

Guilherme Mariano Silva Francisco

**Aprimoramento das técnicas de medição por
meio de uma aplicação de realidade virtual para
tratamento cardíaco complexo**

São Paulo, SP

2024

Guilherme Mariano Silva Francisco

**Aprimoramento das técnicas de medição por meio de uma
aplicação de realidade virtual para tratamento cardíaco
complexo**

Trabalho de conclusão de curso apresentado
ao Departamento de Engenharia de Computação e Sistemas Digitais da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do Título de Engenheiro.

Universidade de São Paulo – USP

Escola Politécnica

Departamento de Engenharia de Computação e Sistemas Digitais (PCS)

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Nakamura

São Paulo, SP

2024

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.

Catálogo-na-publicação

Francisco, Guilherme

Aprimoramento das técnicas de medição por meio de uma aplicação de realidade virtual para tratamento cardíaco complexo / G. Francisco, R. Nakamura -- São Paulo, 2024.

87 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Computação e Sistemas Digitais.

1.Realidade virtual 2.ferramentas de medição 3.doença cardíaca congênita 4.planejamento pré-operatório 5.código aberto I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Computação e Sistemas Digitais II.t. III.Nakamura, Ricardo

*Este trabalho é dedicado à todas as pessoas,
que sonham e lutam por um mundo melhor.*

Agradecimentos

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer à minha família por todo o apoio e amor que recebi incondicionalmente; dedico esta tese a eles.

Em segundo lugar, gostaria de agradecer ao professor Ricardo Nakamura por ter aceitado fazer este trabalho e pelo apoio durante o desenvolvimento da tese, especialmente as reuniões semanais e o acesso ao Interlab, que me permitiu avançar ainda mais no trabalho.

Em terceiro lugar, gostaria de agradecer às minhas faculdades Escola Politécnica da USP e Instituto Superior Técnico (IST), que me deram o conhecimento necessário para realizar este projeto. Especificamente, gostaria de agradecer aos programas de bolsas desses institutos, como PAPFE, PUB e bolsas de pesquisa, que possibilitaram o aprimoramento de meus conhecimentos, permitindo que eu me concentrasse em meus estudos.

Por fim, gostaria de agradecer aos professores e amigos que acreditaram em mim e me apoiaram ao longo dos anos. Especificamente, gostaria de agradecer aos professores Roberto V. Brito, Adriana Hitomi Deguchi e também aos meus amigos Letícia Maia e Paulo Henrique Diniz Fernandes por terem visto em mim algo que eu mesmo não era capaz de ver. Gostaria de estender meus agradecimentos a todos os meus colegas que tornaram a faculdade um pouco mais agradável, em particular, gostaria de agradecer aos meus amigos da Pola Skolitecnica, super agregadores e da comp 2019 de forma geral.

Resumo

Doenças cardíacas complexas, como a cardiopatia congênita, exigem uma compreensão profunda da intrincada anatomia envolvida para que os cirurgiões possam realizar procedimentos que preservem as estruturas saudáveis adjacentes aos defeitos do tecido. Atualmente, isso é obtido por meio de medições físicas usando equipamentos especializados, como o método baseado em Hegar, ou pela interpretação de imagens 2D, o que pode ser um desafio devido à natureza inerentemente tridimensional do problema.

Neste TCC, apresentamos e descrevemos um aplicativo de realidade virtual (RV) de código aberto, desenvolvido e validado inicialmente no Instituto Superior Técnico (IST), que permite aos médicos realizar medições de várias maneiras, recortar o conteúdo do modelo, explorar o interior do coração, visualizar imagens DICOM e manipular o modelo (girar, dimensionar e mover) usando controladores. Além disso, o trabalho foi estendido em São Paulo, na Universidade de São Paulo (USP), onde implementamos técnicas avançadas de visualização, incluindo uma abordagem de realidade virtual totalmente imersiva e realidade mista (MR), com objetos embebidos no ambiente físico por meio da funcionalidade de *passthrough* do Meta Quest 3.

Também realizamos um estudo para avaliar a eficácia do aplicativo com médicos. Acreditamos que este protótipo pode reduzir o tempo necessário para entender doenças cardíacas complexas e aumentar a precisão das medições realizadas. Por fim, a demonstração completa do protótipo pode ser encontrada no YouTube no seguinte link: <https://youtu.be/U2nSuAB95VU>.

Palavras-chave: Realidade virtual, ferramentas de medição, doença cardíaca congênita, planejamento pré-operatório, código aberto.

Abstract

Complex heart diseases, such as congenital heart disease, require a thorough understanding of the intricate anatomy involved so that surgeons can perform procedures that preserve the healthy structures adjacent to the tissue defects. Currently, this is achieved through physical measurements using specialized equipment, such as the Hegar-based method, or by interpreting 2D images, which can be challenging due to the inherently three-dimensional nature of the problem.

In this undergraduate thesis, we present and describe an open-source virtual reality (VR) application, developed and validated initially at the Instituto Superior Técnico (IST), which allows doctors to take measurements in various ways, crop the contents of the model, explore the inside of the heart, view DICOM images and manipulate the model (rotate, scale and move) using controllers. In addition, the work was extended in São Paulo, at the University of São Paulo (USP), where we implemented advanced visualization techniques, including a fully immersive virtual reality and mixed reality (MR) approach, with objects embedded in the physical environment through the passthrough functionality of Meta Quest 3.

We also conducted a study to evaluate the application's effectiveness with doctors. We believe that this prototype can reduce the time needed to understand complex heart diseases and increase the accuracy of the measurements taken. Finally, the full demonstration of the prototype can be found on YouTube at the following link: <<https://youtu.be/U2nSuAB95VU>>.

Keywords: Virtual Reality, Measurement Tools, Congenital Heart Disease, Preoperative Planning, Open Source.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Visualização compartilhada do holograma cardíaco. Fonte: (BRUN et al., 2019).	32
Figura 2 – Holograma em realidade mista. Parte do menu de ferramentas exibido com gesto de clique. Fonte: (BRUN et al., 2019).	33
Figura 3 – Combinação de impressão 3D e aplicação de MR. Fonte: (JEISING et al., 2024).	33
Figura 4 – Participantes explorando propriedades do modelo 3D virtual e informações complementares. Fonte: (JEISING et al., 2024).	34
Figura 5 – Minimapa do cólon. Fonte: (LOPES et al., 2018).	35
Figura 6 – Medição linear usando esferas como representação do local que está sendo medido. Fonte: (LOPES et al., 2018).	36
Figura 7 – Imagem do dicom dentro do modelo. Fonte: (LOPES et al., 2018).	37
Figura 8 – Isolinhas para a medição de distância. Fonte: (HOMBECK et al., 2022).	38
Figura 9 – Medição feita em CT, MRI (esquerda) e fantoma 3DE (direita). Fonte: (STEPHENSON et al., 2022).	40
Figura 10 – Echocardiografia. Fonte: (ONG et al., 2018).	41
Figura 11 – Vários participantes. Fonte: (PARK et al., 2023).	41
Figura 12 – Imagem 4D. Fonte (MENA et al., 2018)	42
Figura 13 – RA móvel. Fonte (YANG et al., 2022).	42
Figura 14 – Representação do <i>moodboard</i>	47
Figura 15 – Softwares usados no Hospital Santa Marta.	48
Figura 16 – Esboços à mão.	51
Figura 17 – Esboços com o Figma.	52
Figura 18 – Esboços de botões para o menu com o qual o usuário interage.	52
Figura 19 – (a) Menu principal fora do modelo. (b) Menu secundário dentro do modelo.	55
Figura 20 – Corte do coração com um plano.	56
Figura 21 – Exibição da medida.	57
Figura 22 – Medição linear.	58
Figura 23 – Medição de raio.	61
Figura 24 – Medição de volume.	62
Figura 25 – Medição salva.	62
Figura 26 – Tela do minimapa.	63
Figura 27 – Imagens Dicom em geral.	64
Figura 28 – (a) Usuário totalmente imerso. (b) Usuário sob realidade mista.	65

Lista de tabelas

Tabela 1 – Estado da arte a partir dos trabalhos relacionados.	40
Tabela 2 – Funcionalidades mínimas exigidas.	50
Tabela 3 – Artigos revisados.	85

Lista de abreviaturas e siglas

RV	Realidade Virtual
DCC	Doença Cardíaca Congênita
RX	Realidade Estendida
RA	Realidade Aumentada
RM	Realidade Mista
IRM	Imagem por Ressonância Magnética
TIC	Tomografia Computadorizada
WPW	Wolff-Parkinson-White
RVi	Realidade Virtual Imersiva
TRNA	Taquicardia de reentrada nodal atrioventricular
ATCC	Angiogramas de tomografia computadorizada cardíaca
DORV	Double Outlet Right Ventricle
TGA	Transposição das Grandes Artérias
IU	Interface do Usuário
RC	Renderização Cinemática
HMD	Head-Mounted Display
3DE	Ecocardiografia Tridimensional
IVDA	Integração e visualização de dados em ambientes aumentados e virtuais
CCI	Coefficientes de Correlação Intraclasse
CV	Coefficiente de variância
MAPE	Erro Percentual Absoluto Médio
DFC	Dinâmica de Fluidos Computacional
IMVR	Medição de isossuperfície em imagens renderizadas por volume

CPR	Reformação Planar Curvada
LOA	Limites de Acordo
MPR	Multiplanar Reconstruction
CTC	Colonografia por Tomografia Computadorizada
CRC	Câncer Colorretal

Lista de símbolos

θ	Letra grega Theta
\times	Produto vetorial
$ x $	Valor absoluto de x

Sumário

1	INTRODUÇÃO	23
1.1	Motivação	23
1.2	Objetivos	23
1.3	Hipótese	24
1.4	Organização do Trabalho	24
2	ASPECTOS CONCEITUAIS	27
2.1	Imagens 2D	27
2.2	Realidade virtual	28
2.3	Doença cardíaca congênita (DCC)	28
2.4	Ferramentas de medição	29
3	TRABALHOS RELACIONADOS	31
3.1	Visão geral	31
3.2	Realidade estendida	31
3.2.1	'Hologramas de realidade mista para planejamento de cirurgia cardíaca: primeira experiência do usuário em doenças cardíacas congênitas'	31
3.2.2	'Uso combinado de impressão 3D e tecnologia de realidade mista para treinamento neurocirúrgico: preparando-se para a cirurgia cerebral'	33
3.3	Ferramentas de medida	34
3.3.1	'Técnicas de interação para colonografia por TC imersiva: Uma avaliação profissional'	34
3.3.2	'Avaliação de tarefas de percepção para medicina: Um estudo comparativo de usuários entre uma realidade virtual e um aplicativo de desktop'	36
3.3.3	'Avaliação de uma ferramenta de medição linear em realidade virtual para avaliação de dados de imagens multimodais de dados de imagens multimodais - um estudo fantasma'	38
3.4	Estado da arte	40
3.5	Discussão	43
3.5.1	Visualização imersiva e percepção espacial	43
3.5.2	Ferramentas de medição e precisão	44
3.5.3	Ferramentas interativas e dinâmicas	44
3.5.4	Custo-benefício	45
3.5.5	Benefícios específicos para o cirurgião	45
3.5.6	Experiência do usuário e design de interface	45
3.5.7	Desafios e direções futuras	46

4	MÉTODO DO TRABALHO	47
4.1	<i>Moodboard</i>	47
4.2	Entrevistas e observações	47
4.2.1	Principais pontos das entrevistas	48
4.2.2	Desafios e possíveis soluções no planejamento pré-operatório	49
4.2.3	Requisitos mínimos para o aplicativo de RV	49
4.2.4	Melhorias futuras baseadas nas sugestões	50
4.2.5	Esboços	50
5	DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO	53
5.1	Tecnologias Utilizadas	53
5.1.1	<i>Hardware</i>	53
5.1.2	<i>Software</i>	53
5.2	Projeto e Implementação	54
5.2.1	Visão geral do aplicativo	54
5.2.2	Ferramentas básicas	54
5.2.3	Formas de medição	55
5.2.4	Ferramentas de medição	57
5.2.4.1	Medição linear	57
5.2.4.2	Medição de curvas	58
5.2.5	Medição de raio/área	59
5.2.6	Medição de volume	61
5.2.6.1	Salvar medições	61
5.2.6.2	Dentro do coração	62
5.2.6.3	Imagens Dicom	63
5.2.7	Realidade mista (MR)	64
5.3	Testes e Avaliação	64
5.3.1	Rascunho de um estudo	64
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	67
6.1	Realizações	67
6.2	Próximos passos	68
	REFERÊNCIAS	71
	APÊNDICES	75
	APÊNDICE A – QUESTIONÁRIO	77
A.1	Seção Demográfica	77

A.2	Avaliação clínica inicial [Imagem 2D]	77
A.3	Avaliação de usabilidade	78
A.4	Avaliação clínica após VR	79
A.5	Comparação pós-operatória	80
A.6	Comparação de visualizações	81
A.7	VR em cirurgia	81
	APÊNDICE B – ARTIGOS REVISADOS	83

1 Introdução

1.1 Motivação

No campo da cirurgia cardiovascular, a compreensão e a visualização precisas da anatomia do coração são cruciais para obter resultados cirúrgicos bem-sucedidos, principalmente em casos complexos, como doenças cardíacas congênitas. Os métodos tradicionais de geração de imagens, como cortes 2D de exames de ressonância magnética ou tomografia computadorizada, exigem que os cirurgiões reconstruam mentalmente um modelo 3D a partir dessas imagens 2D, o que pode ser desafiador e propenso a erros. Os avanços tecnológicos, especialmente a realidade virtual (RV), oferecem o potencial de revolucionar a forma como os cirurgiões interagem com os dados anatômicos, fornecendo ambientes imersivos e tridimensionais onde eles podem explorar e manipular modelos específicos do paciente. Essa transição de 2D para 3D não só aumenta a compreensão espacial, mas também melhora o planejamento pré-operatório, o treinamento cirúrgico e a educação do paciente. Ao integrar ferramentas de medição avançadas e a capacidade de interagir com modelos internos, a RV tem o potencial de reduzir significativamente o tempo e a carga cognitiva necessários para o planejamento cirúrgico, melhorando, em última análise, os resultados dos pacientes.

1.2 Objetivos

O objetivo principal deste projeto é desenvolver um protótipo de RV abrangente que aborde as limitações atuais dos aplicativos médicos de realidade virtual, especificamente para cirurgia cardiovascular. Os principais objetivos incluem:

1. **Desenvolvimento de ferramentas de medição avançadas:** Implementar ferramentas de medição precisas e versáteis no ambiente de RV, incluindo medições lineares, curvas, de volume, área e raio, para permitir que os cirurgiões obtenham dados precisos e confiáveis de modelos 3D.
2. **Exploração de modelo interno:** Permitir que os cirurgiões naveguem dentro de modelos 3D ocultos, como o interior do coração, para examinar de perto as estruturas internas e os defeitos. Isso inclui o desenvolvimento de um minimapa e de recursos de sobreposição de imagens DICOM para ajudar na orientação e na compreensão.
3. **Aperfeiçoamento da usabilidade e da interação:** Crie uma interface intuitiva e amigável que permita a fácil manipulação de modelos 3D, incluindo rotação,

dimensionamento e recorte, com o uso de controladores de RV padrão. Isso inclui tornar a interação o mais natural e eficiente possível para minimizar a curva de aprendizado dos cirurgiões.

4. **Padronização e acessibilidade:** Certifique-se de que o aplicativo de RV desenvolvido seja de código aberto, acessível e padronizado, semelhante a ferramentas estabelecidas como o 3D Slicer, para promover a adoção generalizada e a consistência no planejamento e treinamento cirúrgico.
5. **Reflexão e iteração do cirurgião:** Obter feedback de cirurgiões cardiovasculares por meio de entrevistas e estudos para refinar o aplicativo com base nas necessidades clínicas do mundo real, visando, em última análise, uma ferramenta que melhore significativamente a eficiência e os resultados do planejamento cirúrgico.
6. **Melhorias futuras:** Estabelecer as bases para futuros aprimoramentos, incluindo a capacidade de importar e visualizar dispositivos médicos no ambiente de RV, melhorar o gerenciamento da interface do usuário e permitir a colaboração entre vários jogadores para sessões de planejamento cirúrgico conjunto.

1.3 Hipótese

A implementação de um aplicativo avançado de realidade virtual (RV) para cirurgia cardiovascular aumentará significativamente a precisão e a eficiência do planejamento cirúrgico e da tomada de decisões em comparação com os métodos tradicionais de imagem 2D. Especificamente, nossa hipótese é que: (1) O desenvolvimento de um aplicativo de realidade virtual para a visualização de defeitos cardíacos permite a criação de um ambiente digital que simula com precisão a anatomia cardíaca, possibilitando a navegação interna de estruturas complexas. (2) O aplicativo desenvolvido é capaz de importar e renderizar dados de imagens médicas de forma eficaz, fornecendo uma visualização 3D interativa que é tecnicamente viável para identificar defeitos cardíacos. (3:) O sistema de medição integrado ao aplicativo de realidade virtual permite medições anatômicas com base em dados tridimensionais, o que pode aumentar a precisão em comparação com as visualizações convencionais, embora não tenha sido validado em um ambiente clínico. (4) A arquitetura do aplicativo, que permite a renderização e a navegação interna de modelos cardíacos, demonstra que é tecnicamente viável desenvolver uma ferramenta para apoio diagnóstico e planejamento cirúrgico em cardiologia, embora não tenha sido testada na prática.

1.4 Organização do Trabalho

Aqui, explicamos brevemente o conteúdo dos diferentes capítulos:

- Capítulo 2: Elucida conceitos fundamentais essenciais para a compreensão do tópico principal.
- Capítulo 3: Abrange o conjunto de trabalhos existentes relevantes para o nosso assunto, oferecendo um histórico contextual.
- Capítulo 4: Detalha a abordagem processual que adotamos para atingir nosso objetivo.
- Capítulo 5: Articula o principal resultado de nosso projeto.
- Capítulo 6: Oferece um resumo das principais descobertas, percepções e a importância geral do estudo.

2 Aspectos Conceituais

2.1 Imagens 2D

A geração de imagens médicas, também conhecida como imagem médica bidimensional ou imagens 2D, é uma tecnologia não invasiva que desempenha um papel crucial na saúde moderna, adquirindo e processando sinais para gerar representações visuais de tecidos e estruturas internas do corpo humano. Esses sinais são derivados de vários fenômenos físicos, como som, luz e ondas eletromagnéticas. As imagens geradas permitem que médicos e profissionais da área médica diagnostiquem, monitorem e tratem uma ampla gama de condições médicas.

Existem várias modalidades de imagens médicas amplamente utilizadas, cada uma delas baseada em princípios físicos diferentes e oferecendo vantagens distintas, dependendo da área do corpo e da natureza do problema médico que está sendo examinado. Essas modalidades incluem: Tomografia computadorizada (TC), imagem por ressonância magnética (MRI), ecocardiografia.

A Ressonância Magnética (RM) é uma técnica de imagem que utiliza fortes campos magnéticos e pulsos de radiofrequência para gerar imagens detalhadas das estruturas internas do corpo, principalmente dos tecidos moles. Conforme explicado por Grover et al. (2015), a RM se baseia nas propriedades magnéticas dos átomos de hidrogênio na água e na gordura do corpo. Quando expostos a um campo magnético forte, esses prótons de hidrogênio se alinham com o campo. Um pulso de radiofrequência é então aplicado, desalinhando os prótons. Ao retornarem às suas posições originais, eles emitem sinais que são capturados e transformados em imagens detalhadas pelo scanner de RM.

Um ecocardiograma, ou “eco”, é um exame usado para examinar o coração e os vasos sanguíneos próximos. É um tipo de exame de ultrassom, o que significa que uma pequena sonda é usada para enviar ondas sonoras de alta frequência que criam ecos quando ricocheteiam em diferentes partes do corpo. Esses ecos são captados pela sonda e transformados em uma imagem em movimento em um monitor enquanto o exame é realizado. (NHS, 2022).

Tomografia computadorizada (TC) refere-se a um procedimento computadorizado de geração de imagens de raios X em que um feixe estreito de raios X é direcionado a um paciente e rapidamente girado em torno do corpo, produzindo sinais que são processados pelo computador da máquina para gerar imagens de seção transversal, ou “fatias”. Esses cortes são chamados de imagens tomográficas. Nibib (2022).

2.2 Realidade virtual

Todos os aplicativos de realidade virtual dependem de imagens 2D para recriar modelos 3D, usando técnicas de renderização de volume ou de renderização de superfície. A renderização de superfície envolve a estimativa de estruturas subjacentes a partir das imagens, criando um modelo com base nos contornos da superfície. Em contrapartida, a renderização de volume visualiza os materiais do tecido calculando a cor e a opacidade de cada voxel, oferecendo uma representação mais detalhada das estruturas internas [Udupa, Hung e Chuang \(1991\)](#).

Além da reconstrução do modelo 3D, também é fundamental considerar como o modelo é apresentado. Há três métodos principais para isso: (1) Realidade mista - em que o mundo real é integrado ao virtual, permitindo que o modelo seja apresentado junto com elementos do mundo real; (2) Realidade virtual - em que o mundo real é totalmente substituído por um ambiente virtual, proporcionando imersão total; e (3) Realidade aumentada - em que os objetos virtuais são sobrepostos ao mundo real, mas com recursos limitados em comparação com a realidade mista, normalmente exibida em dispositivos como smartphones. Além disso, tem havido esforços para aprimorar ainda mais a realidade virtual incorporando outros componentes, como a visualização em quatro dimensões (4D), que permite que os cirurgiões observem um ciclo cardíaco completo, proporcionando uma visão dinâmica do coração batendo [Mena et al. \(2018\)](#).

2.3 Doença cardíaca congênita (DCC)

A Cardiopatia Congênita (DCC) é uma condição complexa tipicamente caracterizada por defeitos estruturais no coração que estão presentes no nascimento, embora também possa se manifestar em adultos. O diagnóstico da DCC se baseia principalmente em técnicas de imagem 2D, como ecocardiografia, ressonância magnética (RM) e tomografia computadorizada (TC).

A ecocardiografia é a ferramenta de diagnóstico mais comumente usada devido ao seu custo acessível, natureza não invasiva e facilidade de aplicação. Entretanto, sua principal limitação é a resolução relativamente baixa da imagem, que pode ocultar detalhes críticos da anatomia do coração.

A ressonância magnética oferece vantagens significativas no diagnóstico de DCC, especialmente sua capacidade de fornecer imagens de alto contraste que diferenciam claramente os vários tecidos moles. Isso torna a RM altamente eficaz na visualização de estruturas cardíacas complexas e na avaliação de aspectos funcionais, como o fluxo sanguíneo e o movimento cardíaco. No entanto, o alto custo, os tempos de escaneamento mais longos e a necessidade de os pacientes permanecerem completamente imóveis durante

o procedimento podem ser um desafio, especialmente para pacientes pediátricos.

As tomografias computadorizadas (TC), por outro lado, são valorizadas por sua capacidade de produzir imagens de alta resolução rapidamente, o que as torna úteis em situações de emergência ou quando é necessária uma avaliação rápida. A TC é particularmente eficaz na visualização de estruturas ósseas e calcificações, mas expõe os pacientes à radiação ionizante, o que é uma preocupação significativa, especialmente em crianças pequenas. Além disso, a TC fornece contraste menos detalhado dos tecidos moles em comparação com a RM.

Nos casos em que os exames de imagem não estão disponíveis ou são contraindicados, os cirurgiões podem precisar usar ferramentas físicas, como os dilatadores Hegar, para medir diâmetros e distâncias lineares dentro do coração. O tratamento da doença coronariana é ainda mais complicado pelo fato de que ela geralmente afeta crianças, exigindo uma consideração cuidadosa de suas estruturas anatômicas menores e em desenvolvimento. Isso acrescenta mais uma camada de complexidade, pois os cirurgiões precisam reconstruir mentalmente um modelo 3D do coração a partir de imagens 2D, uma tarefa que exige muito da cognição e é propensa a imprecisões.

2.4 Ferramentas de medição

Medições precisas e confiáveis são essenciais para o tratamento eficaz da cardiopatia congênita (DCC), especialmente quando é necessário introduzir dispositivos externos. Medições precisas minimizam a necessidade de várias intervenções, reduzindo o custo e o risco para o paciente. Apesar da importância significativa dessas medições, as ferramentas disponíveis em ambientes de realidade virtual (RV) ainda não realizaram todo o seu potencial. Vários avanços e desafios nessa área são destacados por pesquisas recentes.

Um desenvolvimento promissor é o método Isosurface Geometric Measurement on Volume-Rendered Images proposto por Kamiya et al. (KAMIYA et al., 2024). Esse método, conhecido como medição de isossuperfície em imagens renderizadas por volume (IMVR), tem como objetivo enfrentar os desafios das medições em 3D da anatomia do coração vivo. O estudo comparou o IMVR com a reforma planar curvada (CPR) e descobriu que o IMVR proporcionou uma precisão superior na medição de características cardiovasculares complexas, incluindo as dimensões da raiz da aorta e da artéria coronária. Os resultados mostraram que a IMVR tinha limites de concordância menores em comparação com a RCP, indicando maior precisão e confiabilidade.

Em outro estudo, Kamiya et al. (KAMIYA et al., 2021) exploraram o uso da tecnologia de RV para análise dinâmica da anatomia da raiz da aorta. Eles enfatizaram a necessidade de uma avaliação mais aprofundada da reprodutibilidade, incluindo a variabilidade intraobservador e interobservador. Suas descobertas sugerem que a tecnologia

de RV tem um potencial significativo para melhorar a compreensão da anatomia cardíaca, com implicações para uma ampla gama de estudos anatômicos.

Lan et al. (LAN et al., 2023) realizaram uma revisão sistemática sobre realidade virtual imersiva (iVR) para planejamento pré-operatório específico do paciente. Sua pesquisa com cirurgias indicou que a iVR foi eficaz para melhorar a compreensão da anatomia específica do paciente em 83,3% dos casos. Isso destaca o crescente reconhecimento do valor do iVR em ambientes clínicos, especialmente para planejamento pré-operatório e fins educacionais.

Por outro lado, embora as ferramentas de medição linear em RV tenham sido amplamente estudadas, como a ferramenta de linha tracejada verde para exibição de comprimentos em milímetros (DENG et al., 2021) e avaliações de ferramentas de medição linear em estudos com fantasmas (STEPHENSON et al., 2022), ainda não há consenso sobre os métodos ideais. Ainda há dúvidas sobre se a renderização linear, o posicionamento da mão, os pré-fabricados ou o raycasting fornecem as medições mais precisas para longas distâncias. Além disso, a usabilidade de outros tipos de medição, como raio, área, volume e medições curvas, não foi examinada minuciosamente. Compreender as diferenças entre as medições feitas dentro e fora do modelo 3D é fundamental, como afirma Kamiya, pois muitos defeitos ocorrem dentro do coração e exigem medições internas precisas para o planejamento eficaz do tratamento.

3 Trabalhos relacionados

3.1 Visão geral

No total, foram analisados mais de 20 artigos que estão intimamente relacionados ao desenvolvimento de aplicativos de realidade virtual (RV) para tratamento cardiovascular e planejamento cirúrgico. A maior parte da literatura se concentra em doenças cardíacas, com exceção de (JEISING *et al.*, 2024), que desenvolveu um aplicativo de realidade mista para treinamento neurocirúrgico. Embora a condição alvo seja diferente, as técnicas de visualização de estruturas anatômicas complexas em RV compartilham semelhanças com a nossa abordagem. Além disso, (LAN *et al.*, 2023) e (BOURAGHI *et al.*, 2023) fornecem revisões sistemáticas do planejamento pré-operatório específico do paciente usando RV, destacando as principais vantagens e desafios da integração da RV em fluxos de trabalho clínicos. Embora essas revisões não contribuam com novos protótipos, elas fornecem informações valiosas sobre as tendências atuais e as direções futuras da RV em cirurgia.

Os demais artigos discutidos nesta seção contribuíram para o desenvolvimento de vários protótipos de RV especificamente para aplicações cardíacas. Entre eles, seis artigos apresentaram alguma forma de ferramentas de medição para modelos virtuais. Desses seis, quatro empregaram ferramentas de medição linear, enquanto dois incorporaram técnicas de medição curva. Um resumo desses protótipos e de suas principais funcionalidades é apresentado na tabela 3.

3.2 Realidade estendida

3.2.1 'Hologramas de realidade mista para planejamento de cirurgia cardíaca: primeira experiência do usuário em doenças cardíacas congênitas'

O estudo de BRUN *et al.* (2019) explora a viabilidade do uso de hologramas de realidade mista (MR) para o planejamento pré-operatório de doenças cardíacas congênitas (DCC). O estudo mostra o potencial dos hologramas como uma alternativa dinâmica e interativa aos modelos cardíacos a partir de impressão 3D, frequentemente utilizados para auxiliar os cirurgiões na visualização de defeitos cardíacos complexos. Os autores criaram um modelo cardíaco 3D a partir de tomografias computadorizadas (CTA) de um paciente com ventrículo direito de dupla saída (DORV) e transposição das grandes artérias (TGA), visualizado com o HoloLens® e avaliado por 36 membros de uma equipe pediátrica de cardiologia.



Figura 1 – Visualização compartilhada do holograma cardíaco. Fonte: (BRUN et al., 2019).

Os resultados indicaram que o holograma foi altamente avaliado por melhorar a compreensão da morfologia complexa do coração, oferecendo aos participantes uma visão mais profunda da anatomia, essencial para o planejamento cirúrgico. O estudo também identificou diferenças na experiência do usuário com base em idade e gênero, onde usuários mais jovens e do gênero feminino avaliaram as ferramentas de interface (como rotação, escalonamento e corte) de forma mais positiva que outros grupos.

Brun enfatiza que hologramas em MR oferecem uma alternativa econômica aos modelos impressos em 3D, que são caros (cerca de 7500 Euros). Embora modelos físicos ofereçam benefícios palpáveis, os hologramas podem fornecer informações anatômicas similares com interatividade dinâmica, tornando-os uma ferramenta valiosa para planejamento cirúrgico e educação. Contudo, o estudo também aponta limitações, especialmente a ausência de ferramentas de medição dentro do holograma. A incapacidade de medir tamanhos e distâncias diretamente no modelo MR é vista como uma limitação significativa, e futuros desenvolvimentos visam corrigir isso com a adição de funcionalidades de medição, essenciais para a tomada de decisões cirúrgicas.

Isso é particularmente relevante para o nosso trabalho, pois reforça nossa decisão de desenvolver ferramentas de medição robustas e precisas (linear, curva, volume, etc.) no nosso protótipo em VR, que Brun et al. identificam como uma necessidade futura para sistemas MR.

Um dos aspectos mais importantes deste estudo para o nosso trabalho é o design da interface do usuário (UI). Brun et al. descrevem um sistema de interação com hologramas em MR que permite aos usuários rotacionar, escalar e cortar um modelo cardíaco 3D, semelhante às funcionalidades do nosso sistema de realidade virtual (VR). Nos inspiramos



Figura 2 – Holograma em realidade mista. Parte do menu de ferramentas exibido com gesto de clique. Fonte: (BRUN et al., 2019).

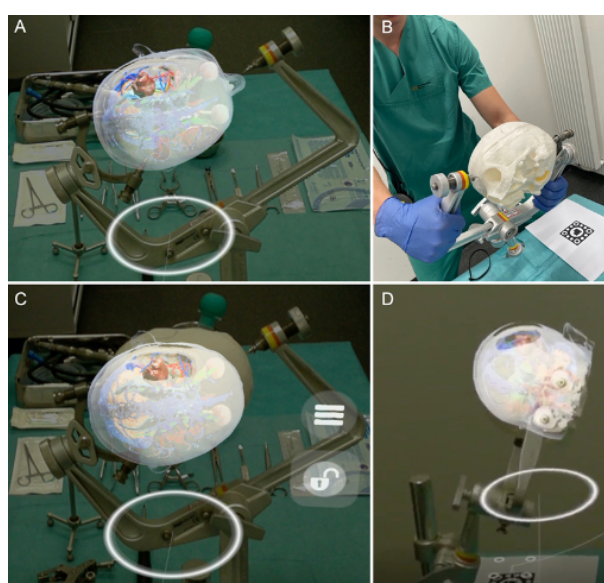


Figura 3 – Combinação de impressão 3D e aplicação de MR. Fonte: (JEISING et al., 2024).

nessa abordagem para criar menus e ferramentas fáceis de usar para os clínicos, garantindo interações suaves e intuitivas com o modelo cardíaco 3D.

3.2.2 'Uso combinado de impressão 3D e tecnologia de realidade mista para treinamento neurocirúrgico: preparando-se para a cirurgia cerebral'

O estudo de JEISING et al. (2024) explora o uso combinado de realidade mista (MR) e impressão 3D no treinamento neurocirúrgico, especialmente em ressecções de tumores cerebrais. A pesquisa integra modelos virtuais e físicos, permitindo que os trainees pratiquem desde a craniotomia até a ressecção do tumor em um ambiente simulado. Essa abordagem une o feedback tátil de modelos impressos em 3D com a visualização imersiva da MR, criando um cenário de treinamento interativo e abrangente. O modelo virtual, baseado em dados de imagem médica, funciona como um "gêmeo digital" da anatomia do paciente, enquanto crânios impressos em 3D possibilitam a prática manual de craniotomia.

Uma contribuição importante deste estudo é a demonstração de como conteúdos

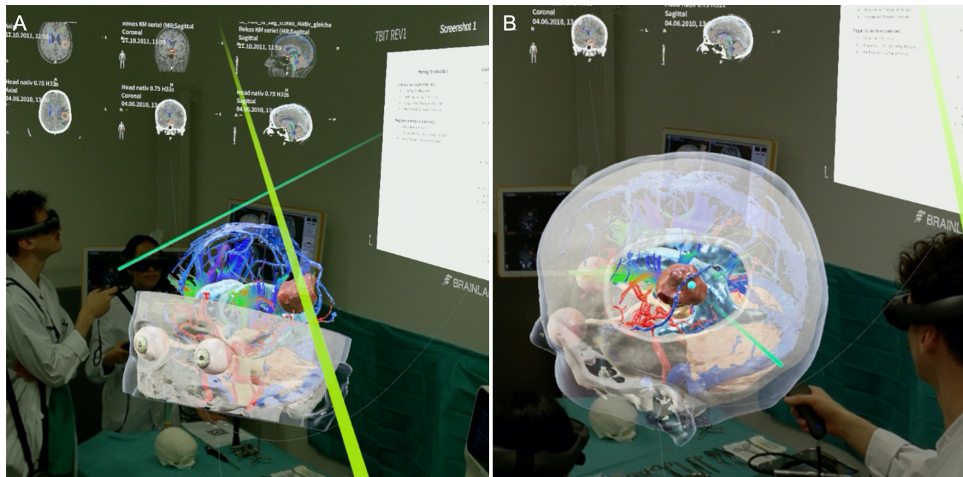


Figura 4 – Participantes explorando propriedades do modelo 3D virtual e informações complementares. Fonte: (JEISING et al., 2024).

virtuais em MR podem ser combinados com instrumentos cirúrgicos reais, simulando condições cirúrgicas realistas. A integração entre MR e impressão 3D, embora comum em outras áreas, é inovadora neste contexto e abre caminho para novas aplicações, inclusive para o planejamento cirúrgico de doenças cardíacas congênitas (DCC).

O estudo também destaca como a MR pode reduzir a sobrecarga cognitiva dos cirurgiões ao eliminar a necessidade de alternar entre diferentes telas, integrando informações múltiplas em um único visor.

Em resumo, o trabalho de Jeising et al. fornece informações valiosas para nosso estudo, mostrando como MR e impressão 3D podem melhorar o planejamento pré-operatório e a tomada de decisões intraoperatória em cirurgias complexas, incluindo a DCC.

3.3 Ferramentas de medida

3.3.1 'Técnicas de interação para colonografia por TC imersiva: Uma avaliação profissional'

O artigo de LOPES et al. (2018) apresenta o iCOLONIC, um conjunto de técnicas de interação imersiva para navegação em colonografia por TC (CTC) usando realidade virtual (VR). A motivação por trás do iCOLONIC decorre dos desafios inerentes à percepção de estruturas 3D complexas, como o cólon, por meio de interfaces 2D convencionais, que muitas vezes resultam em informações perdidas e procedimentos demorados. Ao utilizar a RV, o sistema visa aprimorar a percepção espacial dos médicos e melhorar a velocidade e a precisão do rastreamento do câncer colorretal (CCR).

O iCOLONIC oferece liberdade de movimento em um ambiente de RV não estacionário, o que permite que os usuários se movimentem fisicamente e examinem a estrutura do

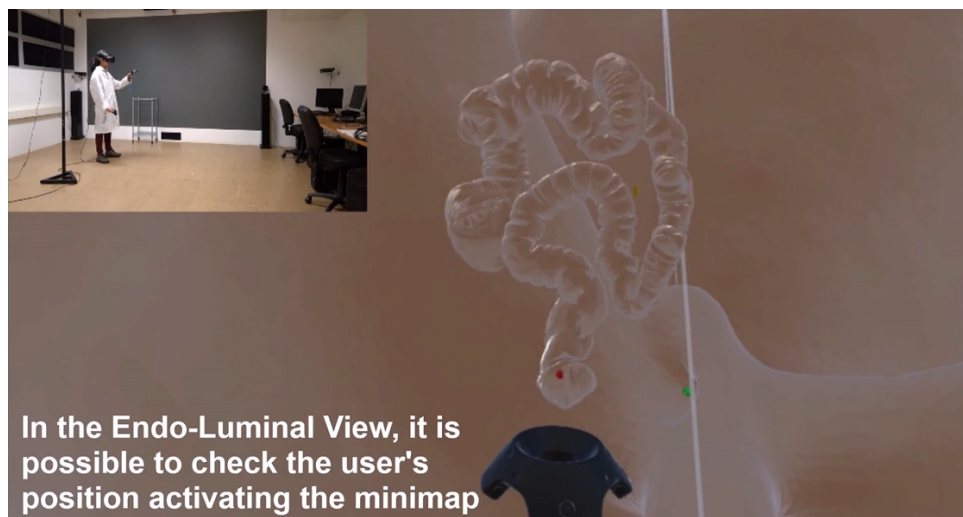


Figura 5 – Minimapa do cólon. Fonte: (LOPES et al., 2018).

cólon em 3D a partir das perspectivas externa (Exo-Luminal) e interna (Endo-Luminal). A navegação aérea dentro do cólon, combinada com um minimapa para orientar a orientação e o rastreamento posicional, oferece aos radiologistas e cirurgiões uma interface mais intuitiva para explorar modelos de cólon em 3D. O sistema também inclui ferramentas para marcação de pólipos, medições de lesões e atualizações dinâmicas de cortes de CTC, que podem auxiliar nos procedimentos de diagnóstico.

Um aspecto importante do iCOLONIC é sua representação em várias escalas, que permite que os usuários se reduzam para navegar no cólon. Esse recurso é inspirado na necessidade de maior percepção 3D e controle de câmera, pois as interfaces tradicionais de mouse e teclado geralmente limitam a capacidade dos médicos de interagir totalmente com modelos 3D. O sistema aumenta a imersão por meio de movimentos não estacionários, o que não apenas melhora a ergonomia, mas também proporciona uma experiência de navegação mais rica e fluida.

A usabilidade do iCOLONIC foi avaliada por meio de um estudo de usuário que envolveu sete profissionais médicos, incluindo radiologistas e cirurgiões com diferentes níveis de experiência em CTC. Os resultados indicaram que as técnicas de interação eram fáceis de executar, forneciam feedback significativo e melhoravam significativamente a consciência espacial durante a navegação no cólon. Os participantes destacaram a capacidade do sistema de melhorar a eficiência do diagnóstico, acelerando a leitura das imagens de CTC em comparação com as interfaces convencionais. Apesar da recepção positiva do sistema, alguns participantes observaram que recursos como a melhoria do contraste de cores e a inclusão de modelos de prono/supino melhorariam ainda mais seu potencial de diagnóstico.

Esse artigo, embora focado em CTC, fornece uma inspiração valiosa para o nosso projeto. Em particular, a ideia de reduzir a escala do usuário para navegar dentro de um modelo 3D foi aplicada à nossa ferramenta de RV para diagnóstico de doenças cardíacas.



Figura 6 – Medição linear usando esferas como representação do local que está sendo medido. Fonte: (LOPES et al., 2018).

Além disso, a abordagem do artigo para medição linear, em que os usuários interagem com uma ferramenta baseada em esfera, foi adaptada para o nosso projeto. A inclusão de um minimapa para ajudar os médicos a manter a orientação em uma estrutura 3D, bem como ferramentas de medição salvas que permitem aos usuários rastrear e recuperar pontos de dados específicos, também são recursos que foram criados em nosso sistema. Além disso, o conceito de atualização dinâmica das fatias de CTC com base na posição do usuário foi uma adição poderosa à nossa própria ferramenta, garantindo que os dados de que os médicos precisam sejam sempre contextualmente relevantes para sua visão atual no modelo 3D.

Em resumo, o iCOLONIC oferece um exemplo convincente de como a RV pode ser utilizada para superar as limitações das interfaces 2D tradicionais em diagnósticos médicos. As técnicas de interação, a liberdade de movimento e o ambiente imersivo descritos no artigo apresentaram inúmeras oportunidades para nosso próprio trabalho, especialmente em termos de design de interface de usuário, navegação espacial e interação de dados em tempo real.

3.3.2 'Avaliação de tarefas de percepção para medicina: Um estudo comparativo de usuários entre uma realidade virtual e um aplicativo de desktop'

HOMBECK et al. (2022) examinam as diferenças de desempenho entre aplicativos de realidade virtual (RV) e de desktop em termos de estimativa de distância e forma, especialmente para tarefas médicas baseadas em precisão, como o planejamento cirúrgico. Um dos argumentos centrais do artigo é que as visualizações desenvolvidas para aplicativos de desktop geralmente são transferidas diretamente para ambientes de RV sem considerar



Figura 7 – Imagem do dicom dentro do modelo. Fonte: (LOPES et al., 2018).

as possíveis alterações no desempenho espacial e temporal. Essa abordagem pode ser problemática para simulações cirúrgicas ou pré-operatórias, em que a precisão é fundamental. Qualquer interpretação errônea de forma ou distância nessas simulações pode influenciar a escolha do tratamento e afetar potencialmente os resultados cirúrgicos.

Os autores enfatizam que, embora os usuários de RV possam se sentir confiantes em sua capacidade de avaliar as relações espaciais com precisão, há evidências de que essa confiança pode estar equivocada. Estudos anteriores demonstraram que os usuários de ambientes virtuais tendem a subestimar as distâncias, às vezes em até 25%, o que pode ter sérias implicações em contextos médicos. É interessante notar que o estudo aponta que essa subestimação não é necessariamente causada por fatores como a qualidade dos gráficos, o campo de visão ou até mesmo a tecnologia do head-mounted display (HMD). Em vez disso, a causa dessa distorção ainda não está clara, o que sugere a necessidade de mais investigações sobre como a RV interage com a cognição espacial em aplicações médicas.

Hombeck et al. também comparam vários estilos de visualização, como Phong, Toon, Fresnel e mapas de calor, em ambientes de desktop e de RV. Suas descobertas mostram que a RV melhora consistentemente o desempenho na estimativa de forma e distância devido à visão estereoscópica, que permite uma interação mais imersiva e intuitiva com modelos 3D. Eles também destacam que as tarefas são concluídas mais rapidamente em RV, quase duas vezes mais rápido do que em plataformas de desktop. Apesar dessas vantagens, os autores pedem o desenvolvimento de diretrizes mais formais para garantir que as visualizações tenham um desempenho ideal quando transferidas do desktop para a RV. Isso é crucial à medida que mais aplicativos médicos, especialmente aqueles relacionados ao treinamento cirúrgico e ao planejamento pré-operatório, mudam para a RV, o que também mostra a importância do aplicativo de código aberto ou, pelo menos, da criação de um padrão para

a comunidade.

Embora Hombeck et al. se concentrem em medições e visualizações de superfície, nosso trabalho amplia esse foco ao abordar problemas internos, como os encontrados em cirurgias cardíacas. Seu reconhecimento dos benefícios da RV em contextos médicos, especialmente em termos de velocidade e precisão, alinha-se com nosso uso da RV para facilitar procedimentos complexos, como medir distâncias entre estruturas cardíacas críticas ou distinguir entre tecido saudável e danificado. Além disso, nossa abordagem inclui métodos de visualização interna, como o uso de imagens DICOM e a incorporação de planos de recorte, que vão além das visualizações em nível de superfície discutidas por Hombeck.

O estudo de Hombeck et al. conclui que a RV melhora o desempenho espacial e temporal em relação aos aplicativos de desktop em tarefas baseadas em precisão. Eles defendem a adoção generalizada da RV para aplicações como treinamento cirúrgico e planejamento pré-operatório. Essa conclusão reforça a importância da transição das configurações tradicionais de desktop para sistemas de RV imersivos em contextos médicos, especialmente quando a compreensão espacial precisa é necessária para o planejamento do tratamento.

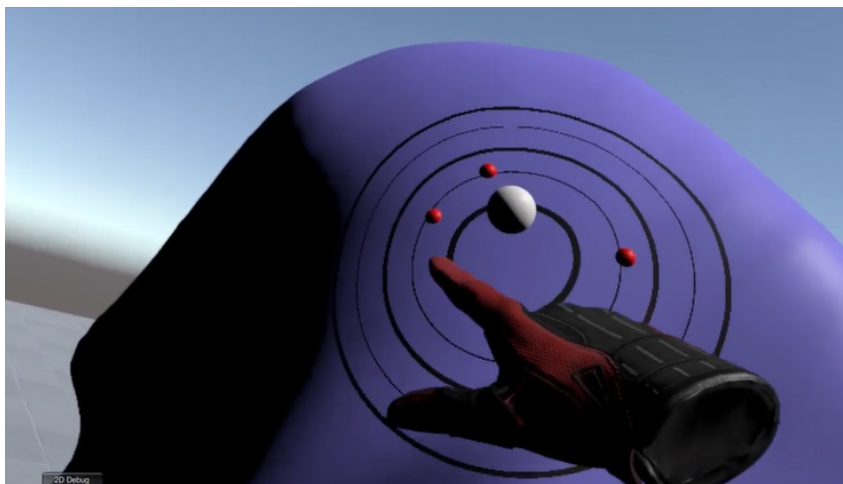


Figura 8 – Isolinhas para a medição de distância. Fonte: (HOMBECK et al., 2022).

3.3.3 'Avaliação de uma ferramenta de medição linear em realidade virtual para avaliação de dados de imagens multimodais de dados de imagens multimodais - um estudo fantasma'

STEPHENSON et al. (2022) realizaram um estudo com o objetivo de avaliar a precisão e a confiabilidade de uma ferramenta de medição linear em realidade virtual (RV)

usando dados de phantom obtidos de três modalidades de imagem cardíaca: ecocardiografia tridimensional (3DE), tomografia computadorizada (CT) e ressonância magnética (MRI). Este estudo procurou determinar se a RV poderia fornecer medições precisas e consistentes nessas modalidades, comparando os resultados com os pacotes de software padrão do setor usados em telas planas. Ao usar conjuntos de dados fantasmas, que são modelos físicos com dimensões conhecidas, os pesquisadores puderam avaliar objetivamente o desempenho da ferramenta de RV em relação às medições de verdade estabelecidas.

O estudo mostrou que as medições de RV foram altamente confiáveis nos conjuntos de dados de TC e RM, com coeficientes de correlação intraclassa (ICC) de $\geq 0,99$ e coeficiente de variação (CV) de $< 10\%$, indicando consistência intra e interobservador. O erro percentual absoluto médio (MAPE) para medições de VR em comparação com a verdade fundamental foi de $1,6\%$ para dados de RM e TC, mostrando excelente concordância. No entanto, um MAPE mais alto de $7,7\%$ foi observado nos dados de 3DE, que os autores atribuíram às dimensões de medição menores no fantoma de 3DE.

Uma das principais descobertas do estudo foi a ausência de viés de medição sistemática em VR para conjuntos de dados de TC e RM, conforme demonstrado pela análise de Bland-Altman. Por outro lado, as medições feitas no software clínico padrão (Sectra) apresentaram uma tendência de superestimação, possivelmente devido à falta de percepção de profundidade real ao visualizar estruturas 3D em uma tela 2D. O estudo levantou a hipótese de que a visão estereoscópica da RV, que proporciona uma percepção de profundidade realista, permite um posicionamento mais preciso dos pontos de medição no espaço 3D, superando algumas das limitações das telas 2D tradicionais.

No entanto, os autores observaram que a realização de medições muito pequenas em RV, especialmente aquelas com menos de 10 mm, representava um desafio. Essa limitação é de particular importância em casos de doença cardíaca congênita (DCC), em que os pacientes, especialmente recém-nascidos e crianças, geralmente apresentam características anatômicas que podem exigir precisão nas medições abaixo de 10 mm. O estudo solicitou uma validação adicional para avaliar o desempenho da RV em dimensões tão pequenas, enfatizando que isso é crucial para a relevância clínica no planejamento cirúrgico pediátrico.

De modo geral, o estudo de Stephenson et al. demonstra que a RV oferece vantagens significativas em relação ao software tradicional de tela plana para tarefas de medição de TC e RM, principalmente por melhorar a percepção de profundidade e reduzir o viés de medição. No entanto, ele também destaca a necessidade de mais desenvolvimento e validação de ferramentas de RV para dimensões de medição menores, que são essenciais no tratamento de pacientes vulneráveis com defeitos cardíacos congênitos.

Essa pesquisa é especialmente relevante para o nosso trabalho em aplicações de RV cardíaca, pois reforça a importância de garantir medições precisas em RV, especialmente ao lidar com estruturas complexas e delicadas como as encontradas em pacientes com DCC.

A ênfase do estudo na validação em pequenas dimensões é uma consideração fundamental para qualquer ferramenta de RV projetada para uso pediátrico.

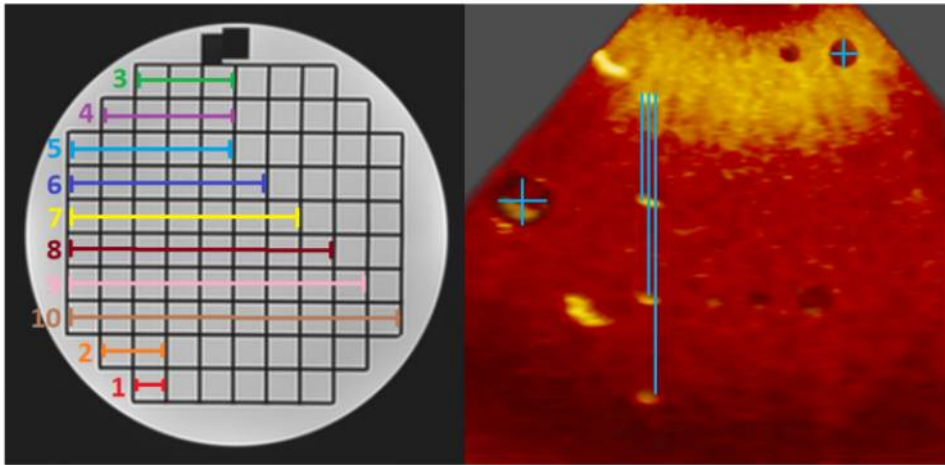


Figura 9 – Medição feita em CT, MRI (esquerda) e fantoma 3DE (direita). Fonte: (STEPHENSON et al., 2022).

3.4 Estado da arte

Há recursos excepcionais que classificamos como estado da arte, seja pela descrição recente deles ou pelos desafios que precisam ser enfrentados para sua implementação. São eles: a reconstrução do modelo 3D a partir de imagens de ecocardiografia, o tempo sequencial do ciclo cardíaco, a colaboração de vários usuários e a combinação da realidade virtual com a realidade aumentada pelo uso de telefones celulares.

#	Estado da arte	Referências
1	Modelos 3D a partir de imagens eco	(PUSHPARAJAH et al., 2022)
2	Vários usuários	(BRUN et al., 2019)
3	Time sequencial heart cycle	(MENA et al., 2018)
4	Realidade Aumentada	(YANG et al., 2022)
5	Realidade virtual + RA	(AWORI et al., 2023)
6	Impressora 3D	(LAU et al., 2022)

Tabela 1 – Estado da arte a partir dos trabalhos relacionados.

Modelo 3D a partir de imagens de ecocardiografia: Consideramos a reconstrução do modelo 3D a partir de imagens de ecocardiografia um dos estados da arte, uma vez que elas possuem um conjunto diferente de problemas em relação às suas contrapartes (CT, MRI), conforme mencionado por (ONG et al., 2018), além disso, a ecocardiografia foi considerada a modalidade de imagem padrão usada para pacientes pediátricos pelos mesmos autores.

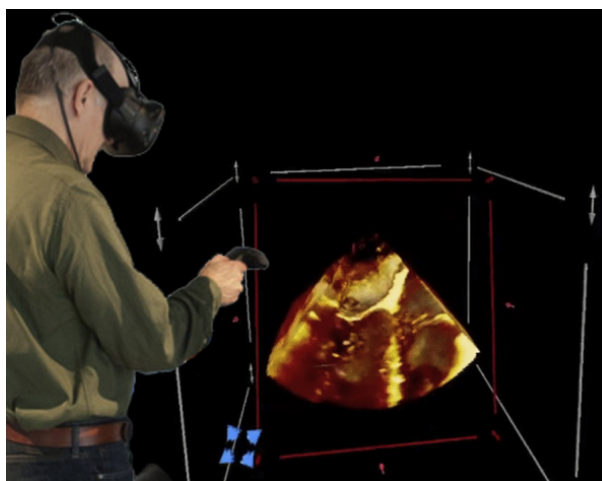


Figura 10 – Echocardiografia. Fonte: (ONG et al., 2018).

Colaboração de vários usuários: Lidar com vários usuários apresenta vários desafios na implementação, e o único artigo identificado com esse aspecto foi (BRUN et al., 2019), embora ele não tenha realizado uma avaliação. Além disso, é essencial reconhecer as considerações exclusivas de um sistema com vários usuários, conforme demonstrado por (PARK et al., 2023).

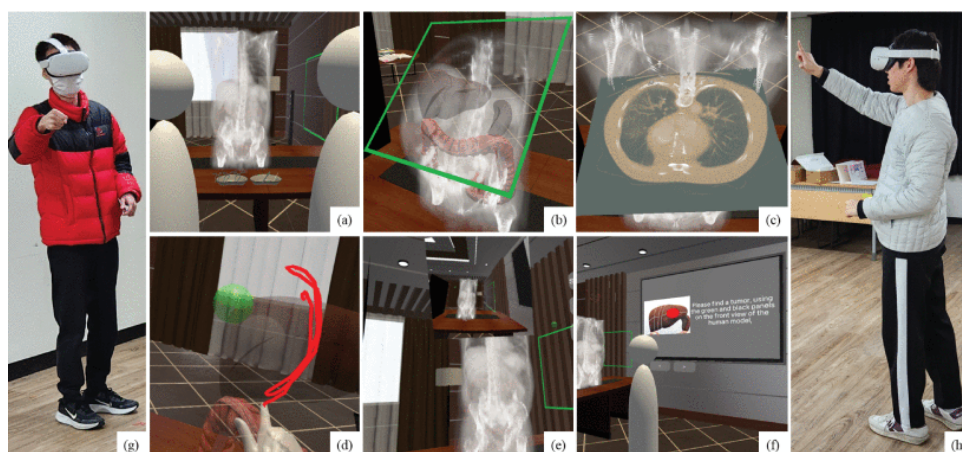


Figura 11 – Vários participantes. Fonte: (PARK et al., 2023).

Ciclo cardíaco sequencial de tempo: O sequenciamento de tempo, também conhecido como 4D, exige um procedimento complexo e um volume substancial de dados, o que leva a um aumento considerável no tempo de processamento. Os recentes avanços na capacidade dos computadores facilitaram a realização bem-sucedida desse procedimento. O único artigo em nosso conjunto de artigos que aborda esse aspecto é (MENA et al., 2018), no qual foram tiradas conclusões sobre o funcionamento do coração. No entanto, esse recurso apresenta um potencial evidente de utilidade prática em um contexto cirúrgico.

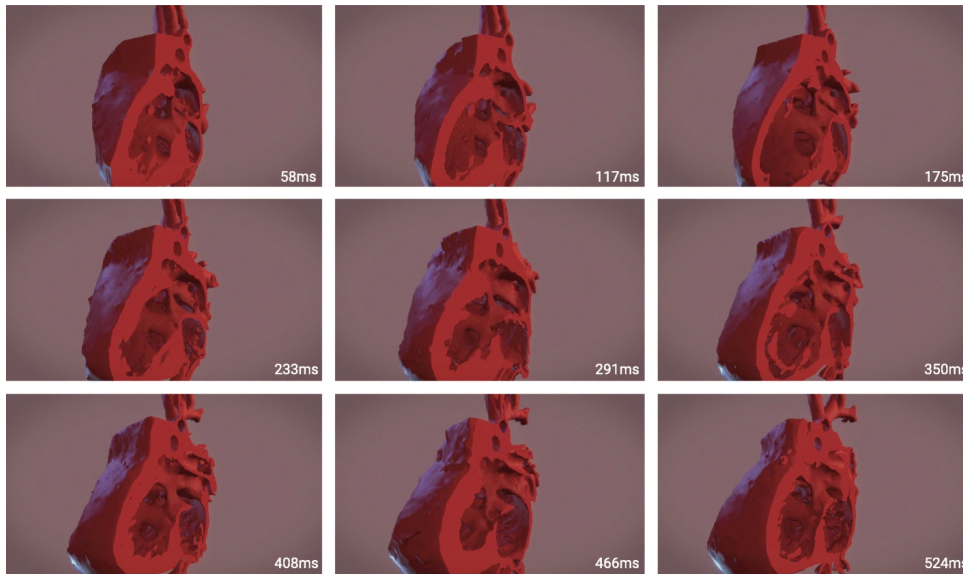


Figura 12 – Imagem 4D. Fonte (MENA et al., 2018)

Realidade aumentada em dispositivos móveis: No recente artigo que examina o uso da Realidade Aumentada Móvel no Planejamento Cirúrgico Cardiovascular, (YANG et al., 2022) enfatiza: “Esta pesquisa é a primeira a avaliar a usabilidade das tecnologias de RA móvel com especialistas médicos”. Essa afirmação ressalta que a ar é uma ferramenta contemporânea, classificada na categoria de estado da arte. Além disso, alguns artigos mencionaram náusea e fadiga como possíveis problemas para o uso prolongado da VR. Portanto, o ar poderia ser usado como uma ferramenta auxiliar para evitar que isso aconteça, embora essa possibilidade ainda não tenha sido totalmente explorada.



Figura 13 – RA móvel. Fonte (YANG et al., 2022).

Impressão 3D: A impressão 3D é uma tecnologia relativamente nova para aplicações médicas (LAU et al., 2022), apesar de sua utilidade, o tempo e o custo de produção são os dois principais fatores que impedem sua ampla aplicação no campo médico (LAU et al., 2022).

3.5 Discussão

Ao analisar o conjunto de trabalhos sobre a aplicação da realidade virtual (RV) e da realidade mista (RM) em diagnósticos médicos, surgem vários insights críticos sobre os benefícios, os desafios e as direções futuras dessas tecnologias na prática clínica, especialmente para doenças cardíacas congênitas (DCC) e planejamento cirúrgico.

3.5.1 Visualização imersiva e percepção espacial

Em vários estudos, um dos benefícios mais proeminentes dos sistemas de RV e RM é a consciência espacial aprimorada e a capacidade de visualizar estruturas anatômicas complexas em três dimensões. Brun et al. (2019) (BRUN et al., 2019) demonstraram o uso de hologramas de RM no planejamento pré-operatório de DCC, mostrando que os hologramas poderiam oferecer percepções mais profundas sobre a morfologia do coração em comparação com os modelos tradicionais impressos em 3D. Os participantes classificaram os hologramas como altamente capazes de melhorar sua compreensão da anatomia do DCC, o que é crucial para o planejamento cirúrgico. Isso reflete os resultados de outros estudos, como o de Lopes et al. (2018) (LOPES et al., 2018) e seu sistema iCOLONIC para colonografia por TC, em que as técnicas de navegação imersiva melhoraram significativamente a percepção espacial e a precisão do diagnóstico.

A visão estereoscópica oferecida pela RV, conforme destacado em Hombeck et al. (2022) (HOMBECK et al., 2022) e Stephenson et al. (2022) (STEPHENSON et al., 2022), desempenha um papel fundamental nessa melhor compreensão espacial. Esses estudos destacam que a RV proporciona aos usuários uma percepção de profundidade não disponível nas telas 2D tradicionais, permitindo medições mais precisas e interação com modelos 3D. Esse benefício é especialmente crucial em cirurgias que requerem alta precisão, como o planejamento neurocirúrgico discutido em Jeising et al. (2024) (JEISING et al., 2024) e a cirurgia cardíaca em pacientes com DCC, conforme enfatizado por Brun et al. (BRUN et al., 2019).

A revisão sistemática de Lan et al. (2023) confirma isso ainda mais, observando que a RV imersiva (iVR) permite que os cirurgiões transformem imagens médicas 2D (por exemplo, TC ou RM) em ambientes 3D interativos, o que melhora significativamente sua compreensão da anatomia específica do paciente. No entanto, Lan et al. também apontaram que, embora a iVR aumente a confiança do cirurgião e a formulação da estratégia cirúrgica, há evidências limitadas que correlacionam isso diretamente a melhorias de curto prazo nos resultados dos pacientes, como tempo operatório ou tempo de internação.

3.5.2 Ferramentas de medição e precisão

Um tema recorrente nesses estudos é a necessidade de ferramentas de medição robustas em ambientes de RV e RM. Brun et al. (BRUN et al., 2019) observaram a ausência de tais ferramentas em seu sistema de holograma de RM como uma grande limitação, destacando a importância de adicionar funcionalidades como medições de distância e tamanho para melhorar o planejamento pré-operatório. Da mesma forma, Stephenson et al. (2022) (STEPHENSON et al., 2022) se concentraram na precisão das medições de RV em diferentes modalidades de imagem cardíaca (TC, RM e ecocardiografia 3D), demonstrando a confiabilidade da RV para medições maiores, mas chamando a atenção para os desafios de precisão ao lidar com dimensões abaixo de 10 mm - essenciais para cirurgias cardíacas pediátricas.

Esses achados validam a decisão de priorizar o desenvolvimento de ferramentas de medição abrangentes em plataformas de RV, o que pode ter um impacto significativo na tomada de decisões clínicas, especialmente em cirurgias delicadas envolvendo recém-nascidos ou crianças com DCC. Por fim, a necessidade de ferramentas de medição validadas é reiterada por Bouraghi et al. (2023) (BOURAGHI et al., 2023), que identificaram que muitos aplicativos de RV em doenças cardíacas dependem de métricas não validadas, o que pode prejudicar sua confiabilidade clínica. A análise de Bouraghi, com foco em aplicativos cardíacos, também ressalta a importância de melhorar a precisão e a validação dessas ferramentas para garantir uma adoção mais ampla e a eficácia clínica.

3.5.3 Ferramentas interativas e dinâmicas

Outra vantagem significativa dos sistemas de RV e RM é sua interatividade dinâmica. Brun et al. (BRUN et al., 2019) compararam hologramas de RM a modelos estáticos impressos em 3D, destacando o potencial dos hologramas para oferecer interação em tempo real, como dimensionamento, rotação e corte de modelos cardíacos. Lopes et al. (2018) (LOPES et al., 2018) enfatizaram de forma semelhante a importância de ferramentas interativas para marcação de lesões e medições de pólipos em um sistema de colonografia por RV, permitindo que os usuários interajam com o modelo em tempo real, melhorando a velocidade e a precisão do diagnóstico de câncer colorretal.

Além disso, Jeising et al. (2024) (JEISING et al., 2024) mostraram como a RM pode integrar modelos virtuais com ferramentas cirúrgicas do mundo real, permitindo uma abordagem mais imersiva e prática para treinamento e planejamento. Essa combinação de interação física e digital é particularmente importante para a prática cirúrgica, pois permite que os cirurgiões pratiquem em ambientes que imitam de perto as condições do mundo real.

Por outro lado, Deng et al. (2021) (DENG et al., 2021) apontam que a interação

dinâmica, como cortar, girar e apagar estruturas virtuais, permite que os cirurgiões explorem modelos anatômicos em tempo real. Deng et al. destacam especialmente a importância da integração de ferramentas avançadas de visualização, como a dinâmica de fluidos computacional (CFD), em plataformas de RV para procedimentos de DCC. Essas simulações permitem que os cirurgiões visualizem o fluxo sanguíneo em tempo real, aprimorando a tomada de decisões durante o planejamento pré-operatório.

O sistema de RV de Deng et al. também oferece ferramentas de interação com vários usuários, um recurso considerado crucial para o planejamento cirúrgico colaborativo e a educação. Isso se alinha com as descobertas de Lan et al. (2023), que mencionam o potencial da iVR para treinamento e planejamento baseados em equipe, embora essa área permaneça pouco explorada.

3.5.4 Custo-benefício

Uma consideração importante levantada por Brun et al. (2019) (BRUN et al., 2019) é a relação custo-benefício dos hologramas de RM em comparação com os modelos tradicionais impressos em 3D. Embora a impressão 3D possa proporcionar benefícios tangíveis, ela é cara, custando aproximadamente € 7.500 por um único modelo. Em contraste, os hologramas podem fornecer percepções anatômicas semelhantes com maior flexibilidade e a um custo menor. Essa consideração torna os sistemas de RV e RM mais acessíveis, não apenas para grandes instituições médicas, mas também para hospitais menores que talvez não tenham condições de arcar com o uso constante da tecnologia de impressão 3D.

3.5.5 Benefícios específicos para o cirurgião

A revisão sistemática de Lan et al. (2023) (LAN et al., 2023) enfatiza que, embora a iVR possa não afetar significativamente os resultados clínicos imediatos (por exemplo, tempo cirúrgico, perda de sangue), ela tem um impacto positivo marcante nos resultados específicos do cirurgião, como confiança, formulação de estratégia cirúrgica e visualização geral da anatomia. Isso é fundamental porque cirurgiões mais bem preparados podem levar a melhores resultados ao longo do tempo, mesmo que os benefícios não sejam imediatamente observáveis em métricas clínicas de curto prazo.

3.5.6 Experiência do usuário e design de interface

A experiência do usuário é outro elemento fundamental discutido nesses estudos. Brun et al. (BRUN et al., 2019) e Lopes et al. (LOPES et al., 2018) destacaram a importância de criar interfaces intuitivas e fáceis de usar que facilitem a interação com modelos 3D complexos. Brun et al. descobriram que os usuários mais jovens e as participantes do

sexo feminino classificaram a usabilidade do sistema de RM de forma mais alta do que os usuários mais velhos e os participantes do sexo masculino, um achado que pode estar ligado a diferenças nas habilidades espaciais e no conforto com novas tecnologias. Isso ressalta a importância de projetar sistemas que atendam a uma ampla gama de usuários, garantindo curvas de aprendizado mínimas e interfaces fáceis de navegar.

3.5.7 Desafios e direções futuras

Embora as tecnologias atuais de RV e RM sejam muito promissoras, ainda existem vários desafios. Hombeck et al. (2022) (HOMBECK et al., 2022) levantaram preocupações sobre a possibilidade de erros de julgamento na estimativa de distância e forma em ambientes virtuais. Embora a RV ofereça visão estereoscópica, ainda há a possibilidade de os usuários subestimarem as distâncias, o que pode ter sérias implicações para tarefas médicas baseadas em precisão, como a cirurgia. Isso ressalta a necessidade de pesquisas contínuas para otimizar os sistemas de RV para uso médico, garantindo que as visualizações sejam precisas e confiáveis para a tomada de decisões clínicas.

Além disso, Stephenson et al. (2022) (STEPHENSON et al., 2022) apontaram a necessidade de mais validação das ferramentas de RV para fazer medições menores e mais precisas, especialmente em casos de DCC pediátrica. A abordagem dessas limitações será crucial para a realização total do potencial da RV e da RM em diagnósticos médicos e cirurgias.

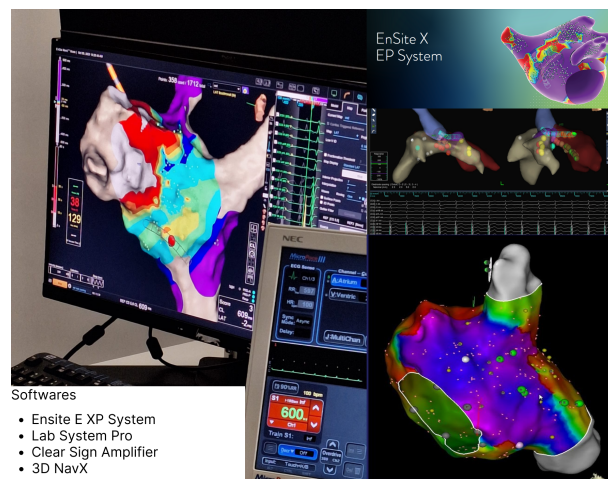


Figura 15 – Softwares usados no Hospital Santa Marta.

valiosas por meio de entrevistas e demonstrações cirúrgicas em tempo real. Durante essas entrevistas e observações, vários aspectos centrais do processo cirúrgico e das ferramentas de software foram discutidos, destacando áreas em que a realidade virtual (RV) poderia aprimorar o planejamento e a execução cirúrgica.

A operação observada envolveu o tratamento da síndrome de Wolff-Parkinson-White (WPW) e taquicardia de reentrada nodal atrioventricular (AVNRT). Durante todo o procedimento, documentamos as principais ferramentas de software usadas por Sérgio, concentrando-nos em sua eficácia no tratamento de defeitos cardíacos. Essas ferramentas, juntamente com seus usos específicos, estão detalhadas na Figura 15. A operação destacou os principais desafios, especialmente a necessidade de técnicas de visualização mais intuitivas e imersivas, que nosso protótipo de RV pretende resolver.

4.2.1 Principais pontos das entrevistas

Sérgio enfatizou vários pontos importantes durante nossas discussões, que influenciaram diretamente o desenvolvimento do protótipo de RV. Alguns dos principais pontos incluem:

- Ausência de RM/CT em todos os casos: Dr. Sérgio Laranjo destacou que nem todos os casos oferecem acesso a imagens de RM ou TC, especialmente em ambientes com recursos mais limitados. Isso limita a quantidade de dados pré-operatórios disponíveis para os cirurgiões.
- Complexidade das doenças cardíacas e o papel da RV: Para doenças cardíacas complexas, especialmente aquelas que exigem uma compreensão precisa das estruturas internas, a RV oferece vantagens significativas. Dr. Sérgio Laranjo compartilhou um exemplo usando o Medsim, uma ferramenta de treinamento neurocirúrgico baseada em RV, para ilustrar como a RV também pode ser transformadora na

cirurgia cardíaca. Ele enfatizou que as ferramentas 2D tradicionais muitas vezes não conseguem transmitir as relações espaciais entre as estruturas que os cirurgiões precisam para um planejamento cirúrgico preciso.

- TAC (Tomografia Computadorizada): Um tipo de dado crítico identificado por Dr. Sérgio Laranjo foi a TAC, ou tomografia computadorizada, que fornece estruturas anatômicas detalhadas. A transformação de dados de TAC em modelos 3D permite que os cirurgiões entendam melhor o posicionamento de tecidos e órgãos críticos.

4.2.2 Desafios e possíveis soluções no planejamento pré-operatório

Um desafio observado durante as entrevistas foi o horário inconsistente das reuniões pré-operatórias, onde os casos dos pacientes são discutidos. De acordo com Sérgio, essas reuniões geralmente são realizadas às quartas-feiras, embora a programação exata seja variável. Para garantir a colaboração oportuna, melhorias futuras poderiam incluir um recurso que permita o planejamento cirúrgico em tempo real ou assíncrono, possibilitando que os cirurgiões compartilhem e revisem modelos de RV remotamente.

Outro desafio central envolve a compreensão da capacidade ventricular e da morfologia da válvula. Sérgio descreveu como os cirurgiões geralmente precisam medir o diâmetro, os raios e os volumes de várias estruturas cardíacas, incluindo válvulas malformadas, para projetar tratamentos eficazes. Por exemplo, em determinados procedimentos, como a cirurgia de Rastelli, é fundamental conhecer a distância exata das estruturas críticas, como a via de saída. A RV pode facilitar essas medições ao fornecer modelos 3D precisos, oferecendo aos cirurgiões uma compreensão mais detalhada desses parâmetros antes da cirurgia.

Sérgio enfatizou também a importância das ferramentas de medição no aplicativo de RV. Ele mencionou especificamente que as medições precisas de distâncias, diâmetros e espessuras são essenciais para distinguir entre tecidos saudáveis e defeituosos. Como ele disse, “um cirurgião precisa saber o que cortar e o que não cortar”. Isso enfatiza a necessidade de precisão nas ferramentas de RV para simular as dimensões exatas das estruturas anatômicas, reduzindo o risco de erros durante a cirurgia.

4.2.3 Requisitos mínimos para o aplicativo de RV

Durante as entrevistas, Sérgio destacou os principais recursos que seriam necessários para que o protótipo de RV fosse eficaz no planejamento cirúrgico. Esses recursos incluem: (1) Integração de dados de TC: A capacidade de visualizar dados de TC em um formato 3D é essencial para compreender a estrutura detalhada do coração. (2) Manipulação do modelo 3D: A capacidade de interagir com o modelo 3D movendo, girando e dimensionando o coração é essencial para obter várias perspectivas e realizar medições. (3) Ampliação /

diminuição: A ampliação ou diminuição do modelo é necessário para examinar de perto estruturas específicas ou para obter uma visão geral de todo o modelo do coração. (4) Recorte: Os planos de recorte são necessários para cortar o modelo do coração e revelar as estruturas internas, fornecendo aos cirurgiões percepções detalhadas de áreas que, de outra forma, permaneceriam ocultas. (5) Etiquetas e anotações: A capacidade de adicionar marcas e anotações diretamente ao modelo 3D ajuda os cirurgiões a marcar áreas importantes, observar distâncias ou destacar regiões de interesse durante o planejamento pré-operatório. Todos esses recursos, exceto as anotações, foram implementados na versão final do protótipo, e a tabela abaixo resume o status de implementação.

	Requisito	Implementado
1	Integração de dados TAC	Sim
2	Manipulação de modelo 3D	Sim
3	ampliação/redução de zoom	Sim
4	Recorte	Sim
5	Etiquetas	Sim
6	Anotações	Não

Tabela 2 – Funcionalidades mínimas exigidas.

4.2.4 Melhorias futuras baseadas nas sugestões

Foram identificados vários aprimoramentos futuros para o protótipo de RV:

- Aprimoramento da interface do usuário e da interatividade: Embora o protótipo atual ofereça funções básicas, como ampliação e manipulação do modelo, Sérgio sugeriu adicionar recursos mais avançados, como colaboração em tempo real entre vários usuários. Isso poderia facilitar as discussões pré-operatórias entre os cirurgiões.
- Integração de IA para segmentação automática: Sérgio também apontou o potencial da integração da inteligência artificial (IA) para segmentar automaticamente as estruturas cardíacas, ajudando os cirurgiões a avaliar rapidamente a condição do coração sem segmentar manualmente cada seção.
- Integração de dispositivos: Outra melhoria importante seria a capacidade de integrar e visualizar dispositivos como marca-passos ou implantes cardíacos diretamente no modelo de RV. Isso permitiria que os cirurgiões avaliassem o ajuste e a função desses dispositivos em relação à anatomia específica do paciente.

4.2.5 Esboços

Depois de obter uma sólida compreensão do problema que pretendíamos resolver, iniciamos o processo de criação de esboços desenhados à mão e digitais para conceituar o

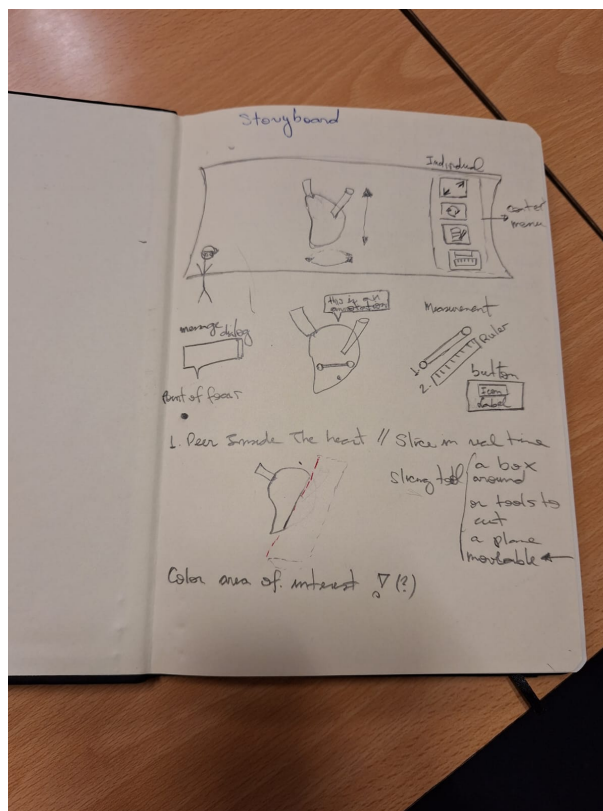


Figura 16 – Esboços à mão.

design e a funcionalidade do sistema. Esses esboços serviram de base para o desenvolvimento do protótipo, permitindo-nos visualizar e refinar os principais recursos no início da fase de projeto.

Inicialmente, criamos esboços desenhados à mão para mapear as funções essenciais do sistema, como mover, girar, recortar, aumentar e diminuir o zoom e medir distâncias lineares dentro do modelo 3D (conforme ilustrado na Figura 16). Esses esboços iniciais nos ajudaram a identificar as interações fundamentais necessárias para a manipulação eficaz do modelo 3D.

Após os esboços desenhados à mão, usamos o Figma para desenvolver diagramas interativos e esquemas de botões mais detalhados (Figura 17 e 18). Esses esboços digitais mostraram o design da interface do usuário, incluindo botões para executar tarefas como medição linear, saída do modelo, criação de áreas de raio de volume curvo e visualização de um mapa do coração. Os esboços do Figma eram de natureza iterativa, atualizados continuamente ao longo da tese à medida que incorporávamos as sugestões dos cirurgiões e supervisores.

O processo de esboço, tanto manual quanto digital, foi uma parte crucial do design do sistema. Ele nos permitiu evoluir a interface e as funcionalidades ao longo do tempo, garantindo que o protótipo final estivesse alinhado às necessidades do usuário e aos requisitos médicos. Alguns botões e funcionalidades, como “medir”, “girar” e “mover”,

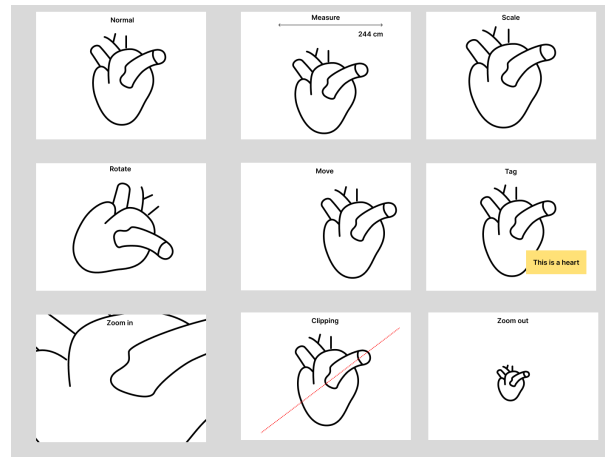


Figura 17 – Esboços com o Figma.

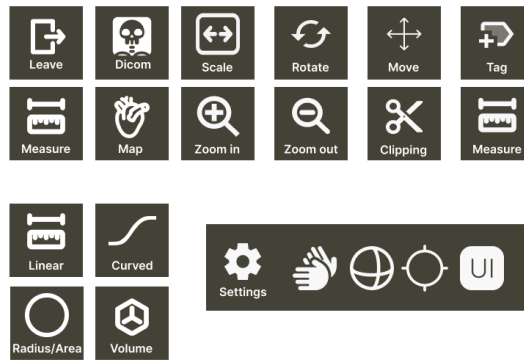


Figura 18 – Esboços de botões para o menu com o qual o usuário interage.

estavam presentes desde o início, enquanto outros surgiram à medida que o projeto avançava, refletindo a natureza iterativa e centrada no usuário do nosso processo de desenvolvimento.

5 Desenvolvimento do Trabalho

Este capítulo detalha o hardware e o software usados para desenvolver o protótipo, a implementação, os testes e a avaliação..

5.1 Tecnologias Utilizadas

5.1.1 *Hardware*

O desenvolvimento do protótipo utilizou um laptop Acer A515-52G-577T equipado com uma GPU GeForce MX130. Essa configuração forneceu a potência de processamento necessária para executar e testar o aplicativo. Para o componente de RV, os óculos de realidade aumentada Meta Quest 2 e Meta Quest 3 foram selecionados devido à sua ampla adoção e custo-benefício. Embora o laptop não suportasse nativamente os aplicativos de desenvolvimento para esse dispositivo de RV, o desenvolvimento e os testes foram facilitados com o uso do recurso de compilação direta do Unity. Essa solução alternativa permitiu a integração e o teste do aplicativo de RV mesmo com suporte nativo limitado. Além disso, o aplicativo foi projetado para ser compatível com outros óculos de RV por meio do novo sistema de controle do Unity, permitindo uma aplicabilidade mais ampla com vários controladores e óculos compatíveis com o Unity.

5.1.2 *Software*

Os requisitos de *software* para o desenvolvimento do protótipo incluíram ferramentas para o processamento de imagens 2D e a construção do modelo 3D. Os dados de imagem 2D, adquiridos do Hospital Santa Martha, foram essenciais para a reconstrução do modelo. O conjunto de dados foi completamente anonimado para proteger a privacidade do paciente, e os comentários dos cirurgiões do hospital teve um papel importante no refinamento do protótipo durante todo o seu desenvolvimento.

Para criar o modelo 3D, foi utilizado o aplicativo de código aberto 3D Slicer. Essa ferramenta facilitou a segmentação das imagens 2D para reconstruir o modelo anatômico. Várias estruturas cardíacas, incluindo a aorta, os ventrículos esquerdo e direito, os átrios esquerdo e direito, a artéria pulmonar, a veia cava e os ossos, foram segmentadas e rotuladas. Após a segmentação, as ferramentas do 3D Slicer foram usadas para criar um modelo oco do coração. Esse modelo oco permitiu que os usuários navegassem virtualmente dentro do coração, proporcionando uma visão imersiva das estruturas internas e aumentando a capacidade de interagir com o modelo a partir dele. Depois de construir o modelo oco, o

MeshLab foi usado para alinhar o modelo com o sistema de coordenadas, garantindo uma representação espacial precisa.

O modelo final, incluindo as versões completa e oca, foi exportado no formato .obj e importado para o Unity. O Unity forneceu a plataforma para integrar o modelo 3D com elementos e funcionalidades interativos de RV. Essa combinação de *hardware* e *software* permitiu o desenvolvimento de um protótipo de RV que suporta a exploração detalhada e interativa de casos de doenças cardíacas congênitas, facilitando a visualização e o planejamento aprimorados para intervenções cirúrgicas.

5.2 Projeto e Implementação

5.2.1 Visão geral do aplicativo

As figuras 19a e 19b ilustram as principais funcionalidades disponíveis no aplicativo de realidade virtual desenvolvido. A principal diferença entre essas duas interfaces é sua localização em relação ao modelo 3D do coração: A Figura 19a mostra o menu fora do modelo, enquanto a Figura 19b exibe o menu usado quando o usuário está dentro do modelo.

De modo geral, o aplicativo fornece ao usuário ferramentas essenciais, como mover, girar, dimensionar e recortar o modelo 3D, que são fundamentais para a interação com o ambiente virtual. Além disso, foram implementadas ferramentas mais avançadas, incluindo a capacidade de exibir imagens DICOM, realizar vários tipos de medições (linear, área, curva e volume), navegar dentro do modelo e personalizar a forma como as medições são realizadas (por exemplo, usando raycasting, posicionamento da mão etc.).

Quando o usuário está dentro do modelo 3D (Figura 19b), a interface oferece um conjunto mais simplificado de ferramentas voltadas para a exploração interna do coração. Essas ferramentas incluem recursos de medição, acesso a cortes de imagens 2D e um recurso de mini-mapa que ajuda na navegação e localização dentro do modelo. Esse conjunto de ferramentas focado garante que os usuários possam analisar e compreender com eficiência as estruturas internas do coração sem sobrecarregá-los com muitas opções.

5.2.2 Ferramentas básicas

Os componentes fundamentais de nosso protótipo de realidade virtual incluem rotação, dimensionamento e recorte do modelo 3D, juntamente com a reconstrução do modelo 3D a partir de imagens 2D, como tomografias computadorizadas ou ressonâncias magnéticas, conforme destacado por (BRUN et al., 2019). Esses recursos básicos são essenciais para a interação com o modelo em um ambiente virtual, permitindo que os cirurgiões manipulem e explorem a anatomia do coração de forma eficaz.

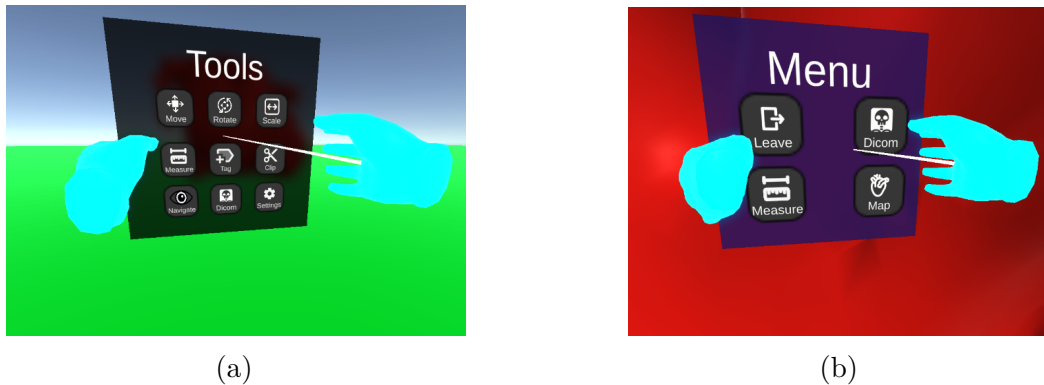


Figura 19 – (a) Menu principal fora do modelo. (b) Menu secundário dentro do modelo.

Normalmente, essas funções são implementadas por meio de gestos com as mãos ou pelo uso de um controle. Em nosso projeto, o controle esquerdo é utilizado para essas operações básicas, com o thumbstick controlando o movimento e a rotação, e o gesto de seleção ou pinça permitindo a rotação e o deslocamento em 3D. Esse modelo de interação intuitivo permite que os usuários manipulem perfeitamente o modelo 3D do coração.

Um dos principais recursos que implementamos é a ferramenta de recorte, que é essencial para visualizar as estruturas internas do coração sem precisar navegar dentro do modelo. Para isso, usamos uma combinação do gráfico de sombreamento e um plano de recorte. A posição do plano em relação ao modelo 3D determina quais partes do coração são visíveis, permitindo uma visão clara e precisa da anatomia interna, conforme demonstrado na Figura 20.

Essa ferramenta de recorte é particularmente importante para os cirurgiões, pois permite que eles inspecionem áreas específicas do coração que podem estar obscurecidas pelos tecidos circundantes no modelo completo. Com um simples ajuste do plano, eles podem cortar o modelo e examinar as estruturas internas de vários ângulos, aumentando consideravelmente a capacidade de diagnosticar e planejar o tratamento.

5.2.3 Formas de medição

Os métodos de medição em nosso aplicativo de realidade virtual oferecem aos usuários três opções principais: Ray Cast, Hand Position e Prefabs. Esses métodos oferecem flexibilidade, dependendo do tipo de medição necessária, seja ela linear, curva, área ou volume.

O método de *ray cast*, que está disponível para todos os tipos de medições, funciona direcionando uma esfera virtual ao longo do caminho da mão do usuário. Quando o usuário pressiona o botão de seleção, o raio é lançado da mão em direção ao modelo, e a medição é feita no primeiro ponto de colisão. Esse método é particularmente útil para medições precisas em que pontos específicos de início e fim precisam ser selecionados.

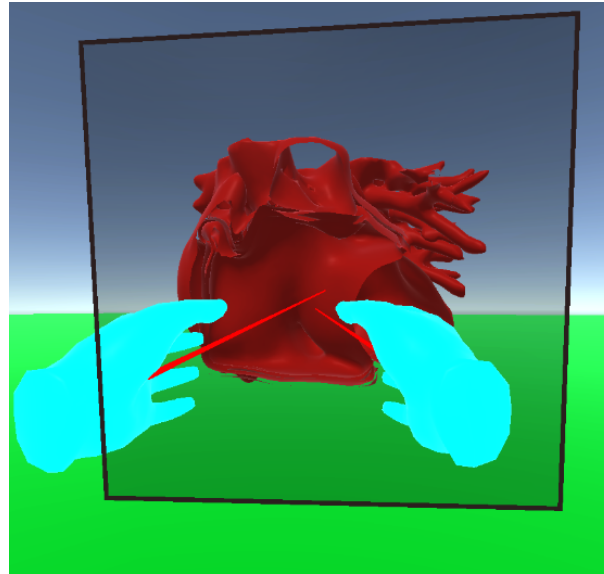


Figura 20 – Corte do coração com um plano.

Para medições curvas e lineares, os usuários podem optar pelo método da posição das mãos. Ao contrário do *ray cast*, esse método não depende de colisores. Em vez disso, ele registra as posições físicas das mãos do usuário quando o botão de seleção é pressionado. Isso permite que os usuários tracem intuitivamente o comprimento ou a forma da área que estão medindo, tornando-o ideal para estruturas anatômicas mais complexas.

Nos casos em que são necessárias medições de volume e área, o método *prefabs* é empregado. Esse método usa um conjunto de objetos 3D, como esferas ou círculos, que podem ser redimensionados usando o botão do polegar no controle esquerdo. O usuário ajusta o tamanho dessas formas pré-fabricadas para corresponder às dimensões do tecido ou defeito que está medindo. Após a conclusão da medição, o usuário pode manter pressionado o botão de menu no controlador direito para exibir as informações da medição, conforme mostrado na Figura 21. Essa exibição também inclui uma opção para um modelo de coração sem escala, garantindo que as distâncias medidas permaneçam consistentes independentemente de qualquer escala ou transformação aplicada ao modelo, seguindo as diretrizes descritas por (WHEELER et al., 2019).

Ao oferecer esses diversos métodos, nosso aplicativo garante que os usuários possam realizar uma ampla gama de medições com precisão e adaptabilidade, atendendo às necessidades complexas do tratamento de doenças cardíacas congênitas e outros procedimentos cardíacos complexos.

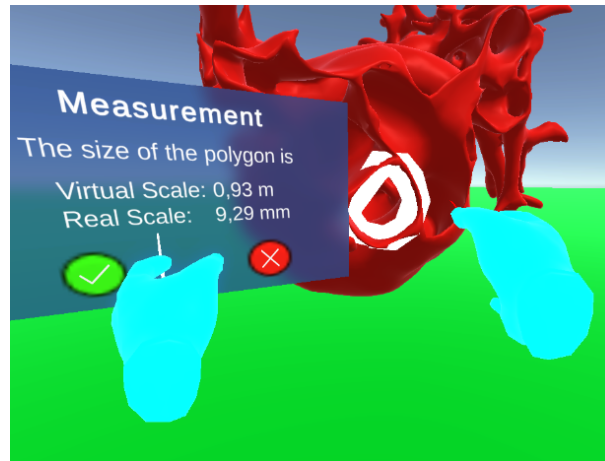


Figura 21 – Exibição da medida.

5.2.4 Ferramentas de medição

5.2.4.1 Medição linear

As medições lineares estão entre as técnicas mais usadas dentro e fora dos ambientes de realidade virtual, principalmente porque são fáceis de executar. Essas medições envolvem simplesmente o cálculo da distância entre dois pontos. Por exemplo, em (DAI et al., 2013), os pesquisadores desenvolveram widgets de linha 3D e planos para medir distâncias e ângulos em renderizações de volume, concentrando-se especificamente em válvulas destacadas. As medições lineares foram rigorosamente validadas, mostrando um desvio médio de $0,815 \pm 0,665$ mm das medições do mundo real, o que é significativamente mais preciso do que as medições de imagens 2D, que exibiram um desvio de $1,753 \pm 3,563$ mm (LAN et al., 2023). Além disso, essas medições demonstraram alta precisão com um baixo Erro Percentual Absoluto Médio (MAPE) de 1,6% para a TC e a RM, conforme confirmado por um estudo com *phantom* (STEPHENSON et al., 2022).

Devido à sua versatilidade inerente - uma vez que há várias maneiras de criar essas medições -, ainda não está claro qual método é o mais ideal do ponto de vista cirúrgico. Nossa hipótese é que o método mais apropriado envolveria o uso de ambas as mãos, como mostrado na Figura 22, porque essa abordagem imita de perto os procedimentos cirúrgicos comuns. No entanto, a literatura frequentemente apresenta o uso de renderização de linha, como demonstrado por (DENG et al., 2021), em que os usuários medem artefatos desenhando um traço verde entre dois pontos finais. Além disso, a necessidade de explorar mais as técnicas de medição é destacada em (BRUN et al., 2019).

Em nosso protótipo, apresentamos três métodos distintos para realizar medições lineares. O primeiro método, que é mais padrão em aplicativos de realidade virtual, envolve o uso de um *raycast* em que o usuário lança duas esferas nos locais desejados. O segundo método utiliza as duas mãos; quando o usuário estiver pronto, ele pode segurar o botão de menu na mão direita para exibir a medição. O terceiro método permite que o usuário

pressiona o botão de seleção em cada controlador, considerando a posição do respectivo controlador em vez do ponto para o qual a mão está apontando. Esse método também requer o pressionamento do botão de menu da mão esquerda para finalizar a medição. Depois que o usuário confirma a medição, o aplicativo exibe tanto a medição virtual (que usa a unidade padrão do Unity, metros) quanto a medição em escala real, que é crucial para aplicações clínicas.

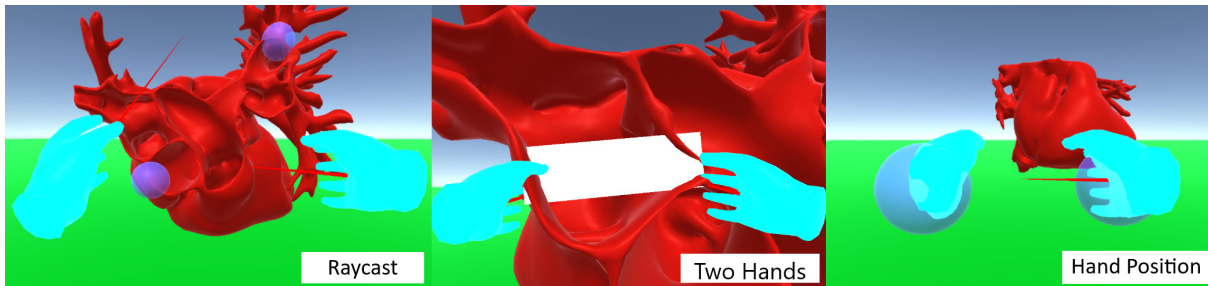


Figura 22 – Medição linear.

5.2.4.2 Medição de curvas

Semelhante às medições lineares, as medições curvas em nosso protótipo são facilitadas por dois métodos principais: o método da esfera e o posicionamento da mão. Os usuários podem criar marcas em posições selecionadas e, uma vez estabelecido o caminho desejado, podem pressionar e manter pressionado o botão de menu no controlador esquerdo para exibir a medição ao longo do caminho curvo formado por essas marcas. Embora o conceito de medição curva não seja totalmente novo - o [KAMIYA et al.](#) implementou uma abordagem semelhante, obtendo precisão de medição dentro de 1 mm - nosso método visa ampliar sua complexidade introduzindo possibilidades de quantificação de válvulas, especialmente em estruturas como a válvula mitral, a válvula pulmonar, a válvula aórtica, o anel e a válvula tricúspide.

Essas medições avançadas são normalmente realizadas em um software especializado, como o SlicerHeart, uma variante do 3D Slicer projetada com ferramentas específicas para aplicações cardíacas. No entanto, a realização de medições tão detalhadas em um ambiente de realidade virtual, sem o uso de dispositivos de entrada tradicionais, como teclado e mouse, não está bem documentada. Isso representa uma área para aprimoramento futuro em nosso projeto.

A importância dessa ferramenta é ressaltada por seu potencial de minimizar a necessidade de procedimentos invasivos. Ao permitir a personalização precisa dos dispositivos para que se ajustem à configuração anatômica exclusiva do coração de um paciente, a ferramenta pode ajudar os cirurgiões a evitar cortes ou modificações desnecessárias de tecidos saudáveis. Além disso, em procedimentos complexos, como a troca atrial ou o procedimento de Rastelli para tratar a saída dupla do ventrículo direito, a capacidade

de mapear com precisão os caminhos curvos é crucial. Uma simples medição linear pode ser insuficiente e comprometer os resultados dos pacientes, dada a natureza delicada das condições abordadas por esses procedimentos.

5.2.5 Medição de raio/área

Os dispositivos que são introduzidos no coração, como marcapassos e outros implantes, não são apenas caros, mas também delicados e difíceis de posicionar corretamente. Portanto, os cirurgiões precisam garantir que esses dispositivos se encaixem como esperado na vida real. Para ajudar a minimizar os possíveis erros e confirmar a precisão dos cálculos, nosso protótipo inclui uma ferramenta de medição de raio/área, que serve como complemento às medições curvas.

Nesse cenário, os médicos têm duas opções principais. A primeira opção envolve o uso de um modelo pré-fabricado em 3D de uma circunferência que pode ser ajustado em tamanho manipulando-se o botão do polegar no controle da mão esquerda. Isso permite que o cirurgião combine a circunferência precisamente com o local desejado dentro do coração. A segunda opção envolve o posicionamento de três esferas que definem uma circunferência. Depois que o usuário posiciona essas três esferas, o sistema gera automaticamente a medição e ajusta a circunferência ao caminho definido por essas esferas, simplificando o processo para o usuário.

Para calcular a posição e a rotação da circunferência, primeiro definimos dois vetores que representam dois lados de um triângulo formado pelas três esferas:

$$V_1 = P_1 - P_0, \quad (5.1)$$

$$V_2 = P_2 - P_0 \quad (5.2)$$

Em seguida, calculamos o vetor normal n para o plano formado pelos pontos, que é perpendicular ao plano. Isso é feito tomando-se o produto cruzado dos dois vetores V_1 e V_2 :

$$n = V_1 \times V_2 \quad (5.3)$$

Para calcular o centro do círculo, usamos uma propriedade geométrica: o centro está na interseção das bissetrizes perpendiculares dos lados do triângulo. Portanto, primeiro calculamos os vetores perpendiculares às cordas V_1 e V_2 :

$$P_1 = V_1 \times n, \quad (5.4)$$

$$P_2 = V_2 \times n \quad (5.5)$$

O centro do círculo está ao longo desses dois vetores perpendiculares, e calculamos o raio r determinando a distância do centro a um dos pontos:

$$r = \frac{\|V_1 - V_2\|}{2} \quad (5.6)$$

Usando a Lei dos Senos, calculamos o deslocamento do centro a partir do ponto médio das cordas. O ângulo entre P_1 e P_2 fornece o ângulo central:

$$\theta = \text{Angle}(P_1, P_2) \quad (5.7)$$

Depois que o centro e o raio são calculados, o círculo é desenhado usando uma equação paramétrica. Dado que o vetor normal n define o plano do círculo, calculamos dois vetores de base ortogonais, B_1 e B_2 , que definem a orientação do círculo no espaço 3D.

Os vetores da base são calculados como:

$$B_1 = \frac{n \times (0, 1, 0)}{|n \times (0, 1, 0)|}, \quad (5.8)$$

$$B_2 = n \times B_1 \quad (5.9)$$

Os pontos no círculo são então computados usando:

$$P(\theta) = C + r * (\cos(\theta)) * B_1 + \sin(\theta) * B_2 \quad (5.10)$$

Onde:

- C é o centro do círculo.
- R é o raio.
- θ é o ângulo que varia entre 0 e 2π .
- B_1 e B_2 são os vetores da base ortogonal do plano.

No momento, somente o método raycast está disponível para o posicionamento das esferas. Nesse método, o usuário “dispara” as esferas para o local desejado usando o controlador. Quando as três esferas estão no lugar, o software calcula o raio e a área do círculo ajustado com base nas posições das esferas, fornecendo uma medida essencial para determinar se o implante se ajustará corretamente.

Essa ferramenta é particularmente útil para procedimentos que envolvem dispositivos caros e complexos, pois ajuda a garantir que todos os cálculos estejam corretos antes de qualquer intervenção física. Ao permitir várias medições no mesmo local, os cirurgiões

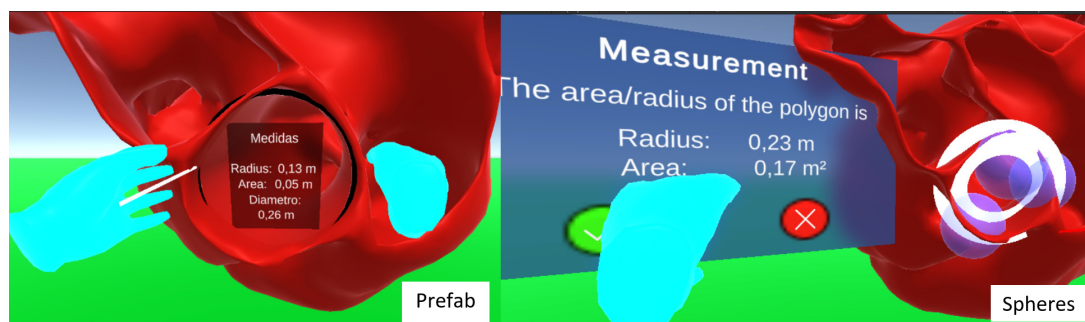


Figura 23 – Medição de raio.

podem verificar seu trabalho, reduzindo assim a probabilidade de erros e aumentando as chances de sucesso na implantação do dispositivo. Para o caso da esfera, quando o usuário coloca 3 esferas, ele gera automaticamente a medida e as cenas do círculo para facilitar o uso.

5.2.6 Medição de volume

Para a medição de volume, nosso protótipo oferece aos cirurgiões duas opções principais: o método pré-fabricado e o método de esfera, conforme mostrado na figura 24. O método pré-fabricado gera uma esfera na frente do usuário, que pode ser aumentada ou diminuída usando o botão do polegar no controlador esquerdo. Esse método é simples e espelha a funcionalidade encontrada no software 2D, o que o torna familiar para muitos usuários e fácil de implementar. No entanto, embora simples, ele pode não ter a precisão necessária para um planejamento cirúrgico complexo.

Por outro lado, o método de esfera envolve a colocação de uma série de esferas pelo usuário para delinear o volume de interesse. Esses pontos são então usados para criar um modelo convexo por meio do algoritmo de casco convexo, que forma uma malha em torno do conjunto finito de pontos fornecidos pelo usuário. O volume é então calculado a partir dessa malha usando o método de cálculo de volume 3D descrito por Zhang et al. (2001) (ZHANG; CHEN, 2001). Essa abordagem oferece uma precisão significativamente maior em comparação com o método pré-fabricado.

5.2.6.1 Salvar medições

Quando os usuários clicam no botão verde na tela de medição (como mostrado na Figura 21), a medição é automaticamente salva para revisão posterior. Esse recurso foi projetado para reduzir o tempo e o esforço que os cirurgiões precisariam gastar para refazer as mesmas medições, garantindo que os dados críticos sejam preservados para uma análise mais aprofundada posteriormente. Na próxima fase de desenvolvimento, planejamos adicionar uma funcionalidade que permita aos usuários navegar diretamente para a posição em que a medição foi feita. Esse aprimoramento não apenas salvará os dados de medição,

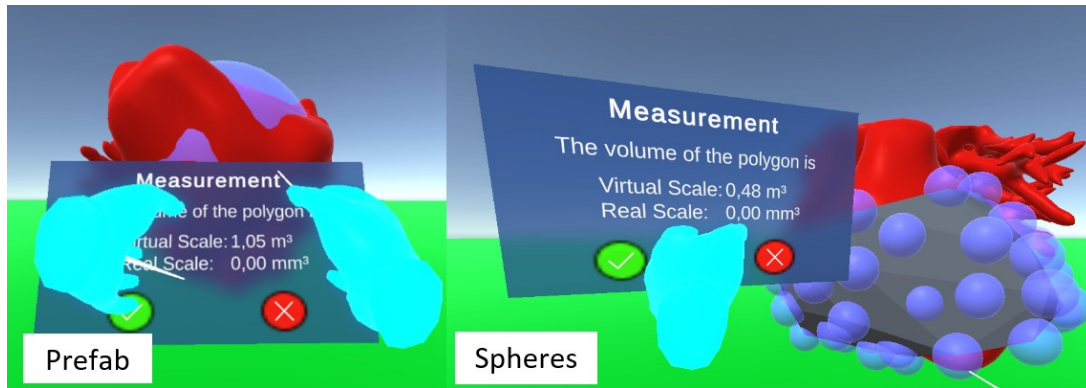


Figura 24 – Medição de volume.

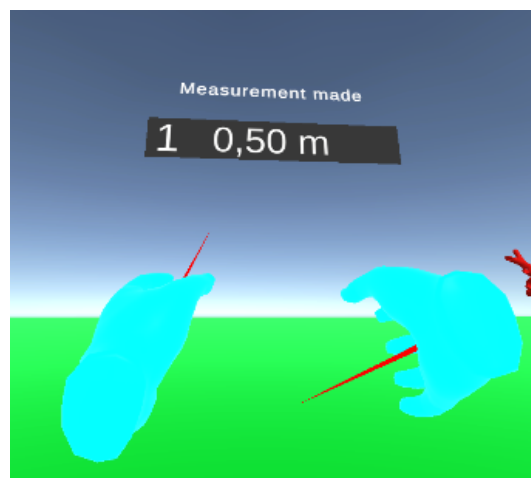


Figura 25 – Medição salva.

mas também registrará e exibirá a posição exata dentro do modelo, fornecendo uma ferramenta mais abrangente para planejamento e revisão cirúrgica.

5.2.6.2 Dentro do coração

Para implementar o recurso de navegação interna, o requisito inicial era criar um modelo oco usando o 3D Slicer, com uma espessura de casca de 1 mm. Essa etapa é fundamental, pois permite que o usuário navegue pelo interior do modelo. O usuário, representado pelo XR Origin, foi reduzido para 0,01 cm para caber dentro do modelo. Além disso, antes de o usuário entrar no modelo, o modelo é reduzido à sua escala original para garantir que as medidas sejam tão precisas quanto seriam no mundo real. Esse dimensionamento é importante para manter a precisão nas simulações. O campo de visão (FOV) da câmera também foi ajustado devido à proximidade das mãos com a câmera, o que poderia distorcer a perspectiva do usuário.

A motivação para criar esse recurso decorre da necessidade de entender a estrutura interna do coração para determinados procedimentos e doenças. Essa compreensão detalhada é essencial para o planejamento eficaz do tratamento. Para ajudar ainda mais o

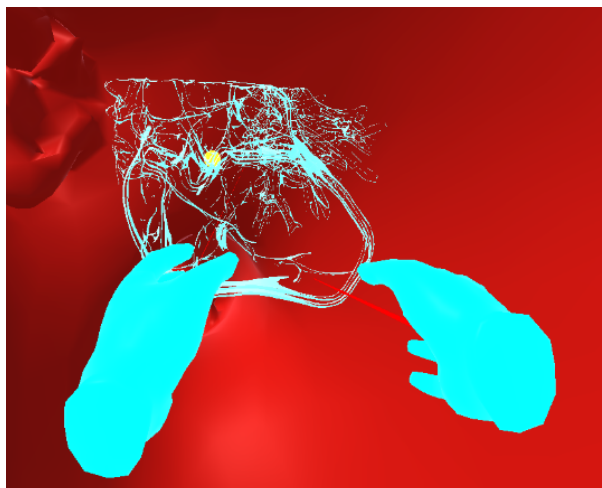


Figura 26 – Tela do minimapa.

usuário, ferramentas como a exibição de imagens DICOM e um minimapa foram integradas ao sistema. O minimapa, conforme mostrado na Figura 26, ajuda a evitar que o usuário fique desorientado dentro do modelo e auxilia na compreensão do contexto espacial do que está sendo observado.

5.2.6.3 Imagens Dicom

Em nosso aplicativo, os usuários têm duas opções para visualizar imagens Dicom, cada uma delas projetada para melhorar a compreensão da estrutura do coração em diferentes contextos.

A primeira opção está disponível fora do modelo do coração, onde os usuários podem acessar componentes para os eixos Axial, Coronal e Sagital. Isso permite que os médicos compreendam rapidamente a estrutura geral do coração, fornecendo uma visão geral abrangente de várias perspectivas. Esses cortes podem ser cruciais para o diagnóstico e o planejamento do tratamento, pois oferecem uma visão detalhada de diferentes seções transversais do coração.

A segunda opção está disponível quando o usuário está dentro do modelo do coração. Nesse modo, as imagens Dicom são exibidas dinamicamente com base na localização do usuário dentro do coração. Essa exibição dependente do local serve como uma forma de localização, ajudando os usuários a se orientarem dentro da complexa anatomia do coração. Ela permite uma compreensão mais imersiva e contextualmente relevante das áreas específicas que estão sendo examinadas, auxiliando na análise detalhada e no planejamento cirúrgico.

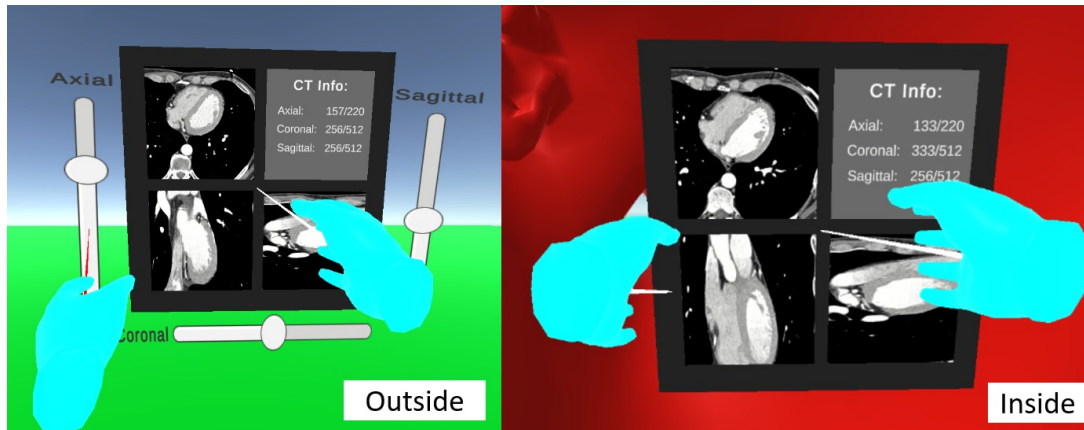


Figura 27 – Imagens Dicom em geral.

5.2.7 Realidade mista (MR)

O aplicativo desenvolvido oferece uma funcionalidade inovadora que permite ao usuário alternar entre um ambiente de realidade virtual totalmente imersivo e uma experiência de realidade mista (MR). Essa transição é feita por meio de um botão simples, intuitivamente localizado no controlador.

Na realidade virtual imersiva, como mostrado na Figura 28a, o usuário interage com um ambiente completamente virtual, sem qualquer visualização do mundo físico ao seu redor. Essa modalidade é ideal para análises detalhadas e exploração profunda de modelos 3D, como o interior do coração, sem distrações externas.

Ao pressionar o botão e alternar para a realidade mista (Figura 28b), o ambiente virtual é integrado ao mundo físico utilizando a funcionalidade de passthrough do Meta Quest 3. Nesta modalidade, o modelo tridimensional do coração é embutido no espaço físico ao redor do usuário, permitindo que ele visualize e manipule o modelo enquanto mantém a percepção do ambiente real.

Essa funcionalidade é especialmente útil para aplicações médicas que demandam a colaboração entre múltiplos profissionais em um ambiente físico compartilhado, ou para simulações onde o contexto do ambiente real é relevante para a análise.

A Figura 28a ilustra o usuário em um estado de imersão total, e a Figura 28b demonstra o modelo cardíaco integrado ao ambiente real na experiência de realidade mista.

5.3 Testes e Avaliação

5.3.1 Rascunho de um estudo

Um estudo foi projetado para explorar vários aspectos importantes desse aplicativo, com foco especial nos métodos preferidos dos cirurgiões para fazer medições, nas diferenças

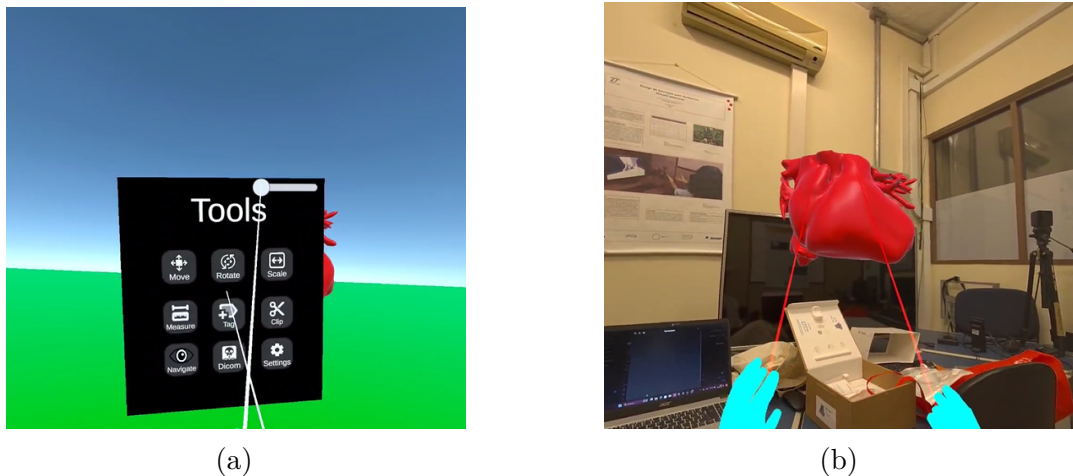


Figura 28 – (a) Usuário totalmente imerso. (b) Usuário sob realidade mista.

de escala ao interagir dentro e fora do modelo e se essas diferenças afetavam a precisão das medições. Além disso, o estudo teve como objetivo reunir percepções sobre possíveis melhorias futuras, a eficácia com que o aplicativo ajuda os cirurgiões a entender as condições clínicas, a diferença de compreensão entre o uso de aplicativos 2D tradicionais como o Slicer e essa ferramenta de realidade virtual, o impacto dessas medições na tomada de decisões cirúrgicas, a probabilidade de os cirurgiões adotarem esse aplicativo no futuro e a importância da capacidade de navegar dentro do modelo.

No total, foram desenvolvidas cerca de 30 perguntas para abordar sistematicamente essas áreas de interesse. No entanto, devido a conflitos de agenda e restrições de tempo com os cirurgiões participantes, o estudo não foi realizado e foi programado para uma investigação futura. O questionário para esse estudo pode ser visualizado no apêndice A. O projeto do estudo foi amplamente inspirado no artigo (PUSHPARAJAH et al., 2021), dada sua relevância para o foco da pesquisa e sua abordagem metodológica.

6 Considerações Finais

6.1 Realizações

Nesta tese, criamos um protótipo de realidade virtual especificamente concebido para a área médica, com enfoque em aplicações cardiovasculares. Esta ferramenta é capaz de executar uma vasta gama de funções essenciais para interações básicas e avançadas com modelos cardíacos 3D derivados de dados de pacientes. Estas funções incluem operações fundamentais, como mover, rodar, dimensionar e recortar o modelo, bem como tarefas de medição mais sofisticadas, como o cálculo de distâncias lineares, trajetórias curvas, volumes, áreas e raios, todas adaptadas para utilização com modelos de renderização de superfícies ocas. A incorporação destas diversas funcionalidades faz deste protótipo uma ferramenta versátil no planejamento e execução de procedimentos cardíacos complexos.

Uma das características de destaque desta aplicação é a capacidade de observar e navegar no interior do modelo cardíaco, o que é particularmente valioso quando se lida com defeitos internos que não são facilmente visualizados a partir de perspectivas externas. Esta funcionalidade foi desenvolvida através da criação de um modelo oco com uma escala precisa para manter a exatidão das medições no interior do ambiente virtual. A capacidade de exploração interior é complementada por ferramentas como um minimapa e a integração de imagens DICOM, que fornecem informações contextuais adicionais para ajudar os utilizadores a manter a sua orientação e a compreender melhor as nuances estruturais do coração. Esta funcionalidade não é apenas uma conquista técnica, mas responde a uma necessidade crítica em cardiologia, onde a compreensão das intrincadas estruturas internas do coração é frequentemente crucial para o diagnóstico e tratamento de doenças como os defeitos cardíacos congênitos.

A aplicação também suporta uma variedade de métodos de medição, atendendo a diferentes necessidades clínicas. Os cirurgiões podem escolher entre a utilização de moldes de raios, posicionamento manual ou pré-fabricados, consoante a tarefa de medição específica. Por exemplo, as medições lineares, que se encontram entre as mais utilizadas, podem ser efetuadas utilizando o ray casting para projetar esferas no modelo ou utilizando diretamente as posições das mãos. As medições curvas, que são cruciais para avaliar estruturas como vasos sanguíneos ou os percursos de incisões cirúrgicas, podem ser efetuadas marcando pontos ao longo de um percurso e calculando a distância total. As medições de volume, essenciais para quantificar os espaços dentro do coração ou o tamanho das estruturas cardíacas, estão disponíveis através de pré-fabricados ou utilizando o algoritmo de casco convexo para criar uma malha 3D que represente com precisão o espaço que está a ser medido. Estes métodos variados proporcionam flexibilidade e precisão, permitindo que a

aplicação seja adaptada a uma vasta gama de cenários cirúrgicos.

Além disso, a aplicação foi concebida tendo em conta a sua futura escalabilidade. Está alojada no GitHub (<<https://github.com/guilherme-francisco/thesis-project>>), onde pode ser acedida abertamente para posterior desenvolvimento e normalização, à semelhança da plataforma de código aberto 3D Slicer, que se tornou um elemento básico na imagiologia médica. Ao disponibilizar o código-fonte, esperamos encorajar a colaboração e a inovação nas comunidades médica e de programadores, promovendo o desenvolvimento de novas ferramentas e funcionalidades que possam ser integradas na aplicação para responder a necessidades emergentes na cirurgia cardíaca.

Através de numerosas entrevistas com cirurgiões do Hospital Santa Marta, tornou-se evidente que esta aplicação tem o potencial de reduzir significativamente o tempo e o esforço que os cirurgiões gastam atualmente na preparação das cirurgias. Atualmente, os cirurgiões têm muitas vezes de reconstruir mentalmente modelos 3D do coração a partir de dados de imagens 2D, um processo que consome muito tempo e é propenso a erros. Ao fornecer um modelo 3D preciso e interativo, o nosso protótipo permite que os cirurgiões visualizem o coração de uma forma muito mais próxima da vida real, aumentando a sua compreensão e melhorando potencialmente os resultados cirúrgicos. Isto é particularmente importante em casos que envolvem doenças cardíacas congénitas complexas, em que a compreensão espacial precisa do defeito relativamente às estruturas circundantes é fundamental.

6.2 Próximos passos

Para melhorias futuras, foram identificadas várias áreas importantes. Um dos principais focos será o aprimoramento do gerenciamento da interface do usuário (UI). Atualmente, cada elemento da interface do usuário dentro do aplicativo opera de forma independente, o que complica o processo de adição de novos recursos e a resolução de casos extremos. Um sistema de gerenciamento de IU mais unificado simplificará o desenvolvimento e melhorará a experiência geral do usuário.

Outra área importante para o desenvolvimento é a inclusão de simulações de implantes de dispositivos. Atualmente, o aplicativo não suporta a importação de dispositivos médicos, como o Watchman, dispositivos cardíacos transcaterter ou o Amulet, que estão sendo cada vez mais usados em procedimentos cardíacos. A capacidade de importar e visualizar esses dispositivos no modelo cardíaco forneceria aos cirurgiões uma ferramenta poderosa para o planejamento pré-operatório, permitindo que eles avaliassem melhor o ajuste e a função desses implantes no contexto anatômico específico de cada paciente.

Além disso, é necessário expandir as ferramentas disponíveis para os cirurgiões quando eles estiverem navegando dentro do modelo cardíaco. Embora o conjunto atual de ferramentas ofereça um nível básico de funcionalidade, seu escopo é limitado. Futuras

atualizações poderiam incluir recursos mais avançados, como ferramentas para simulação de procedimentos cirúrgicos, rótulos anatômicos detalhados e interação aprimorada com o modelo para simular vários cenários cirúrgicos.

Por fim, a possibilidade de adicionar a funcionalidade multijogador ao aplicativo poderia ser transformadora. A cirurgia geralmente é um processo colaborativo, especialmente em casos complexos em que vários cirurgiões podem precisar discutir e planejar o procedimento juntos. A implementação de um modo multijogador permitiria que dois ou mais cirurgiões interagissem com o mesmo modelo em tempo real, facilitando a discussão e a tomada de decisões em conjunto. Isso poderia ser particularmente benéfico para fins educacionais, pois permitiria que os estagiários trabalhassem ao lado de cirurgiões experientes em um ambiente virtual, obtendo informações e feedback valiosos.

Concluindo, embora nosso protótipo de realidade virtual já ofereça um conjunto abrangente de ferramentas para interagir com modelos cardíacos em 3D, há inúmeras oportunidades de desenvolvimento futuro. Ao continuar a refinar e expandir esse aplicativo, pretendemos criar uma ferramenta que não apenas aprimore o processo de planejamento cirúrgico, mas também sirva como plataforma para inovação em aplicativos médicos baseados em realidade virtual. O objetivo final é melhorar os resultados dos pacientes, fornecendo aos cirurgiões ferramentas mais precisas, detalhadas e interativas para compreender e tratar condições cardíacas complexas.

Referências

AWORI, J. et al. Comparative effectiveness of virtual reality (vr) vs 3d printed models of congenital heart disease in resident and nurse practitioner educational experience. *PubMed*, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1186/s41205-022-00164-6>>. Citado na página 40.

BOURAGHI, H. et al. Virtual reality and cardiac diseases: A systematic review of applications and effects. *Hindawi*, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1155/2023/8171057>>. Citado 2 vezes nas páginas 31 e 44.

BRUN, H. et al. Mixed reality holograms for heart surgery planning: first user experience in congenital heart disease. *PubMed*, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1093/ehjci/jey184>>. Citado 11 vezes nas páginas 11, 31, 32, 33, 40, 41, 43, 44, 45, 54 e 57.

DAI, Y. et al. Evaluation of a linear measurement tool in virtual reality for assessment of multimodality imaging data—a phantom study. *Computational and Mathematical Methods in Medicine*, May 2013. Citado na página 57.

DENG, S. et al. A virtual reality system for improved image-based planning of complex cardiac procedures. *Journal of Imaging*, 2021. Disponível em: <<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8404926/>>. Citado 3 vezes nas páginas 30, 44 e 57.

HOMBECK, J. et al. Evaluating perceptual tasks for medicine: A comparative user study between a virtual reality and a desktop application. *IEEE*, 2022. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9756759/>>. Citado 5 vezes nas páginas 11, 36, 38, 43 e 46.

JEISING, S. et al. Combined use of 3d printing and mixed reality technology for neurosurgical training: getting ready for brain surgery. *Neurosurgical Focus*, American Association of Neurological Surgeons, v. 56, n. 1, p. E12, 2024. Disponível em: <<https://thejns.org/focus/view/journals/neurosurg-focus/56/1/article-pE12.xml>>. Citado 6 vezes nas páginas 11, 31, 33, 34, 43 e 44.

KAMIYA, K. et al. Isosurface geometric measurement on volume-rendered images: A novel method for quantitative measurements of complex cardiac anatomical features. *Research Square*, 2024. Citado na página 29.

KAMIYA, K. et al. A virtual-reality imaging analysis of the dynamic aortic root anatomy. *The annals of thoracic surgery*, 2021. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 58.

LAN, L. et al. Immersive virtual reality for patient-specific preoperative planning: A systematic review. *Surgical innovation.*, February 2023. Citado 4 vezes nas páginas 30, 31, 45 e 57.

LAU, I. et al. Clinical applications of mixed reality and 3d printing in congenital heart disease. *PubMed*, 2022. Disponível em: <<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9687840/>>. Citado 2 vezes nas páginas 40 e 42.

- LOPES, D. S. et al. Interaction techniques for immersive ct colonography: A professional assessment. In: FRANGI, A. F. et al. (Ed.). *Medical Image Computing and Computer Assisted Intervention – MICCAI 2018*. Cham: Springer International Publishing, 2018. p. 629–637. ISBN 978-3-030-00934-2. Citado 9 vezes nas páginas 11, 34, 35, 36, 37, 43, 44, 45 e 47.
- MENA, K. A. et al. Exploration of time sequential, patient specific 3d heart unlocks clinical understanding. *BMC*, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1186/s41205-018-0034-7>>. Citado 5 vezes nas páginas 11, 28, 40, 41 e 42.
- NHS. *Echocardiogram*. 2022. Disponível em: <<https://www.nhs.uk/conditions/echocardiogram/>>. Citado na página 27.
- NIBIB. *Computed Tomography (CT)*. 2022. Disponível em: <<https://www.nibib.nih.gov/science-education/science-topics/computed-tomography-ct/>>. Citado na página 27.
- ONG, C. S. et al. Role of virtual reality in congenital heart disease. *PubMed*, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1111/chd.12587>>. Citado 3 vezes nas páginas 11, 40 e 41.
- PARK, S. et al. Effect of auto-erased sketch cue in multiuser surgical planning virtual reality collaboration system. *IEEE Access*, v. 11, p. 123565–123576, 2023. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 41.
- PUSHPARAJAH, K. et al. Virtual reality three-dimensional echocardiographic imaging for planning surgical atrioventricular valve repair. *Journal of thoracic and cardiovascular surgery techniques*, June 2021. Citado na página 65.
- PUSHPARAJAH, K. et al. Virtual reality three-dimensional echocardiographic imaging for planning surgical atrioventricular valve repair. *PubMed*, 2022. Disponível em: <<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8169455/>>. Citado na página 40.
- STEPHENSON, N. et al. Evaluation of a linear measurement tool in virtual reality for assessment of multimodality imaging data—a phantom study. *Journal of Imaging*, November 2022. Citado 8 vezes nas páginas 11, 30, 38, 40, 43, 44, 46 e 57.
- UDUPA, J. K.; HUNG, H.-M.; CHUANG, K.-S. Surface and volume rendering in three-dimensional imaging: A comparison. *Journal of Digital Imaging*, August 1991. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/BF03168161>>. Citado na página 28.
- WHEELER, G. et al. Virtual linear measurement system for accurate quantification of medical images. *Healthcare Technology Letters*, December 2019. Citado na página 56.
- YANG, H. et al. Evaluating cardiovascular surgical planning in mobile augmented reality. *ArXiv*, 2022. Disponível em: <<https://arxiv.org/abs/2208.10639>>. Citado 3 vezes nas páginas 11, 40 e 42.
- ZHANG, C.; CHEN, T. Efficient feature extraction for 2d/3d objects in mesh representation. *IEEE*, 2001. Citado na página 61.

ZORZAL, E. R. et al. Anatomy studio: A tool for virtual dissection through augmented 3d reconstruction. *Computers & Graphics*, v. 85, p. 74–84, 2019. ISSN 0097-8493. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0097849319301578>>. Citado na página 47.

Apêndices

APÊNDICE A – Questionário

A.1 Seção Demográfica

1. Qual é o seu papel?

R: [Escreva sua resposta]

2. Quão experiente você é nesta função?

- a) Estagiário júnior, menos de 3 anos
- b) Estagiário sênior, mais de 3 anos
- c) Profissional independente em início de carreira, menos de 5 anos
- d) Profissional independente sênior, mais de 5 anos

3. Quão experiente você é nesta função, em anos?

R: [Escreva sua resposta]

4. Quão familiarizado você está com os sistemas de Realidade Virtual (VR)? (Isso pode incluir: HTC Vive, Oculus, Sony VR, Google VR, HoloLens, Apple Vision Pro)

- a) nunca usei
- b) Raramente, usei VR uma ou duas vezes no passado.
- c) Às vezes, eu uso quase todos os meses
- d) Frequentemente, eu uso toda semana
- e) Sempre, uso quase diariamente

A.2 Avaliação clínica inicial [Imagem 2D]

1. Depois de observar as imagens 2D/3D, quão confiante você se sente em relação à patologia que requer atenção cirúrgica?

- a) Discordo totalmente
- b) Discordo
- c) Concordo
- d) Concordo plenamente

2. Quão confiante você está sobre sua abordagem cirúrgica para reparar esta válvula?

- a) Discordo totalmente
- b) Discordo
- c) Concordo
- d) Concordo plenamente

3. Por favor, descreva as técnicas cirúrgicas que você usaria neste caso (por exemplo, anuloplastia de anel, alongamento de cordão, extensão de folhetos, etc.). Pode ser necessária mais de uma técnica; por favor forneça o máximo de detalhes possível.

R: [Escreva sua resposta]

A.3 Avaliação de usabilidade

1. Eu acho o sistema desnecessariamente complexo.

- a) Discordo totalmente
- b) Discordo
- c) Concordo
- d) Concordo plenamente

2. Eu acho que as várias funções do sistema estão muito bem integradas.

- a) Discordo totalmente
- b) Discordo
- c) Concordo
- d) Concordo plenamente

3. Eu precisei aprender várias coisas novas antes de conseguir usar o sistema.

- a) Discordo totalmente
- b) Discordo
- c) Concordo
- d) Concordo plenamente

A.4 Avaliação clínica após VR

1. Depois de observar as imagens de VR, quão confiante você se sente em relação à patologia que requer atenção cirúrgica?
 - a) Muito menos confiante
 - b) Menos confiante
 - c) Mesmo confiante
 - d) Mais confiante
 - e) Muito mais confiante

2. Depois de visualizar a VR, sua abordagem cirúrgica é diferente?
 - a) Sem modificações.
 - b) Pequenas modificações.
 - c) Modificações importantes.
 - d) Não aplicável.

3. Quão úteis foram as técnicas de medição para tirar suas conclusões?
 - a) Não é nada útil.
 - b) Um pouco útil.
 - c) Útil.
 - d) Muito útil

4. Quais medidas foram utilizadas para esta patologia? [Selecione mais de um, se aplicável]
 - a) Não aplicável | Nenhum usado.
 - b) Medição linear.
 - c) Medição curva.
 - d) Medição de raio/área.
 - e) Medição de volume.

5. Se alguma medição foi realizada, quão confiante você está sobre ela?
 - a) Discordo totalmente
 - b) Discordo

- c) Concordo
 - d) Concordo plenamente
6. Se você modificou sua abordagem, descreva as técnicas cirúrgicas que usaria neste caso (por exemplo, anuloplastia de anel, alongamento do cordão, extensão de folhetos, etc.) agora que visualizou o caso usando VR. Pode ser necessária mais de uma técnica; por favor forneça o máximo de detalhes possível.
- R: [Escreva sua resposta]
7. Se houver uma melhor compreensão da condição, descreva as áreas específicas onde isso foi útil.
- R: [Escreva sua resposta]

A.5 Comparação pós-operatória

1. Os resultados cirúrgicos corresponderam à sua avaliação no final deste experimento? (você pode marcar mais de uma opção se for o caso).
- a) Sim, correspondeu à minha avaliação depois de visualizar imagens 2D/3D padrão.
 - b) Sim, correspondeu à minha avaliação após visualizar o sistema VR.
 - c) Não
2. Se você respondeu “Não” à pergunta acima, explique como as conclusões diferiram da sua avaliação.
- R: [Escreva sua resposta]
3. A abordagem cirúrgica correspondeu à sua avaliação no final deste experimento? (você pode marcar mais de uma opção se for o caso)
- a) Sim, correspondeu à minha abordagem cirúrgica depois de visualizar imagens 2D/3D padrão
 - b) Sim, correspondeu à minha abordagem cirúrgica depois de visualizar o sistema VR
 - c) Não

4. Se você respondeu “Não” à pergunta acima, explique como as conclusões diferiram da sua avaliação.

R: [Escreva sua resposta]

A.6 Comparação de visualizações

1. Quais diferenças você sentiu entre a visualização totalmente imersiva (realidade virtual) e a realidade mista (semi imersiva ou mixed reality)?

R: [Escreva sua resposta]

2. Qual das visualizações você sentiu mais náusea?/

- a) Realidade virtual
- b) Realidade mista
- c) Indiferente

3. Quais das visualizações você teve mais facilidade/familiaridade?

- a) Realidade virtual
- b) Realidade mista
- c) Indiferente

A.7 VR em cirurgia

1. O sistema VR pode ajudar a diminuir o tempo do procedimento cirúrgico.

- a) Discordo totalmente
- b) Discordo
- c) Concordo
- d) Concordo plenamente

2. O sistema VR pode ajudar a diminuir possíveis complicações cirúrgicas.

- a) Discordo totalmente
- b) Discordo
- c) Concordo
- d) Concordo plenamente

3. O sistema VR pode se tornar uma ferramenta clínica de rotina para o planejamento de cirurgia cardíaca congênita.

- a) Discordo totalmente
- b) Discordo
- c) Concordo
- d) Concordo plenamente

4. Que melhorias você considera que poderiam ser feitas nas ferramentas e métodos de medição?

R: [Escreva sua resposta]

5. Você consideraria usar esse tipo de aplicativo no planejamento de cirurgia cardíaca?

R: [Escreva sua resposta]

APÊNDICE B – Artigos revisados

Autor, Ano	Tipo de RE	Características	Ferramentas de Medição
Bertelli, 2023	RV	Cropping Scaling Intensidade computada Histograma	Não
Pushparajah, 2021	RV	Cropping Animação	Não
Lau, 2022	RM	Ferramenta de recorte Estrutura intra-cardíaca Aumentar	Não
Gehrsitz, 2021	RM	Foto-realístico (3D) Imagem de cortes seccionais	Não
Valls-Esteve, 2023	RA, RV	Reconstrução multiplanar, Intensidade Máxima, Renderização de Volume, Renderização Cinemática	Não
A. Mena, 2018	RV	Modelo sequencial no tempo, Plano de corte	Não
Awori, 2023	RV/RA	Ferramenta de corte	Não
Goo, 2020	RV, RA	Percepção de profundidade	Não
Brun, 2019	RM	Rotação, Escala, Corte, Fatiamento, Navegação pelo modelo, Compartilhamento multiusuário	Não

Ong, 2018	RV	Ampliar, Manipular, Rotacionar, Plano de corte	Não
Bouraghi, 2023	RV	Nenhuma	Não
Park, 2023	RV	Esboço automático, gestos manuais, apontadores de direção, visão em fatias, corte transversal, compartilhamento (até 2), comunicação por voz	Não
Hombeck, 2022	RV	Visualização de distância, Visualização de forma	Sim, mas visualmente
Yang, 2022	MRA	Realidade aumentada móvel	Não
Kamiya, 2024	RV	Medição de isosuperfície	Sim
Jeising, 2024	RM	Superposição de modelo háptico e gêmeo virtual	Não
Lan, 2023	RE	Multijogador Ferramentas de medição Tipo de imagem Custo Tempo	Não
Stephenson, 2022	RV	Medição linear	Sim
Wheeler, 2019	RV	Medição linear	Sim

Deng, 2021	RV	Simulação de fluxo sanguíneo (CFD), Cropping, Janela, Medição, Feedback tátil, Orientação automática de imagem, Compartilhamento assíncrono Compartilhamento síncrono	Sim
Kamiya, 2021	RV	Medição curvada, Medição linear	Sim

Tabela 3 – Artigos revisados.