

A Eficácia das Tecnologias de Realidade Virtual e Aumentada no Ensino Neurocirúrgico

Uma Análise sobre o Impacto no Aprendizado Médico

Fabrizio C. Mota¹

¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí (IFPI),
Avenida Rio dos Matos, S/N, Bairro Germano – 64.260-000 – Piripiri-PI – Brazil

fabriciomota2612@gmail.com

Abstract. *This study is a review aimed at consolidating and synthesizing the main research contributions on the technological applications of Virtual Reality (VR) and Augmented Reality (AR) in the neurosurgical field, with a particular focus on analyzing how these innovations impact the learning and education of medical students and residents. The review covers a specific analysis of the applications of these technologies in the neurosurgical field, highlighting the qualitative aspects of the data obtained from the studies reviewed. In addition to providing a comprehensive overview of advances and limitations, the article explores the practical implications of these technologies for academic and professional training in the medical field under analysis.*

Resumo. *Este estudo trata-se de uma revisão, que visa consolidar e sintetizar as principais contribuições de pesquisa sobre as aplicações tecnológicas de Realidade Virtual (RV) e Realidade Aumentada (RA) no âmbito neurocirúrgico, com foco particular na análise de como essas inovações impactam o aprendizado e a educação de estudantes e residentes de medicina. A revisão abrange uma análise pontual das aplicações dessas tecnologias no âmbito neurocirúrgico, destacando os aspectos qualitativos dos dados obtidos a partir dos trabalhos revisados. Além de fornecer uma visão abrangente dos avanços e limitações, o artigo explora as implicações práticas dessas tecnologias para a formação acadêmica e profissional da área médica em análise.*

1. Introdução

A Realidade Virtual (RV) e a Realidade Aumentada (RA) têm emergido como tecnologias transformadoras na educação e prática médica, particularmente na neurocirurgia [Mishra 2022]. A RV cria um ambiente totalmente computadorizado em 3D e imersivo, que permite a interação em tempo real com as estruturas presentes no mesmo, enquanto a RA envolve a sobreposição de imagens geradas por computador no campo visual real do usuário, ampliando as possibilidades de visualização e interação.

Essas ferramentas oferecem simulações imersivas e interativas que podem melhorar a precisão cirúrgica e o aprendizado dos estudantes de medicina, constituindo uma alternativa inovadora ao treinamento médico tradicional, que frequentemente enfrenta limitações significativas, como a escassez de casos complexos, riscos em treinamentos

práticos e limitações na visualização anatômica [Hey 2023]. No contexto da neurocirurgia, a RV e a RA desempenham papéis cruciais ao integrar dados pré-operatórios, refinar a neuronavegação e expor diferentes condições patológicas de pacientes, além de contribuir para a redução do tempo de cirurgia. Outrossim, com o advento da pandemia de COVID-19, uma vez que restrições a procedimentos eletivos, redução de mentorias presenciais e a suspensão de atividades em laboratórios de anatomia exigiram soluções digitais alternativas, plataformas de simulação virtual e telementoria via RA tornaram-se essenciais para manter a continuidade do treinamento, evidenciando seu potencial como complemento ou mesmo substituto estratégico para métodos tradicionais.

Esta revisão, enfoca o papel e as principais contribuições da literatura existente sobre a aplicação dessas tecnologias no campo neurocirúrgico, especificamente em como estas interagem e integram o aprendizado e a formação acadêmica dos futuros neurocirurgiões. A relevância dessas tecnologias se reflete na sua capacidade de fornecer simulações detalhadas e ambientes de treinamento seguros, o que facilita a familiarização com a anatomia e os procedimentos cirúrgicos, aprimorando significativamente as habilidades técnicas dos residentes.

A questão central desta revisão é: Qual a eficácia das aplicações de RV e RA na educação médica em neurocirurgia? Assim, o objetivo geral é discutir a eficiência dessas tecnologias no aprimoramento do ensino neurocirúrgico. A justificativa acadêmica deste estudo reside na necessidade de consolidar e avaliar as produções científicas sobre o tema, integrando os conhecimentos disponíveis para suplementar e expandir as ideias já discutidas na literatura. O presente trabalho está organizado da seguinte maneira: A seção 2 detalha a metodologia utilizada, abrangendo os métodos de filtragem, seleção e as bases de pesquisa adotadas. A seção 3 aborda as interpretações dos resultados obtidos e as propostas de discussão elaboradas a partir dos estudos analisados. Por fim, a seção 4 apresenta as considerações finais, limitações e sugestões para trabalhos futuros.

2. Metodologia - Revisão Integrativa

Este trabalho configura-se como uma revisão integrativa, cujo objetivo é reunir e sintetizar simultaneamente resultados de estudos quantitativos, qualitativos e teóricos sobre RV e RA em neurocirurgia. Para tanto, seguiram-se as seis etapas clássicas da abordagem integrativa (formulação da questão, busca na literatura, seleção dos estudos, avaliação crítica, extração de dados e síntese dos achados), conforme [Whittemore and Knafl 2005]. A busca contemplou publicações de 2017 a 2024, selecionadas conforme critérios de inclusão relativos ao uso de RV e RA na formação neurocirúrgica. Todas as publicações selecionadas encontravam-se originalmente em inglês, refletindo a predominância de estudos de maior relevância nesse idioma. Portanto, empregou-se ferramentas como o DeepL Translate e Google Translate para viabilizar sua inclusão e análise. Para os critérios de exclusão, descartaram-se os estudos que abordaram exclusivamente aplicações procedimentais imediatas, concentrando-se unicamente nos aspectos técnicos do ato cirúrgico. As buscas foram efetuadas em repositórios e índices bibliográficos reconhecidos na área médica, incluindo as bases PubMed e Scopus, as plataformas editoriais Frontiers e MDPI, e o mecanismo de busca acadêmico Google Scholar.

Utilizou-se da seguinte estratégia de busca por descritores: “Virtual Reality” AND “Neurosurgery” AND “Medical Education” e “Augmented Reality” AND “Sur-

gical Training” AND “Medical Students”. Os termos foram relacionados em diferentes combinações para obtenção de melhores resultados. Os estudos selecionados passaram por uma leitura completa para verificar a conformidade com os critérios de inclusão. Dados foram extraídos dos estudos selecionados, incluindo tipo de estudo, descrições de aplicações de RV e RA, e seus impactos educacionais. A qualidade dos estudos foi avaliada com base em rigor metodológico e relevância dos resultados obtidos, o último categorizado na maioria por avaliações qualitativas das pesquisas analisadas. Para reforçar a confiabilidade dos achados, cada artigo foi examinado segundo três critérios principais: (i) descrição clara do delineamento, (ii) informação sobre o tamanho amostral e (iii) presença de validação prática (simulada, laboratorial ou clínica). Observou-se que 88% dos estudos definem adequadamente seu delineamento, 50% especificam o tamanho da amostra e 62,5% aplicam formas de validação direta. Esses indicadores atestam a consistência metodológica dos trabalhos e conferem robustez às evidências apresentadas.

O principal procedimento deste estudo reside na abordagem integrativa adotada, que permitiu reunir e sintetizar evidências diversas sobre o uso de RV e RA no treinamento neurocirúrgico, abrangendo múltiplos delineamentos e contextos educacionais. Por outro lado, a ausência de avaliação quantitativa sistemática da qualidade metodológica dos estudos analisados constitui uma limitação, restringindo a profundidade da comparação entre os achados. Além disso, a inclusão exclusiva de publicações em inglês pode ter excluído contribuições relevantes em outros idiomas.

Conforme ilustrado na Tabela 1, que sintetiza os trabalhos selecionados, evidencia-se que a aplicação das tecnologias de Realidade Virtual e Aumentada no treinamento neurocirúrgico oferece benefícios significativos. Os resultados dos estudos analisados demonstram que essas ferramentas promovem melhorias na precisão técnica, na compreensão anatômica e na redução da curva de aprendizado dos residentes. Além disso, tais tecnologias otimizam a replicação de planos cirúrgicos e fortalecem o aprendizado prático, contribuindo para uma formação mais robusta e integrada dos futuros neurocirurgiões. Assim, a incorporação dessas abordagens, quando utilizadas de forma complementar aos métodos tradicionais, revela-se essencial para a modernização do ensino e a evolução da prática neurocirúrgica. Por fim, os dados extraídos dos estudos foram organizados em planilha padronizada contendo autor, ano, objetivo, delineamento e principais conclusões. Com base nessas informações, aplicou-se análise temática, que permitiu sintetizar os achados em três categorias recorrentes: aprimoramento técnico, impacto pedagógico e limitações sensoriais.

Tabela 1. Estudos Analisados sobre RV e RA no Treinamento Neurocirúrgico

Referência	Principais Conclusões
Bernado, A.	Estudo de simulação em RV evidenciou melhora estatisticamente significativa em habilidades motoras finas e planejamento espaço-temporal, embora tenha identificado deficiências no realismo do feedback tátil.

Continua na próxima página

Tabela 1 – continuação da página anterior

Referência	Principais Conclusões
Petrone, S e. a.	Ensaio controlado com 30 residentes demonstrou que o simulador híbrido (integração de RA e impressão 3D) proporcionou 89% de usabilidade satisfatória e elevou em 80,9% o índice de precisão na orientação espacial durante simulações de craniotomia.
Truckenmueller, P. e. a.	Estudo descritivo com RV 360° constatou ganhos estatisticamente relevantes na compreensão tridimensional da anatomia cerebral e na execução de procedimentos simulados, comparativamente aos métodos convencionais.
Jean, W. C., Sack, K. D., and Tsen, A. R.	Avaliação técnica de template guiado por RA para acesso transorbital revelou aumento de 25% na exatidão do posicionamento de instrumentos e redução na carga cognitiva dos cirurgiões durante a ressecção de tumores intradurais.
Mishra, R. e. a.	Revisão analítica evidenciou que a RV aprimora significativamente o planejamento pré-operatório em neurocirurgia, embora elevados custos e a ausência de feedback háptico realista ainda limitem sua adoção clínica.
Cannizzaro, D. e. a.	Revisão sistemática indicou que a RA eleva a precisão de abordagens neurocirúrgicas, mas ressaltou a urgente necessidade de avançar no feedback sensorial e na interoperabilidade dos sistemas para uso rotineiro.
Hey, G. e. a.	Análise qualitativa mostrou que residentes submetidos a treinamentos com RA reportaram aumento de 30% na confiança cirúrgica e aceleração da curva de aprendizado em comparação a simuladores não imersivos.
Paro, M. R., Hersh, D. S., and Bulsara, K. R.	Revisão histórica demonstrou a evolução gradual de RV/RA na formação neurocirúrgica, corroborando seu papel na construção de competências técnicas mais refinadas e na padronização de protocolos de treinamento.

3. Resultados e Discussão

3.1. Resultados: Síntese

A síntese dos estudos analisados (Tabela 1) permitiu a categorização dos achados em três eixos principais: *aprimoramento técnico*, *impacto pedagógico* e *limitações sensoriais*. Respectivas categorias evidenciam tanto os benefícios quanto os entraves recorrentes no uso de RV e RA e no ensino neurocirúrgico.

Aprimoramento técnico: Todos os estudos revisados relataram ganhos expressivos em precisão espacial, execução de procedimentos e planejamento operatório. Simulações em RV demonstraram avanços em habilidades motoras finas e raciocínio espaço-temporal [Bernardo 2017], enquanto abordagens guiadas por RA permitiram aumentos de até 25% na exatidão do posicionamento de instrumentos neurocirúrgicos [Jean et al. 2022]. Além disso, ambientes tridimensionais imersivos favoreceram o reconhecimento anatômico com maior profundidade e fidelidade.

Impacto pedagógico: A maioria dos artigos destacou benefícios educacionais mensuráveis, como aumento da confiança dos residentes e aceleração da curva de aprendizado [Hey 2023, Truckenmueller 2024]. Simuladores híbridos e experiências com RA foram associados a níveis elevados de usabilidade (89%) e eficácia percebida (80,9%) [Petrone 2022], sugerindo maior engajamento e retenção de conteúdo por parte dos participantes.

Limitações sensoriais: Seis dos oito estudos identificaram restrições técnicas e econômicas à ampla implementação dessas tecnologias. A ausência de feedback háptico realista, os altos custos de aquisição e manutenção, além da integração limitada com sistemas hospitalares, foram apontados como barreiras recorrentes [Mishra 2022, Cannizzaro 2022]. Tais limitações comprometem a escalabilidade das soluções, especialmente em instituições com menor infraestrutura.

Em conjunto, os achados reforçam o potencial da RV e da RA como ferramentas pedagógicas e operacionais valiosas na neurocirurgia. Contudo, para que sua adoção seja efetiva e duradoura, é necessário superar desafios técnicos e logísticos ainda presentes.

3.2. Discussão

Inicialmente, são explorados os conceitos e as potencialidades dessas ferramentas, evidenciando como a integração entre ambientes digitais imersivos e a sobreposição de elementos virtuais ao mundo real pode aprimorar o treinamento e a prática cirúrgica. Em seguida, a discussão abrange aspectos educativos e técnicos, ressaltando tanto os benefícios observados — como a melhoria na compreensão anatômica, a redução da curva de aprendizado e o aumento da precisão dos procedimentos — quanto as limitações encontradas, incluindo questões de custo, feedback háptico e integração de sistemas. Assim, estabelecendo uma análise crítica que dialoga com os avanços tecnológicos e os desafios persistentes, fornecendo uma base robusta para a compreensão do impacto dessas inovações no ensino e na prática da neurocirurgia.

3.2.1. Realidade Virtual e Aumentada: Conceituação

A Realidade Virtual proporciona uma imersão completa em ambientes digitais simulados, substituindo a percepção do mundo real e criando um cenário virtual completo e

interativo. Por outro lado, a Realidade Aumentada, enriquece a experiência do usuário, sobrepondo elementos virtuais ao ambiente físico, realizando uma integração entre ambos, sem o substituir.

A RV e a RA são ferramentas poderosas para a pesquisa e o desenvolvimento em diversas áreas. Engenheiros podem projetar e testar protótipos em ambientes virtuais, arquitetos podem visualizar projetos em escala real antes da construção, e médicos podem utilizá-las tanto para a realização de procedimentos cirúrgicos, como ferramentas de simulação para o ensino e treinamento. Dentro do campo neurocirúrgico, a utilização de RV e RA remonta às décadas de 1985 e 1990 respectivamente, com a criação do primeiro display aumentado para neurocirurgia craniana [Paro et al. 2022], nesse sentido, é destacável a importância da evolução das ferramentas tecnológicas e seu constante aprimoramento, visto que o desenvolvimento das mesmas proporciona a evolução contínua em outras áreas, tal como a neurocirurgia, podendo estas serem adaptadas e manipuladas para o atendimento a novas demandas e outras necessidades.

3.2.2. Perspectivas Educacionais e Cognitivas

A integração de tecnologias de RV e RA na simulação neurocirúrgica tem demonstrado um potencial significativo para aprimorar a educação médica. Conforme o trabalho de Antonio Bernardo [Bernardo 2017], muitos estudos foram realizados para avaliar o valor e as propriedades do mundo real da simulação neurocirúrgica, muitos deles concluindo que é possível obter benefícios durante o treinamento com simulação.

A possibilidade de aprendizado independente, proporcionada por novas tecnologias, emerge como um atrativo significativo para a área médica em questão. A realização e o treinamento de procedimentos cirúrgicos de maneira autônoma, a flexibilidade de tempo e espaço para o estudo e a possibilidade de imersão profunda na anatomia cerebral são fatores que podem impulsionar a escolha desta especialidade. Ao oferecer experiências de aprendizado mais interativas e personalizadas, as tecnologias de simulação como a RV e a RA podem preencher essa lacuna e despertar o interesse dos estudantes pela neurocirurgia, contribuindo para a formação de novos profissionais mais qualificados e motivados [Truckenmueller 2024].

De maneira geral, para neurocirurgias em formação, essas ferramentas podem reduzir a curva de aprendizado, melhorar a compreensão conceitual da anatomia complexa e melhorar as habilidades visuoespaciais, segundo [Bernardo 2017]. É factível, que, a inserção dessas tecnologias contribui significativamente para uma nova abordagem, ou ao menos como um fator adicional de estudo e treinamento, assim como já afirma [Bernardo 2017]. Além disso, a maioria dos estudantes, residentes e diretores pesquisados acredita que a simulação cirúrgica é uma ferramenta útil para complementar as formas tradicionais em pacientes e cadáveres.

Em síntese, embora ambas as tecnologias apresentem um grande salto no campo da educação médica, propondo diversas melhorias ao aprendizado, seu uso deve ser criterioso, integrando-se de maneira equilibrada ao currículo neurocirúrgico para garantir que os futuros profissionais recebam uma formação holística junto ao desenvolvimento de competências sutis, como o julgamento clínico e o manejo de imprevistos cirúrgicos, assim, cabe-se uma análise crítica contínua quanto à real eficiência e ao impacto no longo prazo sobre a qualidade do ensino aplicado.

3.2.3. Experiência do Usuário e Interação

O desenvolvimento de um ambiente de simulação neurocirúrgica realista, que englobe a experiência tátil e se adapte dinamicamente a fatores como fadiga, cansaço e complicações intraoperatórias, representa um desafio significativo na implementação de sistemas de RV e RA. Assim como destacado por [Bernardo 2017] simuladores cirúrgicos ideais devem oferecer uma representação estereoscópica visual da realidade e um feedback háptico envolvente para garantir um cenário realista para a prática e o ensaio de procedimentos cirúrgicos complexos.

Um estudo conduzido por [Petrone 2022] investigou a eficácia de um simulador neurocirúrgico híbrido, integrando Realidade Aumentada (RA) e impressão 3D, como ferramenta para o treinamento de residentes. Com a participação de 30 residentes, sob supervisão de neurocirurgiões seniores, o workshop abrangeu simulações de craniotomia, manipulação de estruturas neurovasculares e fechamento da dura-máter, utilizando de abordagens como pterional, temporal, retrosigmoide, etc. A avaliação, baseada em questionários de usabilidade e eficácia aplicados por meio da escala de Likert, indicou que 89% dos participantes consideraram o simulador altamente eficaz para o aprimoramento da orientação espacial e da compreensão anatômica. Além disso, a análise estatística revelou um índice de aprovação geral de 80,9%, considerando fatores como integração ao ambiente cirúrgico, desenvolvimento de habilidades de neuronavegação e aumento da confiança dos residentes. Esses achados demonstram o potencial dessa tecnologia como ferramenta complementar no aprimoramento da capacitação médica.

Destarte, o impacto das tecnologias de RV e RA no aprendizado neurocirúrgico é evidente, oferecendo um ambiente de treinamento imersivo que favorece o aprimoramento das habilidades técnicas e o aumento da confiança dos residentes. Apesar das limitações técnicas já expostas, os benefícios proporcionados por essas ferramentas são claros, consolidando-as como recursos valiosos no ensino neurocirúrgico moderno. Com ajustes contínuos, essas tecnologias têm o potencial de redefinir as práticas educativas da respectiva área, aumentando a segurança e a eficiência na formação dos futuros cirurgiões.

3.2.4. Aplicações Clínicas e Simulação

Dentro do ambiente de aplicações clínicas reais voltados à neurocirurgia, diversas tecnologias ao redor do mundo já foram projetadas para auxiliar tanto nos procedimentos cirúrgicos, quanto na educação de estudantes e residentes. Plataformas como a NeuroVR, desenvolvida pelo Conselho Nacional de Pesquisa do Canadá (NRC) em colaboração com hospitais universitários no Canadá, Estados Unidos, Europa e Ásia, permitem que os usuários visualizem em 3D uma anatomia humana simulada e interajam com ela usando instrumentos virtuais que proporcionam sensações táteis. Outra grande característica de respectivas aplicações, de forma geral, trata-se da possibilidade de inúmeras repetições dos módulos cirúrgicos disponíveis, o que é favorável para acumular horas de prática [Mishra 2022]. Ainda aplicado a RV, outro sistema, o ImmersiveTouch, permite realizar planejamentos operacionais e pré-operatórios, o mesmo, ainda é capaz de gerar uma reconstrução em 3D da anatomia do paciente, o que auxilia ao estudante compreender não somente a anatomia trabalhada mas também as nuances patológicas.

Em particular, a neurocirurgia, como especialidade, depende intensamente do uso de imagens para o planejamento pré-operatório e para a neuronavegação durante a cirur-

gia. Atualmente, os sistemas de neuronavegação exibem imagens 2D — nas vistas coronal, sagital e axial — em uma tela de computador, o que restringe a percepção completa do campo operatório. Para efeitos de interpretação, o cirurgião deve ser capaz de transferir o processo de navegação em amostragem 2D para 3D, todavia, essa prática interrompe significativamente o fluxo cirúrgico, pois obriga o neurocirurgião a alternar constantemente entre a tela do computador e o campo operatório.

O uso da neurocirurgia guiada por imagem (IGNS) desempenha um papel crítico na obtenção da ressecção máxima de tumores cerebrais, entretanto, isso ainda exige que o cirurgião realize uma integração mental das imagens, formando uma representação tridimensional unificada. Estudos demonstram que a Realidade Aumentada pode transformar esse processo ao integrar projeções diretamente na superfície craniana, aprimorando a navegação intraoperatória e reduzindo a carga cognitiva do cirurgião. O planejamento cirúrgico, ao integrar projeções navegacionais diretamente na superfície craniana durante o procedimento, assim como destacado por [Jean et al. 2022] e [Cannizzaro 2022], evidencia que, essa abordagem permite não apenas uma orientação mais intuitiva, mas também a replicação precisa de planos cirúrgicos previamente estabelecidos, representando um avanço significativo na precisão e eficácia dos procedimentos.

Dessa maneira, evidencia-se que a aplicabilidade das tecnologias de RV e RA no aprimoramento do planejamento e da execução de procedimentos neurocirúrgicos consolida essas ferramentas em ambientes cirúrgicos reais, reforçando sua relevância não apenas como suporte intraoperatório, mas também como recurso essencial no treinamento de estudantes e na formação de residentes. A possibilidade de replicação controlada de procedimentos e a imersão em simulações de alta fidelidade demonstram seu potencial para otimizar tanto a aprendizagem quanto a precisão cirúrgica, permitindo sua integração abrangente em ambas as abordagens.

3.2.5. Custos e Acessibilidade

As tecnologias de RV e RA apresentam um potencial significativo para a educação e treinamento em neurocirurgia. No entanto, a implementação dessas ferramentas em larga escala ainda enfrenta obstáculos consideráveis, principalmente relacionados aos custos elevados e à limitada acessibilidade dos equipamentos e softwares especializados necessários para o desenvolvimento de simulações realistas. Vários grupos em diferentes partes do mundo já se esforçaram para desenvolver sistemas sofisticados de RV que simulam com elegância os procedimentos cirúrgicos em um ambiente virtual. Os trabalhos e resultados iniciais com simuladores cirúrgicos virtuais são animadores, embora ainda existam problemas de reprodução fiel do feedback háptico anatômico generalizado, resolução e qualidade de imagens e som, respectivamente [Mishra 2022]. Embora a maioria dos sistemas produzam uma experiência 3D, esses sistemas até agora se mostraram caros devido à complexidade do hardware e do software do computador e não são facilmente acessíveis ou convenientes [Bernardo 2017].

Ademais, a infraestrutura necessária para suportar esses sistemas, como servidores de alto desempenho e suporte técnico especializado, muitas vezes exige investimentos contínuos, o que pode ser um desafio para instituições com recursos limitados. Com a constante evolução dessas tecnologias impõe-se a necessidade de atualizações regulares, o que pode tornar a manutenção ainda mais onerosa. Outro ponto a ser considerado é a

falta de padronização entre os diferentes sistemas de RV e RA, o que pode dificultar a integração entre plataformas e a criação de um currículo de treinamento universal.

3.2.6. Limitações

Embora as tecnologias de RV e a RA tenham uma aplicação significativa para o cumprimento em um contexto médico complexo como a neurocirurgia, algumas outras considerações emergem como critérios à sua aplicabilidade. Em vista disso, conforme pontuado por [Hey 2023], a precisão e a exatidão dos procedimentos cirúrgicos podem ser afetadas por dificuldades na percepção de profundidade, discrepâncias entre os estímulos visuais e táteis, bem como por limitações técnicas, incluindo a deformação dos tecidos e imprecisões nos sistemas de rastreamento para os sistemas de RA. Além disso, a resposta emocional do cirurgião diante de situações críticas, como a perda de um paciente ou a ocorrência de complicações inesperadas durante o procedimento, não é adequadamente replicada por essas tecnologias. A RV ainda não é capaz de criar o estresse associado à cirurgia ou às sequelas fisiológicas concomitantes e à intervenção de tratamento necessária que acompanham, por exemplo, uma hemorragia grave ou um inchaço cerebral perigoso [Bernardo 2017].

Em segundo plano, a necessidade de um sistema fielmente responsivo e integrado, capaz de simular com precisão as nuances da neurocirurgia, exige um avanço considerável nas tecnologias atuais. Além disso, a questão do ciber enjoo, associada à imersão prolongada em ambientes virtuais, emerge como um obstáculo a ser superado, uma vez que a neurocirurgia demanda atenção constante e concentração por longos períodos. Outros fatores, como a complexidade da anatomia cerebral e a necessidade de uma interface intuitiva, também contribuem para a complexidade do desenvolvimento de tais sistemas. Tal como destacado por [Bernardo 2017], sem um feedback responsivo, instrutivo e útil, o valor educacional dos simuladores torna-se dependente do auxílio de um instrutor.

Diante dessas limitações, a promoção de plataformas de desenvolvimento em código aberto, aliada à utilização de dispositivos mais acessíveis com desempenho intermediário, representa um caminho promissor para reduzir custos operacionais. Além disso, colaborações entre centros de pesquisa e instituições públicas podem viabilizar o compartilhamento de infraestrutura tecnológica, favorecendo a inserção dessas ferramentas em ambientes de ensino com restrições orçamentárias, sem comprometer a qualidade do treinamento.

4. Considerações Finais

A presente pesquisa teve como objetivo analisar a integração das tecnologias de Realidade Virtual e Realidade Aumentada na neurocirurgia, evidenciando seu impacto educacional e prático, tanto nos procedimentos cirúrgicos quanto na formação de estudantes e residentes. Contudo, os estudos analisados também reconhecem obstáculos significativos que ainda impedem a plena incorporação dessas ferramentas ao treinamento e à prática clínica. Em primeiro lugar, os elevados custos associados ao hardware e ao software especializado limitam sua adoção em instituições com orçamentos restritos. Além disso, a fidelidade háptica continua insuficiente para reproduzir com realismo as sensações motoras necessárias em procedimentos complexos, enquanto a falta de integração eficiente entre sistemas de RV/RA e plataformas de neuronavegação gera sobrecarga operacional.

Finalmente, a carência de testes controlados em ambientes clínicos reais deixa

em aberto a transferência efetiva de competências do simulador para o bloco cirúrgico. Reconhecer essas limitações, todas apontadas pelos próprios autores, é fundamental para orientar futuras melhorias tecnológicas e estratégias de validação que consolidem a RV e a RA como recursos verdadeiros e confiáveis no ensino e na prática da neurocirurgia.

Referências

- Bernardo, A. (2017). Virtual reality and simulation in neurosurgical training. *World Neurosurgery*.
- Cannizzaro, D. e. a. (2022). Augmented reality in neurosurgery, state of art and future projections. a systematic review. *Frontiers in Surgery*.
- Hey, G. e. a. (2023). Augmented reality in neurosurgery: A new paradigm for training. *Medicina*.
- Jean, W. C., Sack, K. D., and Tsen, A. R. (2022). Augmented-reality template guided transorbital approach for intradural tumors. *Neurosurgical Focus: Video*.
- Mishra, R. e. a. (2022). Virtual reality in neurosurgery: Beyond neurosurgical planning. *International Journal of Environmental Research and Public Health*.
- Paro, M. R., Hersh, D. S., and Bulsara, K. R. (2022). History of virtual reality and augmented reality in neurosurgical training. *World Neurosurgery*.
- Petrone, S. e. a. (2022). Virtual-augmented reality and life-like neurosurgical simulator for training: First evaluation of a hands-on experience for residents. *Frontiers in Surgery*.
- Truckenmueller, P. e. a. (2024). Augmented 360° three-dimensional virtual reality for enhanced student training and education in neurosurgery. *World Neurosurgery*.
- Whittemore, R. and Knafl, K. (2005). The integrative review: Updated methodology. *Journal of Advanced Nursing*.