pelos alunos, usando linguagens como *Python*, promove uma aprendizagem ativa e contextualizada. Os resultados da pesquisa mostram que os estudantes que desenvolveram programas para simular fenômenos físicos apresentaram melhor compreensão conceitual, além de maior capacidade de relacionar teoria e prática.

[Ariston et al. 2022] destaca o potencial dos *smartphones* como ferramentas educacionais inovadoras no ensino de Física, especialmente em contextos com limitações de laboratórios. Segundo ele, "outro ponto importante é a utilização do laboratório para a exposição dos experimentos com utilização de softwares de smartphones juntamente com materiais alternativos" [Ariston et al. 2022, p. 17].

Diante dos desafios do ensino de Física, a experimentação e a simulação surgem como ferramentas essenciais para aproximar teoria e prática, tornando os conceitos mais acessíveis. Dessa forma, investir em atividades práticas e recursos simulados é essencial para formar uma geração de estudantes mais preparados.

3. InteraVerso

3.1. Apresentação da Ferramenta

O *InteraVerso* é uma plataforma de simulação educacional projetada para demonstrar os efeitos da gravitação universal. A Figura 2 apresenta a tela inicial do sistema, onde o usuário pode escolher uma das três simulações principais, sendo elas: Translação e Rotação, demonstrando o movimento combinado de corpos celestes; Simulação de Dois Corpos, focada na interação gravitacional e órbitas planetárias; e Problema dos Três Corpos, que exemplifica o comportamento caótico de sistemas gravitacionais complexos.

A simulação de Translação e Rotação do *InteraVerso* (Figura 3.1) demonstra o movimento combinado de corpos celestes, no qual um planeta executa simultaneamente dois movimentos fundamentais, sendo eles a rotação (giro em torno de seu próprio eixo) e



Figura 2. Tela inicial do sistema *InteraVerso*.

a translação (órbita em torno de uma estrela), enquanto um satélite natural orbita o planeta. Através do ajuste de parâmetros como velocidade angular de rotação e período orbital, os usuários podem visualizar diferentes cenários e compreender como esses movimentos fundamentais.

A simulação de Dois Corpos (Figura 3.2) foi desenvolvida como ferramenta fundamental para o estudo da mecânica celeste, demonstrando como as interações gravitacionais entre dois corpos permitem prever órbitas com precisão. Ao mostrar que esse tipo de interação admite solução analítica, a simulação estabelece princípios que tornam possível a previsão orbital acurada. Os usuários podem ajustar parâmetros fundamentais como massas, distâncias e velocidades iniciais, observando em tempo real como essas variáveis determinam a formação de órbitas elípticas, circulares, parabólicas ou hiperbólicas.

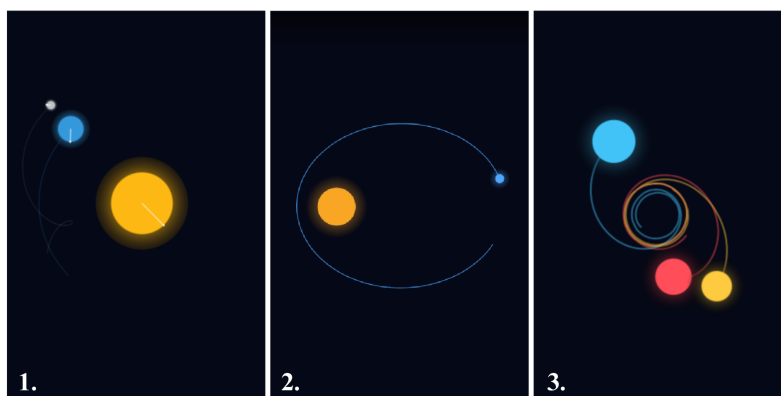


Figura 3. Recortes dos três simuladores em execução.

A simulação do Problema dos Três Corpos (Figura 3.3) aborda um dos desafios mais complexos da mecânica celeste, demonstrando como a interação gravitacional entre três massas gera um sistema dinâmico não integrável com comportamento caótico. Diferentemente do problema de dois corpos, que possui solução analítica, este modelo revela a extrema sensibilidade às condições iniciais, onde mínimas variações nos parâmetros produzem resultados drasticamente distintos.

O sistema foi projetado com uma interface totalmente interativa, permitindo ao usuário controlar diversos aspectos das simulações de forma intuitiva. Os recursos incluem manipulação direta de parâmetros físicos como massas dos corpos, distâncias orbitais e velocidades, além de controle de visualização com zoom e ajuste de posição do observador. A velocidade de execução também pode ser modificada conforme a necessidade do usuário, com operações simplificadas através de comandos imediatos como iniciar, pausar ou resetar a simulação com um único clique. Na Figura 3 pode ser visto a simulação de Translação e Rotação, simulação de Dois Corpos e a simulação do Problema dos Três Corpos, respectivamente.

Visando o uso educacional, o sistema incorpora um painel expansível com informações pedagógicas detalhadas sobre os conceitos físicos abordados em cada simulação. Este recurso transforma a ferramenta em um material didático completo, acessível tanto para professores em suas demonstrações em sala de aula quanto para alunos em estudos individuais.

A usabilidade foi priorizada em todo o desenvolvimento, resultando em um sistema que combina rigor científico com operação simplificada. Esta combinação torna conceitos complexos mais acessíveis através da experimentação prática e visualização de fenômenos que não podem ser observados facilmente na natureza.

3.2. Desenvolvimento do Sistema

O *InteraVerso* foi desenvolvido utilizando *React* com *TypeScript*, adotando uma estrutura modular organizada em pastas específicas para componentes, utilitários e páginas, garantindo código limpo e manutenível. A estilização foi implementada com *Tailwind CSS*, permitindo um design responsivo e consistente, enquanto o *Vite* foi escolhido como ferramenta de *build* para otimização de performance. O núcleo das simulações físicas foi estruturado em módulos especializados, separando a lógica geral das implementações específicas de rotação e órbitas gravitacionais.

A metodologia utilizada para a implementação da simulação do Movimento de Rotação e Translação, bem como das simulações de Interação entre Dois Corpos e do Problema dos Três Corpos, segue uma estrutura integrada e adaptável. Inicialmente, define-se o problema e a necessidade de compreender a complexidade e o comportamento dinâmico desses sistemas físicos em uma perspectiva lógica. Para tanto, optou-se pela utilização da biblioteca *Matter.js*, um motor de física baseado nas leis de Newton, amplamente empregado em aplicações interativas e computacionais [Liabru 2025].

A escolha dessa biblioteca para as simulações físicas se deu por sua capacidade de suportar corpos rígidos, que são modelos matemáticos de objetos indeformáveis, e por oferecer um sistema de eventos que permite a implementação de forças personalizadas, como a gravidade universal. Além disso, as simulações foram desenvolvidas com um controle de escala temporal ajustável, possibilitando a análise do comportamento dos corpos em diferentes velocidades.

Após a definição da biblioteca, realiza-se a configuração do ambiente, desativando a gravidade nativa do *Matter.js* e implementando as forças necessárias diretamente a partir das leis físicas pertinentes. A força gravitacional foi calculada com base na eq. 1, assegurando que a força de atração entre os corpos seja proporcional ao produto de suas massas e inversamente proporcional ao quadrado da distância entre eles

[Murray and Dermott 2000].

```
1 const dx: number = bodyB.position.x - bodyA.position.x;
2 const dy: number = bodyB.position.y - bodyA.position.y;
3 const distanceSq: number = dx * dx + dy * dy;
4 const distance: number = Math.sqrt(distanceSq);
5
6 if (distanceSq === 0 || distance < 1) continue;
7
8 //  $F = G * (m1 * m2) / r^2$ 
9 const forceMagnitude: number =
10   this.G * bodyA.mass * bodyB.mass / distanceSq;
11
12 const force: { x: number; y: number } = {
13   x: (forceMagnitude * dx) / distance,
14   y: (forceMagnitude * dy) / distance
15 };
16
17 Matter.Body.applyForce(bodyA, bodyA.position, force);
18 Matter.Body.applyForce(bodyB, bodyB.position, {
19   x: -force.x,
20   y: -force.y
21 });
```

Figura 4. Implementação da força gravitacional com a *Matter.js*.

A força resultante foi decomposta em componentes x e y , aplicados a cada corpo durante a simulação. O *Matter.js* atualizou as velocidades e posições dos objetos com base nessas forças, garantindo que a simulação evoluísse de maneira consistente com os comportamentos esperados. Na Figura 4, é destacado a parte do código responsável por aplicar as características da gravidade ao sistema.

O sistema foi desenvolvido em uma arquitetura modular que possibilita simulações precisas de órbitas gravitacionais, integrando cálculos físicos avançados com uma interface responsiva e de alto desempenho. Esta ferramenta educacional permite configurar parâmetros como massas e velocidades, simular interações gravitacionais em tempo real e visualizar órbitas estáveis, oferecendo um ambiente intuitivo para o ensino de gravitação.

4. Resultados e Discussão

4.1. Implementação e Validação do Sistema

Para assegurar a eficácia e a relevância do sistema desenvolvido, é essencial submetê-lo a uma avaliação por parte de especialistas na área. Essa etapa de validação permite identificar pontos fortes e partes do sistema que necessitam de aprimoramento, garantindo que a ferramenta atenda às necessidades educacionais e auxilie no processo de ensino e aprendizagem de forma eficaz, viabilizando assim a aplicabilidade prática do sistema em ambientes educacionais reais.

Para coletar essas percepções, foi realizada uma pesquisa de campo com professores de física que atuam em diferentes instituições com diferentes níveis de formação. A pesquisa foi feita através de aplicação de um formulário incluindo questões específicas sobre a usabilidade, precisão das simulações e potencial didático do sistema. Para responder o formulário, os professores receberam um material explicativo em vídeo e um link para acessar e usar o *InteraVerso*.

A fim de quantificar o nível de satisfação dos professores em relação ao sistema, será empregado o método *Customer Satisfaction Score* (CSAT). O CSAT é uma métrica eficaz para avaliar a satisfação dos usuários em relação a aspectos específicos de um produto ou serviço. Conforme destacado por [IBM 2024], essa métrica fornece uma visão clara do nível de contentamento dos clientes, permitindo identificar áreas que necessitam de melhorias.

A avaliação do simulador educacional *InteraVerso* por professores de Física demonstrou um alto grau de aceitação e percepção positiva quanto ao seu potencial didático. A maioria dos docentes possui formação em nível de pós-graduação (75% com mestrado ou doutorado), o que sugere um público com sólida base teórica e experiência na área. Além disso, lecionam majoritariamente no Ensino Médio e Superior, níveis em que os temas abordados pelo simulador são frequentemente explorados.

Os gráficos apresentados na Figura 5 correspondem às respostas fornecidas no questionário. Na pergunta referente ao gráfico (a), 66,7% dos avaliadores consideraram a ferramenta "Excelente" em relevância para o ensino, enquanto 33,3% a classificaram como "Bom". Em (b), a maioria (91,7%) acredita que a plataforma digital facilita a compreensão dos alunos, atribuindo nota 5, e apenas 8,3% deram nota 4. Na questão (c), 75% demonstraram disposição para usar a ferramenta, avaliando como 5, e 25% como 4. Em (d), 83,3% consideram que o sistema tem potencial para tornar o ensino mais dinâmico e acessível (nota 5), contra 16,7% que atribuíram nota 4.

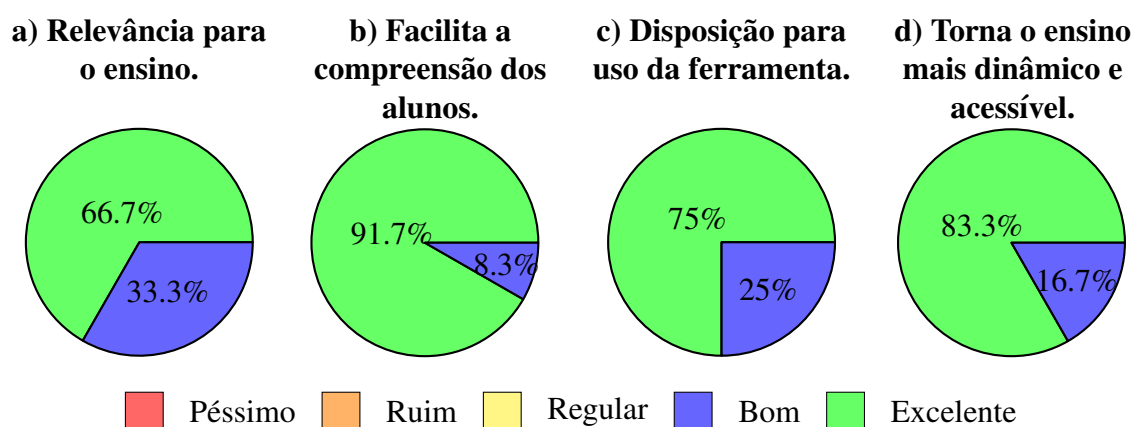


Figura 5. Gráficos dos dados obtidos na aplicação do questionário.

Utilizando a métrica CSAT, os resultados apontam que 100% dos professores aprovam o *InteraVerso* nas questões que avaliam diretamente a relevância, aplicabilidade e potencial de uso do sistema em sala de aula, como pode ser observado na Tabela 1. Para o cálculo do CSAT em cada pergunta do questionário, consideraram-se apenas os votos com notas 4 (bom) e 5 (excelente), que representam avaliações positivas. A fórmula aplicada foi: $CSAT = (\text{Número de votos 4 e 5} / \text{Total de votos}) \times 100$. Esse cálculo fornece o percentual de usuários satisfeitos com cada aspecto avaliado, permitindo uma análise direta e objetiva dos resultados.

Além das questões objetivas apresentadas na Tabela 1 e na Figura 5, os professores que participaram responderam uma questão subjetiva com sugestões e observações sobre o *InteraVerso*. Para preservar a identidade dos participantes, adotou-se uma codificação

específica onde cada *feedback* é identificado por Px (Q6), correspondendo à Questão 6 (seção de depoimentos) respondida pelo Professor x.

Tabela 1. Síntese das respostas do formulário aplicado aos professores.

| Pergunta | Opção votada | % | CSAT |
|--|----------------------|-------|------|
| Formação acadêmica | Mestrado / Doutorado | 75% | — |
| Nível de ensino | Ensino Médio | 83,3% | — |
| Relevância da ferramenta para o ensino da gravitação | Excelente | 66,7% | 100% |
| Infraestrutura da escola para uso do sistema | Excelente | 33,3% | 75% |
| Simulação e interatividade facilitam a compreensão? | Excelente | 91,7% | 100% |
| Disposição para uso em sala de aula | Excelente | 75% | 100% |
| Potencial para tornar o ensino mais acessível e dinâmico | Excelente | 83,3% | 100% |

Esses relatos revelam percepções valiosas sobre a ferramenta, já que os professores participantes da pesquisa forneceram *feedbacks* espontâneos sobre sua experiência com o *InteraVerso*, registrados textualmente conforme suas formulações originais. O professor P3 (Q6) afirmou: *"Bastante atrativo, tornando o ensino sobre gravitação menos abstrato. Gostei muito da possibilidade de alterar os parâmetros, assim torna-se possível relacionar as grandezas envolvidas no estudo"*. Já o professor P1 (Q6) registrou: *"Gostei bastante da simulação do problema de três corpos. O trabalho é interessante e seria legal, explorar as leis de Kepler"*. O professor P12 (Q6) complementou: *"Gostei muito das simulações e acredito ser de grande relevância para as aulas de física quanto para preparatórios da OBA"*.

No entanto, os docentes apresentaram sugestões valiosas para aprimoramentos. Um ponto destacado foi a necessidade de incluir unidades de medida nos parâmetros de simulação, como mencionado pelo professor P2 (Q6): *"Como sugestão, senti falta das unidades de medidas nos parâmetros de simulação. Os alunos tem grandes dificuldades em utilizar as unidades de medidas, acredito que deixando claro as unidades de medidas trabalhadas, ajudaria ainda mais o entendimento da ferramenta"*.

A avaliação do *InteraVerso* por professores de física confirmou seu alto potencial didático, com 100% de aprovação em quesitos como relevância e usabilidade. Os docentes destacaram sua eficácia para simplificar conceitos abstratos de gravitação, mas sugeriram melhorias, como a inclusão de unidades de medida e a expansão para outras áreas da Física. Esses *feedbacks*, aliados aos dados quantitativos, orientarão futuras atualizações, consolidando a ferramenta como recurso educacional às necessidades de ensino.

5. Conclusões e Trabalhos Futuros

Este estudo reafirma o papel transformador das simulações computacionais no ensino de Física, demonstrando como o *InteraVerso* se consolida como ferramenta pedagógica eficaz. A avaliação com professores especializados revelou aceitação unânime, com destaque para sua capacidade de tornar conceitos abstratos de gravitação mais acessíveis. Os depoimentos docentes atestam o valor didático da ferramenta,.

As contribuições apontam caminhos para aprimoramentos práticos, especialmente a inclusão de unidades de medida e expansão para outros conteúdos como eletrostática. Esses resultados ecoam as conclusões de [Spessatto De Maman and Neide 2023] e [Cassal et al. 2021] sobre o potencial das simulações para promover aprendizagem ativa e metacognição.

O estudo comprova que investir em tecnologias educacionais como o *InteraVerso* é estratégico para superar os desafios do ensino de Física, transformando conceitos complexos em experiências interativas que estimulam o engajamento e a compreensão profunda. As perspectivas futuras incluem implementar as sugestões docentes e ampliar a aplicação em diferentes contextos educacionais, consolidando a ferramenta como recurso versátil para o ensino de Física.

Referências

- Ariston, M. M., Aquino, A. A., Saraiva, G. D., Castro, A. J. R. d., and Veloso, M. S. S. d. O. (2022). O uso de smartphones para o desenvolvimento de atividades experimentais no ensino de física. *Revista Insignare Scientia - RIS*, 5(3):105–124.
- Cassal, M. L., Orenge, G., and Isaia, S. M. d. A. (2021). O problema do lançamento oblíquo no ensino de física com abordagem na programação de computadores. *Revista Educar Mais*, 5(4):878–900.
- Costa, M. d. and Lourdes, I. d. (2020). Abordagem histórico-didática para o ensino da teoria eletrofraca utilizando simulações computacionais de experimentos históricos. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 37(1):242–262.
- Halliday, D., Resnick, R., and Walker, J. (2011). Fundamentos de física–vol. 2 (gravitação, ondas e termodinâmica), 9ª.
- IBM (2024). Customer satisfaction score (csat). Acessado em: 20 mar. 2025.
- Liabru (2025). Matter.js - 2d physics engine.
- Murray, C. D. and Dermott, S. F. (2000). *Solar System Dynamics*. Cambridge University Press.
- Nussenzveig, H. M. (2013). *Curso de física básica, 1: mecânica*. E. Blucher.
- Poincaré, H. (1890). Sur le problème des trois corps et les équations de la dynamique. *Acta Mathematica*, 13:1–270.
- Press, W. H., Teukolsky, S. A., Vetterling, W. T., and Flannery, B. P. (2007). *Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing*. Cambridge University Press.
- Spessatto De Maman, A. and Neide, I. G. (2023). Atividades experimentais e simulações computacionais e o pensamento metacognitivo como recursos para o ensino de física. *Revista Espaço Pedagógico*, 30:e14819.
- Tipler, P. A. and Mosca, G. (2009). *Física para Cientistas e Engenheiros: Mecânica, Oscilações e Ondas, Termodinâmica*, volume 1. LTC, Rio de Janeiro, 6 edition.