

Realidade Virtual: uma ferramenta para visualizar conceitos abstratos da óptica quântica

Rafael de Sales Cezimbra Rodrigues¹, Fernando Vieira Mascarenhas¹, Rafael Bulcão Lima¹, Anderson Rafael Correia Buarque da Silva¹, Yasmim Thasla Santos Ferreira^{2,3}, Ingrid Winkler^{2,3}

¹Quantum Industrial Innovation – QuIIN – Competence Center in Quantum Technologies SENAI CIMATEC University Center – Salvador, BA – Brazil

²Institute for Science, Innovation and Technology in Industry 4.0 INCITE INDUSTRIA 4.0, SENAI CIMATEC University – Salvador, BA – Brazil

³Advanced Knowledge Center for Immersive Technologies / AKCIT – Goiânia, GO – Brazil

rafael.rodrigues@fbter.org.br,
fernando.jesus@fbter.org.br, rafael.bulcao@fbter.org.br
anderson.correia@fieb.org.br, yasmim.ferreira@aln.senaicimatec.edu.br,
ingrid.winkler@doc.senaicimatec.edu.br

Abstract. *The comprehension and visualization of abstract phenomena of quantum optics presents a great challenge for the scientific community. The goal of this study is to analyse the existing approaches to facilitate the visualization of abstract concepts of quantum optics and propose upgrades in those demonstrations through the implementation of virtual reality. Following the Design Science Research approach, an exploratory review of the current forms of quantum optics visualization was conducted, establishing a comparison between them. The usage of virtual reality as a visual mediator for quantum phenomena will bring a more didactic and interactive comprehension for students.*

Resumo. *A compreensão e visualização de conceitos abstratos de óptica quântica têm sido um grande desafio para a comunidade acadêmica. Este estudo tem como objetivo analisar as abordagens atuais para facilitar a visualização de conceitos abstratos dentro da óptica quântica e propor melhorias nas demonstrações por meio da realidade virtual. Seguindo a abordagem Design Science Research, foi realizada uma revisão exploratória das atuais formas de visualização da óptica quântica, formando uma comparação entre elas. O uso de ambiente imersivo como mediador visual de fenômenos quânticos trará uma compreensão mais didática e interativa aos estudantes.*

1. Introdução

A física quântica estuda os fenômenos que ocorrem em escalas subatômicas, desafiando as intuições da física clássica ao descrever comportamentos probabilísticos e não determinísticos da matéria e da luz. No contexto da informação quântica, os qubits representam unidades básicas de processamento que, diferentemente dos bits clássicos, podem existir em estados de superposição, assumindo simultaneamente os estados $|0\rangle$ e $|1\rangle$; e emaranhamento, em que dois ou mais qubits mantêm correlações mesmo quando

separados espacialmente. Os fótons, partículas elementares da luz, desempenham um papel central na óptica quântica, sendo amplamente utilizados como qubits físicos devido à sua capacidade de transportar informações quânticas com baixa interferência do ambiente. Além disso, a polarização dos fótons é um dos principais graus de liberdade explorados em experimentos de comunicação e criptografia quântica [Bennett and Brassard 1984]. Tais conceitos, embora fundamentais, permanecem de difícil assimilação, especialmente em espaços de aprendizagem tradicionais [Frare, Araujo and Veit 2024]. Diante disso, o uso de tecnologias imersivas, como a realidade virtual, tem se mostrado promissor no ensino de conteúdos abstratos, conforme estudos aplicados em áreas como a química e a educação superior [Hu-Au 2023], [Chamusca et al. 2024].

Apesar dos avanços nas pesquisas em física quântica, a visualização de seus conceitos fundamentais ainda representa um obstáculo significativo na compreensão destes. Fenômenos como superposição, emaranhamento e polarização de fótons não têm analogias diretas no mundo macroscópico, dificultando sua representação por meios tradicionais como textos, equações e diagramas bidimensionais [Qerimi, Malone and Rexigel 2025]. Essa limitação é bastante crítica na óptica quântica, onde os processos envolvem interações complexas entre partículas de luz e sistemas quânticos que ocorrem em escalas invisíveis ao olho humano.

O ensino de computação e fenômenos quânticos ainda carece de métodos eficazes para tornar tais abstrações mais acessíveis a estudantes. A ausência de recursos visuais interativos adequados contribui para a persistência de uma aprendizagem fragmentada, muitas vezes restrita à memorização de fórmulas, em vez da construção de uma compreensão conceitual profunda. Nesse contexto, torna-se essencial explorar novas formas de representação e visualização capazes de conectar a abstração matemática à experiência sensorial dos aprendizes [Frare, Araujo and Veit 2024], [Kohnle, Baily and Ruby 2014].

Diante das limitações das ferramentas tradicionais para a visualização de conceitos abstratos, a realidade virtual (RV) surge como uma alternativa promissora para preencher esta lacuna [Pirker, Lesjak and Guehl 2017]. Ao proporcionar experiências imersivas em ambientes tridimensionais, a RV permite que os aprendizes interajam com representações espaciais de fenômenos quânticos que, de outro modo, seriam inacessíveis à percepção humana. Essa tecnologia oferece a possibilidade de manipular estados quânticos, observar a emissão de fótons e a sua polarização, promovendo uma compreensão mais intuitiva e sensorial dos conteúdos [Song, Wang and Ghannam 2024]. Estudos recentes têm demonstrado que o uso da RV no ensino de ciências pode aumentar o engajamento, melhorar a retenção do conteúdo e facilitar a aprendizagem significativa de tópicos altamente abstratos [Hu-Au 2023], [Chamusca et al. 2024]. Assim, a aplicação da realidade virtual no ensino de óptica quântica representa não apenas uma inovação tecnológica, mas uma resposta concreta às demandas pedagógicas por formas mais eficazes de mediação conceitual.

Desta forma, a realidade virtual surge como uma tecnologia com potencial para superar essas barreiras, oferecendo novas possibilidades para a representação interativa de fenômenos quânticos. Neste contexto, este estudo tem como objetivo analisar as

abordagens atuais para facilitar a visualização de conceitos abstratos dentro da óptica quântica e propor melhorias nas demonstrações por meio da realidade virtual. Tais melhorias seriam propostas a partir da análise de como as tecnologias imersivas podem facilitar o entendimento dos fenômenos de óptica quântica e futuramente como o desenvolvimento de artefatos que provem isso. Assim, busca-se demonstrar o valor das tecnologias imersivas como recurso pedagógico, abrindo caminho para o desenvolvimento futuro de uma aplicação específica de visualização em realidade virtual voltada à óptica quântica.

Este artigo está organizado da seguinte forma: a seção 2 descreve os métodos utilizados, a seção 3 apresenta a estratégia de pesquisa proposta, a seção 4 analisa os resultados preliminares e a seção 5 fornece nossas considerações finais e sugestões de melhorias nos modelos e caminhos para a continuação deste trabalho.

2. Métodos

Este projeto de pesquisa faz parte de um projeto mais amplo *Immersive virtual and augmented reality environments for training and development in quantum technologies* do Centro de Competência Empresa Brasileira de Pesquisa e Inovação Industrial (EMBRAPII) QuIN. O estudo é exploratório, pois a pesquisa sobre formas de visualização da óptica quântica utilizando ferramentas imersivas é recente, e portanto um estudo exploratório fornece uma abordagem adequada [Gregor and Hevner 2013]. O grupo de pesquisa, composto por pesquisadores, especialistas e estudantes em realidade virtual e computação quântica, definiu a estratégia metodológica inicial em reuniões colaborativas.

3. Estratégia de Pesquisa Proposta

Para alcançar esses objetivos, o trabalho adota a metodologia *Design Science Research* (DSR) [Gregor and Hevner 2013], que envolve seis etapas: (1) identificação do problema; (2) definição dos objetivos da solução; (3) projeto e desenvolvimento do modelo; (4) demonstração do modelo desenvolvido; (5) avaliação do modelo; e (6) comunicação dos resultados à comunidade científica e ao setor produtivo. Os objetivos específicos deste estudo são: (1) analisar as oportunidades e os desafios envolvidos na visualização de fenômenos da óptica quântica; (2) comparar as ferramentas atualmente disponíveis para a demonstração de conceitos quânticos; e (3) demonstrar como a realidade virtual pode facilitar a compreensão e visualização desses fenômenos.

Nas etapas 1 e 2, o problema foi identificado a partir da dificuldade recorrente de compreensão e visualização de fenômenos da óptica quântica em ambientes de prática laboratorial. As buscas foram realizadas nas plataformas de periódicos da CAPES e no Google Acadêmico, filtrando os artigos científicos publicados a partir de 2015. Foram utilizadas as seguintes palavras-chave: ("realidade virtual" AND laboratórios AND educação AND ("revisão" OR "revisão de literatura" OR "revisão sistemática")) OR ("quantum physics visualization" OR "virtual reality physics education" OR "immersive quantum learning"). Após a triagem, foram selecionados quatro estudos que atendiam aos critérios da revisão, cujos resultados serão discutidos nas seções seguintes.

Na etapa 3, foi conduzido um estudo comparativo entre as ferramentas atualmente disponíveis para a visualização de fenômenos ópticos quânticos e as possibilidades oferecidas pela realidade virtual. Com o objetivo de mapear as limitações das ferramentas tradicionais, predominantemente bidimensionais, baseadas em interações por tela e mouse, em contraste com os recursos imersivos e interativos, os quais serão apresentados e discutidos nas seções de resultados e discussão.

Na etapa 4, foi apresentada uma proposta conceitual desenvolvida com base nas análises comparativas realizadas, por meio de um artefato, a fim de evidenciar sua aplicabilidade e explorar sua viabilidade em realidade virtual.

Na etapa 5, foi realizada a validação do artefato com a aplicação de questionários de presença para levantamento de dados qualitativos e quantitativos através de feedback dos usuários. O feedback das interações com os ambientes imersivos fornecidos pelos participantes serão coletados e usados para refinar o desenvolvimento do laboratório e o processo de ensino da computação quântica.

A etapa 6 do método DSR envolveu a comunicação dos resultados obtidos até o momento neste artigo científico.

4. Resultados

A análise exploratória da literatura teve como objetivo comparar métodos de experimentação da óptica quântica com as atuais tecnologias de realidade virtual aplicada a diferentes temas. Os trabalhos revisados demonstram que laboratórios virtuais são uma ferramenta efetiva, em comparação aos laboratórios tradicionais pelo seu alto valor de manutenção e riscos de acidentes no percurso do experimento [Kavanagh et al. 2017]. Em ambientes educacionais, a realidade virtual tem se mostrado uma ferramenta didática eficaz para aumentar o engajamento, a motivação e a retenção do conhecimento [Freina and Ott 2015].

Quando comparadas aos experimentos realizados em laboratórios físicos, as aplicações em realidade virtual oferecem vantagens significativas: são mais seguras, pois eliminam o risco de danos a equipamentos ou acidentes com materiais sensíveis, e também mais acessíveis em termos de custo de acordo com alguns autores, já que muitos laboratórios exigem instrumentos com valores elevados, enquanto o uso de RV demanda apenas o uso de um head-mounted display (HMD) e da aplicação digital correspondente [Jing & Nickerson 2006].

Entre as ferramentas educacionais para visualização de conceitos complexos da física, há um destaque para ambientes virtuais como o *PhET Interactive Simulations* e o *Quantum Flytrap Virtual Lab*. O projeto PhET, desenvolvido pela Universidade do Colorado, oferece uma ampla variedade de simulações baseadas em interações visuais e manipulação de parâmetros físicos, o que tem demonstrado impacto positivo na aprendizagem de tópicos abstratos, como interferência e dualidade onda-partícula [Wieman, Adams and Perkins 2008].

O Quantum Flytrap oferece um laboratório de mecânica quântica via website, com recursos interativos que permitem aos usuários explorar fenômenos como barreiras de potencial, pacotes de onda e estados quantizados [Migdał et al. 2022].

A sobriedade bidimensional da interface do PhET implica na necessidade de aprendizado prévio por parte do usuário para a plena compreensão de suas funcionalidades [Wieman, Adams and Perkins 2008]. Já o Quantum Flytrap, também bidimensional, tem uma estrutura mais gamificada e lúdica para a explicação da experiência. Fazendo assim, que o estudante consiga visualizar sua progressão de conhecimento [Migdał et al. 2022]. Entretanto, ambas possuem limitações à imersão e à compreensão espacial, afastando o usuário da natureza dos experimentos tradicionais.

Assim, a construção de um laboratório em RV pode ajudar os estudantes a desenvolver habilidades laboratoriais, promovendo a capacidade de pensar em múltiplos níveis de abstração [Pirker & Dengel 2021]. Direcionando assim à construção de diretrizes aplicáveis ao desenvolvimento de laboratórios para o ensino de comunicação quântica, visualizando conceitos abstratos, mas também capacitação de alunos para manuseio de instrumentos presentes em laboratórios tradicionais de forma complementar.

Nesse sentido, representações imersivas emergem como uma alternativa mais eficaz para aproximar o usuário da realidade experimental e promover maior senso de presença no experimento. Em particular, a realidade virtual destaca-se como uma tecnologia imersiva capaz de envolver o usuário por completo, permitindo a visualização e interação com o ambiente em 360 graus [Pirker & Dengel 2021].

5. Considerações Finais

Os resultados aqui apresentados proporcionarão base para o desenvolvimento de novos estudos e aplicações em práticas de visualizações em óptica quântica com a utilização de realidade virtual como mediador didático.

Para execução futura deste trabalho, serão seguidas as etapas 4 e 5 da DSR mencionadas na seção Métodos, visando a concretização dos mesmos, a partir de novos artefatos desenvolvidos em realidade virtual para comprovar a eficácia deste meio no ensino dos fenômenos quânticos. A aplicação bem sucedida dessa proposta facilitará o entendimento de estudantes dessa área da quântica, democratizando o acesso a esse conhecimento.

6. Agradecimentos

Este trabalho foi financiado pelo projeto iNOVATeQ Lato Senso Especialização em Computação Quântica apoiado pelo QuIIN - Quantum Industrial Innovation, Centro de Competências em Tecnologias Quânticas EMBRAPPII CIMATEC, com recursos financeiros do PPI IoT/Manufatura 4.0 de número MCTI 053/2023, assinado pela EMBRAPPII.

7. Referências

[Bennett and Brassard 1984] C. H. Bennett and G. Brassard, Quantum cryptography: Public key distribution and coin tossing, Proceedings of IEEE International Conference on Computers, Systems and Signal Processing, pp. 175–179, 1984.

- [Booth, Sutton and James 2021] A. Booth, A. Sutton, M. Clowes, and M. Martyn-St James, *Systematic Approaches to a Successful Literature Review*, Thousand Oaks, CA, USA: Sage, 2021.
- [Chamusca et al. 2024] Chamusca, I.L., et al., *Evaluating Design Guidelines for Intuitive, Therefore Sustainable, Virtual Reality Authoring Tools*. MDPI, 2024: p. 1–25.
- [Fox, Zwickl and Lewandowski 2020] M. F. J. Fox, B. M. Zwickl, and H. J. Lewandowski, *Preparing for the quantum revolution: What is the role of higher education?*, *Phys. Rev. Phys. Educ. Res.*, vol. 16, no. 2, pp. 020131, Oct. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.16.020131>
- [Frare, Araujo and Veit 2024] V. L. F. Frare, I. S. Araujo, E. A. Veit, *Uma revisão sistemática da literatura sobre o ensino de computação quântica*, Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2024. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/282062>.
- [Freina and Ott 2015] L. Freina and M. Ott, *A Literature Review on Immersive Virtual Reality in Education: State Of The Art and Perspectives*, April 2015, Conference: eLearning and Software for Education (eLSE) At: Bucharest (Romania), DOI: 10.12753/2066-026X-15-020
- [Gregor and Hevner 2013] Gregor, S., & Hevner, A. R. (2013). Positioning and presenting design science research for maximum impact. *MIS Quarterly*, 37(2), 337-355.
- [Hu-Au 2023] Hu-Au, Elliot. *Learning Abstract Chemistry Concepts with Virtual Reality: An Experimental Study Using a VR Chemistry Lab and Molecule Simulation*. *Electronics*, [S. l.], v. 12, n. 3, p. 600–615, 2023.
- [Jing & Nickerson 2006] Ma, Jing & Nickerson, Jeffrey. (2006). Hands-on, simulated, and remote laboratories: A comparative literature review. *ACM Comput. Surv.*. 38. 10.1145/1132960.1132961.
- [Kavanagh et al. 2017] S. Kavanagh et al. *Themes in Science \& Technology Education*, 10(2), 85-119, 2017, <https://eric.ed.gov/?id=EJ1165633>
- [Kohnle, Baily, and Ruby 2014]. Kohnle, Antje; Baily, Charles; Ruby, Scott. *Investigating the influence of visualization on student understanding of quantum superposition*. <https://arxiv.org/pdf/1410.0867>
- [Migdał et al. 2022] Piotr Migdał, Klementyna Jankiewicz, Paweł Grabarz, Chiara Decaroli, Philippe Cochin, "Visualizing quantum mechanics in an interactive simulation – Virtual Lab by Quantum Flytrap," *Opt. Eng.* 61(8) 081808 (22 June 2022) <https://doi.org/10.1117/1.OE.61.8.081808>
- [Pirker & Dengel 2021] Pirker, Johanna & Dengel, Andreas. (2021). *The Potential of 360-Degree Virtual Reality Videos and Real VR for Education - A Literature Review*. *IEEE Computer Graphics and Applications*. PP. 1-1. 10.1109/MCG.2021.3067999.
- [Pirker, Lesjak and Guetl 2017] Pirker, Johanna & Lesjak, Isabel & Guetl, Christian. (2017). *Maroon VR: A Room-Scale Physics Laboratory Experience*. 482-484. 10.1109/ICALT.2017.92.

- [Qerimi, Malone and Rexigel 2025] L. Qerimi, S. Malone, E. Rexigel, et al., Exploring the mechanisms of qubit representations and introducing a new category system for visual representations: results from expert ratings, *EPJ Quantum Technology*, v. 12, p. 45, 2025. Disponível em: <https://epjquantumtechnology.springeropen.com/articles/10.1140/epjqt/s40507-025-00346-1>
- [Seskir et al. 2022] Zeki C. Seskir et al. (2022). Quantum games and interactive tools for quantum technologies outreach and education. *Opt. Eng.* 61(8) 081809.
- [Song, Wang and Ghannam 2024] Ge Song, Xunan Wang, Rami Ghannam (2024). Immersive quantum: A systematic literature review of XR in quantum technology education. *Computers & Education: X Reality*, Volume 5. 100087. ISSN 2949-6780.
- [Wieman, Adams and Perkins 2008] Wieman, C. & Adams, Wendy & Perkins, Katherine. (2008). Physics. PhET: Simulations that enhance learning. *Science* (New York, N.Y.). 322. 682-3. 10.1126/science.1161948.