PAULO MUGGLER MOREIRA

TECNOLOGIAS IMERSIVAS NA EDUCAÇÃO:
ESTUDOS DE CASO DE APLICAÇÃO DE
REALIDADE VIRTUAL PARA APRENDIZADO E
TREINAMENTO NA EDUCAÇÃO SUPERIOR

São Paulo

2021

PAULO MUGGLER MOREIRA

TECNOLOGIAS IMERSIVAS NA EDUCAÇÃO:
ESTUDOS DE CASO DE APLICAÇÃO DE
REALIDADE VIRTUAL PARA APRENDIZADO E
TREINAMENTO NA EDUCAÇÃO SUPERIOR

Versão Corrigida

Dissertação apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para obtenção
do título de Mestre em Ciências.

Área de Concentração Engenharia da
Computação

Orientador: Prof. Dr. Romero Tori

São Paulo
2021

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 19 de Abril de 2021

Assinatura do autor:

Assinatura do orientador:

Catálogo na publicação

Moreira, Paulo

TECNOLOGIAS IMERSIVAS NA EDUCAÇÃO: ESTUDOS DE CASO DE APLICAÇÃO DE REALIDADE VIRTUAL PARA APRENDIZADO E TREINAMENTO NA EDUCAÇÃO SUPERIOR / P. Moreira -- versão corr. -- São Paulo, 2020.

170 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Computação e Sistemas Digitais.

1.Realidade Virtual 2.Avaliação 3.Simulador Imersivo I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Computação e Sistemas Digitais II.t.

Nome: Moreira, Paulo

Título: Tecnologias Imersivas Na Educação: Estudos De Caso De Aplicação De Realidade Virtual Para Aprendizado E Treinamento Na Educação Superior

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Aprovado em: 24/02/2021

Banca Examinadora

Prof.(a) Dr.(a): _____

Instituição: _____

Julgamento: _____

Prof.(a) Dr.(a): _____

Instituição: _____

Julgamento: _____

Prof.(a) Dr.(a): _____

Instituição: _____

Julgamento: _____

Agradecimentos

Meus agradecimentos especiais à minha colega Elen Collaço, pela sua valiosa assistência e contribuições oferecidas ao longo de toda a duração deste projeto. A Cléber Gimenez Corrêa e Fátima Nunes, pela concepção e desenvolvimento do simulador ortodôntico Vimet Odonto, que foi a pedra fundamental para o desenvolvimento posterior do VIDA Odonto. A Gustavo Wang, Lucas Sallaberry, Elen Collaço de Oliveira, Maria Aparecida de Andrade Moreira Machado, e Allan Amaral Tori pelo desenvolvimento e aprimoramento continuados do simulador VIDA Odonto. A Allan Amaral Tori, Kim Tanabe, Maria Aparecida de Andrade Moreira Machado, Susy Amantini e Sileide Paccola, pela modelagem 3D anatomicamente precisa da cabeça humana utilizada no simulador VIDA. A todos colegas do Interlab Poli/USP, Lapis EACH/USP e do Lasit FOB/USP. Somos gratos também aos participantes do experimento, que voluntariaram o seu tempo e as suas opiniões em nossa pesquisa ao participarem e completarem os questionários. Por último, ao prof. Dr. Romero Tori, meu orientador neste projeto, sem o qual nada disto teria sido possível. Meus sinceros agradecimentos.

RESUMO

As tecnologias de Realidade Virtual (RV) são cada vez mais acessíveis financeiramente, mas também em sua ergonomia, usabilidade, e barreiras técnicas de implementação, manutenção e uso. Pretendemos aqui explorar o potencial dos ambientes imersivos baseados em RV na educação de uma forma geral, tanto para uso instrucional quanto para treinamento, pela possibilidade de colocar os alunos em contato com os conteúdos pertinentes em contextos realistas, a um baixo custo e de forma segura. Para que o seu uso na educação se dê de forma adequada e eficaz, cabe ao meio acadêmico construir argumentos que evidenciem os impactos, potencialidades e limitações do uso destas tecnologias. Visando contribuir com esta construção, realizamos aqui dois estudos de caso, um deles no contexto de uma aula imersiva em sala de aula (Aula Imersiva) e o outro no formato de um treinamento imersivo individual (Treinamento Imersivo).

Para a aula imersiva desenvolvemos o conteúdo "Modelos de Iluminação em Computação Gráfica", e para o treinamento imersivo utilizamos o simulador de anestesia odontológica "VIDA Odonto", ambos desenvolvidos no Interlab-USP, com a colaboração do autor e dos demais integrantes da equipe do laboratório.

Procuramos explorar correlações entre presença e graus de uso de mídia imersiva, tanto em uma aula expositiva quanto em uma atividade de treinamento prático, bem como estabelecer métricas e atribuir medidas a outros fatores de relevância para a experiência de aprendizado, como a ergonomia e usabilidade dos dispositivos aplicados.

Palavras-chave: realidade virtual, educação, treinamento, ambientes virtuais, imersão, presença.

ABSTRACT

Virtual Reality technologies are becoming more accessible, in terms of financial costs, but also considering ergonomical and technical barriers for their implementation and use. Therefore, we intend here to explore the potential of VR-based immersive environments as resources for both instructional and training uses in general, as those offer possibilities to place students in realistic virtual contexts, at a low cost and in a safe manner. And to contribute so that the use of immersive technologies in education is done in adequate and effective ways, it befalls the academic community to produce studies that highlight impacts, potentials and limitations in the use of these technologies for educational purposes. Aiming to contribute to this body of research, this project has conducted two case studies, one in an immersive lecture format (Immersive Lecture), and another as an immersive training format (Immersive Training).

For the Immersive Lecture study, the content "Illumination Models in Computer Graphics" was developed, while for the Immersive Training study, the dental anesthesia simulator "VIDA Odonto" was utilized. Both environments were developed at Interlab-USP with the author's participation.

In these studies we aim to explore possible effects on the perception of presence when different degrees of immersive media and user interfaces are applied, as well as to establish metrics and attribute measurements to other relevant factors to the learning experience, such as the ergonomics and usability of the tools.

Keywords: virtual reality, education, training, virtual environments, immersion, presence.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Arquitetura genérica de um sistema RV.....	24
Figura 3.1.1 - Publicações em RV entre Jan/2015 e Ago/2019.....	56
Figura 3.1.2 - Finalidade das publicações analisadas	57
Figura 3.1.3 - Contexto de aplicação das publicações com fins educacionais.....	58
Figura 3.1.4 - Tipos de instrumentos de imersão mais utilizados na educação.....	59
Figura 3.1.5 - Tipos de HMD mais utilizados na educação.....	60
Figura 3.1.6 - Instrumentos de medição experimental mais utilizados na educação.....	61
Figura 3.2.1 - Fluxograma da revisão literária.....	65
Figura 4.1.1 - Ilustração de um visualizador de RV Google Cardboard.....	82
Figura 4.1.2 - Ilustração de conceito do ambiente virtual da Aula Imersiva.....	84
Figura 4.1.3 - Elementos do primeiro protótipo do ambiente virtual.....	85
Figura 4.1.4 - Captura de tela do protótipo em operação.....	86
Figura 4.1.5 - Dimensões de diegese e espacialidade das Interfaces Gráficas de Usuário.....	87
Figura 4.1.6 - Versão inicial da UI da Aula Imersiva.....	88
Figura 4.1.7 - Versão pseudo-imersiva do conteúdo da aula.....	89
Figura 4.1.8 - Aplicativo para a aula em RV disponível na Google Play Store.....	90
Figura 4.1.9 - Fluxograma da metodologia experimental.....	94
Figura 4.1.10 Participante da primeira rodada utilizando um visualizador VR.....	94
Figura 4.2.1 Consultório odontológico virtual dentro do AVI VIDA Odonto.....	96
Figura 4.2.2 Imersão de uma estudante no ambiente virtual VIDA Odonto.....	97
Figura 4.2.3 Parâmetros da avaliação automática de performance.....	98
Figura 5.1.1 Resultados da análise do Experimento Aula Imersiva.....	104
Figura 5.1.2 - Comentários negativos dos participantes da Aula Imersiva.....	107
Figura 5.2.1. Tempo de conclusão da tarefa, em segundos.....	110
Figura 5.2.2. Pontuação final no procedimento.....	111
Figura 5.2.3. Sintomas adversos reportados.....	111
Figura 5.2.4. Pontuação de usabilidade da interação com a seringa.....	112
Figura 5.2.5. Percepção de presença auto-reportada.....	112
Figura 6.1 Interface de usuário aprimorada da Aula Imersiva.....	123

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.2.1 - Fatores humanos potenciais do uso de RV.....	42
Tabela 4.1.1 - Competências e Habilidades Abordadas pela Aula Imersiva.....	84
Tabela 4.1.2 - Itens do questionário de presença dos grupos A e B.....	92
Tabela 4.2.1. Grupos de Questões do Questionário de Presença e Exemplos.....	102
Tabela 4.2.2 Questões Discursivas.....	102
Tabela 5.1.1 Comentários livres dos participantes da Aula Imersiva	106
Tabela 5.2.1 Comentários livres dos participantes do Treinamento Imersivo.....	114

LISTA DE ABREVIACÕES

RV - Realidade Virtual

AVI - Ambiente Virtual Imersivo

ANOVA - *Analysis of Variance*

BYOD - *Bring Your Own Device*

RVI - Realidade Virtual Imersiva

CG - Computação Gráfica

HMD - Head-Mounted Display

CAVE - Cave Automatic Virtual Environment

VIDA - *Virtual Interactive Distance-learning on Anatomy*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 Objetivos	16
1.2 Justificativas	16
1.3 Organização do Documento	16
2 FUNDAMENTOS CONCEITUAIS	19
2.1 Realidade Virtual	19
2.1.1 Imersão e Presença em Realidade Virtual	22
2.2 Arquitetura De Sistemas RV, Hardware e Software	24
2.2.1 Dispositivos de Entrada	26
2.2.1.1 Atuadores Mecânicos	26
2.2.1.2 Rastreadores Inerciais	27
2.2.1.3 Rastreadores Espaciais	28
2.2.1.4 Interfaces Neurais	29
2.2.2 Dispositivos de Saída	30
2.2.2.1 Estímulos Visuais	30
2.2.2.2 Estímulos Auditivos	33
2.2.2.3 Estímulos Inerciais	35
2.2.2.4 Estímulos Hápticos	36
2.2.2.5 Estímulos Olfativos	37
2.2.2.6 Estímulos Gustativos	38
2.2.3 Software para Tempo de Execução	39
2.2.3.1 Leitura de dispositivos de entrada	39
2.2.3.2 Instanciação e atualização do modelo simulado	39
2.2.3.3 Transformação dos Dados para Renderização	40
2.2.4 Software de Apoio em Tempo de Desenvolvimento	41
2.3 Implicações de Saúde e Segurança do Uso de RV	42
2.3.1 Fatores de influência na saúde e seus impactos	43
2.4 Presença	46
2.4.1 Métodos Para Medição De Percepção De Presença	49
2.4.2 Fatores Que Influenciam A Percepção De Presença	50
2.5 Imersão	52
3 REALIDADE VIRTUAL NA EDUCAÇÃO IMERSIVA	55
3.1 Análise Bibliométrica	55
3.1.1 Crescimento no número de publicações por ano	56
3.1.2 Finalidades de Aplicação Observadas	57
3.1.3 Contextos de Aplicação	58
3.1.4 Instrumentos tecnológicos de imersão	58
3.1.5 Tipos de HMDs utilizados	60

3.1.6 Instrumentos de medição experimental.....	61
3.1.7 Conclusões da Análise Bibliométrica.....	62
3.2 Síntese do Estado da Arte.....	63
3.2.1 Resultados da Síntese.....	65
3.2.1.1 Ritmo crescente de pesquisa.....	66
3.2.1.2 Potencial percebido da tecnologia.....	66
3.2.1.3 Motivações e justificativas de adoção.....	66
3.2.1.4 Potencial dos ambientes imersivos na indústria do ensino.....	67
3.2.1.5 AVIs como ferramenta de apoio educacional.....	68
3.2.1.6 Influência de imersão e presença no aprendizado.....	69
3.2.1.7 Fatores que influenciam a percepção de presença.....	70
3.2.1.8 Medidas e Configurações Experimentais.....	71
3.2.1.9 Barreiras para adoção.....	73
3.2.1.10 Superando as Limitações da Tecnologia.....	74
3.2.1.11 Lacunas na literatura.....	77
3.2.1.12 Sumário da Revisão do Estado da Arte.....	78
4 METODOLOGIA.....	79
4.1 Aula Imersiva.....	81
4.1.1 Concepção.....	81
4.1.2 Projeto e Desenvolvimento.....	84
4.1.3 A Interface de Usuário.....	86
4.1.4 Procedimento Experimental Aula Imersiva.....	89
4.1.4.1 Protocolo de Pesquisa.....	90
4.1.4.2 Perguntas de Pesquisa.....	91
4.1.4.3 Questionário de Presença.....	91
4.1.4.4 Etapas do Procedimento Experimental.....	92
4.2 Treinamento Imersivo.....	95
4.2.1 Concepção, Projeto e Desenvolvimento.....	95
4.2.2 Procedimento Experimental Treinamento Imersivo.....	100
5 RESULTADOS.....	104
5.1 Aula Imersiva.....	104
5.1.1 Publicação de Artigo em Simpósio Nacional.....	108
5.2 Treinamento Imersivo.....	108
5.2.1 Submissão de Artigo para Periódico Internacional.....	119
6 CONCLUSÕES E DISCUSSÃO.....	120
6.1 Aula Imersiva.....	120
6.1.1 Limitações identificadas no experimento aula imersiva.....	122
6.1.2 Propostas de melhoria da Aula Imersiva.....	122
6.2 Treinamento Imersivo.....	124
6.2.1 Limitações identificadas no Treinamento Imersivo.....	127
6.2.2 Propostas de Melhoria do Treinamento Imersivo.....	129
6.3. Considerações Finais.....	131

REFERÊNCIAS.....	133
ANEXOS.....	147
ANEXO 1 - SÍNTESE DE REVISÃO LITERÁRIA.....	147
ANEXO 2 - PROTOCOLO DE ÉTICA EM PESQUISA	155
ANEXO 3 - TERMO DE CONSENTIMENTO DO PARTICIPANTE	166
ANEXO 4 - ARTIGO PUBLICADO	169

1. INTRODUÇÃO

A evolução das plataformas de Realidade Virtual (RV) para consumo de massa tem sido expressiva nos anos recentes: 2012, 2014 e 2016 foram anos particularmente marcantes neste segmento. Em primeiro lugar, 2012 foi o ano do surgimento do primeiro capacete de RV comercialmente viável para uso doméstico, em grande escala¹. Pouco tempo depois, em 2014, surge o conceito de um capacete RV que utiliza um dispositivo computacional móvel (*smartphone*) como *display*², acoplado a um capacete de papelão dobrado com um par de lentes, possibilitando o acesso a experiências simples em RV a milhares de proprietários de *smartphones* ao redor do mundo. Recentemente, a partir de 2016 observa-se lançamentos e melhorias de plataformas de RV para o mercado de consumo³ com frequência crescente: desde os mencionados visualizadores que convertem um *smartphone* acoplado em um sistema de RV de baixa imersão, até sistemas residenciais *room-scale* que convertem um aposento inteiro em um ambiente de RV de alta imersão. Sem dúvida, os últimos cinco anos marcaram a RV de forma estimulante, indicando talvez que uma fase de franca expansão no setor ainda está por vir, com novas aplicações possíveis em RV, dada a disponibilidade de novas plataformas, mais acessíveis em diversos aspectos que as configurações disponíveis até então.

Observando estes avanços sob a perspectiva de um contexto educacional, que é o foco deste trabalho de pesquisa, pode se observar alguns elementos muito interessantes no momento atual, que justificam uma exploração sistemática das aplicações de RV para seu uso na educação.

Por um lado, em aplicações voltadas ao treinamento e simulação de situações práticas, o uso de RV já é relativamente mais comum: por exemplo, simuladores para

¹ Em 2012 a Oculus, Inc., veio a público com a intenção de criar o *Oculus Rift*, um capacete de VR para o consumidor doméstico, com uma campanha de *crowdfunding* que contou com a adesão de milhares de colaboradores e angariou mais de um milhão de dólares, um sucesso sem precedentes para uma campanha desta natureza até então.

² A Google, Inc. apresentou em 2014 sua visão para uma plataforma móvel de RV de baixo custo, o *Google Cardboard*.

³ Lançamentos oficiais por parte de grandes empresas como Samsung, HTC/Valve, Sony e a própria Oculus introduziram uma gama de opções de tecnologias de RV para o consumidor comum.

treinamento de pilotos de avião consistem em uma atividade-requisito para se pilotar uma aeronave real; e muitas estratégias para ensinar as pessoas a dirigir também já começam a incorporar simuladores RV.

Por outro lado, temos toda uma geração de estudantes, que carrega um mini supercomputador no bolso, permanentemente conectado, acessando e trocando todo o tempo vídeos, imagens, mensagens de texto e outras mídias com alguns toques de um dedo. Com cada vez mais informação disponível e acessível, há de se questionar até quando o modelo de aula tradicional, limitado ao conteúdo de que o instrutor disponha e consiga comunicar no momento de aula, será capaz de motivar as próximas gerações de alunos a aprenderem durante uma aula convencional. Por outro lado, incorporar novos paradigmas tecnológicos e midiáticos a uma estratégia de ensino, de forma bem sucedida e que venha a potencializar o aprendizado dos estudantes, é certamente uma tarefa desafiadora.

As capacidades dos computadores digitais ligados em rede podem ser aproveitadas em diversos aspectos do processo de ensino, como a disponibilização e acesso a conteúdos didáticos, a aplicação e correção de exercícios e testes, o estabelecimento de progressões didáticas individualmente customizadas, a assistência ao acompanhamento do professor com relatórios e notificações, e outras mais em que se pode libertar o professor de aspectos 'menos humanos' de suas atribuições, dando-lhe instrumentos para exercer mais e melhor a função mais humana e dinâmica de sua profissão, e na qual o seu esforço pode gerar o maior benefício, que é a construção da relação professor-aluno. Ganhos de produtividade podem permitir que o docente invista mais em conhecer o processo de aprendizado individual de seus alunos, assim como ganhos de informação agregada podem ajudá-lo a visualizar estes mesmos processos, e assim intervir de forma mais pessoal e dedicada ao ajudar seus alunos a superarem suas dificuldades de aprendizado.

Assim, este trabalho de pesquisa busca abordar algumas questões sobre o uso de ferramentas de RV na educação, como: ao utilizar ferramentas de RV para introduzir conceitos e fundamentos em sala de aula, quais elementos são importantes para o seu uso bem-sucedido? E no caso de treinamento individual envolvendo habilidade motora? Qual o impacto da aplicação destas ferramentas na percepção de presença, seja em situações de sala de aula ou de treinamento individual? Além dos fatores estabelecidos acima, há uma

motivação extrínseca em se construir mais conhecimento acadêmico sobre este tema no momento, dado o ainda relativamente baixo número de estudos encontrados que abordam diretamente o uso de ferramentas de RVI *off-the-shelf* em contextos de sala de aula, especificamente para a introdução de novos fundamentos conceituais, e contextos de treinamento prático de habilidades motoras..

1.1. Objetivos

Para participar da discussão sobre o impacto de imersão ((BOWMAN; MCMAHAN, 2007)), (JERALD, 2015) e presença ((IJSELSTEIJN; FREEMAN; DE RIDDER, 2001)), (SLATER; USOH, 1993), via Realidade Virtual, em aplicações educacionais, avaliamos nesta dissertação de pesquisa duas situações de uso educacional de ferramentas de RV: a primeira, para exposição de conteúdos didáticos conceituais passíveis de representação em 3D, denominada "Aula Imersiva". A segunda aplicação é uma simulação para treinamento de técnicas odontológicas, parte do projeto "VIDA Odonto", do Interlab-USP. Buscamos avaliar os impactos da RVI em cada situação, com base em métricas estabelecidas em protocolos e as medições correspondentes obtidas em rodadas experimentais no uso destas duas ferramentas com usuários. Também apresentamos alguns detalhes sobre o processo de projeto e implementação destas ferramentas, para contribuir com estudos da viabilidade do uso em escala destes tipos de soluções em seus respectivos domínios.

1.2. Justificativas

O uso de aplicações em RV em contextos educacionais, seja como apoio instrucional para aprendizagem de conceitos ou para treinamento de técnicas, é um nicho de pesquisa que apresenta um grande potencial a ser explorado no momento atual. Os pontos focais das aplicações abordadas por este projeto, uma para aprendizagem de conceitos teóricos em situação de aula, com uso simultâneo de RVI por vários estudantes, e outra para treinamento de prática odontológica baseado inteiramente em RVI, são os estudos de caso da aplicação destas duas ferramentas elaboradas no Interlab-USP, em cujos

desenvolvimentos o pesquisador teve participação. Tais ferramentas nos permitiram avaliar impactos, limitações e potenciais da RV em dois contextos educacionais relevantes.

Os estudos sobre uma aplicação de RVI específica para a introdução de novos conceitos e fundamentos teóricos em Computação Gráfica (CG), e de uma aplicação de treinamento prático para Odontologia, terão impacto na motivação para estudos futuros com aplicações similares, em disciplinas e formatos mais diversos, e contribuirão para o consenso acadêmico em relação aos potenciais de uso deste tipo de ferramenta no ensino. A aceitação para publicação de nossos resultados preliminares deste projeto, avaliando o grau de presença envolvido em uma aula imersiva de CG (Moreira, Oliveira e Tori, 2016), também nos apontou a percepção de presença como um ponto relevante para abordagem em trabalhos futuros (Tori et al., 2016).

No entanto, não foi o foco deste trabalho obter comprovações do impacto do uso de ferramentas de RV em elementos da aprendizagem como a absorção e retenção de conhecimento, ainda que possam ter surgido evidências circunstanciais de impactos positivos nestes elementos no decorrer das pesquisas. O estabelecimento formal de impactos na aprendizagem depende de pesquisas com metodologias mais rigorosas, embasadas mais profundamente nas áreas da pedagogia, psicologia, e educação.

A contribuição maior deste trabalho é demonstrar a viabilidade destes dois modelos, o primeiro um modelo de aula conceitual baseada em ambientes virtuais imersivos em RV para aquisição de conhecimento, e o segundo um modelo para treinamento individual de procedimentos específicos para aquisição de habilidades motoras, a partir do qual eventualmente se possam realizar estudos empíricos na área da educação. Além disso, uma vez que haja certas evidências de um impacto positivo na aprendizagem pelo uso da RV, a aplicação posterior destas ferramentas desenvolvidas no Interlab como elemento integrante de disciplinas da engenharia e odontologia será beneficiada por estes estudos.

1.3. Organização do Documento

Este documento se divide em seis capítulos, mais as suas referências e anexos:

- **Capítulo 1: Introdução:** Contextualização da pesquisa, objetivos e justificativa.
- **Capítulo 2: Fundamentos Conceituais:** Exploração dos conceitos fundamentais e literatura de base nos tópicos mais relevantes a este trabalho de pesquisa.
- **Capítulo 3: Ambientes Imersivos na Educação:** Revisão de Literatura e estudos de caso do estado da arte nesta área de pesquisa.
- **Capítulo 4: Metodologia:** Exposição dos métodos empregados e resultados obtidos ao longo deste projeto, conclusões e planejamento futuro para a fase de defesa da dissertação.
- **Capítulo 5: Resultados:** Apresentação dos resultados dos estudos de caso.
- **Capítulo 6: Discussão e Conclusões:** Discussão dos resultados e apresentação das conclusões do trabalho.
- **Referências**
- **Anexos**

2. FUNDAMENTOS CONCEITUAIS

Neste capítulo vamos explorar os fundamentos conceituais, definições e consensos teóricos mais pertinentes a este projeto de pesquisa. De particular interesse para os nossos fins, abordaremos em detalhes os tópicos de RV, imersão, e presença.

2.1. Realidade Virtual

É muito provável que a maior parte das pessoas que pesquisam e se interessam por mídias em geral, e até mesmo boa parte das que não tenham este particular interesse, já tenham consciência da expressão "realidade virtual" nos dias de hoje; a interpretação particular evocada por esta expressão certamente varia entre os indivíduos, mas se pudéssemos tomar uma 'média das interpretações' correntes, seria surpreendente se, entre os fatores mais comuns nestas interpretações, não estejam os elementos de computação gráfica 3D, jogos de computador interativos, e os displays não-convencionais, vestíveis como os HMD (*Head-Mounted Displays*), ou espacialmente imersivos como as CAVE (*Cave Automatic Virtual Environment*).

Esta reflexão nos aponta de forma intuitiva o consenso atual sobre o significado de 'realidade virtual', que parece ter um de seus pilares na capacidade de uma mídia interativa de representar um ambiente tridimensional de forma mais impactante do que em mídias convencionais, por meio de imagens, sons e estímulos aos demais sentidos.

É interessante observar que uma análise puramente etimológica da expressão 'realidade virtual' não nos conduz diretamente ao seu significado mais corrente; Tori e da Silva Hounsell (2018) notam que "virtual" tem o mesmo significado de "potencial"; desta maneira, uma semente é uma árvore virtual, mas um desenho de uma árvore não é uma árvore virtual. A confusão se faz porque a árvore virtual (semente) não pode ser simultaneamente a árvore real; ela é real como semente, mas virtualiza um outro objeto, cuja existência ocorre apenas em potencial.

Se o significado etimológico de 'virtual' indica algo em potencial, que pode vir a ser aquilo que virtualiza, qual é o motivo então de termos adotado a expressão 'realidade

virtual' para designar o que se refere à construção de realismo sintético através de modelos, algoritmos e modos de renderização baseados no computador digital?

Certamente, uma renderização 3D de um objeto ou ambiente não necessariamente carregará o potencial de vir a ser o ambiente de fato, não obstante o grau de realismo representacional encerrado na imagem final. Isto é, a renderização 3D, embora possa ser virtual da sua materialização em alguns casos (e.g. a impressão 3D de um modelo estático, ou um projeto arquitetônico), não o pode ser no caso geral (e.g. personagens fantásticas com animações, avatares, personagens controlados pelo computador).

Poderíamos elencar a simples coincidência na escolha inicial do termo "virtual" como causa da sua adoção, tendo prevalecido este novo sentido por pura inércia? Ora, esta nos parece uma explicação insatisfatória; se assim fosse, possivelmente outras designações haveriam surgido, que eventualmente suplantariam uma designação menos do que ideal. O fato de que a expressão "realidade virtual" é assim utilizada na sua forma corrente, para nós indica que esta é, de fato, a mais aproximada em seu sentido ideal para designar aquilo a que se refere este tipo de mídia.

Mas então, se o sentido de "virtual" na expressão "realidade virtual" de fato se aproxima do seu sentido etimológico original, cabe a questão: qual é o elemento da realidade virtual que apresenta o potencial de se tornar de fato aquilo que representa? É uma realidade "virtual", mas qual é o objeto concreto que está por esta virtualizado? Se não é necessariamente o correspondente material do que está representado, fica evidente então que o potencial (virtual) da realidade virtual está encerrado de alguma outra forma, distinta da possibilidade irrestrita de materialização física.

Resta o potencial de vir a ser perceptual; isto é, a realidade é virtual não pelo potencial de manifestar materialmente aquilo que representa, mas pelo potencial de manifestar estes objetos perceptualmente, alimentando os sentidos do indivíduo para criar a sua percepção de forma cada vez menos distinguível de como seriam percebidos os correspondentes reais destes objetos virtuais. As definições de virtual e real em Tori e da Silva Hounsell (2018) capturam este sentido de imaterialidade e relação com a percepção individual:

“Virtual se refere a ambientes ou elementos que são sintetizados por meio de dispositivos digitais e que podem ser replicados de forma imaterial”.

“Real se refere a ambientes ou elementos que o usuário considere como sendo pertencentes à sua realidade.”

É evidente que a terminologia em voga encerra alguma ambiguidade; podemos dizer, por exemplo, dos arquivos digitais que modelam um ambiente imersivo, residindo na memória do computador, que estes compõem uma realidade virtual, se ainda não se encontram renderizados pelos dispositivos de saída? Para melhor distinguir as entidades relevantes, poderíamos denominar os arquivos digitais, algoritmos, e etc., que definem um ambiente sintético imersivo, de "realidade sintética digital", destacando o fato de ser uma 'realidade construída', com suporte nas mídias digitais. Esta realidade sintética, ao ser renderizada em dispositivos de saída, poderia então ser denominada uma "realidade sintética virtual", pois ao se imprimir sobre os sentidos humanos, guarda o potencial de vir a ser percebida como real. De toda forma o uso do termo Realidade Virtual já se encontra consolidado na linguagem corrente, e será usado ao longo deste documento conforme as definições apresentadas, não obstante quaisquer ambiguidades em seu uso corrente.

Apesar dos primeiros resultados que formaram a base deste campo de conhecimento terem surgido nas décadas de 50 e 60 (HEILIG, 1962a, 1962b; SUTHERLAND, 1964, 1965), foi na década de 80 que Jaron Lanier e seus contemporâneos cunharam a expressão 'realidade virtual' (BIOCCA; LEVY, 1995), capturando com muita expressividade a proposta fundamental desta nova área: a apresentação de estímulos sensoriais que representam ambientes e objetos de forma imaterial (virtual), com o intuito de tornar a sua percepção estimulada indistinguível da percepção (real) que seria evocada pelos paralelos reais destes objetos.

Esta proposta fundamental de indistinguibilidade entre as percepções do material e do imaterial parece pressupor a existência de algum aparato tecnológico para transmissão de informação pelo estímulo dos sentidos humanos, isto é, uma mídia; pois, à exceção de condições psiquiátricas ou outras alterações fisiológicas induzidas no sistema nervoso

humano, para provocar artificialmente percepções indistinguíveis do real em condições normais podemos pressupor não apenas a existência de um suporte tecnológico, mas também que um aparato tecnológico com alto grau de sofisticação técnica é necessário, dada a escala de abrangência e resolução dos sentidos humanos, bem como dos estímulos a que estes são sujeitos na realidade.

De fato, muitas definições da expressão 'realidade virtual' não deixam de incluir o computador digital como elemento fundamental para esta mídia. Para (TORI; KIRNER; SISCOUTTO, 2006), a Realidade Virtual (RV) é, "antes de tudo, uma “interface avançada do usuário” para acessar aplicações executadas no computador [...]”;

Já (JERALD, 2015) apresenta uma definição adotada por (TORI; DA SILVA HOUNSELL, 2018), e também por nós no decorrer deste trabalho: “Realidade Virtual é definida como um ambiente digital gerado computacionalmente que pode ser experienciado de forma interativa como se fosse real.”

2.1.1. Imersão e Presença em Realidade Virtual

Ainda que nos aprofundemos nestes dois conceitos em tópicos específicos mais adiante neste mesmo capítulo, interessa abordar de forma preliminar os conceitos de imersão e presença, para que se torne mais clara a distinção feita a seguir entre Realidade Virtual e Realidade Virtual Imersiva. Imersão e Presença são duas dimensões essenciais das experiências em Realidade Virtual, e são termos encontrados frequentemente na literatura, mas com uso pouco definido, às vezes até contraditório, e por vezes de forma intercambiável (SLATER, 2003).

Por enquanto vamos nos restringir a formular uma distinção clara entre estes dois termos, para que possamos passar a utilizá-los de forma objetiva, ortogonal e livre de ambiguidades. Nos tópicos posteriores deste capítulo passaremos a uma discussão mais aprofundada. Baseado em (SLATER; WILBUR, 1997), Tori e da Silva Hounsell (2018) enunciam a seguinte distinção:

"Imersão se refere a quão preciso determinado sistema computacional é ao prover ao usuário a ilusão de uma realidade diferente daquela na qual este se encontra, ou seja, é o

nível objetivo em que um sistema de RV envia estímulos aos receptores sensoriais do usuário. (Slater e Wilbur, 1997). Portanto, é possível mensurar e comparar a qualidade imersiva de sistemas de RV.", e

"Presença é um estado de consciência: a percepção psicológica que o usuário tem de estar no ambiente virtual (Slater; Wilbur 1997). Por ser uma percepção subjetiva é muito difícil fazer uma avaliação objetiva de quão presente um usuário está se sentindo em determinado ambiente."

Esta distinção basta para definir o que denominamos Realidade Virtual Imersiva (RVI) no restante deste texto: sistemas de RV que, além da apresentação de um ambiente digital interativo gerado computacionalmente (JERALD, 2015), empregam tecnologias de renderização e controle que propiciem graus de imersão mínimos. Para nossos fins, será considerado em alto grau de imersão o sistema que possuir no mínimo as seguintes características:

- Tecnologia de imersão visual por displays fixos com alto campo de visão ($>120^\circ$), ou por HMDs;
- Ponto de vista virtual controlado por rastreamento de movimentação da cabeça do usuário (*head-tracking*);
- Dispositivos de entrada voltados aos modos de interação naturais do corpo humano, como: rastreamento do olhar, joysticks e *trackers* rastreados espacialmente, controladores customizados com resposta háptica, detecção de gestos baseada em visão computacional, entre outros.

2.2. Arquitetura De Sistemas de RV

A arquitetura geral de um sistema de realidade virtual pode ser exemplificada pelo diagrama na figura a seguir, inspirado no modelo de arquitetura descrito em (TORI; DA SILVA HOUNSELL, 2018):

Figura 2.1 Arquitetura genérica de um sistema RV (Fonte: O autor)

Este diagrama representa de forma estática os elementos de um sistema RV e a sua relação entre si em um dado instante no tempo. Como é típico nos sistemas digitais

interativos, o usuário final é o elemento de retroalimentação não-determinístico, criando o fecho entre entrada, processamento, e saída dos dados. Dinamicamente, a cada subdivisão do tempo de simulação, usualmente denominada um quadro (*frame*), ocorrem a leitura dos dispositivos de entrada, a atualização de estado da simulação, a leitura e/ou gravação de dados de modelo, e a renderização sensorial, que será recebida e processada pelo usuário, que poderá atualizar a sua atitude em relação aos dispositivos de entrada, ocasionando uma atualização no modelo simulado, e assim por diante. Este ciclo deve acontecer dezenas de vezes por segundo para que uma boa ilusão perceptual de interatividade seja estabelecida e mantida (CARD; MORAN; NEWELL, 1983) (CARD; NEWELL, 1986).

Esta manutenção da taxa de atualização é um desafio técnico fundamental ao se considerar o projeto e desenvolvimento em RV, pois determina o compromisso entre a fidelidade da simulação possível e as capacidades das plataformas de RV disponíveis. A quantidade e diversidade de processos dentro do ciclo apresentado que devem ocorrer de forma interativa, ou seja, a uma frequência mínima, faz com que esta manutenção da taxa de quadros se apresente de forma diversa para cada componente tecnológico considerado.

A taxa de atualização de um display visual, por exemplo, depende das propriedades físicas dos seus componentes eletrônicos; na simulação do ambiente virtual, a taxa dependerá da complexidade computacional dos algoritmos de software envolvidos, e do hardware computacional utilizado, como processadores, placas de vídeo, e chips de memória. Nos dispositivos de entrada, a taxa de atualização também é muito importante; para o rastreamento de cabeça, por exemplo, houve limitações neste sentido que levaram à aplicação de técnicas de predição do movimento de cabeça, para obter uma atualização mais fluida do ponto de vista simulado (KIRULUTA; EIZENMAN; PASUPATHY, 1997).

Na prática, sempre haverá algum grau de degradação da percepção de interatividade do ambiente real para um ambiente virtual. (TORI; DA SILVA HOUNSELL, 2018) sintetizam este compromisso dizendo que "o ambiente computacional deverá ser tal que consiga coordenar a visualização e os sinais de entrada e saída em tempo real com uma degradação aceitável".

Os dispositivos de hardware podem variar bastante entre implementações de RV, mas, essencialmente, encontraremos atuadores físicos e suas interfaces digitais para leitura nos canais de entrada; computadores digitais processando os dados e atualizando o modelo virtual; e os canais de saída emitindo os estímulos sensoriais suportados.

A simulação digital dos ambientes virtuais em RV, e seus arquivos e dados são executados e mantidos por computadores digitais, utilizando processadores gráficos e de uso geral sem diferenças fundamentais em relação a outros tipos de simulação digital. Uma das principais considerações para este aspecto dos sistemas RV é a seleção de componentes que possam suportar a taxa de atualização mínima para percepção de interatividade, de acordo com o grau de fidelidade desejado para a simulação. Vamos nos focar a seguir nos elementos mais particulares aos sistemas de RVI, que são os seus dispositivos não-convencionais de entrada e saída.

2.2.1. Dispositivos de Entrada

Para obter um alto grau de imersividade, é desejável que uma plataforma de RV integre canais de entrada diversos, que se aproximem da forma como os seres humanos interagem naturalmente com o ambiente real. Daremos uma visão geral dos tipos mais usuais de entrada em aplicações de RV.

É comum que atualmente os desenvolvedores de plataformas de RV combinem estas entradas em dispositivos e sistemas que oferecem vários modos de interação simultaneamente, como os joysticks controladores do HTC Vive ((DEMPSEY, 2016)), que junto às suas estações-base de rastreamento óptico combinam atuadores mecânicos, rastreadores inerciais e rastreadores ópticos.

2.2.1.1. Atuadores Mecânicos

A interação com sistemas digitais pela transdução digital de um sinal mecânico em elétrico, isto é, o apertar de um botão, é provavelmente a forma mais direta, consistente e intuitiva de se implementar interfaces homem-máquina. Não à toa vem sendo utilizada

pelo menos desde o surgimento dos telégrafos elétricos; e os mouses e teclados ainda são as formas quintessenciais de interagirmos com os computadores digitais. As telas sensíveis a toque, cada vez mais disseminadas, por sua vez também se baseiam nos mesmos princípios de atuação eletromecânica, e implementam paradigmas de interação semelhantes aos botões e sensores típicos dos dispositivos físicos.

Porém o uso de teclados, mouses, e telas sensíveis a toque apresenta limitações críticas para aplicações de RV, por serem pouco portáteis ou exigirem que o usuário possa enxergá-los para o seu uso adequado. É mais usual que encontremos atuadores mecânicos em aplicações de RV na forma de joysticks manipulados com as mãos, que integram um conjunto de botões e outros sensores em um pacote ergonômico e de manipulação mais fluida, permitindo uma interatividade mais fluida, ainda que o usuário não possa enxergá-lo; pois a percepção háptica do joystick basta para que este possa utilizá-lo confortavelmente.

Os atuadores mecânicos são tipicamente limitados a um ou dois graus de liberdade por atuador, por limitações de construção (GAO et al., 2002). Porém podemos encontrar atuadores específicos com mais graus de liberdade ((SILVA et al., 2009)), embora ainda possam ser considerados menos ergonômicos, portáteis e de uso menos geral do que os joysticks típicos.

Apresentam diversas vantagens, e poucas limitações além da dificuldade prática em se construir atuadores mecânicos de mais do que dois graus de liberdade. Como vantagens podemos citar: o modo de interação natural para o ser humano, que é a manipulação de objetos concretos; a precisão, consistência e baixa latência de resposta das entradas por atuadores; e seus baixos requisitos de energia.

2.2.1.2. Rastreadores Inerciais

Este tipo de dispositivo de entrada utiliza uma combinação de sensores como acelerômetros, giroscópios e magnetômetros ((KOK; HOL; SCHÖN, 2017; MEINA; RYKACZEWSKI; RUTKOWSKI, 2016) para produzir uma estimativa de orientação e aceleração de um corpo no espaço. Disponíveis hoje em dia na forma de circuitos integrados de baixo custo, vêm sendo integrados por exemplo em headsets para rastrear a

orientação da cabeça do usuário, ou ainda embutidos em joysticks para incluir informações sobre a sua aceleração e orientação no fluxo de dados de entrada.

Apresentam uma grande limitação inerente que é a deriva dos sensores; como operam tipicamente integrando a aceleração sobre o tempo para calcular velocidade e posição, quaisquer erros de medida presente nos sensores, embora pequenos, serão acumulados ao longo do tempo. Isto gera a 'deriva', uma divergência crescente entre a posição estimada e a atual; por ser uma medida integrativa, um erro constante na aceleração resulta em um erro linear na estimativa de velocidade, e por sua vez em um erro quadrático na estimativa de posição (SICILIANO; KHATIB, 2016).

2.2.1.3. Rastreadores Espaciais

Outro tipo de rastreamento que é muito desejável em aplicações de RV é o rastreamento espacial de objetos, isto é, a obtenção de leituras que permitam registrar a posição tridimensional de objetos reais dentro do ambiente de simulação virtual, obtendo uma correspondência espacial entre os ambientes virtual e real. Inicialmente se explorou o desenvolvimento de rastreadores eletromecânicos, eletromagnéticos, e ultrassônicos, que apresentam limitações muito restritivas: de portabilidade, interferência eletromagnética, e baixa largura de banda, e já não têm sido muito frequentes na literatura científica, dadas as evoluções recentes da visão computacional e das técnicas de rastreamento óptico (TORI; DA SILVA HOUNSELL, 2018).

Com o advento recente de sistemas combinando hardware e software para produzir imagens cujos pixels contêm informação da distância entre os objetos registrados e o sensor da câmera, ao invés da sua cor, um novo campo se abriu para o desenvolvimento de paradigmas de interação homem-máquina. Estas imagens de profundidade podem ser segmentadas por técnicas de visão computacional (BRADSKI; KAEHLER, 2008) para: registrar espacialmente objetos relevantes para a simulação (KIM; JAI SONG PARK, 2004); rastrear o corpo humano em todo ou em parte (MARIN; DOMINIO; ZANUTTIGH, 2014; ZHANG, 2012), ou outros objetos específicos da cena; ou ainda fazer inferências sobre a estrutura de objetos, por técnicas de rastreamento esquelético (SCHWARZ et al., 2012). O rastreamento óptico do próprio HMD, por exemplo, tem um

papel muito importante ao acrescentar graus de liberdade translacionais ao ponto de vista do usuário, e permitir que este se mova com mais liberdade pelo ambiente virtual, realizando uma locomoção virtual que corresponde melhor à natural.

Técnicas de rastreamento espacial também podem ser aplicadas no rastreamento da posição dos olhos de um usuário de RV (BERKMAN, 2019; KAUFMAN; BANDOPADHAY; SHAVIV, 1993), o que permite integrar informações de direção do olhar como forma de aumentar a interatividade e também melhorar o realismo gráfico do ambiente virtual, simulando melhor efeitos naturais da visão humana, como a sua profundidade de campo e visão periférica.

2.2.1.4. Interfaces Neurais

Interfaces cérebro-computador (VIDAL, 1973) são tecnologias que se concentram em criar vias de comunicação direta entre um cérebro orgânico e um dispositivo externo, e podem ser implementadas pelo uso de eletrodos internos ou externos à cabeça, de forma não-invasiva, invasiva, ou parcialmente invasiva. Devido à sua neuroplasticidade, o cérebro pode, com o tempo, interpretar sinais de próteses implantadas como se fossem canais sensoriais ou atuadores naturais (LEVINE et al., 2000).

Interfaces neurais já demonstradas em laboratório foram capazes de prever os parâmetros cinemáticos e cinéticos de movimentos dos membros do corpo a partir de informações de ativação neural, permitindo o controle direto de um braço robótico por macacos rhesus (WESSBERG et al., 2000), inclusive com retro estimulação cerebral para proporcionar propriocepção tátil do movimento do braço robótico (O'DOHERTY et al., 2011).

A principal limitação prática no momento para a adoção em escala deste tipo de interface é o desenvolvimento de dispositivos não-invasivos que consigam detectar e modificar diretamente os potenciais elétricos no cérebro com um grau de resolução suficiente para usos práticos. Não obstante os inúmeros dilemas éticos e legais que serão introduzidos pelo avanço e disponibilidade dessas tecnologias, muitos desenvolvedores têm buscado criar justamente este tipo de dispositivos de baixo custo e não-intrusivos para o mercado consumidor (GENUTH, 2015; POGUE, 2012; STEINER; NAHIR; BEN

ELIEZER, 2015). Porém os potenciais das tecnologias de interface neural permanecem em grande parte bloqueados para o consumidor final pelas limitações descritas acima, entre outras (STAFF PRESANS, 2018).

2.2.2. Dispositivos de Saída

Pela sua predominância na percepção humana do mundo objetivo, e também pela maior variedade de processos físicos disponíveis para se codificar, armazenar e reproduzir artificialmente estes estímulos, consideramos natural que as primeiras tecnologias de captura e renderização de estímulos sensoriais foram voltadas aos estímulos visuais e auditivos (ALLEN, 1995; GERNSHEIM, 1986), e estas são hoje muito melhor dominadas e mais consolidadas do que outras. Portanto nos canais de saída de sistemas RV encontraremos mais tipicamente representados o canal visual, por telas e projetores digitais baseados em pixels, e o canal auditivo, utilizando alto-falantes eletromagnéticos em uma variedade de configurações, ou mais tipicamente fones de ouvido estéreo ou multi-canais (*surround*) quando se fala do uso de HMDs.

Porém a importância da renderização sensorial para o grau de imersão de um sistema de Realidade Virtual (por definição) implica que sejam exploradas e desenvolvidas tecnologias de renderização para todos os sentidos humanos. Neste item discutimos algumas tecnologias e possibilidades da renderização sensorial de estímulos para RV, inclusive as que ainda são menos convencionais.

2.2.2.1. Estímulos Visuais

A história dos ambientes virtuais 3D sintetizados por computador está intimamente ligada a história dos jogos eletrônicos. Assim que cientistas foram capazes de utilizar osciloscópios modificados para a renderização rudimentar de imagens e texto, começaram também a surgir os primeiros jogos eletrônicos (GRAETZ, 1981). Depois de algumas décadas de evolução mais lenta, as tecnologias para renderização visual digital passaram a apresentar na década de 1990 um crescimento exponencial, impulsionadas pela indústria dos jogos digitais.

Essa evolução das tecnologias culminou hoje na forma mais disseminada para renderização visual, a tela digital baseada em pixels, que usualmente consiste de matrizes de LEDs RGB associadas a um conjunto óptico, seja para a sua exibição em uma tela ou para projeção externa por lentes.

O sistema perceptual visual possui algumas propriedades como o seu campo de visão (Field of View - FOV), profundidade focal, densidade e resolução de imagem, que são de particular importância na criação de aplicações de alta imersividade.

O campo de visão corresponde à medida da abertura de arcos imaginários que percorrem a imagem percebida nos eixos horizontal e vertical, tanto aquela inerente a um sistema perceptual visual, como a que é aproximadamente proporcionada por um determinado display. É um dos parâmetros essenciais para alta imersão como por CAVEs ou uso de HMDs. Quanto mais se aproximar de percorrer toda a extensão do campo de visão humano (DAVID; DEJOHN DAVID; SINGH, 2017), melhor será a imersividade proporcionada pelo display. Como os HMDs se movem solidariamente à cabeça do usuário, um FOV igual ou ligeiramente maior ao dos olhos humanos seria suficiente para uma imersividade visual completa; em sistemas como CAVEs, baseados em projetores, a situação ideal exigiria a projeção esférica em 360° das imagens sobre o ambiente; porém bons resultados de imersividade podem ser obtidos com a cobertura de FOVs menores.

A profundidade focal diz respeito a uma ou mais distâncias nas quais as imagens de objetos serão recriadas em foco por um sistema óptico. A propriedade responsável por termos uma percepção multifocal do mundo é denominada acomodação, que é a forma com que os pequenos músculos ligados ao cristalino do olho contraem e relaxam, alterando a distância focal dos olhos. A vergência por sua vez é a propriedade dos olhos, que podem se mover de forma independente, convergirem seus eixos ópticos sobre os objetos observados a distâncias menores, para que as duas imagens do objeto de interesse sejam mantidas sobre a fóvea, região mais sensível da retina. Estas duas imagens são fundidas pelo cérebro e percebidas como uma só imagem com informação de profundidade (estéreo), o que nos dá a capacidade de estereoscopia ou percepção de profundidade (KRAMIDA, 2016).

A interação entre estas duas propriedades da visão humana, responsáveis pela multifocalidade e estereoscopia de nossa percepção visual, apresenta mais um conflito fundamental para sistemas de RVI em relação à forma como percebemos o mundo real. Em condições normais, estes dois estímulos estão sempre em correspondência na percepção humana; porém a renderização estéreo de imagens em sistemas de RVI, com a finalidade de proporcionar percepção visual estéreo dos ambientes virtuais, introduz uma discrepância perceptual na qual a acomodação dos olhos corresponde à distância óptica real até um objeto físico, a tela, enquanto a sua vergência depende da distância virtual de um objeto apresentado em estéreo. Esta discrepância pode provocar desconforto no uso de simulações e até mesmo efeitos colaterais mais severos, como a perda prolongada da percepção de profundidade (CARNEGIE; RHEE, 2015; CHARRIÈRE; DUVEAU, 2018).

O desenvolvimento de soluções para este conflito perceptual, na iteração atual das tecnologias de RVI, ainda é limitado à mitigação de seus efeitos, utilizando por exemplo a renderização com campo focal adaptativo, baseada em informações de rastreamento óptico das pupilas, onde uma distorção de foco artificial é introduzida em cada ponto da imagem final em proporção à sua distância ao ponto de vergência das pupilas. Contudo, existem desenvolvimentos buscando solucionar este conflito em seu nível mais fundamental, com mecanismos de renderização não-convencionais que simulam com maior fidelidade as propriedades físicas e geométricas da luz refletida por objetos reais. Por exemplo, os displays 3D de múltiplos planos focais, ou ainda espacialmente deformáveis, e até a renderização direta sobre a retina dos olhos (CHARRIÈRE; DUVEAU, 2018; KRAMIDA, 2016; RYANA; MACKENZIEA, 2012).

Já a densidade e resolução da imagem sintetizada são consequências da quantidade e arranjo físico dos receptores de luz de um sensor eletrônico, e dos emissores de um display, sendo cada ponto de resolução, em ambos os casos, usualmente denominado um pixel. Na prática, a resolução efetiva será quantificada por um ângulo, que determina a separação mínima entre dois objetos a uma certa distância do observador para que sejam percebidos como distintos. A uma distância maior que esta, ou em uma separação menor dos objetos, estes dois corpos não podem ser distinguidos e são percebidos como um só. Estimativas de resolução da visão humana, denominada acuidade visual, variam entre 0.6

minutos de arco em um olho humano com acuidade excelente, até 1 minuto de arco que corresponde à acuidade visual 20/20, ou mais (ALI; KLYNE, 1985; RUSS, 2002).

Isto implica, para o desenvolvimento de tecnologias de renderização gráfica em geral, que para que um dispositivo de renderização obtenha uma imagem cujos pixels sejam indistinguíveis entre si, deve se levar em consideração: a resolução média do olho humano, a distância típica de observação do dispositivo, a quantidade de 'pixels' emissores de luz, e a sua densidade no espaço (PLAIT, 2010).

Algumas técnicas de processamento de imagens têm especial interesse para a RVI. A acuidade visual não é uniforme em todo o campo de visão humano, sendo concentrada em uma região da retina chamada fóvea, que corresponde a um campo de visão de aproximadamente 15°, apenas uma fração dos 200° do campo de visão humano total. Isto abre o potencial para que se dedique mais processamento gráfico à área da imagem que esteja mais próxima do eixo óptico a cada instante, relaxando os requisitos de resolução e fidelidade no restante da imagem, o que pode contribuir para um maior realismo gráfico com baixo impacto na taxa de atualização (GUPTA; KAZI; KONG, 2015). Também é importante simular a profundidade de campo da visão, renderizando em foco apenas aqueles objetos que se encontrem sobre o ponto de vergência dos dois olhos, tornando o restante da imagem menos focado (CARNEGIE; RHEE, 2015). Estas duas técnicas, a renderização foveada e a profundidade de campo dinâmica, dependem da introdução de rastreamento ocular para a sua devida aplicação (ALBERT et al., 2017), e têm o potencial de reduzir sintomas adversos como náusea, desconforto, cansaço visual e dores de cabeça tipicamente associados a simulações de RVI.

2.2.2.2. Estímulos Auditivos

Assim como na visão, a presença de dois conjuntos sensoriais distintos na cabeça humana para a audição nos confere uma percepção espacial apurada do som. Ainda que a captura e síntese de áudio tenham ocorrido pela primeira vez há mais de um século (ANGWIN; STANLEY ANGWIN, 1947; EDISON; UNITED STATES. PATENT OFFICE, 1900), a busca por simulações RV cada vez mais imersivas apresenta novos desafios para a renderização de áudio com fidelidade. Pela característica espacial de nossa

percepção das ondas sonoras, uma renderização plenamente convincente deve incluir considerações sobre como estas devem variar conforme um usuário se movimenta pelo espaço virtual, ou em relação a mudanças no ambiente, e até mesmo como variam de acordo com a posição da cabeça do usuário em relação ao corpo (JOHANSSON, 2019).

O formato de áudio mais disseminado hoje em dia é de dois canais, ou seja, de som estéreo; é feita a gravação de dois sinais, esquerdo e direito, que serão reproduzidos em dois alto-falantes nas posições correspondentes em relação ao usuário. A utilização de mais canais em configuração *surround* pode melhorar a ilusão 3D do som reproduzido, mas ainda não atingem uma fidelidade ideal para os mundos virtuais, pois as posições dos alto-falantes são fixas, enquanto o usuário de uma RVI pode se movimentar, alterando a experiência sonora. Além disso, introduzem complexidade na captura de som e na aparelhagem e configuração necessária para sua reprodução.

Pode ser mais conveniente desenvolver capacidades de renderização auditiva dinâmicas baseadas em apenas dois canais, já que o sistema auditivo humano cria a percepção espacial do som a partir de dois ouvidos, isto é, dois pontos de captura. Assim, ao menos em princípio, deve ser possível criar uma experiência auditiva 3D imersiva com dois canais de renderização sonora, ou seja, dois alto-falantes, pelo controle criterioso da cronometragem, volume, e características de eco e ressonância de cada som para cada ouvido (JOHANSSON, 2019). Manter estes ajustes em tempo interativo requer uma quantidade de cálculos, transformações de dados e outras operações em alta frequência, o que é uma capacidade inerente dos computadores digitais; porém a aplicação deste tipo de tratamento deve incorrer em um impacto significativo no custo computacional por quadro de uma simulação interativa. Assim como as placas gráficas 3D atuais apresentam uma série de otimizações voltadas à renderização imersiva em tempo interativo, fomentada em boa medida pelo crescimento da indústria dos jogos digitais, podemos vislumbrar que o crescimento do mercado de consumo para tecnologias de RVI também pode vir a produzir efeitos semelhantes nos componentes de áudio dos sistemas interativos, como as placas de som, introduzindo novas técnicas e paradigmas de renderização sonora que permitam aumentar a imersividade auditiva, mesmo mantendo a simplicidade do paradigma de dois canais.

Para a captura dos sons com mais informações de tridimensionalidade também há diversas complexidades. Tanto formatos estéreo quanto surround são baseados em canais, e presumem configurações espaciais específicas dos alto-falantes no momento da reprodução, como direita e esquerda. Uma maior fidelidade de áudio poderia ser obtida agregando ao fluxo de dados informações mais detalhadas sobre a relação espacial entre os objetos emissores de som e os microfones no momento da captura, e alguns formatos de áudio têm sido explorados com estas características (DOLBY ATMOS, 2015, HOME THEATER SOUND GETS REAL | DTS, 2016; MIKAMI; NAKAHARA; SOMEYA, 2016), bem como dispositivos capazes de gravar o áudio espacialmente em 360° ao redor de um ponto do espaço (ZOOM H3-VR HANDY RECORDER, 2018).

2.2.2.3. Estímulos Inerciais

A apresentação de estímulos inerciais que representem fielmente a movimentação de um avatar pelo ambiente virtual para o sistema vestibular humano, talvez seja hoje uma das limitações com o maior potencial de ganho para a fidelidade de simulações imersivas, e a consequente percepção de presença induzida. Conforme expomos na seção 2.4, o fenômeno de divergência de percepções de movimento entre os sistemas visual e vestibular, denominada *vecção*, é um dos principais fatores contribuindo negativamente para o uso seguro e confortável de simulações em RVI, especialmente em sessões de maior duração. Os sintomas de enjôo e desorientação que estão associados à *vecção* têm atualmente um dos maiores impactos negativos na percepção de presença reportada por participantes de experimentos, em diversos casos até mesmo impedindo que indivíduos possam desfrutar de simulações de alta imersividade.

Sistemas de RVI que efetuam o rastreamento espacial (posição) da cabeça do usuário, além do seu rastreamento inercial (orientação), podem diminuir a ocorrência de *vecção* durante as simulações, o que contribui para mitigar a ocorrência de sintomas adversos relacionados. Podemos considerar que o uso deste tipo de rastreamento introduz um novo canal de renderização sensorial, de estímulos inerciais no sistema vestibular, ainda que de forma indireta. Isto é, até o limite em que seja possível um grau de correspondência entre os espaços virtual e real, podendo o usuário se locomover

livremente no real e observar a mesma locomoção no ambiente virtual, não são necessárias maiores acomodações para renderizar estímulos inerciais; já que os próprios movimentos do usuário os produzirão em correspondência com os estímulos visuais do ambiente virtual.

Outra abordagem para renderizar estímulos inerciais é através de plataformas e atuadores mecânicos que possam provocar movimentos físicos do usuário em resposta a movimentos virtuais na simulação; porém estas tendem a ser complexas, pouco portáteis e necessitem de espaço dedicado para sua instalação, além de serem tipicamente dedicadas a classes de simulação específicas, como locomoção natural, ou controle de veículos diversos, ou uso de aparato esportivo como esquis e pranchas, e não aplicáveis no caso geral.

A fronteira final para a renderização deste e de outros tipos de estímulo sensorial, talvez seja a estimulação neuronal direta. Para o sentido vestibular, já há resultados interessantes neste sentido, como no trabalho de (FITZPATRICK; DAY, 2004), em que usuários reportaram “um impulso para começar a caminhar para a direita sempre que o pesquisador ativou o interruptor direito”, e ainda, “a sensação de que esta era a única forma de manter o equilíbrio”. Um participante reportou que "o fenômeno é indolor, porém dramático. Seus pés começam a se mover antes mesmo que você perceba. Eu pude até 'controlar remotamente' a mim mesmo ao tomar o controle em minhas mãos".

2.2.2.4. Estímulos Hápticos

Há cada vez mais esforços no sentido de se representar canais de estímulo tátil em simulações (RAISAMO, 2009), com a utilização de motores de vibração, componentes piezoelétricos, e sistemas eletromecânicos para resposta de força sendo as formas mais comuns hoje em dia. Esta classe de estímulos permanece porém um aspecto de difícil generalização entre simulações distintas, necessitando frequentemente de dispositivos e programação customizada para os fins específicos de suas aplicações.

Parte dessa dificuldade se deve à própria complexidade em se tratar de forma generalizada os estímulos táteis, da forma como se é possível fazer com os estímulos visuais e auditivos através da síntese de imagem e som; há uma variedade de estímulos

ambientais percebidos pelos mecanorreceptores e nociceptores típicos da derme humana, dos quais há pelo menos quatro categorias conhecidas dos primeiros, e outras quatro destes últimos. Estas células são capazes de perceber estímulos transientes ou contínuos de pressão, distensão, deslizamento e vibração, bem como estímulos térmicos e químicos (JOHNSON; HSIAO, 1992; TALBOT et al., 1968; TOREBJÖRK; OCHOA, 1980).

Para a renderização arbitrária de estímulos táteis, podemos imaginar uma tecnologia ideal capaz de estimular diretamente os neurônios sensoriais da derme humana. Esta pode consistir de um traje especial composto de materiais têxteis condutores e semicondutores, e vestido sobre o corpo como se fosse uma 'segunda pele'; o qual seria infundido de inúmeras interfaces neuronais, ou 'pixels táteis', capazes de estimular diretamente e com alta fidelidade as variadas dimensões do sentido tátil em cada ponto. A tecnologia de estimulação neuronal direta, porém, ainda se encontra muito limitada para este uso imaginado, apesar dos avanços consideráveis da neurociência nas últimas décadas, e de esforços específicos para o desenvolvimento deste tipo de interface (KRUCOFF et al., 2016; LEVINE et al., 2000; VIDAL, 1973).

Mais promissoras no curto e médio prazo são as tecnologias baseadas em fluidos eletroreológicos (KHALED et al., 2004; PFEIFFER et al., 1999) isto é, cuja viscosidade pode ser modulada pela aplicação de potencial elétrico. A combinação com materiais têxteis eletricamente condutivos poderia produzir vestimentas contendo uma camada interna de um tal fluido, acionada eletricamente pelo simulador, o que poderia proporcionar uma resposta háptica envolvente para uma certa classe de estímulos táteis.

2.2.2.5. Estímulos Olfativos

Em relação ao sentido olfativo, também há esta mesma complexidade de generalização na renderização de estímulos arbitrários com que nos deparamos no sentido tátil. Por ser um sinal químico, pode variar em mais dimensões do que um sinal visual, por exemplo, que é percebido pela distinção entre frequências de onda da luz (eletromagnético); ou o sinal auditivo, que é a transdução de uma vibração mecânica.

Para se ter uma ideia do grau de complexidade envolvido na renderização arbitrária de estímulos olfativos, salientamos que os mamíferos apresentam mais de 1000 tipos

diferentes de receptores olfativos, correspondendo a até 3% dos genes em seu genoma. Nem todos estes genes se expressam nas diferentes espécies de mamíferos; assim mesmo, no ser humano, são aproximadamente 400 os genes funcionais que codificam receptores olfativos (GILAD; LANCET, 2003).

Ainda assim, temos visto o desenvolvimento de diversos dispositivos de renderização olfativa, inclusive com fins comerciais, que têm obtido graus variados de aceitação e sucesso. Para produzir o estímulo olfativo, uma 'biblioteca' de essências aromáticas é dispersada no ambiente ou diretamente no rosto do usuário, em alguns casos apresentando até mesmo a possibilidade de combinação dinâmica entre essências gerando novos aromas (CROWTHER, 1959; HODSON, 2013). Também encontramos esforços iniciais no sentido de estimular eletricamente os neuroreceptores olfativos (HARIRI et al., 2016; HOLBROOK et al., 2019). Estes desenvolvimentos são particularmente importantes para aplicações de RV, já que há evidências de que se pode aprimorar fortemente a percepção de presença em uma simulação pela aplicação criteriosa de estímulos olfativos (BAUS; BOUCHARD, 2017; MUNYAN et al., 2016).

2.2.2.6. Estímulos Gustativos

E por último considerando o sentido do paladar, vemos que além das mesmas complexidades de renderização envolvidas nos sentidos tátil e olfativo (BEIDLER, 1954), temos ainda a questão da forma de aplicação dos estímulos, que por sua particularidade torna relativamente mais difícil encontrar formas pouco invasivas, ou suficientemente sanitárias e práticas para sua aceitação e disseminação (IANNILLI et al., 2015; VI et al., 2017). A estimulação gustatória eletrônica vem sendo estudada (LORENZO; DI LORENZO; HECHT, 1993) com sucesso moderado: RANASINGHE et al., 2011, foram capazes de simular sabores amargos, salgados e azedos ao estimular diretamente a língua por meio de eletrodos; enquanto NAKAMURA; MIYASHITA, 2011 exploraram o que chamaram de 'gustação aumentada' pela aplicação de corrente elétrica em uma bebida isotônica.

2.2.3. Software em Tempo de Execução

O software típico de aplicações de RV deve desempenhar durante a execução interativa da simulação, de forma cíclica, uma série de tarefas conforme a descrição de arquitetura do modelo RV do item 2.3.1. A seguir são descritas algumas das cargas de trabalho encontradas em tempo de execução, seus principais aspectos e potenciais impactos no custo computacional de uma simulação.

2.2.3.1. Leitura de dispositivos de entrada

Certas tarefas de leitura de entrada são mais simples por sua própria natureza, como nos dispositivos como mouses e teclados, que hoje em dia apresentam alto grau de compatibilidade, padronização, e interoperabilidade, mesmo entre modelos e fabricantes distintos, e cujas rotinas de leitura já se encontram consolidadas, estáveis e são parte integrante dos sistemas operacionais modernos. Em tarefas de leitura mais complexas, é muitas vezes necessária uma série de transformações de dados por técnicas algorítmicas sofisticadas para que se produzam informações utilizáveis sobre o estado das entradas.

Para a leitura de rastreadores inerciais, por exemplo, é comum a utilização de algoritmos de controle e processamento de sinais para filtragem, predição e estabilização da leitura (XUE et al., 2012); enquanto sistemas de rastreamento óptico envolvem sofisticadas técnicas de Visão Computacional, em combinação com elementos específicos de hardware para produzir um registro espacial estável (KOWDLE et al., 2018).

2.2.3.2. Instanciação e atualização do modelo simulado

Para a instanciação e atualização do modelo simulado de um ambiente virtual, com as suas dinâmicas particulares, há uma série de subsistemas que devem executar em tempo interativo, como: a instanciação e controle da cena virtual; simulação de física do ambiente; interpretação dos comandos de entrada e ativação das funções correspondentes; atualização de comportamentos dinâmicos dentro da simulação; e etc.

Existe uma diversidade de ambientes de execução para simulações interativas, que oferecem SDKs, IDEs e um processo de compilação que produz código binário

executável, para uma plataforma específica ou multiplataforma. Muitos destes são voltados para a indústria de jogos (Unity3D ; Epic), mas encontram aplicabilidade também em cenários diversos de desenvolvimento para outros tipos de simulação.

É comum entre os SDKs para simulações interativas a abstração da cena virtual em uma organização hierárquica denominada grafo de cena, no qual cada elemento da cena virtual é disposto como a folha de uma árvore, em relação a um ancestral (raiz) comum a todos os objetos da cena, implementada por exemplo pela biblioteca livre OpenSceneGraph (OpenSceneGraph).

Cada nó pode conter as informações e processamento específicos particulares à sua finalidade, e em muitos casos estas informações podem ser acumuladas ao longo da hierarquia, possibilitando assim que operações sobre um ancestral afetem todos os seus descendentes, o que é muito frequente por exemplo durante operações de transformação espacial por matrizes.

Assim um componente que encapsula, por exemplo, o comportamento dinâmico de um agente virtual estaria representado como descendente do nodo deste agente, que por sua vez seria descendente de um outro nodo na cena, representando o conjunto de agentes, ou então o ambiente que o contém, e assim por diante; esta organização pode ser lógica, ou espacial, ou qualquer outra que se apresente mais conveniente para a finalidade do grafo de cena específico considerado.

2.2.3.3. Transformação dos Dados para Renderização

Ao falar sobre a renderização do modelo virtual, vamos nos ater aqui às técnicas para renderização visual. A combinação entre o requisito de manutenção de uma taxa de quadros interativa, e a demanda por realismo visual cada vez maior tem sido uma força motivadora no desenvolvimento exponencial das tecnologias de síntese interativa de imagens.

Boa parte do processamento exigido para tal é hoje implementada diretamente nas placas gráficas modernas, através de seu hardware dedicado e drivers de vídeo. As placas

de vídeo atuais são computadores digitais completos, especializados em tarefas de renderização gráfica.

Assim, a CPU principal do sistema se encarregará principalmente das tarefas de manutenção e transferência de dados, como os conjuntos de vértices com suas informações de geometria e cor, texturas, entre outras, entre a memória principal e a memória da placa gráfica; a qual por sua vez se encarregará dos procedimentos específicos para a síntese das imagens 2D, como a triangulação da geometria e sua rasterização final em pixels.

2.2.4. Software de Apoio em Tempo de Desenvolvimento

Entre os diversos modos de entrada e saída como os explorados nos itens 2.3.2 e 2.3.3, existe hoje uma série de soluções disponíveis para cada possibilidade das aplicações de RVI, utilizadas em conjunto, porém com capacidades e implementações distintas entre si. Isto apresenta uma dificuldade adicional ao se desenvolver aplicações de RVI, pois o desenvolvedor deve optar por se focar em uma plataforma específica, ou introduzir variações no software para arcar com diferentes tipos de dispositivos de entrada e saída. Além disso a interoperabilidade entre componentes de software pode ser complexa, com a necessidade de interfaces de usuário que ajudem a abstrair o tratamento específico de cada tipo e variação de dispositivos encontrados.

Bibliotecas livres como a VR Juggler e Avango (BIERBAUM et al., 2001; KUCK et al., 2008) existem para facilitar estas integrações; porém é comum que os desenvolvedores de dispositivos publiquem seus próprios SDKs, que frequentemente apresentam funcionalidades e acesso mais avançados aos dispositivos do que outras bibliotecas. Já desenvolvedores comerciais têm buscado oferecer soluções integradas que suportem uma gama abrangente de produtos e tecnologias disponíveis, como é o caso do Vizard (VIZARD | VIRTUAL REALITY SOFTWARE FOR RESEARCHERS, 2015), da WorldViz, que também possui uma versão livre de custos.

As plataformas de desenvolvimento de jogos Unity3D e Unreal Engine são dois exemplos de software de apoio muito frequentemente utilizados na criação de ambientes virtuais 3D, e já oferecem hoje uma série de funcionalidades específicas para o suporte de

aplicações de RVI, como a integração dos dispositivos de entrada e saída mais comuns para RVI, e técnicas de renderização estéreo das imagens.

2.3. Implicações de Saúde e Segurança do Uso de RV

O uso de RV, e particularmente o seu uso em alto grau de imersão com HMDs ou CAVEs, apresenta uma série de efeitos colaterais e implicações sobre a saúde e a segurança de seus usuários, que são importantes de se considerar no uso da RVI.

(NICHOLS; PATEL, 2002) apresentam uma revisão de estudos com evidências empíricas sobre efeitos na saúde e segurança no uso de RV. A análise de 36 estudos permitiu gerar um catálogo destes efeitos citados na literatura, reproduzido na tabela a seguir:

Adicção	Alterações bioquímicas	Embaçamento da visão
Alteração cardiovascular	Mudanças na performance motora	Alterações de julgamento perceptual
Satisfação	Ergonomia	Fadiga ocular
Frustração	Alterações gastrointestinais	Alucinações e 'flashbacks' visuais
Isolamento	Desconforto musculoesquelético	Atitudes dos participantes
Deslocamentos perceptuais e desorientação	Instabilidade postural	Demandas posturais
Presença	Alterações respiratórias	Stress e alteração de humor
Transferência de Treinamento	Alterações visuais	Enjôo induzido por RV

Tabela 2.2.1 Fatores humanos potenciais do uso de RV (NICHOLS; PATEL, 2002)

Entre a variedade de fatores encontrados por (NICHOLS; PATEL, 2002), o efeito mais frequentemente mensurado foi a ocorrência de enjôo induzido por RV, um fenômeno similar ao enjôo de simulação, e às vezes chamado de 'cyberenjôo', discutido extensivamente na literatura. Supõe-se que o enjôo induzido por RV ocorre como resultado de conflito de estímulos entre diferentes sentidos, como entre a acomodação e vergência visuais, e entre a percepção de movimento visual e vestibular; estes sintomas são possivelmente explicados pela teoria do conflito sensorial (REASON; BRAND, 1975). Um exemplo deste conflito em RVI ocorre pela translação contínua do ponto de

vista virtual, sem uma translação física correspondente do seu usuário, fenômeno este denominado *vecção*, e que tem o seu paralelo no mundo real, por exemplo quando percebemos um automovimento estando dentro de um carro mesmo sem que este tenha se movido de fato, quando algum veículo percebido em nossa visão periférica começa a se mover. Quando isto ocorre o sistema visual é apresentado a um estímulo de movimento, enquanto o sistema vestibular registra uma posição estática, o que pode desencadear os sintomas de enjôo de simulação.

Um dado muito importante trazido por (KENNEDY; FOWLKES, 1992) indica que a prevalência de enjôo de simulação é de 20% dos usuários no 'melhor' simulador, e de até 60% no 'pior' simulador. Também nota que efeitos residuais podem permanecer por horas após o uso da RVI, e que estes efeitos em particular podem apresentar um risco de segurança. A caracterização do enjôo de simulação é particularmente problemática pelo fato do fenômeno ser polissintomático, não havendo predominância de um único sintoma em todos os indivíduos, e poligênico, podendo sofrer igual influência de diversos fatores no tipo e severidade dos sintomas, inclusive por características individuais dos participantes. Por este motivo a aplicação de questionários como o SSQ (KENNEDY et al., 1993), baseados em grupos de sintomas, pode ser particularmente adequada para se determinar a extensão e severidade de sintomas adversos provocados por simulações em RVI.

Ainda outros dados empíricos destacados na análise de (NICHOLS; PATEL, 2002) são de particular relevância: desistências precoces por desconforto variam entre 4% e 16%, com a grande maioria destas (94%) ocorrendo nos primeiros dez minutos de imersão; e os sintomas induzidos por RV foram em média maiores do que por simuladores imersivos, embora haja menor prevalência de sintomas oculomotores na RV, com mais relatos de náusea e desorientação.

2.3.1. Fatores de influência na saúde e seus impactos

Biocca (1992) argumenta com otimismo que as causas do enjôo de RV são um problema puramente tecnológico que desapareceria com o desenvolvimento da tecnologia. Para muitos fatores, como a ergonomia dos equipamentos utilizados, é

bastante provável que o desenvolvimento tecnológico será de fato capaz de produzir avanços até o ponto em que o impacto destes seja irrelevante.

Porém, embora fatores como as latências visual e de input tenham sido melhorados dramaticamente nos últimos anos, a indução de conflito entre os sentidos visual e vestibular humanos na RV deve permanecer presente em algum grau, mesmo em sistemas de rastreamento *room-scale* de baixas latências. Pois até mesmo nestes casos haverá a limitação física do espaço, e será necessário, em algum grau, manipular a posição do avatar virtual fora de correspondência com algum movimento real do usuário. Este tipo de manipulação irá quase certamente introduzir alguma discrepância entre percepção vestibular e visual do movimento, ou seja, *vecção*. Isto deve se dar, em nossa opinião, pelo menos até que haja técnicas mais avançadas para o estímulo do sistema vestibular, como o estímulo direto do aparelho sensorial vestibular ou das vias neuronais de percepção vestibular, de forma indistinguível dos estímulos naturais, tecnologias que ainda se encontram em um horizonte de longo prazo.

Dada a relevância do conflito visual-vestibular na experiência da RV, e o seu baixo grau de tratabilidade atual, convém nos determos um pouco nos mecanismos relevantes neste conflito. Apesar de haver algumas conclusões contraditórias sobre a influência do rastreamento de cabeça nos sintomas de enjôo (EHRlich; SINGER, 1996; LAMPTON et al., 1994), o consenso acadêmico tende à conclusão de que na presença de translação da cena virtual, a introdução de rastreamento de cabeça tende a diminuir os sintomas adversos (LACKNER; TEIXEIRA, 1977). É provável que as contradições nos resultados tenham se originado de fatores como latências de entrada e saída, que impediram a eliminação de conflitos perceptuais pretendida pela introdução do rastreamento de cabeça. Além disso, o movimento de cabeça aumenta a intensidade dos estímulos vestibulares, o que pode amplificar sintomas adversos (BIOCCA, 1992), especialmente se estes sintomas já estiverem se apresentando.

Ainda mais fundamental do que a presença ou não do rastreamento de cabeça, a ideia de *vecção*, ou percepção ilusória de automovimento, está diretamente relacionada à aparição de sintomas adversos. É uma característica do AVI, e (HETTINGER; KENNEDY; MCCAULEY, 1990) chegam a sugerir que a *vecção* é um precursor

necessário à ocorrência de enjôo de simulação, corroborados por (10.21236/ADA155975, [s.d.]; BIOCCA, 1992; EHRLICH; SINGER, 1996; KENNEDY; FOWLKES, 1992; KENNEDY et al., 1989). A velocidade aparente da vecção parece estar diretamente relacionada à ocorrência de enjôo (MOURANT; THATTACHERRY, 2000; SO; HO; LO, 2001).

Apesar de ser fator fundamental na indução de sintomas adversos, a vecção também pode estar diretamente relacionada à percepção de presença (MCCAULEY; SHARKEY, 1992), com implicações para a relação entre indução de presença e sintomas adversos. A observação de que categorias de aplicações RV focadas no espaço imediato apresentam menos indicações de vecção do que aquelas focadas no espaço distante também é uma informação importante para o desenvolvimento de aplicações RV.

Para mitigar os efeitos adversos da vecção, (PROTHERO et al., 1999) estiveram entre os primeiros a sugerir a introdução de um quadro de referência visual estacionário em relação ao usuário na cena virtual que apresenta vecção, como um cockpit de veículo, um nariz ou outro elemento consistente com a referência inercial do usuário, baseado no argumento de que o enjôo de simulação é causado por uma diferença entre as referências de repouso visual e vestibulares. A introdução de um elemento virtual consistente com a referência inercial seria portanto capaz de mitigar a ocorrência destes sintomas adversos, já que a maioria das indicações de coerência no ser humano são extraídas do sentido visual.

A respeito da adaptabilidade dos indivíduos aos efeitos, em sua revisão (NICHOLS; PATEL, 2002) destacam resultados que indicam o aumento dos sintomas adversos com o tempo de exposição à simulação, porém com a ocorrência de adaptação dos indivíduos aos sintomas com exposições sucessivas à RV, onde 48% dos usuários apresentaram redução dos sintomas já na segunda exposição; embora se estime que até 3% da população poderão nunca se adaptarem. Além disso, a adaptabilidade é pelo menos em parte temporária, recedendo após períodos de afastamento dos estímulos RV.

Outros fatores de impacto na ocorrência de sintomas adversos (NICHOLS; PATEL, 2002) são, a postura de interação: usuários sentados tendem a apresentar menos sintomas

do que usuários que interagem em pé, possivelmente pela menor exigência de controle postural daqueles; e o grau de controle sobre o seu ponto de vista na simulação, onde usuários em uma simulação multi-usuário que não detêm o controle do ponto de vista relatam maiores sintomas, estando este fator associado à noção de agência percebida das alterações no ponto de vista virtual.

Características individuais como idade, gênero sexual biológico, experiência, tendências de personalidade, ansiedade, excitação, entre outras também apresentam um grau de impacto mensurável no aparecimento de sintomas adversos, embora a sua relação mútua pareça intrincada e não tenham sido estabelecidas correlações claras entre estas (LAMPTON et al., 2018).

2.4. Presença

O livro *Hamlet no Holodeck: O Futuro da Narrativa no Ciberespaço*, (MURRAY, 1997) coloca uma série de reflexões sobre o computador e as mídias digitais, e se estas novas mídias irão eventualmente embasar a emergência de um novo formato de narrativa, assim como o surgimento da tecnologia de impressão deu lugar ao surgimento do romance, e a tecnologia cinematográfica permitiu o surgimento do cinema. Bastante relevante no campo de comunicação e mídias, este livro apresenta uma definição geral do conceito de imersão, independente da mídia de apresentação, que julgamos relevante citar aqui:

"Uma narrativa instigante em qualquer mídia pode ser experimentada como uma realidade virtual pois nossos cérebros são programados para sintonizar em histórias com tal intensidade a ponto de obliterar a percepção do mundo à nossa volta... A experiência de ser transportado a um local simulado de forma elaborada é prazerosa em si mesmo, independente do conteúdo de ficção. Nos referimos a esta experiência como imersão. Imersão é um termo metafórico derivado da experiência física de estar submerso em água. Nós buscamos a mesma sensação em uma experiência psicologicamente imersiva que em um mergulho no oceano ou em uma piscina: a sensação de se estar rodeado de uma realidade completamente alheia, tão diversa quanto a água é do ar, que domina toda a nossa atenção, nosso aparato perceptual por inteiro... em uma mídia participatória, estar imerso significa aprender a nadar, a realizar as ações que este novo ambiente torna possível."

Com a evolução natural do léxico na pesquisa científica na área, os pesquisadores vêm criando novas definições e distinções entre conceitos (JERALD, 2015), que muitas vezes se sobrepõem ou mesmo se contradizem entre si. Hoje em dia temos que a definição de Murray do termo imersão se aproxima, na verdade, do que se tem convencionado chamar de *presença psicológica*, *percepção subjetiva de presença*, ou, simplesmente, *presença*, em muitos textos acadêmicos na área. A ideia de presença se refere a algo que é em última instância uma percepção subjetiva do indivíduo; possui nuances e subtipos diversos, e é portanto bastante complexa de se definir em absoluto (LOMBARD; JONES, 2015).

As distinções mais comuns entre as definições de presença encontradas na literatura, conforme enumeradas em (LOMBARD; JONES, 2015), são: a inclusão ou exclusão do fator tecnológico; o objeto ao qual a propriedade se refere: mídia, indivíduo, tecnologia, comunicação, objeto, ou entidade; se a origem do estímulo é externa (sensorial) ou interna (imaginativa); o grau de conspicuidade da tecnologia; aspectos específicos do fenômeno como presença social, espacial, autopresença, engajamento, entre outros.

Pode-se argumentar que fenômenos de presença poderiam ser observados desde o surgimento da arte representacional mais antiga, nos primórdios da espécie humana (IJSELSTEIJN, 2005)); mas a consideração acadêmica e subseqüentes tentativas de identificação e rotulação destes fenômenos é muito recente. A diversidade de definições correntes e diferenças entre estas é resultado de um processo de 'brainstorming' conceitual para a definição de um conceito relativamente elusivo (LOMBARD; JONES, 2015), e vemos um esforço recorrente na literatura de convergir para terminologias e estruturas conceituais comuns de forma a aprimorar a compreensão do fenômeno.

(SLATER; WILBUR, 1995), (SLATER; USOH; STEED, 1994), (BARFIELD et al., 1995), (BARFIELD; WEGHORST, 1993), (SHERIDAN, 1992a, 1992b), (JERALD, 2015) criam uma distinção clara entre os conceitos de imersão e presença. Enquanto a imersão diz respeito aos aspectos puramente técnicos e tecnológicos de uma mídia de apresentação imersiva, a percepção de presença, por outro lado, é um estado de consciência, uma sensação de estar presente no ambiente virtual.

(LOMBARD; JONES, 2015), (WATERWORTH et al., 2015), (JACOBSON, 2002), (LOMBARD; DITTON, 1997), (ZAHORIK; JENISON, 1998), (CHEYNE, 2001), definiram presença como: a sensação de estar localizado em um mundo exterior perceptível ao redor do ser; a experiência de estar engajado pelas representações de um mundo virtual; a ilusão perceptual de não-mediação; equivalente à ação efetivamente amparada no ambiente; e um sentido numinoso (sobrenatural, sagrado, santo) de alteridade.

Comparando-as com a definição de imersão dada em (MURRAY, 1997), percebemos que estas definições claramente buscam se aproximar de um conceito importante comunicado pelo termo, porém, o seu sentido exato varia de forma ampla entre elas. Nestas condições, pensamos ser particularmente importante em qualquer trabalho científico que trate da questão da presença, apresentar uma definição específica desta para os seus fins. Esta definição deve, idealmente, comunicar sem ambiguidade o que está sendo considerado como presença, e evitar se desviar fundamentalmente das definições mais correntes do termo na literatura. Justificamos este ponto de vista em concordância com (LOMBARD; JONES, 2015), que argumentam que estruturas conceituais comuns sejam importantes na comunicação e colaboração efetivas, facilitando a construção de conhecimento, mas por outro lado um conjunto de definições inflexível não será suficiente para caracterizar todo o conhecimento passível de ser produzido sobre um conceito quase subliminar como é a percepção de presença.

Após estas considerações, e também seguindo as recomendações em (LOMBARD; JONES, 2015) sobre a aplicação de novas definições do termo, apresentamos a seguir a nossa própria definição de presença, adotada para os fins deste trabalho de pesquisa:

"Presença é um estado psicológico subjetivo do indivíduo, em que este se percebe em relação a ambientes ou agentes virtuais, advindos por um ou mais fluxos de estímulos sensoriais artificiais; de forma que este indivíduo passe a conceber estes ambientes e agentes de forma não-mediada, abstraindo o aparato tecnológico envolvido e se sentindo fisicamente transportado a um ambiente, ou interagindo diretamente com um agente".

Mais adiante abordaremos também o conceito de imersão, conforme (JERALD, 2015; MCMAHAN, 2013; SLATER, 2018), entre outros. Para melhor compreender os fatores que têm impacto na presença, podemos ainda caracterizar o fenômeno em alguns tipos (BIOCCA, 1997):

- *Presença física* é a sensação de estar fisicamente em um local, imerso em determinado ambiente físico;
- *Presença social* é a sensação de se comunicar com outras personagens do ambiente, sejam elas seres humanos ou agentes autônomos simulados.;
- *Autopresença* se refere a percepção de possuir ou pertencer a um corpo, geralmente na forma de um avatar virtual;

(TORI, 2018) afirma que de especial interesse para a área de educação é o conceito de “presença social”, e que "um grande desafio para pesquisadores e engenheiros envolvidos com as tecnologias de telepresença é aumentar a sensação de presença social dos usuários".

2.4.1. Métodos Para Medição De Percepção De Presença

Como a percepção de presença é uma condição subjetiva, os pesquisadores têm desenvolvido várias definições operacionais que permitam a sua medição. Conforme (TORI, 2018), uma dificuldade na avaliação de mídias imersivas na educação é o estabelecimento de parâmetros e critérios que permitam avaliar e comparar os graus de presencialidade propiciados pelos meios. (BIOCCA; HARMS; GREGG, 2001) definem oito fatores para determinar o grau de presença social em um experimento, agrupados em três áreas (TORI, 2010):

- co-presença: intensidade com que o observador acredita não estar só; nível de ciência focal e periférica do outro e sensação do nível de ciência focal e periférica do outro para com o observador; fator associado: ciência mútua;
- envolvimento psicológico: intensidade com que o observador aloca atenção e empatia emocional ao outro, e acredita ter compreensão das intenções,

motivações e pensamentos do outro; fatores associados: atenção mútua, empatia e compreensão mútua;

- engajamento comportamental: intensidade com que o observador acredita que suas ações sejam interdependentes, conectadas ou reativas às do outro, e sua percepção quanto à reatividade do outro em relação ao próprio observador; fatores associados: interação comportamental, assistência mútua e ação de dependência.

As medidas experimentais de presença têm sido mais usualmente tomadas através de questionários de auto-relato, havendo um debate vigoroso na comunidade acadêmica a este respeito (SADOWSKI; STANNEY, 2002; SLATER, 2004; USOH et al., 2000).

Um estudo de (USOH et al., 2000) argumenta que os questionários de presença deveriam ser capazes de passar em um 'teste de realidade', onde os índices de presença apontados pelo mesmo questionário entre duas experiências semelhantes, uma virtual e outra real, deveriam ser maiores para a experiência real. Para tal finalidade desenvolveram um experimento em que pediu-se a dois grupos de participantes que completassem a mesma tarefa, um em ambiente real, e outro, virtual. Dois questionários de presença diferentes foram aplicados de forma aleatória, o questionário de Witmer e Singer (WITMER; SINGER, 1998) e aquele desenvolvido por Slater, Usoh, e Steed (SLATER; USOH; STEED, 1994). Ao contrário do que seria ideal, nenhum dos dois questionários apresentou índices significativamente maiores para a experiência real. Isto indica que apesar de serem uma ferramenta válida para avaliar presença dentro de variações do mesmo tipo de experiência, estes questionários podem não ser uma boa ferramenta para avaliar a percepção de presença induzida por mídias fundamentalmente distintas.

2.4.2. Fatores Que Influenciam A Percepção De Presença

(BYSTROM; BARFIELD; HENDRIX, 1999) argumentam que uma das metas dos criadores de mundos virtuais, em geral, é proporcionar uma sensação de presença em seus participantes. Baseado na característica de não-mediação da percepção de presença como a definimos, temos que esta meta envolverá decisões objetivas para reduzir a 'visibilidade'

da mídia. Através de configurações experimentais utilizando prototipagem e técnicas de medição de presença é possível avaliar estatisticamente o impacto de uma decisão de projeto na percepção de presença (TORI; DA SILVA HOUNSELL, 2018). Vamos analisar alguns fatores frequentemente mencionados na literatura que podem afetar a percepção subjetiva de presença.

(SLATER; USOH, 1993) distinguem fatores externos e internos que contribuem para a percepção de presença. Fatores externos são aqueles oferecidos pelo sistema de RVI em si; a extensão do campo de visão, grau de interatividade, comportamento dos objetos virtuais, entre outros, que podem ser sumarizados:

- (a) Informação de alta qualidade e resolução deve ser apresentada aos órgãos sensoriais, de uma forma que não implique a existência de dispositivos ou telas.
- (b) O ambiente apresentado deve ser consistente em todas as formas de renderização utilizadas;
- (c) O ambiente deve permitir a interação, incluindo objetos e agentes autônomos que reajam espontaneamente ao sujeito;
- (d) A autorrepresentação do participante, isto é, o seu "corpo virtual" ou "avatar", deve ser similar em aparência ao próprio corpo do sujeito, e responder corretamente, parecendo corresponder aos movimentos do participante;
- (e) A conexão entre as ações do usuário e seus efeitos deve ser simples o suficiente para que o participante as modele ao longo do tempo.

(MEEHAN et al., 2003) demonstram que a latência de fim-a-fim em um sistema tem um impacto direto na percepção de presença, e este fator está diretamente relacionado à qualidade e resolução que um determinado sistema será capaz de oferecer.

(SLATER; WILBUR, 1995) argumentam que o grau de imersão está diretamente relacionado ao grau de percepção de presença; alegam ainda que o grau de presença é

influenciado pelos tipos de informação sensorial mais relevantes para a realização da interação em questão, por exemplo, se a relevância de informação auditiva for maior ou menor do que a da informação visual, a informação auditiva pode apresentar um impacto maior na presença. As preferências individuais por modalidades sensoriais de informação distintas também parecem exercer o seu papel no sentido de presença.

Experimentos de (BIOCCA; HARMS; GREGG, 2001) indicam que para todos os fatores que utilizaram para definir a presença social, situações “face a face” tiveram índices maiores do que naquelas com algum tipo de mediação. As maiores diferenças foram identificadas nos fatores de co-presença e envolvimento psicológico.

(WEECH; KENNY; BARNETT-COWAN, 2019) concluem que a percepção de presença está negativamente correlacionada à ocorrência de enjôo de simulação, embora com um corpo de evidências experimentais ainda pouco robusto. Em se confirmando, esta correlação pode tanto indicar que a ocorrência de enjôo impacta negativamente na percepção de presença; mas também que, por outro lado, simulações de RV capazes de imprimir uma maior percepção de presença podem estar menos propensas a induzir sintomas adversos em seus usuários.

(SLATER; USOH; STEED, 1995) avaliaram uma técnica para locomoção em RVI simulando uma caminhada natural, e concluíram que a técnica foi capaz de induzir maior percepção de presença quando seus usuários se identificavam com o avatar virtual, fortalecendo a idéia de que o grau de correspondência entre o corpo e movimentos do usuário e de seu respectivo avatar virtual têm influência significativa no grau de presença induzido.

2.5. Imersão

Seguindo a terminologia à qual muitos trabalhos relevantes têm convergido (SLATER; WILBUR, 1995), (BYSTROM; BARFIELD; HENDRIX, 1999), (BOWMAN; MCMAHAN, 2007; JERALD, 2015; MCMAHAN, 2013; MCMAHAN et al., 2006, 2012), tomaremos o termo *imersão* em ambientes virtuais para representar a dimensão puramente tecnológica de uma experiência imersiva. Ou seja, os elementos imersivos são aspectos quantificáveis da tecnologia de apresentação da mídia, primariamente

determinados pelo grau em que as tecnologias de apresentação sejam (SLATER; WILBUR, 1995):

- (a) Inclusivas (o grau em que estímulos do mundo externo são isolados do usuário)
- (b) Extensivas (o número de modalidades sensoriais contempladas pelo sistema de imersão)
- (c) Envolventes (o quão panorâmicos são os *displays*)
- (d) Vívidas (a resolução de imagem dos *displays*)

Ainda de acordo com (SLATER; WILBUR, 1995), a categorização da imersão também postula que uma auto-representação egocêntrica, baseada em um corpo virtual, dentro do mundo virtual, é necessária para obter um alto nível de acoplamento entre a propriocepção e as informações sensoriais.

Ao explorar o aspecto da imersão, (JERALD, 2015) cria uma caracterização mais geral dos fatores de imersividade de um sistema:

- *Abrangência*: a quantidade de fluxos de estímulo sensorial diversos, como visual, auditivo, tátil, inercial;
- *Combinação*: a qualidade dos diferentes fluxos sensoriais de apresentar estímulos congruentes entre si, por exemplo, a correspondência entre movimento da cabeça, atualização do ponto de vista renderizado em 3D, e a direcionalidade dos sons;
- *Envolvimento*: a extensão com que cada sentido é envolvido pelo aparato tecnológico, como o campo de visão de dispositivos gráficos, ou a capacidade espacial de sistemas de áudio;
- *Vivacidade*: a fidelidade representacional dos elementos da simulação, como o realismo gráfico, fidelidade de áudio, taxa de quadros, etc;
- *Interatividade*: as possibilidades de interação oferecidas pelo ambiente virtual para que o seu usuário provoque respostas dos elementos simulados;
- *Enredo*: a qualidade, plausibilidade, fluência e consistência das narrativas implementadas pelo ambiente.

Considerando apenas os fatores de imersão visual, podemos ainda destacar alguns elementos quantificáveis que influenciam no grau de imersão (BOWMAN; MCMAHAN, 2007):

- *Campo de Visão*: o tamanho do campo visual em graus que pode ser visualizado em um instante no tempo;
- *Campo de Observação*: o tamanho total do campo visual envolvendo o usuário que pode ser explorado;
- *Qualidade da imagem*: a quantidade de pixels exibidos na tela e a sua densidade espacial;
- *Estereoscopia*: a exibição de imagens diferentes para cada olho, fornecendo uma indicação adicional de profundidade;
- *Renderização baseada na cabeça*: geração das imagens virtuais com base na posição e orientação atuais da cabeça do usuário (produzidas por rastreamento de cabeça);
- *Realismo gráfico*: engloba o detalhamento e realismo visual de modelos 3D e texturas, e da iluminação simulada;
- *Taxa de quadros*: número de atualizações por segundo da imagem em tela;
- *Taxa de atualização*: taxa de atualização de dispositivos de entrada, algoritmos de rastreamento e atualização de elementos interativos do ambiente;

Esta lista, mesmo sem ser exaustiva, indica que tanto o hardware quanto o software têm grande influência no grau de imersão proporcionado por uma plataforma tecnológica imersiva.

De fato, enquanto é possível definirmos e compararmos de forma objetiva o grau de imersão entre duas plataformas de RVI distintas, não é possível garantir que um usuário se sentirá de fato presente ao utilizar uma simulação RVI não obstante o seu grau de sofisticação (TORI; DA SILVA HOUNSELL, 2018), pois a percepção de presença é subjetiva, e há outros fatores que a influenciam além da imersão, conforme discutido no item anterior.

3. REALIDADE VIRTUAL NA EDUCAÇÃO IMERSIVA

A ideia de imersão na educação não é um conceito novo; muitos cursos de idiomas, por exemplo, envolvem uma etapa de imersão na cultura estudada. Também em situações como visitas de campo, como por exemplo ao visitar uma fábrica ou usina, encontramos a imersão como uma estratégia pedagógica que pode proporcionar um aprendizado experiencial difícil de ser emulado por meio de outras metodologias. Por isso mesmo, é um elemento frequente em muitos currículos acadêmicos. Porém, este tipo de imersão apresenta desafios particulares, logísticos e de custo.

A proposta da educação imersiva consiste em proporcionar situações de ensino onde o aluno está em contato direto com o conteúdo da aprendizagem. Como nem sempre é viável, seguro ou adequado colocar o aluno em situações reais de imersão (Entrevista com o Professor Dr. Romero Tori, 2019), pode ser desejável desenvolver alternativas à imersão real, como jogos de representação, simulações de cenários, e, inclusive, a adoção de tecnologias de realidade virtual e aumentada para sintetizar ambientes imersivos que representem as situações reais, pois permitem simular tais situações com segurança, realismo, e baixo custo. Hoje em dia, o termo "educação imersiva" vem sendo utilizado para designar justamente as atividades pedagógicas que se utilizam de tecnologias imersivas. Neste documento vamos seguir esta mesma terminologia, com foco no uso da RV para educação imersiva.

3.1. Análise Bibliométrica

A etapa inicial da fase de revisão da literatura consistiu de uma análise bibliométrica de publicações dos últimos 5 anos, entre Janeiro de 2015 e Julho de 2019, extraídas de buscadores online de literatura acadêmica (*Google Scholar, IEEE Xplore, ACM, PubMed.gov, Scielo, Scopus, SiBi, Springer, ProQuest*), colhendo uma amostra final de 1100 artigos científicos após remoção de duplicatas. A coleta da amostra foi feita a partir das primeiras 10 páginas de resultados de cada buscador, na ordem de relevância apresentada pela própria ferramenta de busca, incluindo cada publicação relevante exceto duplicatas, quando solicitados com uma string de busca combinando os seguintes termos:

((Immersive OR Virtual) AND (Reality OR Environments)) AND (Education OR Learning OR Instruction OR Training)

Foram aplicados filtros dos próprios mecanismos de busca para restringir o intervalo de datas de publicação dos resultados entre 2015 e 2019. A lista completa de referências retornadas é demasiado extensa para inclusão neste documento, estando disponível perante solicitação ao autor. Apresentamos a seguir as principais informações extraídas de uma análise bibliométrica dos resultados de busca.

3.1.1. Crescimento no número de publicações por ano

Olhando para a distribuição do número de publicações por ano, (fig. 3.1.1), vemos um crescimento consistente nos últimos cinco anos. Entre 2015 e 2018, a quantidade de artigos publicados cresceu exponencialmente em aproximados 40% ao ano. Em julho de 2019, a quantidade de publicações já era praticamente a mesma de todo o ano de 2018.

Figura 3.1.1 Publicações em RV para educação por ano entre Jan/2015 e Ago/2019 na amostra avaliada.

3.1.2. Finalidades de Aplicação Observadas

Considerando todo o universo da amostra, a finalidade principal dos instrumentos discutidos no texto foi classificada em uma das categorias: Educacional, para artigos contendo uma aplicação direta de RV para educação, treinamento, instrução ou aprendizagem; Clínica, para aplicações de uso terapêutico e/ou avaliação de populações portadoras de condição médica; e de Fundamentos, para artigos que abordaram técnicas, métricas experimentais, e discussões voltadas aos fundamentos da tecnologia.

A maioria de resultados de busca apresentou finalidade educacional, e uma quantidade significativa de artigos com finalidade clínica, ou explorando fundamentos do tema, sendo o restante com finalidades de aplicação industrial.

Figura 3.1.2 Finalidade das publicações analisadas

Esta distribuição observada ajudou a validar a fase de descoberta, com uma maioria dos estudos encontrados na área de interesse, ainda que o léxico na área de pesquisa em RV apresente certa granularidade e eventual ambiguidade (BIOCCA; LEVY, 1995; SLATER, 2003; STEUER, 1992). Isto torna a calibragem dos termos de busca

particularmente sensível ao se buscar um compromisso entre abrangência da busca e tratabilidade do número de resultados retornados. Na etapa de descoberta houve diversas iterações destes termos até que fosse observada uma prevalência de resultados relevantes na área de interesse entre os resultados de busca.

3.1.3. Contextos de Aplicação

Considerando apenas aqueles resultados dentro da amostra original com finalidade educacional, classificamos cada artigo pelo seu contexto de aplicação, entre: Superior, Primária e Secundária, e Outras. A maioria dos resultados foi dentro do Ensino Superior, menos de 10% dentro da Educação Primária e Secundária, e o restante distribuído em outros contextos (militar, esportes, segurança, e outras), de menor relevância para os nossos fins.

Figura 3.1.3 Contexto das publicações com fins educacionais

3.1.4. Instrumentos tecnológicos de imersão

Ainda considerando apenas os artigos de finalidade educacional entre os resultados, a estes categorizamos conforme a tecnologia de imersão visual abordada: baseado em tela

(screen-based), HMD, CAVE-like, ou simuladores médicos. A categoria de simuladores médicos, embora voltada a simuladores que também utilizam instrumento de imersão baseado em tela, foi incluída separadamente para destacar o alto número de publicações onde o objeto de estudos é um sistema de RV especializado, cuja principal característica é a inclusão de um ou mais dispositivos hápticos que replicam fielmente estruturas anatômicas do corpo humano.

Figura 3.1.4 Tipos de instrumentos de imersão mais utilizados

O estudo de simuladores médicos compreendeu boa parte dos resultados, indicando um crescente interesse em simuladores na educação médica; alguns motivos para esta importância são discutidos em (WEISS et al., 2018). Os estudos apresentando imersão baseada em tela (screen-based) foram 21.3% do total. Esta parcela denota uma certa dificuldade em se isolar artigos que tratam de tecnologias de alta imersão como HMDs ou CAVE-like, somente com a calibração da string de busca, sem sacrificar a abrangência dos resultados retornados.

A parcela de publicações de maior interesse para este trabalho de pesquisa, aqueles que utilizaram imersão por HMDs, foi de quase um quarto do total. É notável a baixa participação de sistemas CAVE-like nesta amostra, talvez por um viés oculto no procedimento de busca em si, ou possivelmente pela maior complexidade e custo deste tipo de sistemas atualmente, em relação às tecnologias de HMD disponíveis no mercado.

3.1.5. Tipos de *HMDs* utilizados

Considerando os artigos de finalidade educacional que utilizaram HMDs, que foram 16,6% da amostra original, verificamos que uma parcela notável destes utilizou como plataforma o HTC Vive; sistemas de HMD de baixo custo, baseados em um visualizador acoplado a smartphone, também têm alta representatividade. Outra plataforma comum é o Oculus Rift, enquanto um grande número de estudos (30.6%) não informou com clareza as plataformas utilizadas, ou não apresentou um estudo de aplicação específica. Uma minoria de estudos foi feita sobre a plataforma Gear VR da Samsung.

Figura 3.1.5 Tipos de HMD mais utilizados

3.1.6. Instrumentos de medição experimental

Sobre o universo de aplicações de finalidade educacional com uso de HMD, avaliamos se houve introdução de resultados experimentais quantitativos ou qualitativos, e qual foi o principal instrumento de coleta e medição utilizado para este fim.

Figura 3.1.6 Instrumentos de medição experimental mais utilizados

Observamos que o instrumento mais comum se baseia em questionários de auto-avaliação em escala Likert ou formatos semelhantes, em um terço dos estudos na amostra. Em seguida os instrumentos que avaliaram alguma forma de resultado de aprendizagem com testes pré- e pós-experimento, são 10.4% do total. Métricas de performance como tempo de conclusão de tarefas, taxa de acertos/erros em uma tarefa procedural, e outras obtidas diretamente da interação do usuário com o sistema, também são frequentemente utilizadas (9.3%).

Outra parcela significativa da amostra utilizou principalmente a coleta de feedback de usuários e/ou especialistas, entrevistas em grupos de foco, e outros instrumentos qualitativos.

Uma quantidade significativa de estudos não introduziu resultados experimentais, enquanto muito poucos avaliaram algum tipo de métrica fisiológica, como condutância da pele, frequência cardíaca, entre outros.

3.1.7. Conclusões da Análise Bibliométrica

Esta revisão e análise preliminares foram bem-sucedidas em apresentar um panorama geral da pesquisa para os nossos fins. Pudemos observar de forma objetiva e quantificada o aumento exponencial da relevância deste campo de pesquisa nos anos recentes, indicada pelo aumento expressivo no número de publicações.

Também evidenciamos entre os estudos educacionais uma grande parcela de estudos dedicados a simuladores médicos, onde em geral a imersão é baseada em tela, aliada ao uso de um dispositivo háptico de alta fidelidade, que representa a anatomia relevante ao procedimento treinado. Dentro desta categoria específica, uma minoria dos estudos foram feitos avaliando a imersão por HMD.

Avaliando os tipos de HMD mais utilizados entre os estudos que os utilizaram, a distribuição foi relativamente equilibrada entre os produtos mais disseminados no mercado atualmente: Oculus Rift, HTC Vive, e Google Cardboard ou similares. Este resultado indica que há uma alta relevância de instrumentos de imersão de baixo e médio custo na literatura atualmente. O potencial percebido destes instrumentos de imersão de baixo e médio custo na sociedade em geral, e em particular para as aplicações educacionais, parece ser um fator fundamental tanto no aumento anual de publicações, quanto na predominância de resultados que avaliam estes instrumentos em detrimento de outros, como instrumentos CAVE-like ou customizados.

Em relação aos tipos de instrumento utilizados na introdução de resultados experimentais, uma maioria expressiva de estudos utiliza para tal fim questionários baseados em percepções subjetivas dos próprios participantes, com escalas em modelo Likert ou formatos derivados. Estudos que introduziram resultados baseados em métricas objetivas, como, resultados de aprendizagem, performance dentro da aplicação, ou fatores fisiológicos, são frequentes, porém não a maioria.

Um fator de interesse a se observar foi a baixa ocorrência de artigos incluindo alguma métrica experimental fisiológica, e ainda menos artigos que tenham incluído uma métrica fisiológica aliada a uma métrica de auto-avaliação por questionários ou outra forma subjetiva de avaliação experimental.

Apesar da evidência baseada em questionários ser uma forma muito utilizada de introduzir resultados experimentais, existem dúvidas pertinentes sobre a sua eficácia como único instrumento de aferição para a validação de aplicações em RV (SLATER, 2004). Por isso argumentamos que a combinação de métricas experimentais objetivas e subjetivas deve ser buscada sempre que seja possível, fomentando a construção de conhecimento sobre as associações entre métricas objetivas e fatores subjetivos.

3.2. Síntese do Estado da Arte

Para a próxima etapa da fase de revisão literária do projeto de pesquisa, optamos por realizar uma análise mais aprofundada de artigos que introduziram revisões de literatura no tema de interesse, também nos últimos cinco anos, entre 2015 e 2019. Esta análise foi feita a partir de uma revisão exploratória (não-sistemática), porém com elementos emprestados de metodologias voltadas a revisões sistemáticas, particularmente para a descoberta, seleção de estudos primários e extração de dados.

A opção por focar em artigos de revisão literária se apresentou como uma forma eficiente de explorar o estado da arte em uma área como a de aplicações RV, ainda cientificamente pouco consolidada, com uma terminologia pulverizada, crescimento exponencial no número de publicações nos últimos anos, e diversidade de finalidades, áreas e contextos de aplicação. Assim foi possível explorar os principais avanços, limitações e tendências da pesquisa recente, de forma sintetizada, simplificando o tratamento do grande volume e dispersão de publicações geradas sobre o tema no período considerado, para os nossos fins.

As etapas de descoberta, seleção de estudos e extração de dados seguiram uma metodologia baseada em (KITCHENHAM, 2004), que é por sua vez uma síntese baseada em (CLARKE; OXMAN, 2000; NHMRC STAFF, 2000a, 2000b; UNIVERSITY OF

YORK. NHS CENTRE FOR REVIEWS AND DISSEMINATION, 2001), e adaptada para as necessidades específicas da pesquisa na área de Engenharia de Software. Também utilizamos elementos da metodologia implementada na ferramenta de software sTart (FABBRI et al., 2016), que foi utilizada para suporte informacional em diversos aspectos operacionais do procedimento de revisão de um alto número de resultados.

Uma combinação de termos de busca similares aos da etapa 3.1 foi aplicada às bibliotecas de publicações mencionadas a seguir, associados ainda aos termos (Review OR Survey), ou utilizando filtros específicos dos buscadores para retornar apenas artigos do tipo revisão literária. Os resultados de cada busca foram consolidados e considerados conforme certos critérios de inclusão. Artigos relevantes contidos nas listas de referências dos resultados incluídos, e outros encontrados de forma exploratória, também foram avaliados. Para inclusão de um estudo primário, aplicamos os seguintes critérios:

- (i) Disponibilidade do texto completo: disponível para consulta livre de custos adicionais, através de bibliotecas abertas, auto-publicação online, concedido pelo autor para os fins desta pesquisa, ou através dos convênios da USP com outras bibliotecas de publicação científica, como o Portal de Periódicos Capes..
- (ii) Idioma de publicação: Inglês ou Português.
- (iii) Foco em finalidade educacional: artigos que se concentraram na revisão de instrumentos de finalidade educacional, com aplicação direta em contextos de aprendizado, treinamento, instrução ou educação.
- (iv) Aplicação de AVIs com imersão por HMD: O artigo se concentra na aplicação de Ambientes Virtuais Imersivos, com imersão implementada por algum tipo de dispositivo de Realidade Virtual de alta imersão: *HMD* ou *Cave-like*;
- (v) Literatura de revisão: Artigos que apresentaram uma revisão de literatura, com metodologia sistemática ou de escopo suficientemente compreensivo no estudo de casos e discussão apresentada, para os nossos fins.

Em síntese, para inclusão nesta análise, tomamos todas as publicações que apresentam uma revisão de literatura tratando de uma ou mais aplicações educacionais de

ambientes virtuais imersivos com imersão por HMD. Reiterando que esta etapa de revisão não foi uma revisão sistemática, tomamos a liberdade de incluir alguns resultados que não atenderam a todos os critérios, por serem considerados relevantes à nossa discussão, bem como de excluir certos resultados considerados pouco relevantes, ainda que tenham cumprido todos os nossos critérios de inclusão.

Ao término do processo de descoberta obtivemos 302 resultados, dentre os quais 60 duplicados. Aplicando nossos critérios de inclusão, chegamos a um número de 15 estudos incluídos para extração dos resultados.

Figura 3.2.1 Fluxograma da revisão literária

3.2.1. Resultados da Síntese

Após a análise dos resultados incluídos, faremos a seguir uma síntese das conclusões obtidas nesta etapa. Dada a heterogeneidade observada entre os artigos analisados, que apresentam uma diversidade de questões de pesquisa, metodologia, apresentação de resultados, formatos e focos de discussão (FREINA; OTT, 2015; LORENZO et al., 2019;

WEISS et al., 2018), optamos por fazer uma síntese narrativa em formato livre de nossas observações, considerando este um formato adequado neste caso. Os trechos a seguir se baseiam na síntese apresentada no Anexo 1 e na bibliografia correspondente referenciada neste, quando não diretamente citadas no próprio texto.

3.2.1.1. Ritmo crescente de pesquisa

Em primeiro lugar, apontamos que foi unânime a observação do ritmo crescente de pesquisa em RVI para educação na última década. Embora seja uma tendência apontada em praticamente todos os estudos recentes na área, não foi observada especificamente nenhuma discussão mais aprofundada sobre os fatores contribuindo para esta tendência. De um modo geral, os autores enunciam como justificativa deste fato o simples crescimento da disponibilidade, acessibilidade e capacidades do aparato tecnológico necessário para estudos em RVI (FREINA; OTT, 2015; JENSEN; KONRADSEN, 2018; KAVANAGH et al., 2017).

3.2.1.2. Potencial percebido da tecnologia

Além disso, uma maioria entre os autores argumentam em favor do grande potencial de aplicação de tecnologias de RVI para a educação do futuro (FREINA; OTT, 2015; JENSEN; KONRADSEN, 2018; KAVANAGH et al., 2017; WEISS et al., 2018); mesmo que o estabelecimento de paradigmas, procedimentos, e melhores práticas pedagógicas necessárias para esta aplicação bem sucedida em larga escala ainda venha se mostrando elusivo.

3.2.1.3. Motivações e justificativas de adoção

As motivações extrínsecas e justificativas para a adoção de RVI na educação são um tema recorrente nos estudos incluídos, e foram analisados em todos os casos, em maior ou menor profundidade. A seguir sintetizamos algumas motivações e justificativas frequentemente citados para a aplicação de RVI (FREINA; OTT, 2015; JENSEN; KONRADSEN, 2018; KAVANAGH et al., 2017; WEISS et al., 2018):

- Acessibilidade de ambientes simulados em relação a um ambiente real inacessível ou 'impossível': exploração espacial, biologia celular, etc.;

- Existência de elementos de risco no mundo real, onde uma simulação em RVI pode produzir efeitos psicológicos, afetivos e cognitivos similares ao mundo real, mas evitando por sua vez os riscos envolvidos na situação concreta.
- Existência de limitações éticas: determinadas configurações experimentais que seriam simplesmente impossíveis do ponto de vista ético com participantes e em ambientes completamente reais, são passíveis de serem exploradas em simulações virtuais. A introdução de ambientes e avatares virtuais, controlados algoritmicamente, que não necessariamente se sujeitam às mesmas restrições éticas aplicáveis aos seus paralelos reais, permite uma nova gama de configurações experimentais em estudos em diversas áreas envolvendo o comportamento humano.
- Suporte natural a paradigmas pedagógicos: princípios como construtivismo, colaboração, aprendizado empírico, e gamificação, possuem implementações relativamente naturais através das capacidades da RVI, tornando a tecnologia uma escolha adequada para abordagens pedagógicas baseadas nestes princípios.
- Fatores de percepção do estudante: aumento de imersividade, motivação, satisfação, engajamento, personalização.
- Controle mais sistemático sobre estímulos intangíveis, como elicitación de medo, compaixão, violência, e etc., abrindo um novo leque de possibilidades em educação psicológica, emocional, e afetiva.
- Potencial de automação de rotinas de treinamento, repetibilidade de condições de treinamento

3.2.1.4. Potencial dos ambientes imersivos na indústria do ensino e a formação em enfermagem na Alemanha

(WEISS et al., 2018), ao revisar a literatura no uso de RVI em educação de enfermagem, apresenta argumentos interessantes sobre os fenômenos e tendências do mercado de trabalho alemão no ensino e prática da enfermagem, que posicionam o desenvolvimento de aplicações educacionais em RVI como um pilar importante da indústria no futuro próximo, para que seja possível atender a escala da necessidade econômica que vem se configurando naquele mercado.

Especificamente, as projeções para 2020 é de que haja um déficit de 165.000 cuidadores profissionais; já o número de pessoas na necessidade de cuidados irá duplicar, para 4.5 milhões até 2060. Enquanto isso, de um número entre 9.000 e 11.000 de ingressantes na carreira de enfermagem em 2009 e 2010, apenas 6.500 pessoas ingressaram neste mercado em 2018.

A sistematização, padronização e automação de etapas no ensino e treinamento de profissionais da enfermagem é uma frente potencial de mitigação deste déficit, já que pode reduzir os custos de treinamento profissional na área, diminuindo as barreiras de entrada na carreira, ao mesmo tempo em que alivia o déficit de profissionais educadores da enfermagem que deve acontecer como consequência no declínio no quadro geral de profissionais na área.

Por ser particularmente adequada a cumprir requisitos de repetibilidade e automação, o uso de ambientes virtuais se apresenta como uma ferramenta natural a ser aplicada de forma fundamental nos procedimentos de treinamento do futuro.

3.2.1.5. AVIs como ferramenta de apoio educacional

Em uma parcela significativa dos casos analisados (Anexo 1) o uso de RV, RVI, e HMDs foi capaz de introduzir resultados de aprendizagem positivos nas configurações experimentais produzidas, para contextos, temas, e tipos de conhecimento diversos: aumento no conhecimento e habilidades do aluno, aumento no seu engajamento e satisfação, resultados de aprendizagem, domínio de habilidades, entre outros.

Este fato parece promissor; contudo, alguns fatores nesta área de pesquisa ainda merecem atenção, em nossa opinião: O fato de muitos estudos estarem voltados à descrição e validação de um produto de desenvolvimento em RVI, faz com que naturalmente estes apresentem um viés de confirmação positiva. Além disso, o grau de rigor científico obtido em muitos destes experimentos pode ainda não ser suficiente para conclusões mais gerais, particularmente devido a populações amostrais relativamente pequenas; ou em muitos casos, as perguntas de pesquisa, e a exploração científica produzida em consequência ainda são demasiado específicas para produzir generalizações

de conhecimento científico no tema. Por último, o efeito motivacional da RV muito provavelmente possui uma componente de 'efeito novidade' (Kavanagh), que deve diminuir conforme a adoção da tecnologia aumenta, introduzindo mais um viés positivo aos resultados contemporâneos.

A este respeito, (JENSEN; KONRADSEN, 2018) levantam uma questão muito interessante sobre a eficácia no uso de HMDs para educação, enunciando que apenas o seu uso não necessariamente melhora a aprendizagem em uma simulação virtual; talvez a questão de pesquisa mais pertinente em um estudo que se proponha a medir a eficácia educacional de tecnologias de RVI seria se uma certa simulação, visualizada por HMD, pode causar aprendizagem, e por quê. A partir de análises como esta podem se tornar mais claros os elementos, funcionalidades, técnicas, paradigmas, práticas, e etc., que melhor sirvam para compor um corpo de conhecimento e habilidades necessárias para a construção sistemática de simulações de RVI que melhorem objetivamente a aprendizagem.

3.2.1.6. Influência de imersão e presença no aprendizado

Os estudos analisados de uma forma geral se baseiam na premissa de que o uso de maior imersão, por exemplo, por tecnologias de HMD no lugar de desktop, tem um impacto positivo no aprendizado. Embora esta pareça ser uma premissa oculta em quase todo estudo de aplicação em RVI hoje em dia, ainda não encontramos consenso científico suficiente para se estabelecer um vínculo objetivo entre imersão e aprendizado. Conforme a exposição do Cap. 2, acreditamos que a construção desta argumentação passa necessariamente pelo conceito de percepção de presença.

Entre os impactos do uso educacional de RVI, foi muito comum a ocorrência de maior engajamento dos alunos. Por exemplo, os participantes em grupos experimentais de maior imersão passaram voluntariamente mais tempo nas tarefas de aprendizado; também levaram a versão imersiva de simulações virtuais mais a sério, evitando obstáculos e perigos com maior cuidado no decorrer da simulação (ABADIA; CALVERT; TAUSEEF, 2018; QUEIROZ et al., 2018).

Como evidência de que o conteúdo pode ser considerado um fator mais ou menos ortogonal influenciando a imersão e percepção de presença, destacamos relatos de que em certos casos o acréscimo de elementos como áudio tridimensional e renderização 3D das mãos do usuário foram contraproducentes (FEALY et al., 2019), confundindo alguns estudantes e distraíndo da tarefa da aprendizagem. Como elementos similares já foram observados com influência positiva na percepção de presença em certos casos (BERTRAND et al., 2018), é possível que estes relatos destacados tenham relação com o conteúdo específico das simulações e sua forma de introdução, mais do que com a sua mera presença ou ausência na simulação.

Baseado na exposição do Cap. 2, podemos dizer que qualificar a percepção de presença é um passo fundamental para estabelecer melhor as relações causais entre mídia e conteúdo, e os potenciais impactos cognitivos provocados pela interação com estes, como o aprendizado. Ou seja, é importante qualificar a relação entre imersão, presença e efeitos cognitivos de simulações em RV para uso educacional. A percepção de presença pode ser considerada o primeiro impacto cognitivo de alto nível que se produz em um indivíduo quando este consome qualquer mídia, seja o papel impresso, uma aula convencional, ou uma simulação em RVI visualizada por HMD. Está associada por um lado ao foco de atenção individual de momento em momento, e por outro às características da mídia e conteúdo, como o seu poder de imersividade característico, e a qualidade do conteúdo relativa à cultura e às preferências do indivíduo. Quando mídia e conteúdo são associadas com êxito, apresentam a qualidade de capturar naturalmente a atenção do receptor, provocando um grau de percepção de presença, ainda que seu poder de imersividade possa ser relativamente baixo.

3.2.1.7. Fatores que influenciam a percepção de presença

Por ser a percepção de presença um fator de forte influência na qualidade de impacto cognitivo que uma simulação em RVI pode gerar, uma das questões correntes na literatura é o estabelecimento de métricas, tomada de medidas, e análise voltadas ao estudo da presença, e especialmente de fatores que a influenciam em uma simulação de RV.

Entre os fatores correlacionados à percepção de presença, temos que o realismo gráfico é positivamente correlacionado, enquanto latência gráfica, e taxa de quadros muito baixa ou muito variável, estão negativamente correlacionadas, até certo ponto em que o aumento na taxa de quadros não produz mais impacto significativo sobre o fenômeno da presença (ABADIA; CALVERT; TAUSEEF, 2018; FENG et al., 2018; JENSEN; KONRADSEN, 2018; KAVANAGH et al., 2017).

Porém pela sua natureza relativamente volátil, e relacionada a fatores psicológicos individuais, também há relatos de impactos por causas mais prosaicas ou subjetivas, e de controle mais difícil, como relatos de que a consciência de outras pessoas observando o participante em imersão impactou negativamente a percepção de presença (ABADIA; CALVERT; TAUSEEF, 2018). Resultados semelhantes levaram (LAMPTON et al., 2018) a argumentar que personalidades mais ansiosas ou reservadas tendem a ter uma experiência menos positiva e menor percepção de presença.

Também há fatores fisiológicos que produzem impactos na presença. A percepção de presença pode ser maior quando o participante está em pé, do que quando sentado, por exemplo (SLATER; USOH; STEED, 1994). Pessoas com graus de exotropia, ou que não sejam capazes de reconstruir a informação de estereoscopia a partir de um par estéreo, também não usufruirão inteiramente dos efeitos de imersão por gráfico estéreo, e consequentemente de quaisquer influências destes em sua percepção de presença.

3.2.1.8. Medidas e Configurações Experimentais

Quando a intenção dos autores foi medir resultados de aprendizagem para conhecimentos conceituais ou emocionais, bem como para obter medidas como percepção de presença, usabilidade, engajamento e outras de natureza mais subjetiva, observamos a prevalência do uso de questionários de autoavaliação, geralmente em formato de múltiplas questões em escala de 1 a 5, baseadas no modelo Likert (NORMAN, 2010). Este formato apresenta as vantagens de oferecer uma coleta simples dos dados, o tratamento mais simplificado e objetivo destes, e maior simplicidade para os participantes. Por outro lado, boas perguntas para compor este tipo de questionário, que

não venham a introduzir vieses pelas suas premissas ocultas e pela própria linguagem utilizada, permanecem complexas de serem criadas e validadas.

Medidas de performance são comuns para avaliar o aprendizado em aplicações de RVI, particularmente para simulações voltadas a conhecimento procedural e psicomotor. Tempo de conclusão, taxa de acertos, taxa de erros, foram algumas das medidas de performance mais frequentes (ABADIA; CALVERT; TAUSEEF, 2018; FEALY et al., 2019; QUEIROZ et al., 2018). Muitos destes estudos apresentam uma única métrica para a performance, o que não permite obter resultados tão robustos quanto a combinação de múltiplas métricas.

O risco de uma única métrica não capturar adequadamente o significado real de performance em uma tarefa é alto. Consideramos que a inclusão de métricas de performance que permitam avaliar aprendizado é uma adição bem-vinda sempre que haja pertinência para tal, mas que esta inclusão seja feita de forma deliberada e planejada, de preferência combinando múltiplas métricas ortogonais que permitam retratar de forma mais fiel a performance real dos indivíduos.

A coleta automática de dados de uso da aplicação, e o seu tratamento utilizando técnicas em inteligência artificial e *learning analytics*, é não apenas uma ferramenta importante para aprimorar procedimentos e resultados experimentais, mas também tem potencial de ser um elemento integrador fundamental para aplicações educacionais em RVI, permitindo funções como análise de aprendizagem e feedback automatizados e personalizados para cada indivíduo (LUOTO, 2018; QUEIROZ et al., 2019).

A partir destas observações, pode-se argumentar que a configuração experimental ideal para estudos de educação aliada a AVIs combina medidas quantitativas e qualitativas, de forma a permitir reflexões que combinem percepções subjetivas dos participantes com dados numéricos de aprendizagem, performance, uso do sistema, e etc. Além disso, a coleta de dados deve fazer um bom uso das capacidades inerentes de tomada e registro automático de medidas dos sistemas computacionais interativos, em particular em sistemas com uma riqueza de modos de interação e fluxos de dados como os das aplicações de RVI contemporâneas.

3.2.1.9. Barreiras para adoção

No campo das limitações que dificultam a adoção e uso de sistemas RVI para aplicações educacionais, se destacam os pontos a seguir, mencionados com maior frequência (CONCANNON; ESMAIL; RODUTA ROBERTS, 2019; JENSEN; KONRADSEN, 2018; KAVANAGH et al., 2017; WANG et al., 2018):

- *Tecnologia gráfica*: realismo insuficiente, latência e flutuação na taxa de quadros.
- *Tecnologias de rastreamento e interação*: as tecnologias e paradigmas de input para RVI ainda não são muito bem consolidadas, com configurações muito diversas de rastreamento e input, além de não haver consenso na forma ideal para muitas interações em RVI, como por exemplo a navegação espacial.
- *Conteúdo*: falta de conteúdo educacional disponível ou ferramentas de autoria para instrutores, somada aos altos custos de produção de novas simulações.
- *Usabilidade do software*: interfaces pouco intuitivas, metas pouco claras, problemas de navegação.
- *Saúde, ergonomia e conforto*: manejo e gerenciamento em sala de aula ainda são complexos, introduzindo custos humanos consideráveis; o uso de HMDs introduz em muitos casos efeitos fisiológicos deletérios, como dores de cabeça, enjôo, desorientação.
- *Equidade*: ainda que tenda a diminuir, o custo dos sistemas para aplicações de RVI ainda é relativamente significativo, o que dificulta a sua adoção em larga escala. Sistemas de baixo custo baseados em BYOD requerem que alunos já possuam dispositivos móveis com especificações ainda consideradas avançadas. Além disso, a ocorrência e impacto de reações fisiológicas adversas não parecem ser uniformemente distribuídos entre os indivíduos.

Algumas destas barreiras, pela sua natureza, devem ser gradualmente aliviadas com o progresso do desenvolvimento tecnológico. Já outros têm natureza intrínseca à essência dos problemas particulares às simulações em RVI para educação, e apenas serão aliviados com a construção de um corpo de conhecimento de paradigmas e melhores práticas na criação e uso deste tipo de simulação; ainda assim, para alguns destes fatores a obtenção

de soluções generalizáveis pode não ser viável (ABADIA; CALVERT; TAUSEEF, 2018), e possivelmente serão sempre um fator de complexidade ao se introduzir simulações de RVI em qualquer contexto.

A barreira da equidade e inclusividade, especificamente, é de relevância particular para os propósitos da educação, e apresenta diferentes aspectos. Existem limitações, por exemplo, intrínsecas à relação do corpo humano com tecnologias de RVI, que prejudicam ou até impedem o usufruto destas por uma parcela da população (BRADLEY; NEWBUTT, 2018; CONCANNON; ESMAIL; RODUTA ROBERTS, 2019; JENSEN; KONRADSEN, 2018). Neste aspecto a única forma de garantir que um instrumento educacional seja verdadeiramente inclusivo e equânime será quando este incluir veículos diversos e equivalentes para a transmissão de um mesmo conhecimento. Por exemplo, se for incluída a RVI, deve se considerar a inclusão da mesma simulação em versão de baixa imersão, menos propensa a provocar desconforto fisiológico.

No quesito custo, é importante observar que cada incremento de custo para implementar uma proposta pedagógica vai excluir uma porcentagem correspondente da população, e vice-versa. Desse modo, não obstante a redução constante nos custos da tecnologia, estas questões devem ser consideradas de forma cuidadosa e deliberada em relação aos objetivos e público-alvo de uma simulação educacional em RVI.

3.2.1.10. Superando as Limitações da Tecnologia

Conforme argumentamos acima, entre as barreiras para adoção de RVI na educação, encontramos limitações extrínsecas, cuja superação depende mais de avanços e desenvolvimentos em segmentos diversos da tecnologia de base para RVI, não relacionadas apenas ao seu uso educacional; e limitações intrínsecas, inerentes à natureza do uso geral e educacional da RVI, e a sua relação com a fisiologia e cognição humanas. As limitações deste tipo dependem para a sua superação da construção de conhecimento científico embasado sobre o aprendizado em RVI, e do estabelecimento de paradigmas e melhores práticas específicos às simulações de RVI envolvendo disciplinas além das engenharias de hardware e software, como design, psicologia, pedagogia, entre outras.

Como exemplos de limitações extrínsecas, podemos destacar características da tecnologia de imersividade, como taxa de quadros, realismo gráfico suportado, latência geral do sistema, amplitude do campo de visão, limitações dos dispositivos de input, e custo de aquisição. O avanço destes parâmetros depende mais diretamente do desenvolvimento das tecnologias de hardware e computação gráfica para RVI, estimulado tanto por melhorias tecnológicas quanto pela evolução do mercado de RVI como um todo.

Também podemos considerar limitações extrínsecas certos impactos fisiológicos do uso de RVIs, como dores de cabeça, desorientação e enjôo de simulação, que podem acometer uma proporção significativa de seus usuários. Estes impactos parecem estar fundamentalmente associados a princípios fisiológicos do funcionamento dos sistemas perceptuais humanos, como o sistema visual e proprioceptivo.

Por exemplo, ao visualizar gráficos estereoscópicos em uma tela de HMD ou desktop, não é possível de emular de forma natural a mesma relação entre vergência e acomodação do aparato visual humano, já que a tela, e portanto a emissão de luz, se encontra sempre a uma distância focal fixa dos olhos, ao mesmo tempo em que o estímulo visual estereoscópico apresenta uma informação conflitante sobre a distância dos objetos (KRAMIDA, 2016; RYANA; MACKENZIE, 2012). Outro fator importante é a disparidade perceptiva provocada pelo movimento do campo visual dentro da simulação, sem que haja um estímulo correspondente a este no sistema vestibular, gerando uma percepção visual de movimento sem que haja a percepção vestibular correspondente, a *vecção* (NICHOLS; PATEL, 2002).

Estes fatores fisiológicos associados a RVI apresentam limitações extrínsecas de difícil tratamento, onde ainda não se pode afirmar se existe a possibilidade de superá-las totalmente apenas com a melhoria do aparato tecnológico, no curto e médio prazo. Atualmente os melhores esforços neste sentido, ao se desenvolver simulações em RVI, consistem na construção criteriosa do conteúdo da simulação e de seus paradigmas de interação, de forma a minimizar estes efeitos. Por exemplo, a introdução de um ou mais elementos de 'incorporação virtual' (*embodiment*), permanentemente fixos no campo

visual do usuário, como o cockpit de um veículo, um nariz, ou mãos virtuais, têm sido utilizadas como forma de mitigar o enjôo de simulação (SLATER; USOH, 1994).

Também ao considerar a navegação dentro de uma simulação RV, encontramos em geral paradigmas de interação que evitam permitir a translação livre do ponto de vista virtual do usuário, fazendo uso de navegação por teletransporte livre ou entre pontos fixos, condução por 'trilhos' virtuais, e de forma geral uma abordagem mais cuidadosa do aspecto da locomoção virtual, para mitigar os seus possíveis efeitos fisiológicos. Também é necessária atenção aos padrões visuais que serão renderizados, pois a visualização de padrões geométricos repetitivos como listras ou grades em uma simulação de RVI pode induzir enjôos, mesmo que a movimentação do ponto de vista do usuário seja limitada em seus graus de liberdade.

Passando a considerar as limitações intrínsecas, observamos uma frequência significativa de relatos envolvendo questões de usabilidade do software de simulação (KAVANAGH et al., 2017), como interfaces contraintuitivas, metas pouco claras dentro da simulação, dificuldades de navegação, entre outras associadas à usabilidade. Para esta categoria de limitação, acreditamos que a forma de superá-las envolve o estabelecimento e uso de melhores práticas de projeto de conteúdo e interatividade para simulações em RVI, de forma a aprimorar a usabilidade do software face aos requisitos específicos da RVI para interatividade.

Também se encontram relatos frequentes de custos adicionais de tempo e esforço exigidos tanto para a produção de uma simulação em RVI (CONCANNON; ESMAIL; RODUTA ROBERTS, 2019), quanto para a sua operacionalização no dia-a-dia da instituição. Estas simulações exigem mão-de-obra altamente especializada no seu desenvolvimento, e um certo conhecimento técnico de seus operadores.

As duas limitações intrínsecas mencionadas acima podem ser enfrentadas, até certo ponto, com a construção e adoção de ferramentas de autoria de conteúdo para simuladores RVI, que diminuam os requisitos de expertise técnica necessária para o seu desenvolvimento, e também ofereçam soluções comuns para os casos de interação mais usuais, contribuindo para consolidar um vocabulário comum para as metáforas de

interação em RVI. Ainda assim, é mais provável que uma tal ferramenta possa apenas facilitar uma fase do processo, ainda sendo necessário dispor de algum grau de competência técnica em engenharia de computação, software, computação gráfica, gráficos digitais, entre outras, para o desenvolvimento completo de uma simulação em RVI.

3.2.1.11. Lacunas na literatura

A pesquisa científica de simulações educacionais em RVI ainda é um campo relativamente novo; embora se possa encontrar estudos datando de algumas décadas atrás (MIKROPOULOS; NATSIS, 2011) que já abordaram o tema, é na última década que se observa um crescimento explosivo no volume de publicações. Como principais limitações e lacunas reportadas na pesquisa científica, encontramos com frequência menção à falta de rigor científico nas configurações experimentais observadas. Tamanho insuficiente de amostras, ausência de grupos de controle, ou tentativas de comparar grupos de comparação inválida (KAVANAGH et al., 2017) foram algumas das insuficiências mais relatadas. Além disso, em muitos campos de aplicação o baixo número ou até mesmo inexistência de estudos específicos se apresenta como uma lacuna; ou, ainda que haja um número considerável de estudos, poucos são executados de maneira mais longitudinal, com populações amostrais maiores, e maior número de sessões, distribuídas ao longo do tempo, em paralelo ao acompanhamento experimental. Muitas vezes foi apresentado um sistema de RVI funcional e uma configuração experimental sólida, porém não se apresentou uma argumentação satisfatória a respeito da validade pedagógica do conteúdo simulado, ou dos instrumentos de avaliação utilizados no experimento.

A introdução de vieses também é um fator mencionado, particularmente pelo fato de um número significativo de estudos na área serem produzidos como forma de validar o desenvolvimento prévio de um produto de RVI específico, e não para a descoberta e generalização de conhecimento científico sobre pedagogia em RVI, o que certamente tem introduzido um viés de avaliação positiva em muitos estudos. Estas lacunas e limitações ainda impedem a generalização de conclusões sobre os benefícios do uso educacional de RVI. Para que se construa um consenso mais sólido neste sentido, ainda é necessária a realização de estudos em maior quantidade e, acima de tudo, maior rigor científico.

3.2.1.12. Sumário da Revisão do Estado da Arte

A tabela no Anexo 1 apresenta um sumário das referências consultadas para esta revisão, destacando ainda pontos que não foram apresentados nesta discussão.

4. METODOLOGIA

Nesta seção descrevemos a metodologia geral deste trabalho, com alguns detalhes dos procedimentos de desenvolvimento das ferramentas imersivas estudadas, bem como os protocolos de experimento e outras informações relevantes à metodologia de execução da pesquisa.

Pela perspectiva construída durante a revisão da literatura e disciplinas regulares, notamos que a produção de estudos que evidenciem impactos, potencialidades e limitações do uso educacional de RVI podem ser relevantes para contribuir com o uso das tecnologias imersivas na educação de forma adequada e eficaz. Neste sentido, esta pesquisa fez dois estudos de caso sobre o uso de ferramentas de imersão 3D em RVI, um deles no contexto de uma aula imersiva, e o outro sobre uma ferramenta para treinamento imersivo.

O primeiro estudo de caso, denominado 'Aula Imersiva', avaliou o uso de uma ferramenta desenvolvida no Interlab-USP com a colaboração do autor, cujo intuito era aprimorar a exposição de conteúdo durante uma aula de uma disciplina da graduação. No formato de aula proposto, os estudantes utilizaram os visualizadores de RV em sala de aula, simultaneamente à explicação do professor. Os visualizadores de RV do tipo 'cardboard', construídos ao se acoplar um *smartphone* comum a um suporte de papelão rígido, plástico, ou outro material, e ainda um par de lentes, são uma opção de *headset* RV de baixo custo, e usabilidade simples, tornando-os uma alternativa com escalabilidade relativamente superior a outras disponíveis, e por isso mesmo uma escolha interessante para este estudo de caso.

O segundo estudo de caso, denominado 'Treinamento Imersivo', deu-se sobre outra ferramenta desenvolvida no Interlab-USP com a colaboração do autor, baseada em uma plataforma de RVI com um *headset* mais sofisticado e alimentada por um PC *desktop* de alta capacidade de processamento gráfico. O VIDA Odonto é um simulador imersivo para treinamento de procedimentos em odontologia, como por exemplo a anestesia do nervo alveolar inferior por injeção, que foi o procedimento objeto de análise neste estudo de caso. O VIDA Odonto conta para este treinamento com um ambiente virtual similar a um consultório odontológico real, inclusive com um modelo 3D do paciente, cuja cabeça foi

modelada em alta precisão e alto grau de detalhamento das estruturas anatômicas relevantes no procedimento simulado. O estudante realiza o treinamento visualizando o ambiente virtual através de um *headset* com rastreamento espacial de cabeça em seis graus de liberdade, e manipulando a seringa virtual por uma interface de controle também com em seis graus de liberdade em uma região espacial restrita, e resposta háptica de força e vibração. A esta interface háptica foi acoplada uma seringa *carpule* real similar a utilizada no procedimento de fato, com qual os estudantes podem controlar a posição e orientação da seringa virtual.

Com estes estudos de caso, pretendemos avaliar o impacto da imersividade em ambientes de RV nas duas situações educacionais mencionadas, uma de instrução expositiva em sala de aula, e a outra de treinamento de um procedimento específico, envolvendo habilidade motora. Desenvolvemos, executamos e analisamos duas situações de uso experimental destas ferramentas, para produzir os resultados destes estudos de caso.

Na situação de instrução 'Aula Imersiva', detalhada na seção 4.1, o seu uso se deu em um contexto de sala de aula, com diversos alunos acompanhando simultaneamente a exposição do professor com o apoio de uma ferramenta de conteúdo imersivo, a Aula Imersiva em Tópicos de Computação Gráfica. A metodologia específica deste procedimento, a sua execução e resultados são detalhados e discutidos nas seções do texto a seguir.

A segunda situação, 'Treinamento Imersivo', detalhada na seção 4.2, envolveu a utilização da ferramenta de treinamento imersivo VIDA Odonto, para um treinamento experimental em procedimentos de anestesia voltado a estudantes de Odontologia. Organizamos um contexto de treinamento prático com estudantes de Odontologia, e a partir dos dados coletados nesta ocasião buscamos avaliar o impacto do uso desta mídia imersiva no contexto educacional de treinamento.

4.1. Aula Imersiva

4.1.1. Concepção

A partir da pesquisa bibliográfica inicial, das discussões em sala de aula, questões formuladas a partir destas, e da disponibilidade de ferramentas e competências técnicas, vislumbrou-se a possibilidade de desenvolver AVIs em Realidade Virtual, visando a aplicação em sala de aula para turmas do ensino superior. Estes AVIs poderiam ser utilizados como material de apoio à exposição de conteúdo em aula, enquanto serviriam como fundamento para procedimentos experimentais projetados para avaliar os fatores relevantes das experiências em realidade virtual em sala de aula, como imersão, presença, engajamento, usabilidade, e aquisição de competências e habilidades.

Para viabilizar uma tal experiência de RVI em sala de aula, em que os alunos pudessem acompanhar a exposição do instrutor ao mesmo tempo em que interagem com os conceitos explorados dentro do AVI, um requisito primário do desenvolvimento seria obter uma solução de baixo custo, para que fosse possível ter diversos kits imersivos durante a instrução, e assim possibilitar uma dinâmica de aula imersiva. Além disso, para aplicações em sala de aula como a proposta, é desejável que a solução encontrada também introduza poucas demandas de configuração, e ofereça uma alta mobilidade.

Por estes motivos chamou a atenção a possibilidade de utilizar um tipo de plataforma para RV introduzido recentemente, na forma do *Google Cardboard*. Entre as possibilidades de configuração surgidas em anos recentes, o *Google Cardboard* trouxe o conceito de plataformas RV baseadas em *smartphones*, uma ferramenta cuja ubiquidade vem crescendo exponencialmente, em que se utiliza da capacidade computacional destes dispositivos, como hardware de aceleração 3D e sensores inerciais, para dar suporte a experiências de RVI. Ao acoplar um tal dispositivo a um conjunto óptico de baixo custo, este se transforma em um visualizador de RVI simples, porém já suportando alguns dos elementos de imersão mais fundamentais característicos da Realidade Virtual Imersiva, como visualização estereoscópica, alto campo de visão, e campo de observação esférico em 360° com rastreamento de orientação da cabeça.

Figura 4.1.1 Ilustração de um visualizador de RV Google Cardboard

Estas plataformas apresentam uma série de características que tornam o estudo de seu uso em sala de aula uma possibilidade interessante, conforme os requisitos primários mencionados acima para tal uso. A primeira é o seu baixo custo em relação a outros dispositivos de RV, o que torna mais viável a sua aplicação em maior escala. Além do baixo custo, outras características que se mostram muito positivas para a sua utilização em sala de aula são os seus baixos requisitos de configuração, e alta mobilidade e ergonomia.

A configuração de um dispositivo do tipo *Cardboard* é de fato mais simples em relação a plataformas mais sofisticadas, exigindo apenas um dispositivo *smartphone* com o aplicativo relevante instalado, a fixação do *smartphone* no conjunto óptico, feita tipicamente por um simples encaixe, e uma etapa de configuração óptica para personalização - esta apenas uma vez por usuário e não a cada sessão. Além disso a alta mobilidade deste tipo de dispositivo é bastante desejável em sala de aula: a simplicidade em se vestir e remover um tal dispositivo permite que se alterne facilmente entre a visualização imersiva e a presença física no ambiente de aula, acompanhando de forma quase simultânea a apresentação do professor e a sua caracterização no ambiente imersivo.

A seleção de uma plataforma como o Google Cardboard, baseada em smartphones, para atender a estes requisitos de custo e mobilidade, também criou condições favoráveis para que explorássemos o paradigma de *Bring Your Own Device (BYOD)*, onde os

dispositivos portados pelos próprios participantes da aula podem servir como base para criação de experiências de aprendizagem com suporte tecnológico. Esta diversidade de fatores embasou a opção inicial neste estudo em se abordar as plataformas de RV do tipo *Cardboard*.

Feitas estas considerações, após a prototipagem inicial de um AVI para Google Cardboard em Unity 3D, e em linha com as diretrizes do prof. Orientador Romero Tori, que se prontificou a disponibilizar algumas de suas aulas nas disciplinas de computação gráfica para estudantes de engenharia e design da USP e do SENAC, foi fechado um formato para o conteúdo a ser implementado no ambiente de aula imersiva, que abordaria então tópicos de computação gráfica de forma imersiva e interativa. Mais especificamente, o AVI seria criado como uma ferramenta de apoio ao instrutor na exposição de tópicos em modelos de iluminação para ambientes virtuais 3D.

A possibilidade de criar conteúdo de apoio em RVI para tópicos de computação gráfica 3D se mostrou particularmente interessante, pela sinergia entre os conceitos teóricos abordados e a capacidade de um AVI 3D em demonstrar estes conceitos de forma interativa, diretamente na mídia a que se aplicam. Por exemplo, os alunos poderiam observar diretamente os efeitos visuais ao se alternar entre duas equações distintas para o modelo de iluminação 3D, ao mesmo tempo em que o instrutor discorre sobre estas equações e o significado de seus parâmetros, introduzindo assim elementos de aprendizado experiencial à aula.

Além dos requisitos primários já citados como custo, configuração e mobilidade, a opção feita pelas disciplinas e conteúdos específicos, ou seja, tópicos de iluminação em computação gráfica para estudantes de engenharia e design, determinou certas competências e habilidades cuja obtenção pelos estudantes deveria ser facilitada pelo uso do AVI. Estas orientaram então o conjunto de requisitos funcionais da aplicação que determinaram qual conteúdo seria introduzido no AVI, e quais interações com este conteúdo seriam suportadas. A tabela a seguir lista de forma não-exaustiva as principais competências e habilidades abordadas pela aula imersiva:

Lista de competências e habilidades - Aula Imersiva 01
Reconhecer o impacto visual da variação dos parâmetros da fórmula de iluminação no modelo renderizado em 3D
Identificar visualmente o efeito de um termo interpolador de normais na fórmula de sombreado
Diferenciar visualmente e conceitualmente os termos de iluminação ambiente e iluminação por fonte pontual no modelo
Reconhecer os efeitos visuais atribuídos a cálculos de especularidade, como cor especular, refletividade e uniformidade da superfície

Tabela 4.1.1 Competências e Habilidades Abordadas pela Aula Imersiva

Figura 4.1.2 Ilustração de conceito do ambiente virtual para aula imersiva.

4.1.2. Projeto e Desenvolvimento

Uma vez estabelecido um direcionamento inicial para a criação desta ferramenta de aula imersiva, deu-se início ao projeto e desenvolvimento da ferramenta propriamente dita. Utilizando o ambiente de desenvolvimento Unity 3D, no qual o autor já possuía alguma familiaridade no projeto de soluções para entretenimento e pesquisa, uma versão inicial do AVI em RV foi produzida com o conteúdo da aula imersiva, em conjunto com a equipe do INTERLAB, em que o seu usuário poderia controlar certos parâmetros de renderização da cena, através de uma interface de controle diegética; ou seja, cuja representação no mundo virtual é apresentada como parte deste próprio mundo, na forma de painéis de controle modelados em 3D com os quais o usuário poderia interagir direcionando a eles o seu olhar por alguns instantes.

Esta ferramenta de aprendizado é um ambiente em RVI, que permite que seus usuários rotacionem livremente o seu ponto de vista em torno de um ponto fixo no espaço, nos três eixos lineares x , y , e z , a partir das leituras dos sensores inerciais do dispositivo. Ou seja, apresenta três graus de liberdade rotacionais para o movimento de cabeça, a partir de um ponto de observação fixo no espaço. O usuário é imerso em um ambiente interno (Fig. 4.1.3) inspirado em uma ilustração do livro-texto do curso (WATT, 1993), enquanto pode controlar parâmetros dos modelos de iluminação e sombreado subjacentes, observando o efeito das mudanças introduzidas na renderização da cena, em um loop de retroalimentação imediato entre ação e percepção. O objetivo é familiarizar os estudantes com conceitos em computação gráfica e algoritmos de renderização 3D, como fontes de luz, cores difusa e especular de um material, refletividade de materiais e interpolação de vetores normais.

Figura 4.1.3 Elementos do primeiro protótipo do ambiente virtual para aula imersiva, baseado em uma ilustração em (WATT, 1993).

Os tópicos tema destas aulas, em particular, os modelos computacionais para iluminação e reflexão 3D, técnicas e algoritmos de renderização, conforme mencionado, apresentam em potencial uma boa sinergia com a mídia 3D interativa, no formato de uma aula imersiva em RVI. Este mesmo tipo de sinergia foi explorado em um contexto de educação à distância em, (DICKY, 2005), que argumenta:

"Dada a natureza deste ambiente de aprendizado, combinado ao seu conteúdo instrucional, teria sido difícil não proporcionar atividades autênticas. Os estudantes foram imersos tanto no conteúdo quanto na cultura de um ambiente 3D. [...] Pode se argumentar que este ambiente de aprendizado permitiu aos seus usuários a oportunidade, em certo sentido, de se tornarem incorporados no conteúdo instrucional e seu contexto. No lugar de apenas observar ações como rotação e translação de objetos de uma perspectiva em terceira pessoa, os estudantes puderam construir uma compreensão destas ações, a partir de uma perspectiva em primeira pessoa [...] (p. 448)."

Figura 4.1.4. Captura de tela do protótipo em operação, com um quadro das imagens correspondentes aos olhos esquerdo e direito do observador, visualizando um dos painéis da interface de usuário diegética.

4.1.3. A Interface de Usuário

(GALLOWAY, 2006) discute em profundidade o conceito de diegese, tomado como "a totalidade do universo de ação narrativa" em um mundo virtual. A não-diegese neste sentido refere-se aos elementos do aparato do mundo virtual que são externos ao universo de ação narrativa. Este conceito pode ser aplicado a qualquer elemento que constitua o aparato total de um mundo virtual: gráficos, efeitos sonoros e música, capacidades de interação, todos podem ser classificados como diegéticos ou não-dieгéticos em algum grau.

Aplicando este conceito à Interface Gráfica de Usuário (GUI), pode-se considerar dieгéticos os elementos da GUI que estejam de algum modo embutidos no espaço

narrativo do mundo virtual em questão, e não-diegéticos caso a sua representação se encontre distante ou fora do universo narrativo. Por exemplo, em um mundo virtual que simule uma sala de aula, uma fórmula apresentada como se estivesse escrita em uma lousa lousa virtual em giz é um elemento diegético, enquanto apresentar a mesma informação em uma caixa semi-transparente flutuando no ar tornaria este elemento não-diegético, ou menos diegético, já que caixas transparentes flutuantes ainda não fazem parte do espaço narrativo usual de uma sala de aula convencional, e tal apresentação causaria assim uma ruptura com o universo narrativo da simulação, tendo portanto um menor grau de diegese.

A discussão em (FAGERHOLT; LORENTZON, 2009) faz referência a uma outra dimensão dos elementos de uma GUI em AVIs 3D, que é a sua espacialidade: um elemento de GUI possui uma representação espacial se ele existe dentro do espaço 3D do mundo virtual, como parte dele; ou uma representação não-espacial, em outros casos (e.g., um display tipo HUD com elementos fixos sobrepostos à tela). O diagrama a seguir busca sintetizar estas dimensões dos elementos de GUI:

*Figura 4.1.5. Dimensões de diegese e espacialidade do elementos de Interfaces Gráficas de Usuário.
(FAGERHOLT; LORENTZON, 2009)*

A interface de usuário para a ferramenta de aula imersiva foi desenvolvida sob a suposição de que uma representação de interface totalmente diegética e espacial

ofereceria um efeito mais forte de imersão na ficção da simulação, e consequentemente uma sensação maior de presença no ambiente virtual. Portanto para contribuir com o elemento de imersão, uma escolha de projeto deliberada foi feita de se tornar a interface de usuário materializada e disponível inteiramente dentro do espaço narrativo do mundo virtual (Fig 4.1.6), no lugar de uma interface de usuário abstraída na forma de 'menus flutuantes' ou outras tais entidades que não parecessem conectadas ao mundo virtual de uma forma significativa. Através da interface, o estudante pode controlar uma diversidade de parâmetros dos modelos de iluminação global e local da cena em que se encontra imerso, como: intensidade e cor das fontes individuais de luz; intensidade e cor da luz ambiente; e parâmetros de sombreamento de objetos na cena como cores do material, refletividade, e interpolação de vetores normais.

Há três categorias de ajustes que o usuário pode realizar no modelo de iluminação do ambiente virtual: controles ambientais, controles de pontos de iluminação, e controles de sombreamento de objetos. Os controles de interface dentro de cada uma destas categorias consistem principalmente de controles deslizantes, chaves e botões. O usuário pode interagir com cada um destes controles direcionando o seu olhar a um elemento de UI e mantendo-o fixo por alguns instantes, até o acionamento do comando em questão. Para permitir o controle de todas as suas funções, os elementos de interface foram divididos em três painéis distintos, cada um com uma representação plenamente espacial, fixa no ambiente virtual 3D, como pode ser visto na figura a seguir:

Figura 4.1.6 A versão inicial da UI é representada como três 'consoles' estáticos com uma posição fixa no ambiente 3D. Pode ser classificada como diegética e altamente espacial.

Com o intuito de avaliar possíveis efeitos do grau de imersão da simulação sobre a experiência de aprendizagem e a percepção de presença induzida, foram criadas duas versões distintas de interface para o ambiente 3D onde se apresentava o conteúdo: uma versão experimental mais imersiva, onde o espaço de apresentação dos objetos de conteúdo da aula e o espaço de imersão do aluno usuário coincidiam (Fig. 4.1.6); e uma versão de controle pseudo-imersiva, onde o aluno se localizava em um espaço de imersão, porém os objetos de conteúdo, e as alterações efetuadas nestes através dos controles de interface, eram apresentados neste espaço de forma não-imersiva, como se estivessem projetados em uma tela de TV virtual (Fig. 4.1.7).

Figura 4.1.7. Versão pseudo-imersiva do conteúdo, utilizada pelo grupo de controle. O usuário interage com a mesma interface do grupo experimental, porém os objetos de conteúdo da aula são representados não no mesmo espaço virtual em que o usuário se encontra, mas em uma representação não-imersiva em uma tela de televisão virtual

4.1.4. Procedimento Experimental Aula Imersiva

Uma vez disponibilizada a versão inicial desta ferramenta em um aplicativo para *smartphones*, passou-se a projetar um procedimento experimental que permitisse avaliar o potencial de aplicação desta tecnologia imersiva em sala de aula. O objetivo ao realizar estes estudos seria primeiramente avaliar o impacto da imersão em RV na sensação de presença reportada pelos alunos, e no aproveitamento reportado da experiência imersiva; em um segundo momento, também foi avaliado o impacto de certas alterações na interface de usuário na usabilidade e satisfação geral com a experiência, baseado em questionários subjetivos e comentários livres dos usuários, aplicados durante cada estudo.

Figura 4.1.8. Aplicativo para o experimento em RV disponível na Google Play Store

4.1.4.1. Protocolo de Pesquisa

Observa-se que a validação experimental do uso de qualquer mídia no ensino em sala de aula está sujeita a uma série de fatores de interferência de difícil controle, como:

- Divergências na exposição conceitual, isto é, a mesma aula apresentada em momentos diferentes, dificilmente terá exatamente a mesma linguagem, método, gestos, etc., por parte do instrutor;
- Interferências cruzadas na atenção dos participantes, por estarem todos acompanhando a aula no mesmo ambiente;
- Curiosidade ou entusiasmo dos participantes em relação ao uso de uma nova tecnologia/mídia;

Na criação deste protocolo houve esforços no sentido de fixar esses fatores e isolar o fator imersão, de tal forma que eventuais interferências possam ser atribuídas ao único elemento que se altera, no caso a imersão no conteúdo.

Com estas considerações, o procedimento experimental projetado deu origem a um protocolo de experimento, aprovado pelo Comitê de Ética em pesquisa envolvendo seres humanos (CEPH). O protocolo completo se encontra no anexo 2.

4.1.4.2. Perguntas de Pesquisa

Para balizar o projeto destas atividades experimentais na situação de instrução em sala de aula, elencamos as seguintes perguntas de pesquisa, com o intento de explorá-las em maior profundidade através deste experimento:

P1. Quais as diferenças provocadas na experiência de aprendizagem de conceitos básicos de iluminação em computação gráfica, entre mídias não-imersivas e imersivas, sem alteração nas demais estratégias pedagógicas e condições ambientais ?

P2. Há alguma correlação entre percepção de presença e uso de mídia imersiva / não imersiva numa aula expositiva sobre conceitos básicos de iluminação em computação gráfica?

4.1.4.3. Questionário de Presença

Um aspecto de particular importância neste procedimento experimental, o processo de criação dos questionários para avaliação da percepção de presença, é um tópico sobre o qual há uma diversidade de literatura, com algumas divergências sobre as melhores práticas e a aplicabilidade de resultados obtidos através de tais questionários (Slater 2004; Usoh et al. 2000). Optou-se por utilizar uma versão traduzida para o português de questões extraídas do questionário de presença do Igroup (IPQ) (SCHUBERT; FRIEDMANN; REGENBRECHT, 2001), em uma escala Likert de 7 pontos, variando entre -3 ("discordo totalmente") e 3 ("concordo totalmente"), com 0 correspondendo a "não concordo nem discordo". O questionário foi adaptado ao cenário particular de Realidade Virtual (Tabela 4.2). Neste estudo o foco foi analisar as questões relacionadas à sensação de estar presente, imersão e envolvimento. Descartamos as questões do questionário original que eram relacionadas exclusivamente ao ambiente real.

QUESTÕES	GRUPO EXPERIMENTAL	GRUPO CONTROLE
1	Tive a sensação de estar dentro do mundo gerado pelo computador	Tive a sensação de estar dentro do mundo gerado pelo computador
2	De alguma forma senti que a sala virtual me envolvia	De alguma forma senti que o ambiente apresentado na tela de TV virtual me envolvia
3	Me senti como se estivesse apenas vendo imagens	Me senti como se estivesse vendo imagens na tela da TV
4	Me senti presente na sala virtual	Me senti presente no ambiente mostrado na tela da TV
5	Estive completamente cativado pelo mundo virtual	Estive completamente cativado pelo ambiente mostrado na tela da TV
6	Não me senti presente na sala virtual	Não me senti presente no ambiente mostrado na tela da TV

Tabela 4.1.2 Itens do questionário de presença dos grupos experimental e controle

Além da percepção de presença, foram introduzidas as seguintes questões dissertativas, para que os participantes oferecessem suas opiniões a respeito da experiência em geral, com o intuito de coletar ideias e possibilidades de melhoria no aplicativo.

- “Identifique e discuta os pontos fortes e os pontos fracos desta experiência”,
- “Comente sobre a interação com a interface e possíveis melhorias”
- “Você preferia aprender este conteúdo na forma apresentada, em slides, vídeo ou outra (especifique)?”.

4.1.4.4. Etapas do Procedimento Experimental

Com estas considerações, o procedimento experimental projetado deu origem a um protocolo de experimento, que foi posteriormente aprovado em comitê de ética. O texto completo deste protocolo se encontra no anexo 2; a seguir destacamos os pontos principais do procedimento em uma visão geral. Na criação deste protocolo houve esforços no sentido de fixar todos os demais fatores e isolar a variação do fator imersão entre os grupos de participantes, de tal forma que eventuais interferências possam ser atribuídas ao único elemento que se altera, no caso a imersão no conteúdo. O procedimento foi conduzido em quatro etapas:

Etapa 1. Avaliação de compatibilidade pré-experimento: para avaliar o grau de acessibilidade da ferramenta RV proposta, os estudantes deveriam baixar e instalar um aplicativo de benchmark nos seus dispositivos previamente ao experimento. Os estudantes teriam então que realizar algumas tarefas simples dentro de um AVI 3D simples (não-RV), permitindo que se familiarizassem com a operação da interface de usuário por direção do olhar, e para que tivéssemos uma medida de quantos estudantes poderiam executar o experimento em seus próprios dispositivos.

Etapa 2. Grupos experimental e de controle: para o experimento, os estudantes foram selecionados aleatoriamente para dois grupos, depois de se acomodarem na sala de aula sem saber previamente que seriam divididos em grupos. Cada estudante teve acesso ao mesmo tipo de headset RV tipo cardboard. Alguns estudantes utilizaram os seus próprios dispositivos, enquanto para aqueles que não puderam disponibilizar um dispositivo para o experimento, ou que não passaram no teste de compatibilidade, receberam smartphones providenciados pela organização do experimento. O primeiro grupo de 6 participantes foi designado como grupo experimental, e outros 6 como grupo de controle. Durante o experimento, o professor introduziu os conceitos básicos de iluminação local e global; em seguida, foi solicitado aos participantes de ambos os grupos que interagissem com o conteúdo da ferramenta de aula imersiva. Os participantes realizavam alterações nos parâmetros de renderização e observavam o seu impacto visual. O grupo experimental efetuava as alterações no próprio ambiente virtual em que se encontravam imersos. O grupo de controle observava as mesmas alterações refletidas nos mesmos objetos exibidos em uma tela de TV virtual.

Etapa 3. Preenchimento do questionário de presença: terminada a exposição do conteúdo pelo professor, foi solicitado aos participantes que preenchessem um questionário de presença online e também que respondessem questões dissertativas dando um retorno sobre a usabilidade do sistema de aprendizagem.

Figura 4.1.9 Fluxograma da metodologia experimental

Doze participantes foram recrutados para participar da primeira rodada experimental (uma do sexo feminino, onze do sexo masculino, idade $M=25,41$, $DP=2.71$). Os participantes eram estudantes matriculados no nível da graduação de um módulo de Tecnologia da Computação Gráfica na Escola Politécnica da USP. Pediu-se a todos os participantes que lessem e assinassem o termo de consentimento do anexo 2 para poderem participar no experimento. Havia alguns critérios para exclusão: gravidez, histórico de doenças cardíacas, labirintite e histórico de náusea provocada por simulação.

Figura 4.1.10 Participante da primeira rodada utilizando um visualizador VR do tipo cardboard.

4.2. Treinamento Imersivo

4.2.1. Concepção, Projeto e Desenvolvimento

Enquanto a aplicação de RVI para aprimorar a exposição de conteúdo ao vivo em sala de aula aparenta ser uma abordagem relativamente nova, o uso de RV para aprendizado orientado a treinamento de habilidades específicas já é uma prática mais bem estabelecida em muitas áreas (Kyaw et al. 2019; Jensen and Konradsen 2018; Ruthenbeck and Reynolds 2015; Pausch et al. 1992). No segundo estudo de caso realizado neste projeto, avaliamos experimentalmente o sistema de treinamento em RVI conhecido como VIDA Odonto, produzido pelo Interlab-USP. O VIDA Odonto oferece uma simulação de treinamento de anestesia do nervo alveolar inferior por injeção, inclusive com uma seringa carpule real acoplada ao dispositivo de interação com resposta háptica (Tori et al. 2018).

O sistema VIDA Odonto utiliza RVI para simular um ambiente virtual para o treinamento de procedimentos odontológicos, aplicando conceitos como a manipulação direta de objetos, interfaces diegéticas, e um paradigma de visualização holográfico, isto é, de imersão binocular 3D no ambiente 3D renderizado com liberdade de deslocamento do ponto de observação. Alguns dos diferenciais importantes do sistema proposto são a visualização holográfica, a possibilidade de movimentar-se livremente pelo consultório odontológico virtual, e de posicionar-se livremente em relação ao paciente virtual; a avaliação automática da performance de treino; e a gravação e visualização imersiva dos procedimentos efetuados para obtenção de *feedback* e graduação por notas. Estas são apenas algumas das funcionalidades que já foram incorporadas na versão atual, e o sistema está ativamente passando por novas expansões e desenvolvimentos (Tori et al. 2018).

Uma premissa importante por trás da iniciativa do projeto VIDA Odonto é a de que seria viável se desenvolver e operar um sistema de treinamento em RVI para estudantes de odontologia, para que aprendam e treinem procedimentos práticos diversos do seu cotidiano profissional, buscando criar uma experiência intuitiva, natural, com um impacto neutro ou positivo na carga cognitiva exigida, e que gere

uma forte percepção de presença, se aproximando da experiência real de efetuar tais procedimentos em pacientes humanos. Considerando o potencial de uso da RVI para implementação de abordagens de aprendizagem a distância em massa, devemos ainda levar em conta a diversidade de configurações de plataformas de RVI que poderão ser utilizadas pelos usuários finais no dia-a-dia. Assim, neste estudo exploramos uma das possíveis configurações de um tal sistema, entre diversos modelos e categorias de periféricos de entrada e saída possíveis para RVI, para avaliar o seu impacto em dimensões importantes da experiência, como a percepção de presença, o engajamento no aprendizado, e a usabilidade da ferramenta como um todo.

O procedimento de anestesia do nervo alveolar inferior por injeção foi eleito como a primeira unidade de treinamento a ser oferecida pelo sistema VIDA, motivado por, entre outros fatores, a disponibilidade de acessórios de treinamento padronizados no ponto-alvo de preço do sistema para o procedimento escolhido, e pela possibilidade de criar uma rotina de treinamento facilmente reproduzível e mensurável (Collaço 2019).

Figura 4.2.1. (a) Consultório odontológico virtual, (b) modelo 3D de uma cabeça humana, e (c) administração simulada de injeção dentro do AVI VIDA Odonto (Tori et al. 2018).

Em AVIs 3D voltados à educação médica como o VIDA Odonto, deve se tomar um grande cuidado com a precisão e realismo de modelagem do ambiente, equipamentos envolvidos nos procedimentos, e particularmente das estruturas anatômicas relevantes que serão visualizadas e manipuladas. Como tal, o desenho e modelagem 3D de uma cabeça humana anatomicamente correta, para os fins do procedimento de treinamento

selecionado, compôs uma linha de pesquisa em si própria dentro do Interlab desde os primeiros estágios de desenvolvimento do VIDA Odonto (Ribeiro et al. 2019; A Tori et al. 2014). Um ambiente 3D interno semelhante a um consultório odontológico real, incluindo uma cadeira odontológica, janelas, paredes, piso, elementos decorativos e pia médica. A cabeça foi completamente modelada em 3D e texturizada de uma forma anatomicamente correta, com foco em particular na região bucal, desde a estrutura óssea do crânio passando por cada camada de tecido na face humana, músculos, veias e artérias, nervos, pele e gengivas, permitindo visualizações altamente detalhadas dentro da região de interesse.

O ambiente virtual é composto pelo interior do consultório odontológico, um avatar do estudante, um paciente virtual, instrumentos virtuais, objetos de cenário, e controles de interface e câmera. Novos desenvolvimentos que permitirão a interação à distância com um instrutor, por meio de um avatar virtual, já estão em pauta para os próximos ciclos de desenvolvimento do VIDA. Este consultório odontológico virtual compõe o cerne da experiência no sistema VIDA, onde novos módulos podem ser desenvolvidos e incorporados para treinamento de novos procedimentos, integração de diferentes periféricos de entrada e saída, ensino à distância com orientação ao vivo por instrutor, e assim por diante. A versão já desenvolvida suporta aspectos importantes para o treinamento virtual, como: observação narrada do procedimento gravado conforme executado por um especialista, com uma visualização simulando raios-x de estruturas anatômicas; o treinamento do procedimento observado em um paciente virtual 3D manuseando uma seringa carpule real acoplada ao dispositivo de resposta háptica; e a medição da precisão e eficácia dos movimentos realizados, em comparação com trajetórias previamente gravadas da seringa quando manuseada por praticantes profissionais, possibilitando funções de avaliação e *feedback* automáticos (Tori et al. 2018).

A questão do registro envolve o posicionamento de objetos 3D virtuais em relação a objetos físicos no mundo real, de forma que a relação entre estes possa ser percebida, no que tange a sua posição e escala, de forma consistente com nossa experiência internalizada da realidade. Esta questão exige consideração cuidadosa em sistemas de RVI, dado que deve haver uma correspondência entre certos objetos físicos e a sua

representação no mundo virtual, como os dispositivos de entrada e saída percebidos pelo usuário, e seus modelos 3D renderizados no virtual, em correspondência espacial, isto é, em registro, com os controles e *displays* físicos que representam.

Devido a este princípio, diversas medidas foram implementadas no desenvolvimento do VIDA Odonto, como a modelagem cuidadosa de posições e proporções dos objetos 3D da cena virtual para que criem percepções de escala e distância relativas próximas às que se teria em um consultório real equivalente. Além disso, a calibragem das posições ideais para o rastreamento de mãos e cabeça e para o posicionamento da câmera virtual e do avatar foi instrumentalizada e incluída como uma função de configuração do sistema para que uma instalação adequada possa ser obtida mais rapidamente em uma variedade de contextos. A figura 4.2.2 mostra um exemplo de imersão de uma estudante no ambiente virtual.

Figura 4.2.2. Imersão de uma estudante no ambiente virtual VIDA Odonto (Tori et al. 2018).

Para aprimorar ainda mais o realismo de simulação, uma seringa carpule real foi acoplada ao dispositivo de interface háptico, incluindo funções de resposta de força específicas à situação modelada, como simulação da resistência dos tecidos e endurecimento do braço mecânico do dispositivo háptico em caso de manuseio do instrumento fora de um limite de curso pré-determinado. O registro espacial entre a mão real e a mão virtual, e entre o instrumento real e o instrumento virtual, é atualmente derivado da calibragem de posição deste dispositivo háptico no ambiente virtual. Complementando a possibilidade de controlar a seringa virtual pelo manuseio direto de uma seringa real, o sistema deve futuramente incluir um acessório real na forma de uma cabeça humana, registrada espacialmente com a cabeça do modelo 3D do paciente, com

a manipulação real das bochechas e boca do acessório sendo refletida na cabeça 3D virtual. Também será possível a um instrutor acompanhar e interagir com a simulação, observando o estudante em imersão por RVI, seja ao vivo ou por gravações, trocar de posição com o estudante, e avaliar a sua execução do procedimento.

Uma das funções mais inovadoras permitidas pelo sistema VIDA é o módulo de avaliação automática de performance. Ele é baseado em gravações da trajetória 3D das mãos e dos instrumentos utilizados durante o procedimento, que podem ser comparadas a um agrupamento pré-capturado das trajetórias destes elementos, quando o procedimento é realizado por profissionais experientes. Para a anestesia do nervo alveolar inferior por injeção, foi determinado em colaboração com um painel de especialistas que os dois elementos mais importantes para se ter uma avaliação de performance seriam a proximidade da punção da agulha de um ponto alvo na boca do paciente, e o ângulo de penetração. Uma pontuação entre 0 e 1 é atribuída pela multiplicação de três termos: um termo binário para determinar se a punção foi efetuada dentro de uma distância máxima de tolerância do ponto alvo; a inclinação da agulha posicionada durante a punção, em relação a uma inclinação de referência; e um coeficiente de erro por distância relativo à distância entre o ponto de punção e o ponto alvo, quando dentro da região mínima de tolerância. A figura 4.2.3 ilustra estes três fatores.

Figura 4.2.3. Parâmetros da avaliação automática de performance (Tori et al. 2018).

Esta implementação de prova de conceito foi desenvolvida utilizando Unity3D v4.6, com bibliotecas específicas quando necessário, como para renderização e o uso do rastreamento óptico nas plataformas Oculus Rift DK2 ou HTC Vive. O rastreamento de mãos e instrumento foi obtido pela calibragem prévia do registro entre o dispositivo de

interface háptica com a seringa acoplada, e a seringa virtual, ou então pelo rastreamento óptico de um marcador HTC acoplado diretamente ao instrumento. O ponto e ângulo da punção são rastreados e gravados para a avaliação de performance posterior. O sistema suporta tanto visualização por um *headset* estereoscópico quanto em um monitor planar convencional. O componente de avaliação automática foi calibrado com as trajetórias de mão e seringa quando executadas por um professor especialista, e então testadas com outros especialistas para validar o seu funcionamento adequado.

4.2.2. Procedimento Experimental Treinamento Imersivo

Para avaliar os impactos desta configuração do VIDA Odonto na percepção de presença e experiência de aprendizagem de modo geral, desenvolvemos um novo procedimento experimental, mais adequado à situação de treinamento e às ferramentas tecnológicas utilizadas, porém similar em alguns aspectos ao procedimento já utilizado no primeiro estudo de caso deste projeto. Particularmente, os questionários e o modelo de avaliação de presença foram versões adaptadas dos questionários do primeiro estudo, com alguns aprimoramentos. O procedimento experimental foi dividido em um processo de três etapas:

- *Primeira etapa: questionário pré-experimento.* Neste passo os participantes declaram a sua aceitação aos termos de participação, bem como algumas informações de base como a existência de condições prévias de saúde que pudessem prevenir a sua participação no estudo, acuidade visual e o uso de óculos ou lentes, familiaridade com experiências em RVI, e familiaridade com o procedimento de anestesia.
- *Segunda Etapa: executar a sequência de treinamento.* Os estudantes realizaram o procedimento utilizando um dispositivo háptico Touch Haptic Devices desenvolvido pela empresa 3D Systems, capaz de rastrear uma seringa carpule real acoplada a este, e reproduzir os seus movimentos na seringa virtual, bem como oferecer um feedback de resposta háptica de acordo com o contato da seringa virtual com elementos do AVI.

Após vestir o *headset* de RV, o participante foi introduzido primeiramente a um teste simples de acuidade visual estereoscópica, desenvolvido no escopo do projeto

VIDA Odonto, onde duas esferas virtuais, 'A' e 'B', eram apresentadas simultaneamente a distâncias diferentes do plano da câmera, e o participante precisaria então dizer qual das esferas aparentava estar mais distante para ele, ou se as duas aparentavam estar à mesma distância. Estes dados podem eventualmente, e com protocolos mais sofisticados, ter relevância por si próprios, para que se avalie a distribuição de acuidade estereoscópica na população experimental. No contexto deste estudo, este levantamento nos permitiu detectar instâncias em que a acuidade visual estereoscópica foi insuficiente para aproveitamento dos dados, porém sem permitir que se identificasse as causas para tal, i.e., se devido à fisiologia do participante, ou por questões de ajuste e calibragem individual do headset de RV.

Em seguida, uma gravação do professor era reproduzida com uma explicação básica do procedimento para a anestesia do nervo alveolar inferior por injeção, enquanto um avatar 3D realizava-o no interior do consultório virtual, e o estudante podia observá-lo em RVI, posicionando livremente o seu ponto de vista na cena, inclusive com detalhamento em 'raio-X' das estruturas anatômicas relevantes. Finalmente, o estudante realizava então ele mesmo o procedimento no paciente virtual, utilizando o dispositivo de interação descrito.

- *Terceira Etapa: questionário de presença.* Após haver completado o procedimento de treinamento, o estudante seguia para um terminal próximo para completar um questionário de presença (Tabela 4.2.1) As questões foram baseadas no *Igroup Presence Questionnaire* (IPQ) (Schubert et al., 2001), traduzido para o Português e adaptado ao nosso cenário particular de simulação em RVI. Neste estudo, estamos interessados em analisar os agrupamentos de questões relacionadas à percepção de presença, a sensação de 'estar lá', imersão e engajamento. Descartamos as questões do IPQ que são explicitamente relacionadas ao ambiente real. As questões foram respondidas pelos participantes em uma escala Likert de 7 pontos, entre -3 ('discordo plenamente') e +3 ('concordo plenamente'), correspondendo o 0 a 'não concordo nem discordo'. Os participantes também responderam um conjunto de questões dissertativas sobre a experiência de uso do sistema de treinamento (Tabela 4.2.2).

Tabela 4.2.1. Grupos de Questões do Questionário de Presença e Exemplos

Grupo	Fator de Interesse	Questão de Exemplo
1	Percepção de presença relativa ao ambiente Virtual	O consultório virtual parecia um consultório odontológico real?
2	Percepção de presença relativa ao rastreamento, Dispositivo de entrada e dispositivo háptico	A mão virtual parecia se mover como a minha própria mão
3	Facilidade de uso da interface	Foi fácil controlar a seringa real
4	Sintomas físicos etc.)	Durante o experimento eu senti... (náusea, dores, desconforto visual, etc.)

Tabela 4.2.2 Questões Discursivas

Questão	Ambos os grupos
1	Identifique e discuta pontos positivos e negativos desta experiência.
2	Apresente suas considerações gerais sobre esta experiência.
3	Por favor deixe seus comentários e sugestões.

Vinte e nove participantes foram convidados a participar neste estudo (dezoito mulheres e onze homens, idade média de 34.55 anos, com desvio-padrão de 12.45 anos). Estes foram recrutados voluntariamente por listas de e-mails, quadro de avisos do departamento de Odontologia, e divulgação direta. Todos os participantes precisaram ler e assinar um termo de consentimento para participar do experimento. Alguns critérios de exclusão foram: gestação, histórico de doenças cardíacas, labirintite e náusea durante imersão em realidade virtual.

Após completar a fase de coleta de dados, realizamos o tratamento destes dados e análises estatísticas, utilizando o Matlab Versão R2015a, para gerar estatísticas descritivas sobre os dados coletados no procedimento experimental.

Para analisar os fatores de interesse derivados dos questionários, primeiramente as perguntas foram agrupadas conforme os fatores de interesse que impactam: tempo para conclusão da tarefa, pontuação final no procedimento, usabilidade do dispositivo de interação, sintomas adversos, e percepção de presença. Então os valores de respostas foram totalizados por participante para cada grupo, em um procedimento no qual itens fraseados positivamente acrescentavam ao valor, e itens fraseados negativamente eram subtraídos deste total para cada grupo de questões correspondente a um fator de interesse. A média destes somatórios foi então tomada como uma escala tipo Likert consistente sobre cada fator de agrupamento (Carifio & Perla, 2007). Finalmente, transformações de dados e levantamento de estatísticas descritivas foram aplicados, para

fornecer evidências do impacto da configuração experimental sobre os diversos fatores de interesse.

Para análise das medições objetivas de tempo até completar a tarefa, e da pontuação final do procedimento, não foram necessárias transformações ou agrupamentos adicionais dos dados.

5. RESULTADOS

5.1. Aula Imersiva

Uma análise estatística dos dados do questionário de presença foi realizada utilizando o SPSS versão 24. Para comparar a eficácia da indução de presença, uma análise de fatores ANOVA foi realizada entre os grupos de controle e experimental.

Conforme a análise, os resultados da interface experimental mostraram ser capazes de induzir uma percepção de presença maior do que a interface de controle [$F(1,11)=6.41$, $p=.05$, $n=.56$]. A interface experimental promoveu graus maiores de presença ($M=1.41$, $SD=0.78$) quando comparada à interface de controle ($M=-0.30$, $SD=1.63$).

Figura 5.1.1 a) e b) Resultados da análise de respostas ao questionário de presença comparando grupos experimental (verde) e controle (vermelho). (a) Os resultados mostraram que os participantes avaliaram a percepção de presença como estatisticamente maior no grupo experimental do que no grupo de controle. (b) Respostas dos questionários em dois grupos, experimental (I) e controle (NI). Os participantes indicaram suas respostas em uma escala Likert de 7 pontos entre "discordo completamente" (-3) a "concordo completamente" (3). As barras representam valores médios e as barras de erro indicam os erros padrão.

Também foi observado um desvio padrão maior na interface de controle. Isto poderia ser atribuído à necessidade do usuário movimentar a cabeça para focalizar o olhar entre a interface de controle abaixo, e a tela de TV, mais acima no campo de visão, para observar os efeitos visuais das mudanças nos parâmetros, o que poderia ter introduzido um elemento de confusão e fadiga ao acompanhar a instrução.

A respeito do questionário dissertativo, notamos algumas questões de usabilidade da interface, como: muitos controles de UI que precisam ser controlados a partir de um referencial estacionário no espaço, tornando o espaço adjacente ao avatar virtual do usuário excessivamente poluído de elementos. Como alguns participantes declararam: "pontos fracos: o desconforto físico de precisar virar frequentemente a cabeça; exige movimentos de cabeça pouco naturais"; "ainda que o ambiente imersivo se encontre a todo o nosso redor, ter uma área de foco menor dentro do campo de visão pode aprimorar o conforto e compreensão da experiência, já que olhar para trás com o headset é desconfortável na situação de sala de aula".

Os pontos fortes do experimento, relatados pelos participantes, indicam que o sistema promoveu uma grande aceitação da aula entre os estudantes. Alguns participantes reportaram que: "A experiência oferece uma boa imersão. Pude compreender conceitos do modelo de iluminação muito melhor.", "maior imersão no conteúdo, os exemplos explicados podem ser visualizados imediatamente", "a boa interatividade com o ambiente tornou mais fácil aprender os conceitos apresentados.", "tive mais facilidade em aprender os tópicos de computação gráfica", "como estivemos imersos no ambiente virtual, prestamos mais atenção ao conteúdo.". Também observamos que 5 dos 6 estudantes do grupo experimental prefeririam aprender o conteúdo no formato apresentado. No grupo de controle, 2 participantes declararam que prefeririam aprender o conteúdo na forma apresentada, 2 declararam que na forma de slides, e 2 declararam "outros".

Os comentários livres dos participantes estão listados na tabela abaixo, divididos aproximadamente em aspectos 'Positivos', 'Neutros', e 'Negativos'. Itens classificados na categoria 'Negativos' também foram subsequentemente divididos nas seguintes classes: ergonomia e usabilidade, performance do software, desvio de sensor, qualidade gráfica, estabilidade, experiência de usuário, e outras. Uma rápida análise indicou nesta primeira rodada uma prevalência de comentários negativos (22/39, 56.5%) sobre positivos (9/39, 23%) e neutros (8/39, 20,5%). Dos comentários negativos, identificamos as seguintes tendências: predominaram as questões ligadas à ergonomia e usabilidade de UI, totalizando 40,9% (9/22) dos comentários negativos.

Outras questões mencionadas com frequência foram associadas às classes desvio de sensores (*sensor drift*), performance, estabilidade, e qualidade gráfica. Ainda que mencionados com menor frequência do que as questões de usabilidade, estas classes de problemas, à exceção da qualidade gráfica, impedem que o participante utilize a ferramenta adequadamente; portanto questões de performance, estabilidade, e desvio de sensor têm uma alta prioridade para resolução, ainda que não tenham sido a maioria dos comentários negativos de participantes. Estas categorias estão melhor sintetizadas no gráfico da Figura 5.1.2.

Comentários Livres - Experimento Aula Imersiva	
Positivos	
<ul style="list-style-type: none"> - Estando imersos no ambiente virtual prestamos mais atenção à aula - Pude aprender CG (computação gráfica) mais facilmente - Pude visualizar outros ambientes e realizar simulações mais facilmente - A boa interatividade com o ambiente facilita o aprendizado dos conceitos introduzidos - Maior imersão no conteúdo apresentado. Retorno imediato dos conceitos explicados - Headsets bem construídos, ambiente virtual agradável - A experiência proporcionou uma boa imersão. Pude compreender melhor os conceitos de iluminação 3D envolvidos - Dinâmicas imersivas ajudam a chamar a atenção às teorias e métodos por trás dos conceitos - A experiência encoraja a interação pelo estudante 	
Neutros	
<ul style="list-style-type: none"> - Alguma forma de teclado ou outro dispositivo de entrada poderia tornar mais rápido e menos propenso a erros o processo de efetuar alterações visuais no ambiente - Foi bom para entender conceitos do modelo de iluminação; entretanto, nada que não pudesse ser feito em uma tela de computador - Mesmo estando imersos no ambiente ao nosso redor, limitar a área de interação a uma região menor pode aprimorar o conforto - Providenciar alças para prender os headsets pode ajudar - Ter headsets disponíveis para todos os estudantes em sala seria melhor pois permitiria a todos explorarem a imersão juntos - Melhorar o 'lag', adicionar uma função para reiniciar o giroscópio, diminuir a qualidade gráfica para melhorar o fps - Pode ser interessante fazer o cursor 'saltar' para pontos de interesse na UI, para facilitar a interação - É uma ferramenta interessante para introduzir o conceito de realidade virtual. 	
Negativos	
<ul style="list-style-type: none"> - É cansativo precisar mover constantemente a cabeça para operar os controles. (<i>Ergonomia/Usabilidade</i>) - É um pouco incômodo de usar e interagir (<i>Ergonomia/Usabilidade</i>) - O painel à direita nem sempre começava à minha direita, às vezes se movendo para minhas costas. (<i>Desvio de Sensor</i>) - Efetuar as mudanças é demorado e incômodo. (<i>Ergonomia/Usabilidade</i>) - Limitar a dispositivos Android impede a disponibilidade a todos os estudantes. (<i>Outros</i>) - Às vezes quando eu deixava o headset, a interface virtual se movia sem a minha intervenção. Após 	

- recolocar o headset eu estava voltado para o painel direito ao olhar à frente, em vez do painel central. *(Desvio de sensor)*
- Houve problemas com atraso e queda na taxa de quadros, que ocasionaram náusea e fadiga em mim e um colega. *(Performance)*
 - Não acho que foi a melhor maneira de ensinar o assunto, pois é difícil para o instrutor reter a atenção dos estudantes na explicação. *(Experiência de Usuário)*
 - Desconforto físico de precisar virar demais a cabeça para utilizar certos controles. Movimentos não naturais. *(Ergonomia/Usabilidade)*
 - Precisar olhar para trás é desconfortável quando sentados em um ambiente de sala de aula. *(Ergonomia/Usabilidade)*
 - Precisar segurar o headset com as mãos torna mais difícil não tremer. *(Ergonomia/Usabilidade)*
 - Poderia ter menos *aliasing* (gráfico), mas eu gostei da interface. *(Qualidade Gráfica)*
 - Às vezes a imagem perdia fidelidade com o rastreamento, criando desconforto. *(Desvio de sensor)*
 - Em certos momentos o aparato de UI tornava difícil perceber a aplicação. *(Ergonomia/Usabilidade)*
 - A experiência me deu desconforto e náusea. *(Outros)*
 - A qualidade de imagem não era muito boa. *(Qualidade Gráfica)*
 - Muito 'lag', induzindo vertigem e piorando a experiência de usuário. *(Performance)*
 - Um pouco cansativo para a vista. *(Ergonomia/Usabilidade)*
 - O aplicativo falhou no decorrer do experimento. *(Estabilidade)*
 - O aplicativo parou de responder durante a sessão, impedindo a sua conclusão. *(Estabilidade)*
 - Precisar lidar com problemas de interação (e.g., movimento de câmera inconsistente) desvia a atenção do que está acontecendo no ambiente. *(Desvio de sensor)*
 - É difícil observar os efeitos das mudanças quando precisamos olhar em outra direção para operar os controles de UI. *(Ergonomia/Usabilidade)*

Tabela 5.1.1 Comentários livres dos participantes da primeira rodada experimental

Negative User Comments - First Run

Figura 5.1.2 Comentários negativos dos participantes da primeira rodada experimental.

5.1.1. Publicação de Artigo em Simpósio Nacional

A metodologia e os resultados observados durante a realização da Aula Imersiva foram sintetizados em um artigo, intitulado "Impact of Immersive Technology Applied in Computer Graphics Learning", que foi publicado no XXVII Simpósio Brasileiro de Informática na Educação - SBIE 2016, p. 410 (MOREIRA; DE OLIVEIRA; TORI, 2016).

5.2. Treinamento Imersivo

Utilizando o MATLAB R2015a, estatísticas descritivas foram produzidas sobre os seguintes fatores: tempo para conclusão da tarefa, pontuação final no procedimento, usabilidade do dispositivo de interação, percepção de presença, e sintomas adversos declarados.

Para os fatores *tempo para conclusão da tarefa* e *pontuação final no procedimento* apresentamos os dados também em forma de histogramas, para fornecer contexto adicional.

Ao se tentar comparar resultados desta natureza com outros da literatura acadêmica, nos deparamos com algumas dificuldades de difícil tratamento, particularmente ao se buscar uma forma padronizada entre os questionários existentes para percepção de presença, que facilite tais comparações (Lombard et al. 2009; Witmer and Singer 1998; Slater 1999). Esta dificuldade de padronização pode ser explicada, ao menos parcialmente, pois as simulações variam muito em suas capacidades, contextos, modos de interação, e narrativas, e assim também ocorre com o projeto, estrutura e fraseado de tais questionários, ao serem adaptados para que se tornem coerentes com as particularidades de cada estudo. Considerando esta realidade, reconhecemos que uma tentativa de produzir uma comparação estatisticamente válida entre as medições de percepção de presença deste projeto e outras publicações similares iria além do escopo deste projeto.

Notamos entretanto que no estudo Treinamento Imersivo as pontuações gerais em todos os fatores considerados foram relativamente favoráveis. Isto significa que, entre os

valores esperados possíveis para as médias observadas em nossas amostras, os valores obtidos em nossos resultados indicaram um bom grau de eficácia do sistema VIDA como uma ferramenta de simulação e treinamento em RVI. As médias dos fatores positivos 'percepção de presença' e 'pontuação final no procedimento' se encontram significativamente altos em seus respectivos domínios, enquanto a média do fator negativo 'sintomas adversos apresentados' está situada em nível mais inferior do seu domínio de pontuação.

De acordo com as medições obtidas, os participantes indicaram que um alto grau de presença foi promovido pela sequência de treinamento de anestesia dental. A média agregada de presença se situou no oitavo decil dentro da escala de presença e método de contagem descritos em nossa metodologia.

A prevalência de sintomas adversos se situou na região inferior do segundo quartil em nossa escala, o que pode ser considerado um nível baixo - ainda que longe de ser irrisório - dado que estamos considerando de forma agregada todos os relatos de sintomas adversos, independentemente do tipo ou severidade dos sintomas relatados.

Nossa ferramenta de manipulação háptica permite que uma seringa 3D virtual no ambiente de treinamento RV corresponda espacialmente a uma seringa carpule real que é manipulada diretamente pelos treinandos conforme estes efetuam o movimento da seringa virtual buscando completar o procedimento. A seringa real é acoplada a um dispositivo de feedback háptico de força, que fornece uma resposta tátil à manipulação da seringa virtual. A pontuação auto-reportada em nossos questionários para o fator de usabilidade desta configuração foi relativamente alta, com sua média situada dentro do terceiro quartil em nossa escala.

Estes dados estão sumarizados nas figuras 5.2.1 a 5.2.5.

Figura 5.2.1. Tempo de conclusão da tarefa, em segundos. a) Média da série com barra de erro padrão, e b) histograma dos tempos de conclusão.

Figura 5.2.2. Pontuação final no procedimento. a) Média da série com barra de erro padrão, e b) histograma das pontuações finais.

Figura 5.2.3. Sintomas adversos reportados, em agregado. Média da série normalizada com barra de erro padrão.

Figura 5.2.4. Pontuação de usabilidade da interação com a seringa. Média da série normalizada com barra de erro padrão.

Figura 5.2.5. Percepção de presença auto-reportada. Média da série normalizada com barra de erro padrão.

Os participantes também puderam oferecer comentários discursivos sobre a sua experiência com a ferramenta de treinamento, sob quatro categorias: problemas e dificuldades encontrados, pontos fortes da experiência, sugestões, e comentários gerais.

Os participantes também puderam oferecer comentários dissertativos do questionário em quatro categorias: dificuldades e problemas encontrados, pontos fortes do sistema, sugestões, e considerações gerais. A tabela 5.2.1 apresenta um sumário destes comentários, *sic erat scriptum*. As dificuldades e pontos fortes mencionados foram rotulados com as seguintes categorias: *usabilidade e ergonomia, didática, imersividade e realismo narrativo, adaptação fisiológica, outros*. Os comentários gerais foram classificados conforme o seu conteúdo predominantemente *positivo, neutro, ou negativo* a respeito da experiência como um todo. Apesar de carregar alguma subjetividade, estas classificações se mostraram úteis para gerar uma perspectiva mais empírica sobre as evidências anedóticas disponíveis nos comentários dos participantes, o que nos deu base para construir alguns argumentos sobre o sistema VIDA, e ao uso de RVIs deste tipo na educação.

Por uma análise de contagem simples dos comentários, já rotulados e classificados, destacamos os seguintes fatos:

- A maioria dos comentários em 'Problemas' (21/29, 72,4%) no Treinamento Imersivo mencionaram questões de ergonomia e usabilidade; destes, 14 deles, ou 66,7%, mencionaram questões especificamente relacionadas à seringa virtual e o seu manuseio através da seringa real. Outra parcela significativa destes comentários (10,3%) mencionou questões relacionadas ao ajuste do próprio *headset* e distorções visuais provocadas por estes desajustes, particularmente a dificuldade de visualizar a imagem em foco. Alguns comentários típicos foram (sic): *"o manuseio da seringa foi um pouco difícil. Mais especificamente no direcionamento dela"*, *"O manuseio era um tanto pesado ao manusear a seringa[...]"*, *"O manuseio da seringa era um pouco complicado[...]"*.
- Entre os comentários em 'Pontos Fortes', destacamos que todos exceto um (96,6% dos participantes) citaram elementos referentes à imersividade e realismo narrativo do procedimento simulado em suas respostas. 51,7% dos participantes também afirmaram positivamente sobre a usabilidade e ergonomia oferecidas pela manipulação da seringa virtual através de uma seringa real, mesmo apesar dos problemas mencionados em 'Problemas'. A didática também foi frequentemente

incluída como ponto forte, em 37,9 % dos comentários. Alguns comentários típicos nesta categoria foram (sic): *"O feedback haptico da seringa foi fantástico[...]"; "I like the feeling of skin resistance upon putting the needle and while injecting."* (participante não-lusófono), *"O ambiente é muito real, a sensação que a seringa causa também."*, *"Pude experimentar a aplicação de uma anestesia"*, *"Permitiu o entendimento e visualização de forma real de como fazer o procedimento."*, *"Ótima sensação de realismo, tanto visual quanto tátil. Instruções claras."*, e *"me senti uma anestesista"*.

- Entre as opiniões livres oferecidas no item 'Comentários Gerais', uma maioria de 58,6% das respostas apresentaram um teor predominantemente positivo a respeito do sistema, enquanto em apenas um comentário o teor foi predominantemente negativo, em referência a limitações de usabilidade e ergonomia elicitadas em respostas aos itens anteriores. O restante dos comentários, 37,9%, apresentou um teor neutro, ou então o participante optou por não responder este item.

A tabela a seguir apresenta uma listagem extensiva dos comentários oferecidos pelos participantes.

Comentários Dissertativos - Treinamento Imersivo
Dificuldades e Problemas Encontrados
<ul style="list-style-type: none"> - Demorei um pouco para achar o ponto certo do óculos, e no começo do manuseio da seringa precisei me acostumar (<i>usabilidade e ergonomia</i>) - Óculos acabou ficando um pouco mal posicionado e a imagem não ficou tão nítida (meio borrada) - audio baixo (<i>usabilidade e ergonomia</i>) - o som estava baixo (<i>usabilidade e ergonomia</i>) - As principais dificuldade encontradas foram a limitação dos movimentos, a altura da cadeira odontológica, (<i>usabilidade e ergonomia</i>) - o manuseio da seringa foi um pouco difícil. Mais especificamente no direcionamento dela. (<i>usabilidade e ergonomia</i>) - O manuseio da seringa era um pouco complicado e a minha visão periférica estava embaçada. (<i>usabilidade e ergonomia</i>) - No início demorou para me adaptar, mas aconteceu. (<i>adaptação fisiológica</i>) - O manuseio era um tanto pesado ao manusear a seringa, sendo necessário maior esforço do que o

natural para mover a seringa. *(usabilidade/ergonomia)*

- sou canhota e fiz com a mao direita *(usabilidade/ergonomia)*
- No momento em que houve a orientação do professor eu demorei a perceber a ilustração do procedimento no canto esquerdo da boca, ele começou a falar e depois de um tempo percebi que a imagem havia mudado e que estava demonstrando o que o áudio estava explicando. O paciente ainda se parece muito com um desenho e não com uma pessoa, talvez faça falta um pouco de cabelos (hahahaha) ou alguma outra maneira dele se parecer mais com uma pessoa e assim aumentar a imersão. *(didática) (imersividade e realismo narrativo)*
- O posicionamento na cadeira foi difícil para ajustar a amplitude dos meus movimentos. Às vezes eu queria ficar em pé. Era uma rotina que precisava de muita atenção e eu queria mais autonomia do meu movimento 'para melhorar meu campo de visão. *(usabilidade e ergonomia)*
- At the time of injecting, I have to re-coordinate with my muscular memory and what I see visually. Once, certain time is passed, my brain seem to adjusted and re-coordinate the visual-masucular movement. *(adaptação fisiológica)*
- Senti a seringa real um pouco presa, levemente difícil de movimentar. Não sei dizer se ela estava presa em algo. Apesar disso consegui realizar os movimentos que desejava. *(usabilidade e ergonomia)*
- Os momentos de pegar e soltar a seringa era quando a imersão diminuía. Eu sentia que não estava no controle. Mas depois que o ajudante colocava a seringa na mão a imersão voltava. *(usabilidade e ergonomia) (imersividade e realismo narrativo)*
- manuseio da seringa *(usabilidade e ergonomia)*
- Dificuldade de encontrar o foco, durante o experimento, pois o óculos precisa ficar bem ajustado para manter o foco *(usabilidade e ergonomia)*
- Achei a seringa pesada. *(usabilidade e ergonomia)*
- Poderia haver mais uma sensibilidade no contato da agulha com o paciente *(usabilidade e ergonomia)*
- Acredito que uma dificuldade foi não ser uma dentista. *(imersividade e realismo narrativo)*
- Nenhum *(nenhum)*
- Achei que a seringa tremeu demais, não sei se por ser canhoto ou por estar um pouco nervoso com a experiência. *(usabilidade e ergonomia)*
- nao encontrei nenhuma dificuldade *(nenhum)*
- tive um pouco de dificuldade com as instruções do áudio *(usabilidade e ergonomia)*
- som poderia ser controlado para aumentá-lo *(usabilidade e ergonomia)*
- Foi um pouco complicado ajustar os óculos. Apesar de que desse para ver o suficiente, a imagem não chegou a ficar 100% nítida, então o procedimento inicial acabou sendo mais demorado (não estava dando para fazer por não estar tão nítido). Também não dava para ver onde acabava a agulha, então eu não sabia muito bem se ela já tinha tocado o paciente ou não. *(usabilidade e ergonomia) (imersividade e realismo narrativo)*

- Encontrei dificuldade em perceber as dimensões do experimento, que respondiam rápido ao meu movimento real, mas com um pequeno delay. Dificuldade para calcular o local exato da anestesia e manter o movimento dos braços e mãos de forma a respeitar o campo da boca virtual do paciente *(adaptação fisiológica)*
- estabilidade com a seringa *(usabilidade e ergonomia)* *(adaptação fisiológica)*
- gostaria de poder fazer o experimento com a mão esquerda. *(usabilidade e ergonomia)*

Pontos Fortes do Sistema

- Simulou com muita eficiência todo o processo *(didática)* *(imersividade e realismo narrativo)*
- Sensação tátil *(usabilidade e ergonomia)*
- realístico e sensorial *(imersividade e realismo narrativo)*
- A simulação do ambiente e da manipulação da seringa *(imersividade e realismo narrativo)* *(usabilidade e ergonomia)*
- É muito interessante. É bastante real. Permite reprodutibilidade. Evita ter que treinar em outras pessoas. *(imersividade e realismo narrativo)*
- Ambiente imersivo e a sensação de manuseio da seringa é bem real. *(imersividade e realismo narrativo)* *(usabilidade e ergonomia)*
- A sensação de injetar a anestesia na boca do paciente me pareceu bem real. *(imersividade e realismo narrativo)* *(usabilidade e ergonomia)*
- Pude experimentar a aplicação de uma anestesia. *(imersividade e realismo narrativo)*
- A inserção e imersão foram muito realistas, assim como os feedbacks sensoriais que tínhamos ao perfurar as bolinhas ou o paciente. *(imersividade e realismo narrativo)* *(usabilidade e ergonomia)*
- bem explicado, funcionou como uma experiência prática para mim *(didática)* *(imersividade e realismo narrativo)*
- Imagens nítidas e sensibilidade interessante no manuseio da seringa. *(imersividade e realismo narrativo)* *(usabilidade e ergonomia)*
- O feedback háptico da seringa foi fantástico. Fiquei pensando em que outros treinamentos são possíveis com realidade virtual. *(imersividade e realismo narrativo)* *(usabilidade e ergonomia)*
- I like the feeling of skin resistance upon putting the needle and while injecting. *(imersividade e realismo narrativo)* *(usabilidade e ergonomia)*
- O ambiente é muito real, a sensação que a seringa causa também. A presença dos pontos coloridos e da rota de trajetória da seringa com certeza me fez entender melhor do que se alguém apenas a tivesse descrito em uma situação real, apontando os dentes por exemplo. *(didática)* *(imersividade e realismo narrativo)* *(usabilidade e ergonomia)*
- "Apesar dos gráficos em 3D não serem próximos do real a sensação de imersão é bem grande, principalmente pelo peso da seringa e a sensação de pressão quando encosto ela na boca do paciente. *(imersividade e realismo narrativo)* *(usabilidade e ergonomia)*

- E apesar de não haver muita interação com a pia localizada atrás da cadeira, involuntariamente fiquei tentando não me mover para não bater a cabeça nela." (*imersividade e realismo narrativo*)
- a realidade, e clareza nas explicações e procedimentos (*didática*) (*imersividade e realismo narrativo*)
- Realidade e sincronia das ações (*imersividade e realismo narrativo*) (*usabilidade e ergonomia*)
- Foi muito real. (*imersividade e realismo narrativo*)
- Bom método de treinamento (*didática*) (*imersividade e realismo narrativo*)
- Permitiu o entendimento e visualização de forma real de como fazer o procedimento. (*didática*) (*imersividade e realismo narrativo*)
- acho que o peso da seringa ajuda no realismo (*imersividade e realismo narrativo*) (*usabilidade e ergonomia*)
- Ótima sensação de realismo, tanto visual quanto tátil. Instruções claras. (*didática*) (*imersividade e realismo narrativo*) (*usabilidade e ergonomia*)
- SISTEMA MUITO EFICIENTE (*imersividade e realismo narrativo*)
- achei muito real a experiência, não tenho conhecimento na área e achei que a explicação da professora somada a experiência faz com que o aprendizado se torne algo mais fácil. (*didática*) (*imersividade e realismo narrativo*)
- me senti uma anestesia (*imersividade e realismo narrativo*)
- O ambiente tinha continuidade, se eu mexesse a cabeça eu poderia ver o restante do consultório, não era como se a imagem ficasse restrita ao paciente. Quando estava apertando a agulha, a impressão era de que realmente estava saindo alguma anestesia, dava para sentir. Isso de longe foi o mais realista. (*imersividade e realismo narrativo*) (*usabilidade e ergonomia*)
- Clareza para instruir sobre nervos e a localização exata deles, o experimento parece muito próximo da realidade (*didática*) (*imersividade e realismo narrativo*) (*usabilidade e ergonomia*)
- boas orientações e método (*didática*) (*imersividade e realismo narrativo*)
- achei que as instruções foram boas, a imagem bem realista e a seringa também. (*didática*) (*imersividade e realismo narrativo*)

Sugestões

- Gamificação
- FeedBack em tempo real se estou posicionando certo
- Colocar um apoio para a mão
- Possibilidade de afastar o paciente. Calibrar a posição da nossa mão com a posição da mão virtual. O paciente não tem qualquer reação. Uma reação sonora poderia ser adicionada. Não tem cheiro de consultório. Isso é fácil de ser resolvido com um pouco de eugenol.
- Considero que possa melhorar o manuseio da seringa. Parece mais pesada que a seringa real.
- O manuseio poderia ser um pouco menos rígido, como na munheca, que ficava um pouco difícil

mudar muito o ângulo.

- Graphic looked like PS2
- melhorar o foco e trazer mais realidade para a seringa utilizada
- seria bom, que quando encostássemos na boca ou dente o equipamento tivesse gerasse um sinal de pressão, para aumentar o realismo.
- Creio que para dar maior realismo, após perfurar o tecido, a seringa não poderia tremer na imagem, pois haveria um ponto evitando isso, ou seja, o ponto onde houve a perfuração. Fazer versão do sistema para canhotos.
- Recomendado para o procedimento
- as instruções no vídeo referentes ao pedido de auxílio dos colaboradores do local ficaram um pouco confusas em alguns momentos
- controlar o som pelo próprio usuário
- Talvez ter um apoio de braço/mão para a pessoa que estiver fazendo o procedimento seria legal. Não necessariamente um braço de cadeira ou algo assim, mas, por exemplo, um suporte que simulasse o corpo do paciente. Ficaria mais fácil, na minha opinião, para o aluno se localizar espacialmente por meio do tato.
- lembrar dos dentistas canhotos.

Considerações Gerais

- Uma verdadeira imersão. Como já tenho a experiência foi muito excitante fazer, mas me intriga em como se comportará alguém sem experiência *(positivo)*
- A experiencia é muito interessante. Mas, parecia que minha mão estava amarrada. O paciente estava muito próximo. A amplitude de movimentos parecia reduzida e a carpule ficava o tempo todo muito próxima do rosto do paciente. Me senti preocupado com o tempo todo. A altura da minha mão nao correspondia a imagem, por isso fiquei trabalhando numa posição inadequada. *(negativo)*
- Muito boa pesquisa. *(positivo)*
- Promissor. *(positivo)*
- Achei interessante, e julgo que aprendi sobre *(positivo)*
- Muito bom e bastante realista. Acho que pode ajudar muito no aprendizado, como um simulador mesmo para saber onde aplicar a anestesia de forma mais segura quando for fazer na vida real. *(positivo)*
- façam também para canhotos! :) *(neutro)*
- overall, the entire experience was nice, for me only difficulty is visual-mascular coordination was off. My hand feels like approximately 15cm lower than what I see in VR. *(positivo)*
- Achei uma metodologia muito boa para o ensino de práticas e avaliações. *(positivo)*
- muito bacana, didático, simples manuseio e ótima compreensão *(positivo)*

- A utilização da RV com certeza poderá auxiliar no treinamento dos dentistas. *(positivo)*
- Intuitivo. Muito Real. *(positivo)*
- Adorei a experiência. Acredito que dá mais segurança antes de realizar o procedimento real. *(positivo)*
- bem legal, mas como disse faltou a sensação de tocar em outras partes *(neutro)*
- Excelente iniciativa, ampliando o aprendizado, sem a necessidade de usar um tecido biológico. A escalabilidade é outro ponto forte. *(positivo)*
- Sistema muito eficiente *(positivo)*
- de uma maneira geral achei muito eficaz e torna o aprendizado mais real e didático, gostei bastante! *(positivo)*
- Se tivessem mais elementos do consultório, como a mesa com os aparelhos do dentista, a luz acima da cadeira, e se a seringa estivesse sob a mesa, me sentiria 100% no consultório. Apenas isso, inclusão de poucos elementos gráficos do consultório. Adorei a experiência imersiva! parabéns aos pesquisadores! os apontamentos são apenas detalhes. *(positivo)*
- Apesar de não ser 100% realista, acho que é real o suficiente para um aluno de odonto aprender o procedimento, afinal até eu entendi como faz. É bem claro (o áudio e as instruções), mas não foi muito fácil me localizar sem muito do recurso tátil (só tinha a agulha). *(positivo)*
- Me parece que vai ajudar bastante gente a treinar um procedimento bem delicado. parabéns pela iniciativa! *(positivo)*

Tabela 5.2.1 Comentários livres (sic) dos participantes do Treinamento Imersivo

5.2.1. Submissão de Artigo para Periódico Internacional

A metodologia e os resultados observados durante a realização da Aula Imersiva e do Treinamento Imersivo foram sintetizados em um artigo, intitulado "Learning With Virtual Reality Immersive Technologies: Case Studies in Lecture and Training Environments", que foi submetido para o processo de publicação do periódico internacional Computers & Education em 24/11/2020.

6. CONCLUSÕES E DISCUSSÃO

Os experimentos para avaliar a percepção de presença e outros fatores de relevância para uso do sistema foram executados para ambas as ferramentas de RV neste estudo, e nossos resultados sugerem um nível de presença maior para o grupo experimental no estudo 'Aula Imersiva', e um nível relativamente alto de presença auto-reportada pelos participantes do estudo 'Treinamento Imersivo'. Para a Aula Imersiva, isto nos sugere que a percepção de presença pode aumentar proporcionalmente ao grau em que o conteúdo seja apresentado em contextos e narrativas mais plenamente imersivos, mesmo que mantidas as mesmas capacidades imersivas dos dispositivos de hardware. Para o segundo estudo, o Treinamento Imersivo, realizamos uma avaliação e validação satisfatórias da ferramenta, atribuindo métricas fortes a algumas de suas principais características, o que nos permitiu melhor esclarecer os potenciais e limitações da ferramenta em sua versão atual, contribuindo para orientar a próxima fase em seu desenvolvimento, e outros desenvolvimentos similares no futuro.

6.1. Aula Imersiva

Nosso experimento piloto 'Aula Imersiva' apresentou resultados promissores ao se utilizar um dispositivo de RV de baixo custo em uma aula em tópicos de Computação Gráfica para alunos de graduação. Encontramos evidências de que a interface experimental da ferramenta promoveu altos graus de percepção de presença quando comparada à interface de controle. Consideramos que a principal contribuição deste estudo foi demonstrar uma maneira eficaz e de baixo custo de se utilizar a tecnologia imersiva aplicada a uma aula de computação gráfica. Também oferecemos evidências de que, em uma mesma plataforma de RVI, a forma de apresentação do conteúdo e a interface de usuário podem ser manipuladas para provocar graus diferentes de percepção de presença, ao se ajustar o grau de imersividade implícito no conteúdo da simulação.

Especulamos que resultados semelhantes podem ser reproduzidos para explicações didáticas de muitos outros fenômenos. Em particular, aqueles que apresentem uma certa transitividade entre o fenômeno explicado e uma visualização deste modelada em 3D, e ainda mais quando, com o apoio apenas de mídias 2D, estas explicações apresentarem

uma alta carga cognitiva de visualização e abstração, e esta carga possa ser reduzida pela introdução de mídias de apoio 3D imersivas. Tópicos como por exemplo a visualização de cadeias de reações bioquímicas no ambiente intracelular e outras cadeias de reações químicas, estudo de sólidos geométricos, funções em três ou mais variáveis e outros objetos matemáticos, fenômenos de propagação de ondas tridimensionais, dobramento de proteínas, análise e simulação estrutural para engenharia, arquitetura e design, e assim por diante.

Também pudemos documentar a aplicação de um procedimento de projeto iterativo de interface de usuário (GUI), com planejamento orientado pelo feedback de grupos experimentais, a partir do qual se pode identificar, isolar e priorizar esforços de projeto para aprimorar uma ferramenta de software, particularmente a sua interface de usuário (GUI), que é um elemento fundamental de simulações em RVI. Ainda que em bases amostrais relativamente pequenas, pudemos coletar informações valiosas para o aprimoramento da ferramenta, com a execução do procedimento documentado. Reafirmamos que a ergonomia e a usabilidade são dois aspectos críticos do projeto de uma interface de usuário para RVIs, inclusive no que diz respeito à percepção de presença e imersividade.

Um aspecto de nota para o uso educacional de RVI, e que foi identificado em alguns comentários de participantes, é bem sintetizado pelo seguinte comentário:

"Às vezes foi difícil manter a atenção na explicação dada, porque eu estava entretido operando a interface."

Este comentário indica um impacto importante de tais experiências, e que corre o risco de ser negligenciado durante um projeto de RV educativa, que é o efeito que a introdução da nova tecnologia pode produzir nos estudantes, particularmente sobre aqueles menos familiarizados com simulações de RV. Isto é, a atenção do estudante pode ser desviada da explicação do professor e do andamento da aula, por este estar engajado na descoberta da nova ferramenta e seus usos, potencialmente prejudicando os objetivos didáticos em um primeiro momento.

Um possível aprimoramento neste sentido seria permitir que os estudantes acompanhem as explicações de aula individualmente em seu próprio ritmo, interagindo mais livremente com o conteúdo virtual enquanto constroem a sua compreensão do fenômeno estudado. Para isto, a experiência deveria ser implementada de forma auto-suficiente. Um modelo de navegação da narrativa didática seria incorporado ao software, para que os estudantes possam interagir com diferentes partes da explicação à sua própria maneira e tempo, voltando, repetindo, ou avançando conforme se sintam seguros da sua compreensão. Tal formato poderia apresentar vantagens como a escalabilidade, desacoplamento entre o tempo do instrutor e o tempo do estudante, bem como resultados de aprendizado positivos, podendo ser aplicado dentro e fora da sala de aula.

6.1.1. Limitações identificadas na Aula Imersiva

A partir da coleta dos comentários livres da primeira rodada experimental, pudemos observar que problemas de ergonomia e usabilidade apresentaram o maior impacto negativo na experiência geral do usuário, e possivelmente também na percepção de presença induzida pelo ambiente virtual. Nossa análise do conteúdo dos comentários nos levou a crer que a apresentação da UI em três painéis distintos, localizados espacialmente no referencial do ambiente virtual, provocou problemas severos com a usabilidade e ergonomia da interface de usuário. Por exemplo, exigir que o usuário realizasse muitos movimentos com a cabeça entre os painéis induziu maiores desconfortos fisiológicos como náusea, cansaço visual e dificuldades de orientação, bem como agravou os problemas de desvio dos sensores inerciais inerente à plataforma de VR utilizada. Além destes, os problemas de performance, estabilidade, e excesso de desvio do sensor (*sensor drift*), também requerem atenção especial, pois a sua ocorrência pode impedir completamente a utilização da simulação por uma parcela significativa dos participantes.

6.1.2. Propostas de Melhoria da Aula Imersiva

Baseado nos problemas identificados no passo anterior, propusemos as seguintes medidas para melhoria:

- Ergonomia/Usabilidade: para reduzir o esforço de movimentar demais a cabeça e pescoço ao operar a interface, os três painéis fixos foram substituídos por uma tablet que podia se mover pelo espaço virtual, acompanhando o referencial do avatar do usuário. O tablet atualiza sua posição para permanecer sempre logo abaixo do campo de visão do usuário quando desarmado, e o usuário pode ativá-lo a qualquer momento ao olhar para baixo além de um certo limiar; assim que ativado, o tablet sobe para dentro do campo de visão e permanece fixo em uma posição 3D, permitindo que o usuário interaja pelo olhar com os elementos de UI.

Figura 6.1 Interface de usuário aprimorada da Aula Imersiva

- Estabilidade e performance: estas foram aprimoradas ao se reduzir a complexidade geral dos modelos 3D na cena, diminuindo o número de vértices e triângulos renderizados para cada modelo, e utilizando apenas uma única textura, funcionando como um mapa ou paleta de cores, para colorização de todos os objetos da cena. Parâmetros de qualidade de iluminação e sombras, como resolução e distância máxima, foram ajustados para otimizar a performance.
- Desvio de sensor: por ser um problema inerente ao modo de rastreamento do sistema RV utilizado, quaisquer possíveis aprimoramentos no desvio de sensor propriamente dito seriam um problema fora do escopo deste projeto; para mitigar os efeitos do desvio, foi acrescentado à UI um botão de reset de rastreamento da cabeça, permitindo aos usuários redefinir livremente a posição '0' do rastreamento, o que poderia ser utilizado se após alguns minutos de uso, o desvio de sensor provocasse

uma discrepância muito grande entre o valor da posição rastreada da cabeça, e o valor real.

6.2. Treinamento Imersivo

O experimento 'Treinamento Imersivo', por sua vez, forneceu uma prova de conceito da viabilidade de um procedimento utilizando simulações de RV imersiva em suporte dos estágios iniciais de treinamento de técnicas para o procedimento de anestesia dental, bem como outros procedimentos desta natureza.

Considerando que os participantes deste, em sua maioria, não possuíam treinamento formal na área médica ou odontológica, não possuíam experiência prévia no procedimento, e realizaram este tipo de treinamento pela primeira vez durante o experimento, a média da pontuação final no procedimento que foi obtida pelo grupo nos permite algumas interpretações, não-excludentes entre si. Em primeiro lugar, a de que a ferramenta de simulação RV para treinamento permitiu implementar de forma bem-sucedida uma sequência de atividades de treinamento, de forma que a maioria dos participantes sem experiência prévia foram capazes de se engajar no uso da ferramenta, e cumprir uma tarefa requerendo habilidades específicas especializadas em sua primeira tentativa, neste ambiente simulado de treinamento. Uma outra interpretação que podemos fazer a respeito da média das pontuações é a de que, conquanto os procedimentos de avaliação e pontuação automática na iteração atual do VIDA Odonto são certamente adequadas para a classificação de estudantes com pouca ou nenhuma experiência prévia, é provável que para procedimentos médicos de maior sofisticação técnica, ou em treinamentos voltados a treinandos com mais experiência, seja necessário agregar técnicas mais sofisticadas e/ou extensivas para a avaliação e pontuação automática, para que se possa acomodar graus diversos de habilidade e experiência da parte dos treinandos. Técnicas promissoras neste aspecto incluem o uso de ferramentas de aprendizado de máquina contando com bases de comparação de conhecimento especializado mais extensivas previamente coletadas, para tarefas como as em questão, que envolvam habilidade motora e manipulação de instrumentos. Estes já são desenvolvimentos previstos e em curso para a ferramenta VIDA Odonto dentro de nosso grupo de pesquisa.

Ainda que, para os propósitos de nossa apresentação neste documento, todos os sintomas adversos tenham sido agrupados em uma única escala agregada, gostaríamos de salientar que os relatos predominantes presentes em nossos dados dizem respeito aos sintomas 'visão embaçada/desfocada' e 'sensação de peso/desconforto na cabeça', que podem provavelmente ser atribuídos à possibilidade limitada de calibração e ajuste individual cuidadosos do headset de RV de forma individual para cada participante em nosso protocolo experimental. Uma investigação mais aprofundada desta possível correlação pode apresentar relevância para se determinar os procedimentos mais adequados de calibração e ajuste individual dos aparatos de RV na aplicação prática destes instrumentos, para que o grau adequado de calibração individual por usuário possa ser aplicado, enquanto ainda se preserva a escalabilidade do procedimento de treinamento descrito.

Conforme mencionado em nossos resultados, a pontuação auto-reportada de usabilidade do dispositivo de interação, relativamente alta, indica para nós que a ferramenta obteve um alto grau de aceitação pelos participantes, e que um grau adequado de funcionalidade já está presente nesta iteração da implementação do VIDA Odonto. Embora, para nossos fins em particular, o fato da pontuação para este fator não ter sido ainda mais alta indica que possivelmente os participantes estiveram lidando com alguns problemas importantes no uso da ferramenta. Como esperado sob este argumento, alguns destes problemas foram indicados pelos participantes em seus comentários dissertativos, o que provavelmente representa o motivo desta pontuação de usabilidade agregada não ter sido ainda maior.

No que tange aos comentários dissertativos dos participantes, os dados qualitativos que coletamos destes também oferecem perspectivas valiosas. Primeiramente, consideramos relevante destacar a quase unanimidade de menções ao fator 'imersividade narrativa e realismo' como um dos pontos fortes da experiência de treinamento, onde apenas um dos participantes não mencionou diretamente este fator em seus comentários positivos. Acreditamos que esta forte assimetria traz algumas informações interessantes, para além das qualidades específicas desta ferramenta de treinamento em particular. Em primeiro lugar, a de que este formato particular de simulação para treinamento apresenta um potencial de aceitação entre os treinandos que é fundamental para a sua adoção em escala para fins

educacionais, de forma que estas possam produzir impactos reais nas práticas cotidianas de educação. Além disso, nos aponta a possibilidade de que tais graus de imersividade e realismo podem ser obtidos através deste tipo de simulação, de forma que esta forma de treinamento possa vir a se tornar tão efetiva quanto, ou até mesmo mais efetiva do que treinamentos *in vivo* em muitas situações, onde por exemplo o treinamento por simulação possa vir a ser, comparado a situações de treinamento *in vivo*, mais repetível e ético, de menor risco, menor custo, e assim por diante.

Outro aspecto que emergiu de nossas análises dos comentários qualitativos é o quanto impactante questões de ergonomia e usabilidade podem ser para este tipo de treinamento por simulação. Por um lado, o mero fato de tal dispositivo de interação, que permita o controle de um instrumento virtual pela manipulação direta de seu equivalente real, estar disponível e funcional para o treinamento, pareceu produzir um grau de imersividade e realismo sem precedentes na experiência de muitos participantes, o que foi indicado por comentários como por exemplo (sic) "*me senti como uma anestesista*", e ainda "*pude experimentar a aplicação de uma anestesia*". Por outro lado, a proporção e diversidade de dificuldades mencionadas pelos participantes a respeito do uso deste mesmo dispositivo indica a importância de se aprimorar e aperfeiçoar tais modos de interação para que se tornem tão similares às nossas interações naturais com o mundo real quanto seja possível. Isto por sua vez reforça a importância de se haver fases de avaliação e validação robustas em projetos que considerem o uso de RV imersiva para fins de treinamento prático, e apresentamos aqui um formato viável para se conduzir partes de tais atividades.

A partir da perspectiva gerada por este contraste, argumentamos que esta classe de simulações pode obter um alto grau de retorno com esforços dedicados ao aprimoramento destes dispositivos de interação e de seu rastreamento no mundo virtual, no que diz respeito à imersividade, experiência de usuário, e aos objetivos de simulação. Passamos a seguir a enumerar algumas destas limitações específicas, e sintetizamos algumas propostas de solução imaginadas.

Finalmente, gostaríamos de destacar que o desenvolvimento de periféricos customizados com maior diversidade, que sejam voltados para o uso em RV, sob medida para situações e contextos de treinamento específicos, pode ser uma proposta vantajosa em

diversos aspectos. À luz das principais limitações e pontos fortes que observamos a respeito dos modos e dispositivos de interação avaliados neste projeto, consideramos que uma abordagem integrada de desenvolvimento de produto para estes fins, onde dispositivos de interação customizados sejam produzidos visando situações de treinamento específicas, poderia tanto aprimorar fortemente os pontos fortes mencionados, como os ganhos em realismo e imersividade, enquanto também mitigariam fortemente as suas maiores limitações, como a sensação pouco natural da interação como um todo. É de nossa opinião que este tipo de desenvolvimento apresenta potencial para habilitar experiências de treinamento em RV que podem vir a ser virtualmente equivalentes a suas contrapartes reais, ao menos para os fins de aquisição de habilidades técnicas específicas.

6.2.1. Limitações identificadas no Treinamento Imersivo

Analisando em maiores detalhes os comentários relatados sob o item 'Problemas e Dificuldades' do questionário, percebemos que as principais limitações relatadas se referem à usabilidade e ergonomia do controle da seringa virtual através da seringa real rastreada. Dificuldades neste sentido foram expressadas por uma maioria dos participantes, em mais de 70% de suas respostas.

Apesar disso, especulamos que este mesmo modelo de interação com a seringa foi responsável por boa parte do impacto positivo percebido nas observações dos participantes sobre a imersividade e realismo narrativo da simulação. Podemos até observar diretamente este impacto em muitos dos comentários reproduzidos na tabela 5.1.1, na seção 'Pontos Fortes' como: *"O feedback haptico da seringa foi fantástico[...]"*, *"I like the feeling of skin resistance upon putting the needle and while injecting."*, e *"O ambiente é muito real, a sensação que a seringa causa também."*

Esta aparente contradição indica, em nossa opinião, que este modo de interação pouco convencional e de alta fidelidade é um elemento crucial no sistema VIDA e outros semelhantes, para o seu potencial imersivo, e portanto para a experiência do usuário e objetivos de simulação. Desta forma, foi percebido pelos participantes de forma até mesmo desproporcional a outros elementos da simulação, magnificando as suas limitações e potencialidades na percepção do usuário. E por este motivo argumentamos que esses modos

de interação apresentam uma expectativa de grandes impactos positivos na imersividade destas simulações conforme sejam mais aprimorados, ao mesmo tempo em que também introduzem um risco relativamente alto de que imperfeições aparentemente pequenas na fase de projeto ganhem magnitude inesperada na experiência dos usuários na fase de produção, podendo até mesmo impactar negativamente os objetivos de simulação. Tanto este potencial quanto este risco, entre outros fatores, reforçam a importância de que haja etapas de avaliação e validação em projetos de simuladores com finalidade educacional. Acreditamos que estas etapas podem produzir resultados satisfatórios a partir de estudos em formatos semelhantes ao descrito na metodologia deste projeto de pesquisa.

Vamos agora tentar elucidar alguns motivos por trás das limitações de ergonomia e usabilidade do dispositivo de interação principal, conforme estas foram relatadas pelos participantes do Treinamento Imersivo. Entre as respostas que mencionaram aspectos específicos destas limitações, observamos com certa frequência queixas em referência à dificuldade de manuseio, sensação de peso e a limitação da extensão dos movimentos naturais introduzida pelo dispositivo, como por exemplo: "*Senti a seringa real um pouco presa[...]*", "*O manuseio era um tanto pesado[...]*", "*o manuseio da seringa foi um pouco difícil[...]*", "*O manuseio era um tanto pesado ao manusear a seringa*" (sic). Estas observações nos levam a crer que uma maior aproximação entre o manuseio do dispositivo de interação com a seringa virtual, e o manuseio intuitivo de uma seringa real, esteve prejudicada por diferenças funcionais (limitação de movimentos) e hápticas (excesso de peso), entre outras, introduzidas pelo dispositivo de interação em questão e a sua construção particular.

Dada a natureza e interconexão do conjunto de problemas relatados pelos participantes afetando este modo de interação, além dos impactos positivos atribuídos às funcionalidades deste próprio tipo de dispositivo, consideramos que possa ser bastante vantajoso para a indústria a aplicação de uma abordagem mais estruturada para o desenvolvimento destes modos de interação para simuladores RVI para treinamento, por exemplo com projeto de produtos específicos dedicados a estes fins, com fatores de forma mais ergonômicos e próximos da experiência real, e integrações nativas às plataformas de RV já existentes no mercado.

As demais limitações mais frequentemente relatadas pelos participantes foram relativas a: ajustes de áudio, ajustes visuais e da posição do headset, liberdade de movimentação de uma forma geral, e adaptação fisiológica. Apenas enunciamos estas categorias de limitações, sem elaborar mais a discussão sobre estas, por considerarmos que já foram abordadas anteriormente nesta discussão, ou então por serem de tratamento trivial no contexto do VIDA Odonto, ou ainda de baixo interesse acadêmico para as finalidades deste projeto de pesquisa. Propostas de melhoria para essas limitações se encontram brevemente mencionadas na seção a seguir.

6.2.2. Propostas de Melhoria do Treinamento Imersivo

Mencionamos agora as demais classes de limitações mais frequentemente relatadas pelos participantes, e uma ou duas possíveis forma de mitigá-las ou solucioná-las, sem elaborar mais a discussão sobre estas por as considerarmos de tratamento trivial ou então de baixo interesse acadêmico para as finalidades deste projeto de pesquisa:

- *Áudio baixo*: Garantir um volume de base adequado do áudio e ajuste adequado dos fones de ouvido no usuário; oferecer um controle de volume na interface de usuário do simulador.
- *Ajuste do headset*: Alocar mais tempo para o procedimento de ajuste individual do headset antes de iniciar a simulação, com o apoio de um checklist; realizar a etapa de calibragem óptica do headset para cada usuário; oferecer opções de calibragem e ajuste visual na interface de usuário quando disponíveis.
- *Liberdade de movimentação*: no caso do simulador VIDA consideramos que esta limitação foi provocada principalmente pela necessidade de utilizar o dispositivo de interação háptico. Porém destacamos que podem haver ganhos neste sentido utilizando uma configuração mais permanente e robusta dos rastreadores ópticos do sistema de rastreamento, ampliando o espaço físico rastreado, e também com mais funcionalidades de locomoção disponíveis na interface de usuário dentro da simulação.
- *Adaptação fisiológica*: O simulador VIDA Odonto já inclui etapas na

simulação com o intuito de auxiliar a aclimatação fisiológica e perceptual dos seus usuários. Recomendamos aqui o prolongamento destas etapas para maior aclimatação do participante conforme se julgue necessário. Porém, é importante ainda considerar o tempo de exposição máximo ideal a um determinado simulador, conforme as características particulares suas e de seus usuários. Para esta finalidade, se fazem importantes estudos específicos que permitam estabelecer métricas para este tempo de exposição ideal e medi-lo através de protocolos experimentais robustos.

Finalmente, na seção anterior, destacamos este elemento específico do simulador VIDA, que é o controle da seringa virtual através de um dispositivo que simula uma seringa real, e entramos em maiores detalhes a respeito de suas limitações e seus potenciais. Assim o fizemos por considerar que, entre as limitações e potenciais observados, tanto os problemas quanto os pontos fortes da versão atual deste modo de interação pouco convencional podem ser melhor abordados em conjunto, tratando estes modos de interação de forma mais estruturada em um processo separado de desenvolvimento de produto.

Esclarecendo, os dispositivos de interação utilizados no Treinamento Imersivo têm se mostrado até o momento soluções satisfatórias para a experiência de usuário e para os objetivos de simulação propostos, com o potencial de já serem aplicados em produção em sua versão atual a partir de mais alguns aprimoramentos. Porém consideramos que a indústria como um todo deve se beneficiar mais a partir do ponto em que alguns de seus participantes optem por desenvolver soluções customizadas específicas para os casos de uso de simuladores RVI para treinamentos, e por isso desejamos nesta discussão chamar a atenção para este potencial ainda pouco explorado.

Embora o desenvolvimento de soluções dedicadas para estes modos de interação pressuponha um custo inicial mais elevado para o seu desenvolvimento, entre outras barreiras, como o acesso a direitos de propriedade intelectual, especulamos que o impacto potencial dessas melhorias na imersividade e qualidade de simulações RVI para treinamento possa elevar o grau de aceitação e adoção destas soluções na indústria para uma escala que mais do que justificaria estes custos e barreiras iniciais.

Portanto, apresentamos como principal proposta de melhoria para simuladores RVI voltados a treinamento, a exemplo do VIDA Odonto, que participantes da indústria possam estruturar seus modelos de negócios incluindo o desenvolvimento destes dispositivos customizados de interação, semelhantes a instrumentos e outros objetos reais para as situações simuladas de treinamento, onde estes dispositivos já estejam integrados às soluções de rastreamento para RVI predominantes no mercado, e apresentem fatores de forma, ergonomia e usabilidade próximas dos instrumentos reais simulados. Nossa opinião é de que este tipo de desenvolvimento já está ao alcance da indústria como um todo, e que os requisitos específicos do tipo de simulador estudado neste projeto de pesquisa, aliado ao seu potencial impacto positivo, devem justificar maiores investimentos em desenvolvimentos nesta área.

6.3. Considerações Finais

Finalmente, queremos aqui sintetizar a perspectiva construída ao longo deste projeto de pesquisa, apresentando algumas das principais conclusões e resultados produzidos.

Em primeiro lugar, é evidente para nós que o ecossistema tecnológico como um todo se encontra em um momento em que há ainda um grande potencial para disrupção das práticas convencionais em muitas áreas da atividade humana, particularmente na área da educação. Some-se a isso o estado atual das tecnologias de RVI, incluindo as práticas e ferramentas para a criação de conteúdo para esta, e antevemos um movimento crescente de desenvolvimento e adoção de soluções para educação que envolvam simulações de RVI nos próximos anos.

Consideramos que este projeto de pesquisa pôde contribuir com o avanço do conhecimento acadêmico na área, ao explorar a aplicação prática de duas simulações de RVI para finalidade educacional, uma para situação de exposição teórica (Aula Imersiva) e uma para treinamento prático (Treinamento Imersivo). Utilizamos metodologias semelhantes para quantificar a percepção de presença induzida em ambos os casos, ainda que por medidas subjetivas, e coletamos observações valiosas sobre os elementos mais limitantes e mais impactantes de cada experiência, a partir dos relatos de participantes.

Os potenciais e limitações mais comuns em cada simulação que estas informações nos permitiram elicitar podem ser considerados informações valiosas para o projeto e o desenvolvimento de outros tipos de simulação RVI para educação. Um tema comum que apareceu de maneira bastante relevante em ambos os estudos de caso por nós conduzidos foram, por um lado, os impactos positivos relatados pelos participantes, provocados pelas novas possibilidades de interação com a mídia 3D, e pela percepção de maior naturalidade destes novos modos de interação; e, por outro lado, os impactos negativos relatados pelos participantes pelas limitações de ergonomia e usabilidade presentes nestas mesmas novas formas de interação. Especulamos a partir desta observação que ao aumentar o grau de imersividade proporcionado em um ou mais canais sensoriais humanos, há um risco maior de que limitações e diferenças em relação aos modos de percepção e interação naturais do ser humano, ainda que pequenas, venham a causar um impacto negativo na experiência final de forma generalizada.

A metodologia aqui exposta para realizar estes estudos de caso oferece um modelo para a condução de estudos semelhantes no desenvolvimento de outras simulações RVI, que permitam detectar e priorizar questões de maior impacto na experiência de usuário e nos objetivos de simulação, e consideramos que esta etapa de avaliação e validação da experiência de simulação seja fundamental em projetos desta categoria.

REFERÊNCIAS

10.21236/ada155975. (:unav), , [s.d.]. DOI: 10.21236/ada155975. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.21236/ada155975>.

ABADIA, Rhodora; CALVERT, James; TAUSEEF, Syed Mohammad. Salient Features of an Effective Immersive Non-collaborative Virtual Reality Learning Environment. *In: PROCEEDINGS OF THE 10TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON EDUCATION TECHNOLOGY AND COMPUTERS 2018*, New York, NY, USA. **Anais [...]**. New York, NY, USA: ACM, 2018. p. 268–278.

ALBERT, Rachel; PATNEY, Anjul; LUEBKE, David; KIM, Joohwan. Latency Requirements for Foveated Rendering in Virtual Reality. **ACM transactions on applied perception**, New York, NY, USA, v. 14, n. 4, p. 25:1–25:13, 2017.

ALI, M. A.; KLYNE, M. A. **Vision in Vertebrates**, 1985. DOI: 10.1007/978-1-4684-9129-6. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4684-9129-6>.

ALLEN, Nicholas P. L. **Verification of the Nature and Causes of the Photo-negative Images on the Shroud of Lirey-Chambéry-Turinde arte**, 1995. DOI: 10.1080/00043389.1995.11761214. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1080/00043389.1995.11761214>.

ANGWIN, A. Stanley; STANLEY ANGWIN, A. **The Alexander Graham Bell Centenary Lecture. “Graham Bell—pioneer: an era of outstanding developments in world communication”** *Journal of the Institution of Electrical Engineers - Part I: General*, 1947. DOI: 10.1049/ji-1.1947.0084. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1049/ji-1.1947.0084>.

BARFIELD, Woodrow; WEGHORST, Suzanne. The sense of presence within virtual environments: A conceptual framework. **Advances in Human Factors Ergonomics**, [S. l.], v. 19, p. 699–699, 1993.

BARFIELD, Woodrow; ZELTZER, David; SHERIDAN, Thomas; SLATER, Mel. Presence and performance within virtual environments. **Virtual environments and advanced interface design**, [S. l.], p. 473–513, 1995.

BAUS, Oliver; BOUCHARD, Stéphane. **Exposure to an unpleasant odour increases the sense of Presence in virtual reality** *Virtual Reality*, 2017. DOI: 10.1007/s10055-016-0299-3. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s10055-016-0299-3>.

BEIDLER, L. M. A theory of taste stimulation. **The Journal of general physiology**, [S. l.], v. 38, n. 2, p. 133–139, 1954.

BERKMAN, Mehmet Ilker. **Eye Tracking in Virtual Reality** *Encyclopedia of Computer Graphics and Games*, 2019. DOI: 10.1007/978-3-319-08234-9_170-1. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-08234-9_170-1.

BERTRAND, Philippe; GUEGAN, Jérôme; ROBIEUX, Léonore; MCCALL, Cade Andrew; ZENASNI, Franck. Learning Empathy Through Virtual Reality: Multiple Strategies for Training Empathy-Related Abilities Using Body Ownership Illusions in Embodied Virtual Reality. **Frontiers in Robotics and AI**, [S. l.], v. 5, p. 26, 2018.

BIERBAUM, A.; JUST, C.; HARTLING, P.; MEINERT, K.; BAKER, A.; CRUZ-NEIRA, C. VR Juggler: a virtual platform for virtual reality application development. In: PROCEEDINGS IEEE VIRTUAL REALITY 2001 2001, **Anais [...]**. [s.l: s.n.] p. 89–96.

BIOCCA, Frank. Will Simulation Sickness Slow Down the Diffusion of Virtual Environment Technology? **Presence: Teleoperators and Virtual Environments**, [S. l.], v. 1, n. 3, p. 334–343, 1992.

BIOCCA, Frank. The Cyborg's Dilemma: Progressive Embodiment in Virtual Environments. **Journal of computer-mediated communication: JCMC**, [S. l.], v. 3, n. 2, 1997. DOI: 10.1111/j.1083-6101.1997.tb00070.x. Disponível em: <https://academic.oup.com/jcmc/article-abstract/3/2/JCMC324/4080399>. Acesso em: 23 set. 2019.

BIOCCA, Frank; HARMS, Chad; GREGG, Jenn. The networked minds measure of social presence: Pilot test of the factor structure and concurrent validity. In: 4TH ANNUAL INTERNATIONAL WORKSHOP ON PRESENCE, PHILADELPHIA, PA 2001, **Anais [...]**. [s.l: s.n.] p. 1–9.

BIOCCA, Frank; LEVY, Mark R. **Communication in the age of virtual reality**. [s.l.] : Lawrence Erlbaum Associates, Inc., 1995.

BOWMAN, D. A.; MCMAHAN, R. P. Virtual reality: how much immersion is enough? **Computer**, [S. l.], 2007. Disponível em: <http://www.cs.rug.nl/~roe/courses/OriInf/Bowman-Virtual-Reality>.

BRADLEY, Ryan; NEWBUTT, Nigel. Autism and virtual reality head-mounted displays: A state of the art systematic review. **Journal of Enabling Technologies**, [S. l.], v. 12, n. 3, p. 101–113, 2018.

BRADSKI, Gary; KAEHLER, Adrian. **Learning OpenCV: Computer Vision with the OpenCV Library**. [s.l.] : “O’Reilly Media, Inc.”, 2008.

BYSTROM, Karl-Erik; BARFIELD, Woodrow; HENDRIX, Claudia. A Conceptual Model of the Sense of Presence in Virtual Environments. **Presence: Teleoperators and Virtual Environments**, [S. l.], v. 8, n. 2, p. 241–244, 1999.

CARD, Stuart K.; MORAN, Thomas P.; NEWELL, Allen. **The psychology of human-computer interaction**. 1983 Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates, , 1983.

CARD, Stuartk; MORAN, Thomasp; NEWELL, Allen. The model human processor- An engineering model of human performance. **Handbook of perception and human performance.**, [S. l.], v. 2, n. 45--1, 1986. Disponível em: <http://iihm.imag.fr/blanch/ens/2009-2010/M1/IHM1/cours/UIR-1986-05-Card.pdf>.

CARNEGIE, Kieran; RHEE, Taehyun. Reducing Visual Discomfort with HMDs Using

Dynamic Depth of Field. **IEEE computer graphics and applications**, [S. l.], v. 35, n. 5, p. 34–41, 2015.

CHARRIÈRE, Simon; DUVEAU, Louis. **A vergence accommodation conflict-free virtual reality wearable headset****Digital Optics for Immersive Displays**, 2018. DOI: 10.1117/12.2315620. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1117/12.2315620>.

CHEYNE, J. A. The ominous numinous. Sensed presence and 'other' hallucinations. **Journal of Consciousness Studies**, [S. l.], 2001. Disponível em: <https://www.ingentaconnect.com/content/imp/jcs/2001/00000008/F0030005/1203>.

CLARKE, Mike; OXMAN, Andy. **Cochrane reviewers' handbook**. [s.l.] : Update Software, 2000.

CONCANNON, Brendan J.; ESMAIL, Shaniff; RODUTA ROBERTS, Mary. Head-Mounted Display Virtual Reality in Post-Secondary Education and Skill Training: A Systematic Review. In: FRONTIERS IN EDUCATION 2019, **Anais [...]**. : Frontiers, 2019. p. 80.

CROWTHER, Bosley. Smells of China; 'Behind Great Wall' Uses AromaRama. **The New York times**, [S. l.], 1959.

DAVID, N. Dejohn; DEJOHN DAVID, N.; SINGH, Tripty. **Estimation of field of view on human fundus image****2017 International Conference on Energy, Communication, Data Analytics and Soft Computing (ICECDS)**, 2017. DOI: 10.1109/icecds.2017.8389503. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1109/icecds.2017.8389503>.

DEMPSEY, P. The teardown: HTC Vive VR headset. **Engineering Technology**, [S. l.], v. 11, n. 7-8, p. 80–81, 2016.

DICKEY, Michele D. Three-dimensional virtual worlds and distance learning: two case studies of Active Worlds as a medium for distance education. **British journal of educational technology: journal of the Council for Educational Technology**, [S. l.], v. 36, n. 3, p. 439–451, 2005.

Dolby Atmos. [s.d.]. Disponível em: <https://www.dolby.com/us/en/brands/dolby-atmos.html>. Acesso em: 3 out. 2019.

EDISON, Thomas A.; UNITED STATES. PATENT OFFICE. **U.S. patents issued to Thomas A. Edison from 1883-88**, 1900. DOI: 10.5479/sil.472335.39088007608003. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5479/sil.472335.39088007608003>.

EHRlich, Jennifer A.; SINGER, Michael J. Simulator Sickness in Stereoscopic vs. Monoscopic Helmet-Mounted Displays. **Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society ... Annual Meeting Human Factors and Ergonomics Society. Meeting**, [S. l.], v. 40, n. 24, p. 1290–1290, 1996.

Entrevista com o Professor Dr. Romero Tori sobre Educação Imersiva. [s.d.]. Disponível em: <http://www.cest.poli.usp.br/pt/entrevista-com-o-professor-dr-romero-tori-sobre-educacao-imersiva/>. Acesso em: 11 nov. 2019.

FABBRI, Sandra; SILVA, Cleiton; HERNANDES, Elis; OCTAVIANO, Fábio; DI THOMMAZO, André; BELGAMO, Anderson. Improvements in the StArt Tool to Better Support the Systematic Review Process. *In: PROCEEDINGS OF THE 20TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON EVALUATION AND ASSESSMENT IN SOFTWARE ENGINEERING 2016*, New York, NY, USA. **Anais [...]**. New York, NY, USA: ACM, 2016. p. 21:1–21:5.

FAGERHOLT, Erik; LORENTZON, Magnus. Beyond the HUD-user interfaces for increased player immersion in FPS games. *[S. l.]*, 2009. Disponível em: <http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/111921.pdf>.

FEALY, Shanna; JONES, Donovan; HUTTON, Alison; GRAHAM, Kristen; MCNEILL, Liz; SWEET, Linda; HAZELTON, Michael. The integration of immersive virtual reality in tertiary nursing and midwifery education: A scoping review. **Nurse education today**, *[S. l.]*, v. 79, p. 14–19, 2019.

FENG, Zhenan; GONZÁLEZ, Vicente A.; AMOR, Robert; LOVREGLIO, Ruggiero; CABRERA-GUERRERO, Guillermo. Immersive virtual reality serious games for evacuation training and research: A systematic literature review. **Computers & education**, *[S. l.]*, v. 127, p. 252–266, 2018.

FITZPATRICK, Richard C.; DAY, Brian L. Probing the human vestibular system with galvanic stimulation. **Journal of applied physiology**, *[S. l.]*, v. 96, n. 6, p. 2301–2316, 2004.

FREINA, Laura; OTT, Michela. A literature review on immersive virtual reality in education: state of the art and perspectives. *In: THE INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE ELEARNING AND SOFTWARE FOR EDUCATION 2015*, **Anais [...]**. : “Carol I” National Defence University, 2015. p. 133.

GALLOWAY, Alexander R. **Gaming: Essays on algorithmic culture**. [s.l.] : U of Minnesota Press, 2006. v. 18

GAO, Feng; LI, Weimin; ZHAO, Xianchao; JIN, Zhenlin; ZHAO, Hui. New kinematic structures for 2-, 3-, 4-, and 5-DOF parallel manipulator designs. **Mechanism and Machine Theory**, *[S. l.]*, v. 37, n. 11, p. 1395–1411, 2002.

GENUTH, Iddo. **Brain computer interfaces bring neuroscience to the masses**. 2015. Disponível em: <https://eandt.theiet.org/content/articles/2015/05/brain-computer-interfaces-bring-neuroscience-to-the-masses/>. Acesso em: 2 out. 2019.

GERNSHEIM, Helmut. **A Concise History of Photography**. [s.l.] : Courier Corporation, 1986.

GILAD, Yoav; LANCET, Doron. Population differences in the human functional olfactory repertoire. **Molecular biology and evolution**, *[S. l.]*, v. 20, n. 3, p. 307–314, 2003.

GRAETZ, J. Martin. The origin of spacewar. **Creative Computing**, *[S. l.]*, v. 7, n. 8, p. 56–67, 1981.

GUPTA, Kushagr; KAZI, Suleman; KONG, Terry. Dynamic Eye Gaze Tracking for Foveated

Rendering and Retinal Blur. *[S. l.]*, 2015. Disponível em: http://cs229.stanford.edu/proj2015/157_report.pdf.

HARIRI, Surina; MUSTAFA, Nur Ain; KARUNANAYAKA, Kasun; CHEOK, Adrian David. Electrical Stimulation of Olfactory Receptors for Digitizing Smell. In: PROCEEDINGS OF THE 2016 WORKSHOP ON MULTIMODAL VIRTUAL AND AUGMENTED REALITY 2016, New York, NY, USA. **Anais [...]**. New York, NY, USA: ACM, 2016. p. 4:1–4:4.

HEILIG, M. L. **The original multimedia multisensory virtual reality: Sensorama Stimulator** United States Patent and Trade Office, Virginia, USA, US-3,050,870, , 1962. a.

HEILIG, Morton L. **Sensorama simulator**, 3050870, 1962. b.

HETTINGER, Lawrencej; KENNEDY, Roberts; MCCAULEY, Michael. Motion and human performance. **Motion and space sickness(A 93-55929 24-52)**. Boca Raton, FL, **CRC Press, Inc.** , 1990, *[S. l.]*, p. 411–441, 1990.

HODSON, Hal. Smell-o-vision screens let you really smell the coffee. **New scientist** , *[S. l.]*, v. 217, n. 2910, p. 20, 2013.

HOLBROOK, Eric H.; PURAM, Sidharth V.; SEE, Reiner B.; TRIPP, Aaron G.; NAIR, Dinesh G. **Induction of smell through transthyroid electrical stimulation of the olfactory bulb** **International Forum of Allergy & Rhinology**, 2019. DOI: 10.1002/alr.22237. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1002/alr.22237>.

Home Theater Sound Gets Real | DTS. [s.d.]. Disponível em: <https://dts.com/dtsx>. Acesso em: 3 out. 2019.

IANNILLI, Emilia; BEGER, Marcel; FÜRER, Raffaella; HUMMEL, Thomas. A gustatory stimulator. **Journal of neuroscience methods**, *[S. l.]*, v. 255, p. 12–16, 2015.

IJSSELSTEIJN, Wijnand A. History of telepresence. **O. Schreer, P. Kauff, & T. Sikora (Eds.) D**, *[S. l.]*, v. 3, p. 7–22, 2005.

IJSSELSTEIJN, Wijnand A.; FREEMAN, Jonathan; DE RIDDER, Huib. **Presence: Where Are We?** **CyberPsychology & Behavior**, 2001. DOI: 10.1089/109493101300117875. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1089/109493101300117875>.

JACOBSON, D. On theorizing presence. **Journal of Virtual Environments**, *[S. l.]*, 2002. Disponível em: http://www.jimelwood.net/students/tsukuba/english_s/jacobson_2002.doc.

JENSEN, Lasse; KONRADSEN, Flemming. A review of the use of virtual reality head-mounted displays in education and training. **Education and Information Technologies**, *[S. l.]*, v. 23, n. 4, p. 1515–1529, 2018.

JERALD, Jason. **The VR Book: Human-Centered Design for Virtual Reality**. [s.l.] : Morgan & Claypool, 2015.

JOHANSSON, Mathias. VR For Your Ears: Dynamic 3D audio is key to the immersive experience by mathias johansson\textperiodcentered illustration by eddie guy. **IEEE**

Spectrum, [S. l.], v. 56, n. 2, p. 24–29, 2019.

JOHNSON, K. O.; HSIAO, S. S. Neural mechanisms of tactual form and texture perception. **Annual review of neuroscience**, [S. l.], v. 15, p. 227–250, 1992.

KARIS, Brian; GAMES, Epic. Real shading in unreal engine 4. **Proc. Physically Based Shading Theory Practice**, [S. l.], v. 4, 2013. Disponível em: <https://www.unrealengine.com/en-US/>.

KAUFMAN, A. E.; BANDOPADHAY, A.; SHAVIV, B. D. An eye tracking computer user interface. In: PROCEEDINGS OF 1993 IEEE RESEARCH PROPERTIES IN VIRTUAL REALITY SYMPOSIUM 1993, **Anais [...]**. [s.l: s.n.] p. 120–121.

KAVANAGH, Sam; LUXTON-REILLY, Andrew; WUENSCH, Burkhard; PLIMMER, Beryl. A Systematic Review of Virtual Reality in Education. **Themes in Science and Technology Education**, [S. l.], v. 10, n. 2, p. 85–119, 2017. . Acesso em: 26 ago. 2019.

KENNEDY, Robert S.; FOWLKES, Jennifer E. **Simulator Sickness Is Polygenic and polysymptomatic: Implications for Research** **The International Journal of Aviation Psychology**, 1992. DOI: 10.1207/s15327108ijap0201_2. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1207/s15327108ijap0201_2.

KENNEDY, Robert S.; LANE, Norman E.; BERBAUM, Kevin S.; LILIENTHAL, Michael G. Simulator Sickness Questionnaire: An Enhanced Method for Quantifying Simulator Sickness. **The International journal of aviation psychology**, [S. l.], v. 3, n. 3, p. 203–220, 1993.

KENNEDY, R. S.; LILIENTHAL, M. G.; BERBAUM, K. S.; BALTZLEY, D. R.; MCCAULEY, M. E. Simulator sickness in U.S. Navy flight simulators. **Aviation, space, and environmental medicine**, [S. l.], v. 60, n. 1, p. 10–16, 1989.

KHALED, W. et al. A Haptic System for Virtual Reality Applications Based on Ultrasound Elastography and Electro-Rheological Fluids. In: ACOUSTICAL IMAGING 2004, **Anais [...]**. : Springer Netherlands, 2004. p. 667–674.

KIM, N. F.; JAI SONG PARK. Segmentation of object regions using depth information. In: 2004 INTERNATIONAL CONFERENCE ON IMAGE PROCESSING, 2004. ICIP '04. 2004, **Anais [...]**. [s.l: s.n.] p. 231–234 Vol. 1.

KIRULUTA, A.; EIZENMAN, M.; PASUPATHY, S. Predictive head movement tracking using a Kalman filter. **IEEE transactions on systems, man, and cybernetics. Part B, Cybernetics: a publication of the IEEE Systems, Man, and Cybernetics Society**, [S. l.], v. 27, n. 2, p. 326–331, 1997.

KITCHENHAM, Barbara. Procedures for performing systematic reviews. **Keele, UK, Keele University**, [S. l.], v. 33, n. 2004, p. 1–26, 2004.

KOK, Manon; HOL, Jeroen D.; SCHÖN, Thomas B. **Using Inertial Sensors for Position and Orientation Estimation**. [S. l.], , 2017. Disponível em: <http://arxiv.org/abs/1704.06053>. arXiv.

KOWDLE, Adarsh et al. The Need 4 Speed in Real-time Dense Visual Tracking. **ACM transactions on graphics**, New York, NY, USA, v. 37, n. 6, p. 220:1–220:14, 2018.

KRAMIDA, Gregory. Resolving the Vergence-Accommodation Conflict in Head-Mounted Displays. **IEEE transactions on visualization and computer graphics**, [S. l.], v. 22, n. 7, p. 1912–1931, 2016.

KRUCOFF, Max O.; RAHIMPOUR, Shervin; SLUTZKY, Marc W.; EDGERTON, V. Reggie; TURNER, Dennis A. Enhancing Nervous System Recovery through Neurobiologics, Neural Interface Training, and Neurorehabilitation. **Frontiers in neuroscience**, [S. l.], v. 10, p. 584, 2016.

KUCK, Roland; WIND, Jürgen; RIEGE, Kai; BOGEN, Manfred; BIRLINGHOVEN, S. Improving the avango vr/ar framework: Lessons learned. In: WORKSHOP VIRTUELLE UND ERWEITERTE REALITÄT 2008, **Anais [...]**. [s.l: s.n.] p. 209–220.

LACKNER, J. R.; TEIXEIRA, R. A. Optokinetic motion sickness: continuous head movements attenuate the visual induction of apparent self-rotation and symptoms of motion sickness. **Aviation, space, and environmental medicine**, [S. l.], v. 48, n. 3, p. 248–253, 1977.

LAMPTON, Donald R.; GLLDEA, John P.; MC DONALD, Daniel P.; KOLASINSKI, Eugenia M. Effects of Display Type on Performance in Virtual Environments. [S. l.], 2018. Disponível em: <https://pdfs.semanticscholar.org/8f4a/5c94aaa5ca88a709a96ead20835395c4857e.pdf>.

LAMPTON, Donald R.; KOLASINSKI, Eugenia M.; KNERR, Bruce W.; BLISS, James P.; BAILEY, John H.; WITMER, Bob G. Side effects and aftereffects of immersion in virtual environments. In: PROCEEDINGS OF THE HUMAN FACTORS AND ERGONOMICS SOCIETY ANNUAL MEETING 1994, **Anais [...]**. : SAGE Publications Sage CA: Los Angeles, CA, 1994. p. 1154–1157.

LEVINE, S. P. et al. A direct brain interface based on event-related potentials. **IEEE transactions on rehabilitation engineering: a publication of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society**, [S. l.], v. 8, n. 2, p. 180–185, 2000.

LOMBARD, Matthew; DITTON, Theresa. At the heart of it all: The concept of presence. **Journal of computer-mediated communication: JCMC**, [S. l.], v. 3, n. 2, 1997. Disponível em: <https://psycnet.apa.org/fulltext/2001-03229-004.pdf>.

LOMBARD, Matthew; JONES, Matthew T. Defining Presence. In: LOMBARD, Matthew; BIOCCA, Frank; FREEMAN, Jonathan; IJSSELSTEIJN, Wijnand; SCHAEVITZ, Rachel J. (org.). **Immersed in Media: Telepresence Theory, Measurement & Technology**. Cham: Springer International Publishing, 2015. p. 13–34.

LORENZO, Patricia M. Di; DI LORENZO, Patricia M.; HECHT, Gerald S. **Perceptual consequences of electrical stimulation in the gustatory system** *Behavioral Neuroscience*, 1993. DOI: 10.1037//0735-7044.107.1.130. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1037//0735-7044.107.1.130>.

LORENZO, Gonzalo; LLEDÓ, Asunción; ARRÁEZ-VERA, Graciela; LORENZO-LLEDÓ, Alejandro. The Application of Immersive Virtual Reality for Students with ASD: A Review between 1990-2017. **Education and Information Technologies**, [S. l.], v. 24, n. 1, p. 127–151, 2019. . Acesso em: 26 ago. 2019.

LUOTO, Antti. Systematic Literature Review on User Logging in Virtual Reality. *In: PROCEEDINGS OF THE 22ND INTERNATIONAL ACADEMIC MINDTREK CONFERENCE 2018*, New York, NY, USA. **Anais [...]**. New York, NY, USA: ACM, 2018. p. 110–117.

MARIN, G.; DOMINIO, F.; ZANUTTIGH, P. Hand gesture recognition with leap motion and kinect devices. *In: 2014 IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON IMAGE PROCESSING (ICIP) 2014*, **Anais [...]**. [s.l.: s.n.] p. 1565–1569.

MCCAULEY, Michael E.; SHARKEY, Thomas J. **Cybersickness: Perception of Self-Motion in Virtual Environments****Presence: Teleoperators and Virtual Environments**, 1992. DOI: 10.1162/pres.1992.1.3.311. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1162/pres.1992.1.3.311>.

MCMAHAN, Alison. Immersion, engagement, and presence: A method for analyzing 3-D video games. *In: The video game theory reader*. [s.l.] : Routledge, 2013. p. 89–108.

MCMAHAN, Ryan P.; BOWMAN, Doug A.; ZIELINSKI, David J.; BRADY, Rachael B. Evaluating display fidelity and interaction fidelity in a virtual reality game. **IEEE transactions on visualization and computer graphics**, [S. l.], v. 18, n. 4, p. 626–633, 2012.

MCMAHAN, Ryan P.; GORTON, Doug; GRESOCK, Joe; MCCONNELL, Will; BOWMAN, Doug A. Separating the Effects of Level of Immersion and 3D Interaction Techniques. *In: PROCEEDINGS OF THE ACM SYMPOSIUM ON VIRTUAL REALITY SOFTWARE AND TECHNOLOGY 2006*, New York, NY, USA. **Anais [...]**. New York, NY, USA: ACM, 2006. p. 108–111.

MEEHAN, M.; RAZZAQUE, S.; WHITTON, M. C.; BROOKS, F. P. Effect of latency on presence in stressful virtual environments. *In: IEEE VIRTUAL REALITY, 2003. PROCEEDINGS*. 2003, **Anais [...]**. : ieeexplore.ieee.org, 2003. p. 141–148.

MEINA, M.; RYKACZEWSKI, K.; RUTKOWSKI, A. Position tracking using inertial and magnetic sensing aided by permanent magnet. *In: 2016 FEDERATED CONFERENCE ON COMPUTER SCIENCE AND INFORMATION SYSTEMS (FEDCSIS) 2016*, **Anais [...]**. [s.l.: s.n.] p. 105–111.

MIKAMI, Takashi; NAKAHARA, Masataka; SOMEYA, Kazutaka. Compatibility Study of Dolby Atmos objects' spatial sound localization using a visualization method. *In: AUDIO ENGINEERING SOCIETY CONVENTION 140 2016*, **Anais [...]**. : Audio Engineering Society, 2016. Disponível em: <http://www.aes.org/e-lib/online/browse.cfm?elib=18157>.

MIKROPOULOS, Tassos A.; NATSIS, Antonis. Educational virtual environments: A ten-year review of empirical research (1999–2009). **Computers & education**, [S. l.], v. 56, n. 3, p. 769–780, 2011.

MOREIRA, Paulo; DE OLIVEIRA, Elen Collaço; TORI, Romero. Impact of Immersive Technology Applied in Computer Graphics Learning. **Brazilian Symposium on Computers in Education (Simpósio Brasileiro de Informática na Educação - SBIE)**, [S. l.], v. 27, n. 1, p. 410, 2016. . Acesso em: 3 nov. 2019.

MOURANT, Ronald R.; THATTACHERRY, Thara R. Simulator Sickness in a Virtual Environments Driving Simulator. **Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society ... Annual Meeting Human Factors and Ergonomics Society. Meeting**, [S. l.], v. 44, n. 5, p. 534–537, 2000.

MUNYAN, Benson G., 3rd; NEER, Sandra M.; BEIDEL, Deborah C.; JENTSCH, Florian. Olfactory Stimuli Increase Presence in Virtual Environments. **PloS one**, [S. l.], v. 11, n. 6, p. e0157568, 2016.

MURRAY, J. H. **Hamlet on the holodeck: The future of narrative in cyberspace (2001 ed.)**Cambridge, Mass: The MIT Press, , 1997.

NAKAMURA, Hiromi; MIYASHITA, Homei. Augmented Gustation Using Electricity. *In: PROCEEDINGS OF THE 2ND AUGMENTED HUMAN INTERNATIONAL CONFERENCE 2011*, New York, NY, USA. **Anais [...]**. New York, NY, USA: ACM, 2011. p. 34:1–34:2.

NHMRC STAFF. **How to Review the Evidence: Systematic Identification and Review of the Scientific Literature : Handbook Series on Preparing Clinical Practice Guidelines**. [s.l.] : National Health and Medical Research Council, 2000. a.

NHMRC STAFF. **How to Use the Evidence: Assessment and Application of Scientific Evidence**. [s.l.] : National Health and Medical Research Council, 2000. b.

NICHOLS, Sarah; PATEL, Harshada. Health and safety implications of virtual reality: a review of empirical evidence. **Applied ergonomics**, [S. l.], v. 33, n. 3, p. 251–271, 2002.

NORMAN, Geoff. Likert scales, levels of measurement and the “laws” of statistics. **Advances in health sciences education: theory and practice**, [S. l.], v. 15, n. 5, p. 625–632, 2010.

O'DOHERTY, Joseph E.; LEBEDEV, Mikhail A.; IFFT, Peter J.; ZHUANG, Katie Z.; SHOKUR, Solaiman; BLEULER, Hannes; NICOLELIS, Miguel A. L. Active tactile exploration using a brain-machine-brain interface. **Nature**, [S. l.], v. 479, n. 7372, p. 228–231, 2011.

PFEIFFER, Charles; MAVROIDIS, Constantinos; BAR-COHEN, Yoseph; DOLGIN, Benjamin P. **Electrorheological-fluid-based force feedback deviceTelemanipulator and Telepresence Technologies VI**, 1999. DOI: 10.1117/12.369269. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1117/12.369269>.

PLAIT, Phil. Resolving the iPhone resolution. **Discover**, [S. l.], 2010. Disponível em: <https://slate.com/technology/2010/06/resolving-the-iphone-resolution.html>.

POGUE, David. 6 Electronic Devices You Can Control with Your Thoughts. **Scientific American**, [S. l.], 2012. Disponível em:

<https://www.scientificamerican.com/article/pogue-6-electronic-devices-you-can-control-with-your-thoughts/>. Acesso em: 2 out. 2019.

Products - Unity. [s.d.]. Disponível em: <https://unity3d.com/pt/unity>. Acesso em: 4 out. 2019.

PROTHERO, J. D.; DRAPER, M. H.; FURNESS, T. A., 3rd; PARKER, D. E.; WELLS, M. J. The use of an independent visual background to reduce simulator side-effects. **Aviation, space, and environmental medicine**, [S. l.], v. 70, n. 3 Pt 1, p. 277–283, 1999.

QUEIROZ, Anna Carolina Muller; NASCIMENTO, Alexandre Moreira; TORI, Romero; DA SILVA LEME, Maria Isabel. Using HMD-Based Immersive Virtual Environments in Primary/K-12 Education. *In: IMMERSIVE LEARNING RESEARCH NETWORK 2018, Anais [...]*. : Springer International Publishing, 2018. p. 160–173.

QUEIROZ, Anna Carolina Muller; NASCIMENTO, Alexandre Moreira; TORI, Romero; DA SILVA LEME, Maria Isabel. Immersive Virtual Environments and Learning Assessments. *In: IMMERSIVE LEARNING RESEARCH NETWORK 2019, Anais [...]*. : Springer International Publishing, 2019. p. 172–181.

RAISAMO, Jukka. Tactile Sensing & Feedback. **pervasive. jku. at**, [S. l.], p. 1–62, 2009.

RANASINGHE, Nimesha; CHEOK, Adrian David; FERNANDO, Owen Noel Newton; NII, Hideaki; PONNAMPALAM, Gopalakrishnakone. Electronic Taste Stimulation. *In: PROCEEDINGS OF THE 13TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON UBIQUITOUS COMPUTING 2011*, New York, NY, USA. **Anais [...]**. New York, NY, USA: ACM, 2011. p. 561–562.

REASON, James T.; BRAND, Joseph John. **Motion sickness**. [s.l.] : Academic press, 1975.

RUSS, John C.; . . . John. **The Image Processing Handbook, Fourth Edition**. [s.l.] : Taylor & Francis, 2002.

RYANA, L.; MACKENZIE, K. J. Multiple-focal-planes 3D displays: A practical solution to the vergence-accommodation conflict? **Conference on 3D Imaging ...**, [S. l.], 2012. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6615114/>.

SADOWSKI, Wallace; STANNEY, Kay. Presence in virtual environments. [S. l.], 2002. Disponível em: <https://psycnet.apa.org/record/2002-00153-040>.

SCHUBERT, Thomas; FRIEDMANN, Frank; REGENBRECHT, Holger. The Experience of Presence: Factor Analytic Insights. **Presence: Teleoperators and Virtual Environments**, [S. l.], v. 10, n. 3, p. 266–281, 2001.

SCHWARZ, Loren Arthur; MKHITARYAN, Artashes; MATEUS, Diana; NAVAB, Nassir. Human skeleton tracking from depth data using geodesic distances and optical flow. **Image and vision computing**, [S. l.], v. 30, n. 3, p. 217–226, 2012.

SHERIDAN, Thomas B. **Telerobotics, Automation, and Human Supervisory Control**. [s.l.] : MIT Press, 1992. a.

SHERIDAN, Thomas B. Musings on Telepresence and Virtual Presence. **Presence:**

Teleoperators and Virtual Environments, [S. l.], v. 1, n. 1, p. 120–126, 1992. b.

SICILIANO, Bruno; KHATIB, Oussama. **Springer Handbook of Robotics**. [s.l.] : Springer, 2016.

SILVA, A. J.; RAMIREZ, O. A. D.; VEGA, V. P.; OLIVER, J. P. O. PHANToM OMNI Haptic Device: Kinematic and Manipulability. *In*: 2009 ELECTRONICS, ROBOTICS AND AUTOMOTIVE MECHANICS CONFERENCE (CERMA) 2009, **Anais [...]**. [s.l: s.n.] p. 193–198.

SLATER, Mel. A Note on Presence Terminology. **Presence connect 3.3**, [S. l.], p. 1–5, 2003.

SLATER, Mel. How Colorful Was Your Day? Why Questionnaires Cannot Assess Presence in Virtual Environments. **Presence: Teleoperators and Virtual Environments**, [S. l.], v. 13, n. 4, p. 484–493, 2004.

SLATER, Mel. Immersion and the illusion of presence in virtual reality. **British journal of psychology** , [S. l.], v. 109, n. 3, p. 431–433, 2018.

SLATER, Mel; USOH, Martin. Body centred interaction in immersive virtual environments. **Artificial life and virtual reality**, [S. l.], v. 1, n. 1994, p. 125–148, 1994.

SLATER, Mel; USOH, Martin; STEED, Anthony. Depth of Presence in Virtual Environments. **Presence: Teleoperators and Virtual Environments**, [S. l.], v. 3, n. 2, p. 130–144, 1994.

SLATER, Mel; WILBUR, Sylvia. Through the looking glass world of presence: A framework for immersive virtual environments. *In*: FIVE 1995, **Anais [...]**. [s.l: s.n.] p. 1–20.

SLATER, Mel; WILBUR, Sylvia. A Framework for Immersive Virtual Environments (FIVE): Speculations on the Role of Presence in Virtual Environments. **Presence: Teleoperators and Virtual Environments**, [S. l.], v. 6, n. 6, p. 603–616, 1997.

SLATER, M.; USOH, M. Presence in immersive virtual environments. *In*: PROCEEDINGS OF IEEE VIRTUAL REALITY ANNUAL INTERNATIONAL SYMPOSIUM 1993, **Anais [...]**. [s.l: s.n.] p. 90–96.

SLATER, M.; USOH, M.; STEED, A. Taking steps: the influence of a walking technique on presence in virtual reality. **ACM transactions on computer-human interaction: a publication of the Association for Computing Machinery**, [S. l.], 1995. Disponível em: <https://dl.acm.org/citation.cfm?id=210084>.

SO, Richard H. Y.; HO, Andy; LO, W. T. A Metric to Quantify Virtual Scene Movement for the Study of Cybersickness: Definition, Implementation, and Verification. **Presence: Teleoperators and Virtual Environments**, [S. l.], v. 10, n. 2, p. 193–215, 2001.

STAFF PRESANS. **Five quick insights on neural interfaces - Open Organization**. 2018. Disponível em:

<https://open-organization.com/en/2018/12/27/cinq-apercus-rapides-sur-les-interfaces-neurales> /. Acesso em: 2 out. 2019.

STEINER, Ami; NAHIR, Roee; BEN ELIEZER, Barak. **Device, system, and method of controlling electronic devices via thought**, 20150338917:A1, 2015.

STEUER, Jonathan. Defining Virtual Reality: Dimensions Determining Telepresence. **The Journal of communication**, [S. l.], v. 42, n. 4, p. 73–93, 1992.

SUTHERLAND, Ivan E. Sketchpad a Man-Machine Graphical Communication System. **Simulation**, [S. l.], v. 2, n. 5, p. R–3–R–20, 1964.

SUTHERLAND, Ivan E. The ultimate display. **Multimedia: From Wagner to virtual reality**, [S. l.], p. 506–508, 1965.

TALBOT, W. H.; DARIAN-SMITH, I.; KORNHUBER, H. H.; MOUNTCASTLE, V. B. The sense of flutter-vibration: comparison of the human capacity with response patterns of mechanoreceptive afferents from the monkey hand. **Journal of neurophysiology**, [S. l.], v. 31, n. 2, p. 301–334, 1968.

TOREBJÖRK, H. E.; OCHOA, J. L. Specific sensations evoked by activity in single identified sensory units in man. **Acta physiologica Scandinavica**, [S. l.], v. 110, n. 4, p. 445–447, 1980.

TORI, Romero. **Educação Sem Distancia**. [s.l.] : Ed. SENAC, 2010.

TORI, Romero. **Educação sem distância: As tecnologias interativas na redução de distâncias em ensino e aprendizagem**. [s.l.] : Artesanato Educacional LTDA, 2018.

TORI, Romero; DA SILVA HOUNSELL, Marcelo. **Introdução a Realidade Virtual e Aumentada**. Porto Alegre: Editora SBC, 2018.

TORI, Romero; KIRNER, Claudio; SISCOOTTO, Robson Augusto. **Fundamentos e tecnologia de realidade virtual e aumentada**. [s.l.] : Editora SBC, 2006.

TORI, Romero; WANG, Gustavo Ziyu; SALLABERRY, Lucas Henna; TORI, Allan Amaral; DE OLIVEIRA, Elen Collaço; DE A. M. MACHADO, Maria Aparecida. **VIDA ODONTO: Ambiente de Realidade Virtual para Treinamento Odontológico** *Revista Brasileira de Informática na Educação*, 2018. DOI: 10.5753/rbie.2018.26.02.80. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5753/rbie.2018.26.02.80>.

UNIVERSITY OF YORK. NHS CENTRE FOR REVIEWS AND DISSEMINATION. **Undertaking systematic reviews of research on effectiveness: CRD's guidance for those carrying out or commissioning reviews**. [s.l.] : NHS Centre for Reviews and Dissemination, University of York, 2001.

USER, Super. **The OpenSceneGraph Project Website**. [s.d.]. Disponível em: <http://www.openscenegraph.org/index.php/33-openscenegraph/4-front-page>. Acesso em: 4 out. 2019.

USOH, Martin; CATENA, Ernest; ARMAN, Sima; SLATER, Mel. Using Presence Questionnaires in Reality. **Presence: Teleoperators and Virtual Environments**, [S. l.], v. 9, n. 5, p. 497–503, 2000.

VI, Chi Thanh; ABLART, Damien; ARTHUR, Daniel; OBRIST, Marianna. **Gustatory interface: the challenges of “how” to stimulate the sense of taste** *Proceedings of the 2nd ACM SIGCHI International Workshop on Multisensory Approaches to Human-Food Interaction - MHFI 2017*, 2017. DOI: 10.1145/3141788.3141794. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1145/3141788.3141794>.

VIDAL, J. J. Toward direct brain-computer communication. **Annual review of biophysics and bioengineering**, [S. l.], v. 2, p. 157–180, 1973.

Vizard | Virtual Reality software for researchers. [s.d.]. Disponível em: <https://www.worldviz.com/vizard-virtual-reality-software>. Acesso em: 4 out. 2019.

WANG, Peng; WU, Peng; WANG, Jun; CHI, Hung-Lin; WANG, Xiangyu. A Critical Review of the Use of Virtual Reality in Construction Engineering Education and Training. **International journal of environmental research and public health**, [S. l.], v. 15, n. 6, 2018. DOI: 10.3390/ijerph15061204. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/ijerph15061204>.

WATERWORTH, John A.; WATERWORTH, Eva Lindh; RIVA, Giuseppe; MANTOVANI, Fabrizia. **Presence: Form, Content and Consciousness Immersed in Media**, 2015. DOI: 10.1007/978-3-319-10190-3_3. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-10190-3_3.

WATT, Alan. 3D Computer graphics. [S. l.], 1993. Disponível em: <http://papers.cumincad.org/cgi-bin/works/Show?8fd8>. Acesso em: 1 nov. 2019.

WEECH, Séamas; KENNY, Sophie; BARNETT-COWAN, Michael. Presence and Cybersickness in Virtual Reality Are Negatively Related: A Review. **Frontiers in psychology**, [S. l.], v. 10, p. 158, 2019.

WEISS, Sebastian; BONGARTZ, Hannah; BOLL, Susanne; HEUTEN, Wilko. Applications of Immersive Virtual Reality in Nursing Education—A Review. **Clusterkonferenz Zukunft der Pflege—Innovative Technologien für die Praxis, Oldenburg**, [S. l.], 2018.

WESSBERG, J. et al. Real-time prediction of hand trajectory by ensembles of cortical neurons in primates. **Nature**, [S. l.], v. 408, n. 6810, p. 361–365, 2000.

WITMER, Bob G.; SINGER, Michael J. Measuring Presence in Virtual Environments: A Presence Questionnaire. **Presence: Teleoperators and Virtual Environments**, [S. l.], v. 7, n. 3, p. 225–240, 1998.

XUE, Liang; JIANG, Cheng-Yu; CHANG, Hong-Long; YANG, Yong; QIN, Wei; YUAN, Wei-Zheng. A novel Kalman filter for combining outputs of MEMS gyroscope array. **Measurement**, [S. l.], v. 45, n. 4, p. 745–754, 2012.

ZAHORIK, Pavel; JENISON, Rick L. Presence as Being-in-the-World. **Presence: Teleoperators and Virtual Environments**, [S. l.], v. 7, n. 1, p. 78–89, 1998.

ZHANG, Z. Microsoft Kinect Sensor and Its Effect. **IEEE Multimedia**, [S. l.], v. 19, n. 2, p. 4–10, 2012.

Zoom H3-VR Handy Recorder. 2018. Disponível em:
<https://www.zoom-na.com/products/field-video-recording/field-recording/zoom-h3-vr-handy-recorder>. Acesso em: 3 out. 2019.

ANEXO 1 - SÍNTESE DA REVISÃO DO ESTADO DA ARTE

	Autores	Área	n	Categorias	Discussão
	(WANG et al., 2018)	Engenharia Civil	6	visualização treinamento de segurança treinamento operacional análise estrutural	ocorrência de AVs baseados em BIM e imersão RV por desktop tendência de aumento em implementações de maior imersividade movimento de ensino centrado no instrutor para centrado no estudante
	(FREIN A; OTT, 2015)	Educação Geral	3	temas em frequência decrescente: Ciências e engenharia Ciências médicas Outros	uso amplo de RVI no treinamento de adultos lacuna em populações com deficiências lacuna em educação primária e secundária
	(WEISS et al., 2018)	Enfermagem	10	primeiros socorros comunicação com pacientes virtuais descontaminação imersão na sala de operações anatomia colaboração em um hospital virtual preparação epidural	habilidades psicomotoras, afetivas e cognitivas efeitos positivos da RVI na motivação e aprendizagem necessário amostragens populacionais mais significativas incluir resultados além do conforto e experiência auto-reportados inclusão de mais resultados de aprendizagem Lacuna em estudos sobre treinamento de procedimentos conflito de vocabulário na área, sugerindo uma distinção lexical mais clara entre tecnologias e conceitos
	(JENSE N; KONR ADSEN , 2018)	HMDs para educação e treinamento	21	habilidades cognitivas habilidades psicomotoras habilidades afetivas	Análise MERSQI () dos estudos mostra qualidade geral inferior à média Resultados cognitivos iguais ou inferiores a controles Resultados de aprendizagem psicomotora relacionados à fidelidade do simulador Resultados de aprendizagem afetiva sem diferenças entre HMD e screen-based variância significativa nos graus de desconforto físico reportados entre estudos ocorrência de enjôo positivamente correlacionada à idade, negativamente à experiência com jogos 3D atitudes de aprendizagem com HMDs geralmente mais positivas A aquisição de habilidades cognitivas pode ser dificultada pelo efeito de novidade do uso de HMDs lacuna de pesquisas em habilidades cognitivas de alto nível

					<p>faltam resultados demonstrando transferência de aprendizagem psicomotora</p> <p>aplicabilidade de RVI para treino psicomotor é muito dependente das tecnologias periféricas de rastreamento de corpo</p> <p>bom potencial de aplicabilidade de RVI para o desenvolvimento de habilidades afetivas</p> <p>a eficácia de HMDs e RVIs para aprendizagem pode estar correlacionada aos tipos de personalidade dos estudantes</p>
	(KAVAN AGH et al., 2017)	RV na educação	99	<p>Domínios: 35% ciências médicas 28% educação geral 19% engenharia 16% ciências 27% outros tópicos</p> <p>Contextos: 51% superior 10% educação primária e pré-primária 9% secundária 6% setor privado 24% outros</p> <p>simulação; treinamento; acesso a recursos limitados ou inacessíveis; educação à distância;</p>	<p>análise temática dos estudos primários</p> <p>lacuna de pesquisas que generalizem o conhecimento para áreas não-especializadas de educação.</p> <p>embasamento pedagógico da pesquisa atual é pouco sólido.</p> <p>'efeito novidade' constitui uma componente transiente do efeito motivacional da RV para os estudantes</p> <p>uso de RVI introduz overheads de custo e treinamento de uso que foram relatados frequentemente</p> <p>relatos negativos relacionados a questões de usabilidade do software, interfaces contraintuitivas, metas pouco claras, problemas de navegação</p> <p>elementos negativos associados ao design de experiência do usuário têm maior potencial de impacto no aprimoramento de RVI para educação no curto prazo</p>
	(BRADLEY; NEWBUTT, 2018)	HMDs com população no grupo de Transtornos de Espectro Autista (TEA)	6	<p>avaliação e monitoramento de respostas dos indivíduos</p> <p>aprendizado de habilidades para o mundo real</p>	<p>lacuna de 20 anos na literatura entre 1996 e 2006</p> <p>questões de desconforto, enjôo, continuidade gráfica como fatores negativos na aceitação dos usuários</p> <p>usuários relataram autenticidade e plausibilidade das situações reais simuladas</p> <p>melhorias de performance em tarefas foram observadas</p> <p>graus de confiança e auto-satisfação reduzidos nos grupos que utilizaram instrumentos de RV</p> <p>ausência de instrumentos qualitativos limita a compreensão da percepção subjetiva dos usuários</p> <p>avaliação de percepções de conforto e usabilidade como um requisito ético na pesquisa sobre populações com TEA</p>
	(CONCANNON; ESMAIL; RODUT A ROBERTS, 2019)	Educação pós-secundária e treinamento de habilidades	119	<p>ciência e tecnologia</p> <p>ciências médicas</p>	<p>35 de 38 estudos que introduziram medidas experimentais apresentaram impacto positivo na aprendizagem pelo uso de RV imersiva</p> <p>a literatura raramente apresentou justificativas pedagógicas bem embasadas para o uso de RV</p> <p>tempo para planejamento, desenvolvimento, comunicação e treinamento ao integrar instrumentos de RVI em currículos</p>

					ideal que programas incluindo RVI apresentem implementação de contingência com imersividade desktop como para contornar o problema da inclusividade de usuários mais suscetíveis a enjôo de simulação
	(QUEIROZ et al., 2019)	Instrumentos de medida de aprendizagem para AVIs	46	<p>Áreas Temáticas: Agronomia e Biologia Ciência da Computação Medicina Ciências Sociais Engenharia Psicologia Saúde</p> <p>tipos de conhecimento: procedural 67% conceitual 13% ambos 19%</p> <p>Tipos de habilidade: cognitiva 53% emocional 24% motora 17%</p> <p>Públicos: geral 28% pacientes ou profissionais de saúde 22% estudantes de educação superior 20% corporativo 13% ensino secundário 2%</p>	<p>concentração das publicações nos EUA e economias mais desenvolvidas</p> <p>desktop e HMDs são os instrumentos de imersão visual predominantes</p> <p>imersão auditiva: 69% dos estudos</p> <p>resposta háptica: 20% dos estudos</p> <p>Instrumentos de avaliação: métricas 67%, padrões 30%, IA 3%</p> <p>Procedimentos de avaliação: automático 45%, manual 40%</p> <p>Métodos de avaliação: apenas quantitativo 85%, qualitativo 2%, ambos 13%.</p> <p>crescimento da pesquisa na área atribuída à defasagem de tempo entre a disponibilidade de novas tecnologias e a sua adoção gradual em pesquisa.</p> <p>concentração em economias mais desenvolvidas devida a um atraso adicional na adoção em economias menos desenvolvidas. O aumento na disponibilidade de dispositivos de RV aliado ao vasto campo de pesquisa pode provocar uma inflexão nesta dinâmica</p> <p>Baixa frequência de estudos avaliando aprendizados conceituais, ou específicos para educação secundária. Este ponto é fundamental para adoção em educação secundária, currículos muito baseados em conhecimentos conceituais.</p> <p>Escassez de instrumentos experimentais qualitativos de, possivelmente pelos requisitos de tempo e especialização demandados.</p> <p>Capacidade de registro e relatório automáticos apresentadas por AVIs ainda subutilizada.</p> <p>Coleta automática de dados pode potencializar a quantidade e poder de análise de avaliações qualitativas e quantitativas</p> <p>Estudos longitudinais permanecem subrepresentados</p> <p>Técnicas de learning analytics e inteligência artificial (IA) são uma fronteira vital para a avaliação automática de aprendizagem</p>
	(FENG et al., 2018)	Treinamento gamificado de procedimentos de evacuação	15	<p>procedimentos de evacuação de emergência</p> <p>teste e validação de instalações de emergência</p> <p>investigação comportamental de usuários em situação simulada de emergência</p>	<p>RVI produziu resultados de aprendizagem superiores na maioria dos casos, entre tarefas simples (habilidade espacial), conhecimento conceitual de alto nível (melhores práticas), e aquisição e retenção de conhecimento</p> <p>resultados comportamentais e pedagógicos foram observados</p> <p>Maioria de experimentos focou na aquisição de conhecimentos, apenas dois avaliaram retenção</p> <p>Instrumentos de medição: questionários, questões de entrevista, testes, registro automático de dados</p>

				<p>capacidade de seguir instruções na simulação</p> <p>investigação perceptual de usuários em situação simulada de emergência</p> <p>detecção de perigos e riscos</p> <p>influência social do comportamento na evacuação</p> <p>reconhecimento de comportamentos em diferentes condições de evacuação</p> <p>comportamentos para orientação espacial durante evacuação</p>	<p>Medidas da experiência dos participantes: auto-relatados e fisiológicos</p> <p>Abordagens instrucionais: feedback pós-resposta (imediato ou pós-simulação), instruções pré-resposta</p> <p>Soluções de navegação: movimentação controlada por joystick ou movimento em direção à orientação de cabeça do usuário ao apertar um botão</p> <p>Métodos de narrativa: dirigida por ação, instrução, performance ou ambiente</p> <p>Perigos simulados: estáticos e dinâmicos</p> <p>Estimulação sensorial: visual, auditiva, háptica e olfativa</p> <p>Apenas um estudo avaliou o enjôo de simulação. 20% dos participantes relataram um efeito colateral indesejável</p>
	(ABADI A; CALVE RT; TAUSE EF, 2018)	Características salientes de AVIs para aprendizagem	24	<p>ciências e engenharia</p> <p>segurança</p> <p>aprendizagem empírica</p> <p>astronomia</p> <p>ciências médicas</p> <p>música</p> <p>estórias narrativas</p> <p>engenharia civil</p>	<p>análise de aspectos: técnicos - usabilidade, imersão, incorporação; aprendizagem - conhecimento, domínio, motivação, performance; humanos - presença, percepção, engajamento, elicitação de emoções, empatia;</p> <p>Frequências de investigação dos aspectos: presença 37.5%, domínio 25%, percepção 20.8%, imersão 20.8%, performance 16.7%, engajamento 16.7%, incorporação 16.7%, usabilidade 12.5%, retenção de conhecimento 8.3%, empatia 8.3%, motivação 4.2%, elicitação de emoções 4.2%</p> <p>54.2% dos estudos realizaram avaliação dos AVIs por mais de um aspecto</p> <p>presença e imersão sempre avaliadas por questionários de autoavaliação. Alguns estudos incluíram métricas fisiológicas. Apenas um estudo incluiu grupos de foco e entrevistas</p> <p>O domínio dos tópicos de aprendizagem foi medido em 25% dos estudos, geralmente utilizando testes pré- e pós-experimento</p> <p>Apenas dois estudos avaliando retenção, com medidas após um período de duas semanas</p> <p>Performance foi medida por atividades baseadas em tarefas, questionários, e citação de comentários dos participantes</p> <p>Engajamento medido por questionários e comentários</p> <p>Empatia, incorporação e elicitação de emoção foram testados utilizando escalas de intervalo de 5 pontos, questionários, entrevistas, e grupos de foco.</p> <p>Elicitação emocional beneficiou a retenção de conceitos; retenção foi maior com o uso de RVI do que sem, e também foi induzida resposta emocional mais intensa</p>

					<p>Usabilidade e satisfação de uso avaliadas por questionários personalizados e também pelo questionário SUS em certos casos</p> <p>Distribuição dos aspectos abordados variam bastante entre estudos</p> <p>Prescrição sistemática de aspectos para estudos não seria viável ou desejável; contudo há alguns aspectos e relações que idealmente devem ser medidos de forma concomitante na maioria dos casos</p>
	(LUOTO, 2018)	registro e relatório automático de dados em RVI	78		<p>Métodos de coleta: rastreamento do corpo 49%, medidas de performance 42%, resposta fisiológica 3%, questionários e entrevistas 41%</p> <p>Justificativas para coleta automática: evidenciar funcionalidade (37%), determinar domínios de usabilidade (8%), comparação entre RV e não-RV (9%), comparação de tecnologias (32%), desenvolvimento das funcionalidades de registro e automação (8%)</p> <p>O uso de registro e relatório automatizados exige desenvolvimento adicional da solução técnica</p> <p>Orientação, posição e tempo da postura de cabeça são frequentemente registrados</p> <p>Arquiteturas de registro e relatório são normalmente locais e não distribuídas</p> <p>Benefícios eventuais do registro automático advém da análise de registros</p>
	(LORENZO et al., 2019)	RV Imersiva para estudantes com TEA	12	<p>educação primária</p> <p>educação secundária</p> <p>educação especial</p> <p>habilidades sociais</p> <p>habilidades emocionais</p> <p>comunicação não-verbal</p>	<p>Evolução nas questões entre 1996 e 2017, iniciando com tolerância e aceitação de aparato RV pelos estudantes, até o foco em aprendizagem, treinamento e transferência de conhecimento</p> <p>Em geral se buscou verificar a viabilidade de um instrumento RVI na aprendizagem de habilidades sociais, analisando impactos obtidos e transferência de conhecimento</p> <p>Todos os estudos foram capazes de verificar algum grau de resultados de aprendizagem positivos</p> <p>A maior parte dos estudos foi conduzida com um grupo de controle típico e um grupo experimental com TEA</p> <p>amostras variam de 3-7 estudantes até 10-33 estudantes, de idades entre 6 e 18 anos</p> <p>O acesso a populações amostrais maiores é um obstáculo no trabalho com estudantes do EA</p> <p>Não foram encontrados estudos avaliando aprendizado em adultos do EA</p> <p>muitos participantes já eram capazes de habilidades sociais básicas, aumentando a probabilidade de obter melhorias nestas áreas</p> <p>Alguns estudos utilizaram instrumentos baseados em HMD, entretanto há uma prevalência de instrumentos CAVE-Like na pesquisa analisada</p>

					<p>Crianças não exibiram dificuldades específicas ao interagir com o HMD, entretanto exibiram problemas de generalização. Algumas dificuldades em perceber as imagens renderizadas como ferramentas interativas foi observada</p> <p>algumas limitações relacionadas ao stress sofrido pelos usuários ao observar certas situações simuladas</p> <p>impactos: conduta emocional melhor adaptada, aprendizagem de habilidades sociais por repetição, comunicação não-verbal, habilidades de conversação</p> <p>generalização de resultados ainda difícil pois requer avaliação de transferência para o mundo real, o que implica em uma outra fase experimental que em muitos casos pode exigir o acompanhamento de um adulto de confiança do participante por questões éticas e de segurança.</p> <p>melhorias na aprendizagem surgem potencialmente em função do realismo, estrutura e repetitividade da simulação em RVI</p> <p>limitações de tamanho de amostra, generalização de resultados e demonstração de transferência de conhecimento</p> <p>Sugestão de um protocolo de pesquisa para trabalhar com estudantes do EA</p>
	(FEALY et al., 2019)	Educação de enfermagem	2		<p>RVI considerada uma progressão natural da imersão por desktop rumo ao treinamento baseado em simulação</p> <p>O preparo de estudantes para situações de emergência de baixa frequência é um nicho particularmente promissor para a aplicação de RVI</p> <p>O desenvolvimento de programas de treinamento RVI exige recursos extensivos de tempo e esforço</p> <p>adoção para esta aplicação específica está em sua infância, com aplicações potenciais consideráveis</p> <p>capacidade de imergir estudantes de forma segura em ambientes de alto-risco, situações caóticas ou infrequentes; o desenvolvimento de habilidades pessoais e de equipe nestas condições é um ponto forte da RVI para esta aplicação específica</p>
	(QUEIROZ et al., 2018)	HMDs na educação primária e secundária	24	<p>Tópicos em ordem de frequência:</p> <p>STEM</p> <p>habilidades cognitivas</p> <p>ciências sociais</p> <p>esportes</p> <p>habilidades sociais e emocionais</p> <p>conhecimento</p> <p>habilidade</p> <p>perícia</p>	<p>Diversas contribuições importantes de AVIs baseados em HMD para educação primária, secundária e especial identificadas</p> <p>Resultados baseados em perícia foram os mais frequentemente positivos, seguidos por estudos baseados em habilidades.</p> <p>Maioria dos relatos em estudos conceituais (conhecimento) são de melhorias significativas, porém alguns não apresentaram tais resultados</p> <p>a efetividade de um AVI na aprendizagem depende muito da natureza da tarefa.</p> <p>processos de aprendizagem são diferentes para tipos distintos de conhecimento: o conhecimento conceitual em geral exige a apreensão de relações mais explícitas do que perícias e habilidades</p>

					<p>Todos estudos focados em aquisição de conhecimento apresentaram alguma melhoria de aprendizagem</p> <p>Estudos focados em habilidades relataram melhorias na percepção de relevância, confiança no aprendizado, satisfação, motivação e engajamento</p> <p>Todos estudos focados em perícia relataram alguma melhoria de performance</p> <p>resultados de aprendizagem entre grupos de estudantes típicos e com necessidades especiais obtiveram ganhos significativos nos grupos com NE ao aplicar RVI por HMD, a ponto de superar diferenças originais entre os grupos</p> <p>Parâmetros investigados: Percepção espacial, atenção e foco, habilidades sociais, maleabilidade cognitiva, conectivos temporais, percepção sequencial de tempo, analogias conceituais e perceptivas, raciocínio indutivo, flexibilidade de pensamento, perícias motoras e em esportes</p> <p>Necessidades futuras de pesquisa: Maior número de participantes e sessões em estudos (estudos longitudinais), grupos mais equilibrados, grupos de controle</p> <p>Necessário comparações objetivas entre RVI e formatos mais convencionais (livretos, vídeos 2D, aulas)</p> <p>permitir certas customizações pelo participante para melhorar a imersão pode ter grande impacto na usabilidade e flexibilidade de um sistema RVI</p> <p>instrumentos de autoavaliação como questionários podem ser integrados à experiência no AVI, mas para tal é necessário executar experimentos e avaliar a acurácia dos resultados coletados dentro do próprio AVI</p> <p>AVIs multiusuário compartilhados ainda são uma forma de aplicação pouco explorada</p> <p>Avaliação de melhorias de aprendizagem requer uma medida do conhecimento prévio dos estudantes</p> <p>Resultados conceituais (conhecimento) indicam que AVIs baseados em HMD parecem melhorar a recordação e compreensão de informações em comparação a plataformas convencionais ou em desktop</p> <p>combinação entre técnicas convencionais e de AVIs parecem surtir os melhores efeitos no ensino.</p> <p>Resultados em habilidades estiveram em linha com os relatados em estudos voltados a adultos e ao ensino superior</p> <p>Engajamento, motivação, e percepção de auto-eficácia tem papel importante na performance acadêmica de estudantes</p> <p>Prevalência de tópicos STEM é parcialmente explicada pelo apelo de se criar aulas e simulações sem os riscos e custos de experimentos reais</p> <p>a imersão em cenários sintéticos confere aplicabilidade direta da RVI para tópicos como história e geografia, entre outros</p>
--	--	--	--	--	---

	(BERTR AND et al., 2018)	RVI no estudo e treinamento da empatia	N/I	<p>habilidades emocionais em adultos</p> <p>representação e incorporação de papéis</p> <p>treinamento de mindfulness</p> <p>implementação de metas de autorregulação comportamental</p>	<p>Descrição e definições de empatia</p> <p>Moderadores de resposta empática</p> <p>Estratégias de aprendizado para habilidades de empatia</p> <p>RVI como espaço seguro para trabalho com interações sociais inter-grupo</p> <p>Efeitos potenciais da RVI com impacto no treinamento de empatia: ilusões perceptuais de localidade e de plausibilidade, ilusão de incorporação total (full-body ownership), ilusões de agência</p> <p>Impactos destes efeitos: tomadas de perspectiva multisensoriais, manipulação de sinais interoceptivos, influência da auto-representação no comportamento (efeito Proteus)</p> <p>O uso de RVI, efeito Proteus, e exposição a situações reais podem ser combinados ao promover intervenções para o aprimoramento empático</p> <p>A manipulação da personalidade e comportamentos do avatar tem relevância notável na indução de empatia</p> <p>A manipulação de informações fisiológicas como batimentos cardíacos, respiração - ou manipulação interoceptiva - pode ser incorporada em experiências em RVI para ajudar a modular e controlar as respostas emocionais dos usuários</p>
--	-----------------------------------	---	-----	---	--

Tabela A1 síntese dos estudos de revisão incluídos

ANEXO 2 - PROTOCOLO DE ÉTICA EM PESQUISA

Título

Impacto das mídias imersivas nos processos de ensino-aprendizagem

Título público

Novas tecnologias na educação

Protocolo de Experimento - Aula Imersiva 2016

Pesquisadores responsáveis: Romero Tori e Ricardo Nakamura.

Alunos de pós-graduação: Elen Collaço e Paulo Muggler.

Alunos de graduação: Henrique Susumo, Felipe Biondi, Lucas Salaberry e Bruno Saito.

Resumo

O presente trabalho tem como objetivo identificar eventuais diferenças na aquisição de conhecimento, por parte de alunos do ensino superior, de conteúdos didáticos relacionados a iluminação em computação gráfica apresentados de forma imersiva e não imersiva durante uma aula expositiva. Além disso, pretende-se avaliar os fatores de percepção de presença (o quanto os participantes se sentiram imersos no ambiente virtual) e *embodiment* (o quanto os participantes se perceberam incorporados no papel de outro). Para tanto, foi desenvolvido um ambiente virtual imersivo de realidade virtual que utiliza um dispositivo móvel adaptado.

1. Introdução

Este protocolo descreve os procedimentos que serão executados para a realização de um experimento com voluntários que participarão da avaliação de um ambiente virtual para dispositivos móveis de realidade virtual de uma aula de Computação Gráfica. O experimento será desenvolvido pela equipe do Laboratório de Tecnologias Interativas (INTERLAB) da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (POLI USP).

O presente trabalho tem como objetivo desenvolver um ambiente de aula virtual para dispositivos móveis de realidade virtual. Esse ambiente deve oferecer treinamento imersivo em tópicos específicos de computação gráfica a estudantes do nível de graduação. Em lugar de aula expositiva será utilizado um ambiente virtual tridimensional, baseado no conceito de BYOD (*Bring Your Own Device*), no qual os estudantes podem usar seus próprios *smartphones* em sala de aula e laboratórios para fins educacionais.

Para este fim, a equipe do INTERLAB desenvolveu uma ferramenta de treinamento imersivo para tópicos de Computação Gráfica, baseada em Realidade Virtual (RV) que utiliza o próprio *smartphone* do aluno como HMD (*Head Mounted Display*) de realidade virtual, por meio de adaptadores de baixo custo (conhecidos como *cardboards*). Essa ferramenta será aplicada em condições controladas durante uma aula, para extrair dados que permitirão elucidar as perguntas de pesquisa definidas a seguir.

Por fim, observa-se que a validação experimental do uso de qualquer mídia no ensino em sala de aula está sujeita a uma série de fatores de interferência de difícil controle, como:

- Divergências na exposição conceitual, isto é, a mesma aula apresentada em momentos diferentes, dificilmente terá exatamente a mesma linguagem, método, gestos, etc., por parte do instrutor;
- Interferências cruzadas na atenção dos participantes, por estarem todos acompanhando a aula no mesmo ambiente;
- Curiosidade ou entusiasmo dos participantes em relação à nova tecnologia/mídia;

Na criação deste protocolo houve esforços no sentido de fixar esses fatores e isolar o fator imersão, de tal forma que eventuais interferências possam ser atribuídas ao único elemento que se altera, no caso a imersão no conteúdo.

2. Perguntas de Pesquisa

P1. Há diferenças no aprendizado de conceitos básicos de iluminação em computação gráfica, quando trocamos mídias não-imersivas por imersivas, sem alteração nas demais estratégias pedagógicas e condições ambientais ?

P2. Há alguma correlação entre percepção de presença e uso de mídia imersiva / não imersiva numa aula expositiva sobre conceitos básicos de iluminação em computação gráfica?

3. Hipóteses

H1. Existem diferenças no aprendizado de conceitos básicos de iluminação em computação gráfica, quanto trocamos mídias não-imersivas por imersivas sem alteração nas demais estratégias pedagógicas.

H2. Existe correlação entre percepção de presença e uso de mídia imersiva ou não imersiva numa aula expositiva sobre conceitos básicos de iluminação em computação gráfica.

H3. O treinamento imersivo sobre conceitos básicos de iluminação em computação gráfica produz alta percepção de *embodiment* nos participantes comparado ao ambiente imersivo sem imersão no conteúdo.

3. Objetivos

Gerais

OG1. Identificar eventuais diferenças na aquisição de conhecimento, por parte de alunos do ensino superior, de conteúdos didáticos relacionados a iluminação em computação gráfica apresentados de forma imersiva e não imersiva.

OG2. Identificar eventuais diferenças na percepção de presença e *embodiment*, por parte de alunos de ensino superior;

Específico

OE1. Criar uma prova de conceito de uma nova ferramenta, baseada em realidade virtual de baixo-custo, dispositivos móveis e o conceito de BYOD, para ensino de computação gráfica

OE2. Avaliar a prova de conceito criada, por meio de medidas objetivas de desempenho dos dispositivos e software utilizados.

OE3. Avaliar a prova de conceito criada, por meio de medidas subjetivas da experiência do aluno

4. Metodologia

Para identificar a interferência da imersão, tanto na aquisição de conhecimento quanto na percepção de presença e *embodiment*, faz-se necessário fixar todas as demais variáveis envolvidas nas aulas experimentais, exceto a imersão. Para tanto foi planejada, para cada sessão experimental, uma aula ministrada por um único professor simultaneamente para três grupos de alunos. Cada grupo ouvirá exatamente as mesmas orientações e explicações, porém, visualizará o conteúdo de formas distinta dos outros dois. O primeiro grupo visualizará normalmente as imagens projetadas em um *datashow*, conforme a explanação do professor evolui. Os dois outros grupos estarão imersos em um ambiente de realidade virtual, usando (esses dois grupos) o mesmo equipamento e a mesma interface de interação. Entre esses grupos, haverá uma pequena, porém relevante, diferença. Ambos estarão em um ambiente imersivo tridimensional e ambos visualizarão aquele mesmo conteúdo que será projetado para o primeiro grupo (dos os alunos não imersos), mas um deles assistirá numa televisão virtual colocada no ambiente tridimensional (portanto, o conteúdo em si, da mesma forma que o primeiro grupo, será bidimensional e não imersivo, ainda que inserido em um ambiente tridimensional e imersivo). Já o segundo grupo imersivo totalmente envolto pelo conteúdo, como se estivessem dentro das imagens que os demais verão apenas projetadas (num telão real e numa TV virtual, respectivamente). Dessa forma, poderão ser realizadas comparações entre o uso de mídia não imersiva e imersiva, bem como isolar o fator curiosidade ou novidade, ao se comparar o segundo grupo com o primeiro e com o terceiro.

Espera-se realizar o experimento com 30 voluntários. Antes do início serão avaliados seus conhecimentos prévios, para posterior comparação com seus desempenhos após realização da aula. Para os dois grupos que participarão do ambiente imersivo será também realizado um treinamento para familiarização com o ambiente e com a interface, de modo a se evitar que dificuldades causadas por falta de familiaridade interfiram nos resultados.

4.1 Primeira etapa: **Pré-experimento**

Para a etapa de pré-experimento, as seguintes atividades devem ser realizadas:

- Preenchimento de um questionário inicial contendo as informações básicas dos alunos;
- Sessão prévia com todos os participantes em um ambiente virtual específico, com a mesma interface do ambiente experimental, mas conteúdos diferentes, para que todos os participantes possam começar o experimento propriamente familiarizados com as interfaces e metáforas de interação utilizadas no ambiente virtual;
- Avaliação de conhecimento prévio: uma avaliação básica de conhecimentos prévios pelos participantes dos tópicos abordados na aula experimental.

- Sorteio dos participantes para divisão em dois grupos: grupo A (sem o uso dos dispositivos móveis, composto por um terço da turma); grupo B (com uso dos dispositivos móveis, composto por dois terços da turma).

4.2 Segunda etapa: **Experimento**

A mesma aula será ministrada simultaneamente para os participantes dos dois grupos (A e B), eliminando assim possíveis divergências originárias da variação no instrutor e/ou metodologia de aula. Os participantes serão instruídos a manter o silêncio e falar apenas diretamente com um dos monitores, em caso de problemas ou dúvidas em relação ao uso da ferramenta.

De forma a organizar os grupos e evitar possíveis interferências entre os mesmos, pretende-se utilizar a seguinte configuração:

- Participantes do grupo A (sem uso de dispositivos): concentrados nas fileiras dianteiras da sala, próximos ao professor e à lousa/*datashow*, de forma a evitar que a atenção dos mesmos se disperse observando os colegas que estarão explorando o conteúdo através do dispositivo móvel de realidade virtual.
- Participantes do grupo B (com uso de mídia imersiva): ocuparão as fileiras posteriores da sala. Sem que saibam serão divididos, aleatoriamente, em dois subgrupos de mesmo tamanho, B1 (conteúdo não imersivo) e B2 (conteúdo imersivo), de acordo com o dispositivo que receberem, uma vez que metade desses equipamentos estará configurada para executar o ambiente em que o conteúdo será exibido na TV virtual e a outra metade em que o conteúdo será o próprio ambiente no qual o aluno ficará imerso.

Em seguida será ministrada a aula, por um professor ao vivo, que conduzirá uma aula expositiva abordando os seguintes conteúdos:

- Modelo de Iluminação: luzes pontual, spot, direcional, e ambiente;
- Modelo de Reflexão: reflexão especular, interpolação de normais.

À medida em que o professor explana determinadas técnicas, imagens correspondentes ilustrativas dos ambientes iluminados e renderizados com as referidas técnicas serão exibidas no telão, para o grupo A, e acessadas interativamente na mídia imersiva, sob comandos do professor, pelos participantes do grupo B.

4.3 Terceira etapa: **Avaliação da aprendizagem**

A avaliação do conteúdo assimilado será realizada utilizando um formulário *online*.

4.4 Quarta etapa: **Questionário de Presença e *Embodiment***

Serão aplicados questionários validados na comunidade científica sobre presença e *embodiment*. Além disso, serão aplicados perguntas dissertativas de forma a coletar as impressões e experiências do usuário com a ferramenta e possíveis sugestões, críticas e melhorias da ferramenta imersiva (no caso dos alunos não imersivos com relação à aula com *datashow*).

4.4 Metodologia de análise

Serão avaliadas três condições distintas:

- Grupo A (controle 1): Sem uso de mídia imersiva;
- Grupo B1 (controle 2): Treinamento imersivo sem imersão no conteúdo, mas com imersão em outro ambiente, sem relação com o conteúdo;
- Grupo B2 (experimental): Treinamento imersivo com imersão no conteúdo.

Serão realizadas comparações entre grupo A e grupo B para verificação do impacto da curiosidade e novidade e entre subgrupos B1 e B2 para isolar a componente da efetiva imersão no conteúdo.

Os dados serão coletados por meio de uma plataforma online e serão analisados por métodos estatísticos (ANOVA).

5. Roteiro

Nesta seção será apresentado o roteiro detalhado para a realização do experimento. Vale ressaltar que este roteiro é uma referência e pode sofrer alguns ajustes operacionais, sem impacto nas experiências dos alunos. Ao longo do período previsto para a realização de testes e desenvolvimento das pesquisas poderão surgir necessidades de mudanças nas funcionalidades do sistema ou nas perguntas realizadas aos participantes. Contudo serão mantidos objetivos, características e dificuldades previstos neste roteiro. Não serão utilizados conteúdos ou tarefas que possam suscitar constrangimentos ou que sejam de cunho pessoal, étnico, religioso ou político.

5.1 Participantes

Os participantes do experimento serão voluntários maiores de idade e sejam alunos de curso superior. Todos os participantes serão orientados a ler e, se aceitarem prosseguir na participação, a preencher um termo de consentimento livre e esclarecido. Serão considerados os seguintes critérios de exclusão: gravidez, problemas cardíacos prévios, labirintite e enjoo à imersão da realidade virtual.

5.2 Local

Os experimentos serão realizados em sala de aula e/ou laboratório da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (Poli USP) e/ou em espaço oferecido por outra instituição de ensino superior com a qual venhamos a colaborar.

5.3 Apresentação do Experimento

Inicialmente será apresentada uma breve explicação sobre o experimento e das regras básicas dos testes. Além disso, o experimento contará com o auxílio de alunos de iniciação científica, mestrandos e doutorandos envolvidos no desenvolvimento do projeto que irão dar o suporte necessário se caso haja alguma dúvida ou problemas de uso do sistema por parte dos participantes. Em seguida, o professor orientará os participantes a preencher o Termo de Consentimento Livre e Esclarecido de acordo com a regra de exclusão prevista na Seção 4.1.

Após todas as explicações, incluindo o tempo previsto para realização dos testes, será dada oportunidade para que o candidato decline o convite. Na hipótese de se constatar que determinado voluntário venha apresentar algum desconforto durante a execução do experimento esse será dispensado e não será contabilizado como participante.

Será ainda solicitada ao participante autorização para filmagem do procedimento e para divulgação dessas imagens. Se a pessoa não autorizar a divulgação de sua imagem, ainda assim o experimento poderá ser realizado. Nesse caso as imagens e vídeos serão armazenados apenas para registro e consulta restrita aos pesquisadores, sem utilização em publicações. Será realizada uma avaliação inicial sobre os tópicos de iluminação do curso de forma a verificar se a pessoa possui algum conhecimento prévio sobre o tópico de Iluminação do curso de Computação Gráfica.

5.4 Questionário Pré-experimento

Após o preenchimento do termo de consentimento de participação no experimento, os estudantes voluntários serão orientados a preencher um questionário *online* pré-teste contendo dados pessoais, bem como idade, sexo e curso de graduação, que terá como objetivo traçarmos o perfil do estudante. O ANEXO 1 apresenta as perguntas deste formulário.

5.5 Experimento Aula imersiva

O sistema de RV permite ao participante interagir no ambiente imersivo por meio de um *tablet* virtual que permite controlar o sistema de iluminação da sala virtual com o objetivo de analisar tópicos de iluminação e de reflexão de Computação Gráfica. A figura abaixo apresenta o ambiente imersivo desenvolvido.

Figura 01 - Ambiente Imersivo

Durante a aula imersiva o participante precisará utilizar um dispositivo móvel de realidade virtual e irá realizar o experimento sentado em uma carteira de sala de aula ou de uma mesa de laboratório de informática. Alguns exemplos desses dispositivos estão ilustrados na Figura 01.

Para evitar qualquer interferência no experimento serão utilizados dispositivos móveis e adaptadores de realidade virtual de características equivalentes, fornecidos pelos realizadores do experimento.

Todos os adaptadores serão previamente desinfetados com álcool gel (e sempre que o equipamento for passado de um aluno a outro).

Figura 02 - Dispositivo móvel para RV Gear VR (esquerda) e Google Cardboard (direita).

Em seguida será realizada a preparação prévia para o grupo B. Os alunos desse grupo utilizarão um aplicativo com interface similar ao da ferramenta imersiva do experimento, para se familiarizarem com a interface e os dispositivos. Nessa fase preparatória também serão avaliados quanto à capacidade de percepção do efeito estereoscópico (essencial para a completa imersão tridimensional e diferenciação entre conteúdo 2D na tela de TV virtual e conteúdo 3D). Havendo alunos que por características específicas de seu sistema visual não consigam enxergar as imagens com nitidez ou não consigam visualizar o efeito estereoscópico, serão trocados com outros alunos do grupo A (sorteados).

5.6 Avaliação de Aprendizado

Após a execução da aula, o professor responsável irá orientar os alunos a acessar uma plataforma *online* e responder perguntas referentes ao conteúdo dado, de forma a avaliar o aprendizado do aluno. As perguntas serão elaboradas de acordo com os seguintes tópicos:

- Modelo de Iluminação: luzes pontual, spot, direcional, e ambiente;
- Modelo de Reflexão: reflexão especular, interpolação de normais.

5.7 Questionário Pós-experimento

Finalmente, os estudantes serão orientados a preencher um formulário *online* contendo perguntas dissertativas sobre a experiência de interação do aprendiz com o ambiente virtual, e um questionário de percepção de presença e outro de *embodiment*, que utilizem a escala Likert. Para tanto, serão utilizados questionários validados pela comunidade científica da área, traduzido e adaptado para o nosso contexto. Dessa forma, poderá haver pequenos ajustes sem alterar o teor dos mesmos.

O objetivo do questionário de presença é coletar informações sobre a qualidade de imersão e envolvimento oferecida pelo ambiente desenvolvido. Por outro lado, o questionário de *embodiment* terá como objetivo coletar informações sobre o quanto os participantes se percebem incorporados no papel do aluno virtual segurando o tablet e controlando o sistema de iluminação da sala virtual.

Ao final do experimento e dos preenchimento dos questionários, os alunos do grupo A serão convidados a também experimentar a ferramenta imersiva, a fim de não se sentirem excluídos. Obviamente mais nenhum dado será coletado a partir desse ponto.

6. Riscos

O possível risco que o experimento pode proporcionar seriam eventuais desconfortos ou mesmo possíveis sensações de náusea ao usar o dispositivo móvel de realidade virtual. Nesse caso os alunos serão orientados a interromper imediatamente o experimento.

7. Benefícios

- Contato e familiarização com uma nova tecnologia de ponta, que vem ganhando relevância industrial, comercial e social nos últimos anos;
- Melhor entendimento por parte do aluno em contato com algoritmos de difícil compreensão em tópicos específicos de Computação Gráfica;
- Proporcionar ao aluno a sensação de estar dentro do conteúdo aprendido por meio de tecnologias de realidade virtual.

ANEXO 1 (do protocolo experimental Aula Imersiva)**Questionário Pré-experimento**

Nome:

Idade:

Sexo:

Curso de graduação:

Por favor, responda as seguintes questões com Discordo Totalmente, Discordo, Neutro, Concordo, Concordo Totalmente:

- Tenho dificuldade em visualizar tecnologias 3D;
- Tenho desconforto/náusea ao utilizar tecnologias de visualização 3D
- Já tenho experiência com tecnologias de Realidade Virtual.
- Já tenho experiência com o Google Cardboard, Gear Vr ou outro dispositivo móvel de RV.
- Já tenho experiência com Jogos 3D.

ANEXO 3 - TERMO DE CONSENTIMENTO DO PARTICIPANTE

TERMO DE CONSENTIMENTO LIVRE E ESCLARECIDO

Prezado(a) Participante,

Você está sendo convidado(a) para participar voluntariamente de um projeto de pesquisa intitulado Novas Tecnologias na Educação. A pesquisa é realizada pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP) e é orientada pelo Prof. Dr Romero Tori. O projeto foi aprovado pelo Comitê de Ética em Pesquisa em Seres Humanos da CEPH-IPUSP (CAAE -XXX).

O objetivo dessa pesquisa é analisar o uso da realidade virtual no ensino e aprendizagem do curso de Computação Gráfica. Para isso a sua participação é muito importante, e ela se daria da seguinte forma, durante a aula do Prof. Dr Romero Tori de Computação Gráfica, você irá usar um dispositivo móvel de realidade virtual no qual você estará imerso em um ambiente de aprendizado relativo ao tópico de Iluminação. Informamos ainda que há a possibilidade de inclusão em grupo de controle ou experimental.

Informamos que poderão ocorrer algum tipo de desconforto, náusea ou tontura pelo uso das tecnologias de realidade virtual. Você deve informar imediatamente a equipe de pesquisa caso algum desses sintomas sejam notados e o experimento será interrompido imediatamente.

Gostaríamos de esclarecer que sua participação é totalmente voluntária, podendo você: recusar-se a participar, ou mesmo desistir a qualquer momento sem que isto acarrete qualquer ônus ou prejuízo à sua pessoa.

Informamos ainda que as informações serão utilizadas somente para os fins desta pesquisa, e serão tratadas com o mais absoluto sigilo e confidencialidade, de modo a preservar a sua identidade

Caso você tenha mais dúvidas ou necessite maiores esclarecimentos, pode nos contatar nos endereços abaixo ou procurar o Comitê de Ética em Pesquisa da CEPH-IPUSP, cujo endereço consta neste documento. Este termo deverá ser preenchido em duas vias de igual teor, sendo uma delas, devidamente preenchida e assinada entregue a você.

Além da assinatura nos campos específicos pelo pesquisador e por você, solicitamos que sejam rubricadas todas as folhas deste documento. Isto deve ser feito por ambos (pelo

pesquisador e por você, como sujeito ou responsável pelo sujeito de pesquisa) de tal forma a garantir o acesso ao documento completo.

Agradecemos, desde já a sua valiosa colaboração.

À disposição,

Prof. Romero Tori.

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP).

Eu,..... declaro que fui devidamente esclarecido e concordo em participar VOLUNTARIAMENTE da pesquisa coordenada pelo Prof. Dr Romero Tori.

_____ Data:.....

Assinatura do participante

Eu Romero Tori declaro que forneci todas as informações referentes ao projeto de pesquisa supra-nominado.

_____ Data:.....

Assinatura do pesquisador

Qualquer dúvida com relação à pesquisa poderá ser esclarecida com o pesquisador, conforme o endereço abaixo:

Prof. Dr. Romero Tori

Av.Prof. Luciano Gualberto travessa 3, no. 158

Prédio da Engenharia Elétrica - sala C2-45

Cidade Universitária

CEP 05508-010

São Paulo – SP

TEL (11) 3091-5282

E-mail: tori@usp.br

Qualquer dúvida com relação aos aspectos éticos da pesquisa poderá ser esclarecida com o Comitê de Ética em Pesquisa com Seres Humanos do CEPH-IPUSP, no endereço abaixo:

CEPH-IPUSP

Instituto de Psicologia da USP

Av. Prof. Mello Moraes 1721 - Bloco G, 2º andar, sala 27

CEP 05508-030. Cidade Universitária - São Paulo – SP

Tel: (11) (11) 3091-4182

E-mail: ceph.ip@usp.br

ANEXO 4 - ARTIGO PUBLICADO EM SIMPÓSIO NACIONAL

Impact of Immersive Technology Applied in Computer Graphics Learning

Paulo Muggler Moreira¹, Elen Collaço de Oliveira¹, Romero Tori¹

¹Departamento de Engenharia de Computação e Sistemas Digitais
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP)

Caixa Postal 61548 – 05508-010 – São Paulo – SP – Brazil

{paulomuggler,elencollaco}@gmail.com, tori@acm.org

Abstract. *In this paper we describe an application of immersive technology to a specific learning context. In this case, a Virtual Reality environment was created for the purpose of delivering lesson content in a Computer Graphics module for students of engineering and architecture courses. The virtual environment was designed to demonstrate lighting model algorithms and aspects of 3D rendering techniques. An experiment was carried out in which students were divided into two groups that viewed the same lesson content: experimental and control group. In this pilot study we describe the application in detail and discuss preliminary results based on analysis of the participants' perceptions collected through a presence questionnaire. Our results revealed that the experimental group showed higher levels of presence and involvement compared with the control group.*

DOI: <http://dx.doi.org/10.5753/cbie.sbie.2016.410>

Disponível em <https://www.br-ie.org/pub/index.php/sbie/article/view/6722>