UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA BIOMÉDICA

Trabalho de Conclusão de Curso

DESENVOLVIMENTO DE UMA FERRAMENTA PARA MANIPULAÇÃO DE IMAGENS MÉDICAS DE ANGIOTOMOGRAFIA 3D ATRAVÉS DE REALIDADE VIRTUAL

Maria Teresa de Oliveira Carvalho

Natal/RN
2022

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA BIOMÉDICA

DESENVOLVIMENTO DE UMA FERRAMENTA PARA MANIPULAÇÃO DE IMAGENS MÉDICAS DE ANGIOTOMOGRAFIA 3D ATRAVÉS DE REALIDADE VIRTUAL

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento de Engenharia Biomédica da Universidade Federal do Rio Grande do Norte para obtenção do título de Graduada em Engenharia Biomédica.

Graduanda: Maria Teresa de Oliveira Carvalho

Orientadora: Prof.ª Dra. Heliana Bezerra Soares

Coorientador: Me. Raimundo Francisco de Amorim Júnior

Natal/RN

2022

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN
Sistema de Bibliotecas - SISBI
Catalogação de Publicação na Fonte. UFRN - Biblioteca Central Zila Mamede

Carvalho, Maria Teresa de Oliveira.
Desenvolvimento de uma ferramenta para manipulação de Imagens Médicas de Angiotomografia 3D através de Realidade Virtual / Maria Teresa de Oliveira Carvalho. - Natal, 2022.
72f.: il.

Monografia (graduação) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Graduação em Engenharia Biomédica. Natal, RN, 2022.
Orientador: Drª. Heliana Bezerra Soares.
Coorientador: Me. Raimundo Francisco de Amorim Júnior.

1. Realidade virtual - Monografia. 2. Doenças cardíacas congênitas - Monografia. 3. Imagens 3D - Monografia. 4. Cardiologia pediátrica - Monografia. I. Soares, Heliana Bezerra. II. Júnior, Raimundo Francisco de Amorim. III. Título.

RN/UF/BCZM CDU 004:616.12

Elaborado por MARJORIE ROSIELLE SILVA DO AMARAL - CRB-15/353

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE

CENTRO DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA BIOMÉDICA

DESENVOLVIMENTO DE UMA FERRAMENTA PARA MANIPULAÇÃO DE IMAGENS MÉDICAS DE ANGIOTOMOGRAFIA 3D ATRAVÉS DE REALIDADE VIRTUAL

Banca Examinadora do Trabalho de Conclusão de Curso:

Prof.ª Dra. Heliana Bezerra Soares _____
Orientadora

Me. Raimundo Francisco de Amorim Júnior _____
Coorientador

Prof.ª Dra. Iria Caline Saraiva Cosme _____
Avaliadora Externa - IFRN

Natal/RN

2022

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha família, por estar sempre ao meu lado e por todo o amor, força e suporte. Às memórias de Aldenora, Joaquim, Mariana e Josias, que foram e são grandes inspirações para mim.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, o meu maior protetor, por me guiar na busca dos meus sonhos, por sempre me dar forças e por nunca me desamparar, principalmente nos momentos de dificuldade.

À minha mãe, Marta, que é tão fundamental na minha vida e que, ao longo desses anos, esteve a todo momento me encorajando e me incentivando com as suas palavras, ao meu pai, Pedro, por ser uma figura tão presente na minha caminhada e por me dar todo o suporte e apoio necessários, e à minha tia Marluce, minha mãe do coração, que sempre esteve ao meu lado, cuidando tão bem de mim e me fortalecendo.

À minha irmã, Maria Fernanda, por me ajudar, orientar e apoiar nos momentos em que eu precisei, ao meu irmão, Paulo, por todo o amor e cuidado, às minhas tias, Graça e Auxiliadora, por todo o entusiasmo e torcida pela realização dos meus sonhos, e à minha madrinha Rosandra, por todas as orações e pelo carinho.

Agradeço à minha psicóloga Kamilla Soares, que foi essencial durante esses anos de graduação, me ajudando a enfrentar os meus medos e me fazendo acreditar mais em mim.

A todos os professores e professoras que contribuíram com a minha formação profissional desde o primeiro ciclo, no curso de Ciências e Tecnologia, até o curso de Engenharia Biomédica, e por todo o conhecimento compartilhado.

Agradeço, especialmente, à professora Heliana Bezerra Soares, minha orientadora, que durante a graduação sempre me incentivou e auxiliou no desenvolvimento de pesquisas, pelos aprendizados importantes que me foram passados e por sua serenidade, que me acalmava nos momentos de ansiedade.

Ao meu coorientador Raimundo Francisco de Amorim Júnior, por toda a sua disponibilidade, colaboração e assistência desde o meu primeiro contato, e por sua empolgação, que muito me estimulou no desenvolvimento deste trabalho.

Ao professor Rummenigge Rudson Dantas pela disposição e por ter me ajudado com total atenção nos momentos de dúvidas. Agradeço aos meus amigos e aos colegas de curso, pela parceria e ajuda durante a graduação e também pelos momentos de descontração, que foram tão necessários e indispensáveis.

EPÍGRAFE

“Não é o que o mundo reserva pra você, mas o que você traz para o mundo.”

- Anne of Green Gables

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS ..... **x**

LISTA DE TABELAS ..... **xii**

LISTA DE ABREVIAÇÕES, SIGLAS E SÍMBOLOS ..... **xiii**

RESUMO ..... **xv**

ABSTRACT ..... **xvi**

1. INTRODUÇÃO **1**

1.1. OBJETIVOS **3**

1.1.1. Objetivo Geral **3**

1.1.2. Objetivos Específicos **3**

1.2. ESTRUTURA DO TRABALHO **4**

2. DOENÇAS CARDÍACAS CONGÊNITAS **5**

2.1. DOENÇAS CARDÍACAS CONGÊNITAS ACIANÓTICAS **6**

2.1.1. Comunicação interatrial (CIA) **7**

2.1.2. Comunicação interventricular (CIV) **7**

2.1.3. Defeito do septo atrioventricular total (DSAV) **8**

2.1.4. Canal arterial patente **8**

2.1.5. Coarctação da aorta (CoA) **9**

2.1.6. Obstrução da via de saída do ventrículo direito **9**

2.1.7. Obstrução da via de saída do ventrículo esquerdo **10**

2.2. DOENÇAS CARDÍACAS CONGÊNITAS CIANÓTICAS **10**

2.2.1. Transposição das grandes artérias **10**

2.2.2. Dupla saída do ventrículo direito (DSVD) **11**

2.2.3. Truncus Arteriosus **11**

2.2.4. Tetralogia de Fallot (ToF) **11**

2.2.5. Atresia pulmonar **11**

2.2.6. Atresia tricúspide 12

2.2.7. Síndrome do coração esquerdo hipoplásico 12

2.3. TRATAMENTOS 12

2.4. MODALIDADES DE DIAGNÓSTICO 14

3. IMAGENS MÉDICAS EM 3D 17

3.1. MODELOS DO CORAÇÃO EM 3D 18

4. REALIDADE VIRTUAL 21

4.1. APLICAÇÕES EM REALIDADE VIRTUAL NA MEDICINA 23

4.2. USO DA REALIDADE VIRTUAL NA CARDIOLOGIA PEDIÁTRICA 29

4.3. *UNITY* 33

5. FERRAMENTA EM REALIDADE VIRTUAL 35

5.1. BASE DE IMAGENS 35

5.2. DESENVOLVIMENTO DA FERRAMENTA 35

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO 44

7. CONCLUSÃO 50

7.1. TRABALHOS FUTUROS 51

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 52

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. (a) Tomografia computadorizada do paciente, (b) Modelo tridimensional virtual do coração e (c) Modelo tridimensional impresso do coração. 19

Figura 2. (a) Modelo virtual do coração com atresia pulmonar e comunicação interventricular (CIV), (b) e (c) Protótipos em 3D do coração. 20

Figura 3. Primeiro *head-mounted display* patenteado em 1916. 21

Figura 4. Participante de um estudo utilizando óculos de realidade virtual e controladores portáteis. 23

Figura 5. Paciente utilizando um dispositivo de realidade virtual no *Lucile Packard Children's Hospital Stanford*. 26

Figura 6. Estudante manipulando o coração em um ambiente de realidade virtual - *Stanford Virtual Heart Project*..... 30

Figura 7. (a) Configuração da plataforma de RV e (b) a (e) Visualização do modelo 3D do coração em diferentes ângulos e planos no ambiente virtual. 32

Figura 8. Visão frontal do cenário. 36

Figura 9. Visão lateral direita do cenário. 37

Figura 10. Visão lateral esquerda do cenário..... 37

Figura 11. Ambiente de realidade virtual com coração com coarctação da aorta. 38

Figura 12. Verificação da instalação dos pacotes *Android*. 39

Figura 13. Configuração da plataforma de desenvolvimento. 39

Figura 14. Definição do nome da aplicação. 40

Figura 15. Definição da orientação padrão. 40

Figura 16. Definição da versão mínima do *Android*. 40

Figura 17. Arquivos selecionados na seção *Build*. 41

Figura 18. Opção *Cardboard* XR *Plugin*. 41

Figura 19. (a) *Smartphone Samsung Galaxy* A8 e (b) *Headset* de realidade virtual VR *Box*. 42

Figura 20. União dos dispositivos para demonstração do ambiente virtual desenvolvido. 43

Figura 21. Ambiente de realidade virtual com coração com coarctação da aorta corrigida pós cirurgia. 44

Figura 22. Ambiente de realidade virtual com coração com *truncus arteriosus*..... 45

Figura 23. Coração com *truncus arteriosus* em duas metades. 45

Figura 24. Ambiente de realidade virtual com coração com drenagem anômala total das veias pulmonares. 46

Figura 25. Coração com drenagem anômala total das veias pulmonares. 47

Figura 26. Coração com drenagem anômala total das veias pulmonares em duas metades. 47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Comparativo de valores entre modelos de *headsets* disponíveis no mercado nacional..... 42

LISTA DE ABREVIAÇÕES, SIGLAS E SÍMBOLOS

2D – Duas Dimensões

3D – Três Dimensões

API – *Application Programming Interface*

APK – *Android Application Pack*

AVC – Acidente Vascular Cerebral

BTT – *Blalock-Taussig-Thomas*

CIA – Comunicação Interatrial

CIV – Comunicação Interventricular

CoA – Coarctação da Aorta

DCC – Doença Cardíaca Congênita

DICOM – *Digital Imaging and Communications in Medicine*

DSAV – Defeito do Septo Atrioventricular Total

DSVD – Dupla Saída do Ventrículo Direito

ECG – Eletrocardiograma

EUA – Estados Unidos da América

HMD – *Head Mounted-Display*

ICC – Insuficiência Cardíaca Congestiva

INCOR – Instituto do Coração de Natal

iOS – *iPhone OS*

OBJ – *Object File*

OMS – Organização Mundial da Saúde

PDI – Processamento Digital de Imagens

RA – Realidade Aumentada

RB-2 – *Reality Built for 2*

RM – Ressonância Magnética

RV – Realidade Virtual

SDK – *Software Development Kit*

STL – *Standard Tessellation Language*

SUS – Sistema Único de Saúde

TC – Tomografia Computadorizada

TEA – Transtornos do Espectro Autista

ToF – Tetralogia de Fallot

UFPE – Universidade Federal de Pernambuco

CARVALHO, Maria Teresa de Oliveira. **Desenvolvimento de uma ferramenta para manipulação de Imagens Médicas de Angiotomografia 3D através de Realidade Virtual**. Trabalho de Conclusão de Curso, Graduação em Engenharia Biomédica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 72p., 2022.

RESUMO

As doenças cardíacas congênitas são alterações que surgem nos componentes anatômicos do coração ou nos seus vasos sanguíneos, durante o desenvolvimento do feto no útero. No Brasil, essa condição patológica possui uma taxa de mortalidade elevada, e esse cenário se torna mais complicado nas regiões carentes do país, onde há um índice significativo de diagnósticos imprecisos e a ausência de tratamentos adequados. As dificuldades durante o diagnóstico podem ocorrer pelo fato de o coração humano possuir uma estrutura tridimensional complexa, e também pela grande variabilidade dessas irregularidades cardíacas, tornando a análise dos exames por meio de imagens bidimensionais desafiadora. Sendo assim, a ferramenta desenvolvida utilizou a tecnologia de realidade virtual para auxiliar estudantes de Medicina, médicos especialistas e cirurgiões na visualização e no entendimento da anatomia cardíaca de pacientes diagnosticados com cardiopatias congênitas. Essa aplicação viabilizou a observação de modelos em três dimensões de corações de bebês e crianças, em um ambiente imersivo, permitindo uma avaliação completa do órgão. As estruturas cardíacas definidas para esse estudo puderam ser visualizadas externamente e internamente a partir de diferentes ângulos, proporcionando uma melhor análise da anatomia específica dos pacientes e demonstrando que o método de realidade virtual pode ser utilizado como uma ferramenta educacional e assistencial.

Palavras-chave: Doenças cardíacas congênitas, realidade virtual, imagens 3D, cardiologia pediátrica.

CARVALHO, Maria Teresa de Oliveira. **Development of a tool for manipulation of 3D Angiotomography Medical Images through Virtual Reality**. Conclusion Work Project, Biomedical Engineering Bachelor Degree, Federal University of Rio Grande do Norte, 72p., 2022.

ABSTRACT

Congenital heart defects are alterations that appear in the anatomical components of the heart or in its blood vessels, during the development of the fetus in the uterus. In Brazil, this pathological condition has a high mortality rate, and this scenario becomes more complicated in poor regions of the country, where there is a significant rate of inaccurate diagnoses and absence of adequate treatment. Difficulties in the diagnosis can occur due to the fact that the human heart has a complex three-dimensional structure, and also due to the great variability of these cardiac irregularities, making the analysis of exams using two-dimensional images challenging. Thus, the developed tool used virtual reality technology to help medical students, specialist doctors and surgeons to visualize and understand the cardiac anatomy of patients diagnosed with congenital heart diseases. This application enabled the observation of three-dimensional models of the hearts of babies and children, in an immersive environment, allowing a complete evaluation of the organ. The cardiac structures defined for this study could be visualized externally and internally from different angles, providing a better analysis of the specific anatomy of patients and demonstrating that the virtual reality method can be used as an educational and assistance tool.

Keywords: congenital heart disease, virtual reality, 3D images, pediatric cardiology.

1. INTRODUÇÃO

As doenças cardíacas congênitas (DCCs) são a principal causa de mortalidade entre crianças no mundo (UPADHYAY *et al*., 2019). No Brasil, essas patologias apresentam uma taxa de mortalidade elevada (LEITE, 2021), sendo a doença congênita que mais ocasiona morte em crianças (ROCHA *et al*., 2018). Esse cenário se torna ainda mais preocupante diante da subnotificação existente no país (AMORIM JÚNIOR, 2020), juntamente com a ocorrência de diagnósticos imprecisos e a ausência de tratamentos adequados (LEITE, 2021).

Diante disso e tendo em vista que um número significativo de bebês e crianças precisam de intervenções cirúrgicas para o reparo dessas irregularidades cardíacas, uma vez que 25% dos casos de cardiopatias congênitas requerem cirurgias no primeiro ano de vida do bebê (DAMIANO, 2020), reforçar a importância do diagnóstico correto e do tratamento precoce dessas doenças se faz necessário para que esse panorama seja alterado (PENIDO, 2020). Desse modo, melhorias no âmbito da saúde pública, através do desenvolvimento de estratégias e de tecnologias que possam oferecer mais qualidade de vida para esses pacientes, são fundamentais (SOARES, 2020).

O diagnóstico dessas doenças pode ser feito com o teste do coraçãozinho, oferecido pelo Sistema Único de Saúde (SUS), que consiste em um teste de oximetria de pulso (DAMIANO, 2020) para avaliar os batimentos cardíacos e o nível de oxigênio no sangue do bebê, ou por meio de manifestações clínicas (CARDIOL, 2020). Outros exames físicos e de imagens, como o ecocardiograma, a ressonância magnética (RM) e a tomografia computadorizada (TC) são importantes para o diagnóstico e também para definir o tratamento que será realizado em um determinado caso (UPADHYAY *et al*., 2019).

Assim, o uso de dados de imagens provenientes desses exames médicos vem sendo aceito como um padrão de tratamento para o planejamento cirúrgico de malformações cardíacas congênitas. Todavia, mesmo com os avanços nas tecnologias de imagem, o estudo e o ensino na cardiologia infantil pode ser desafiador, até mesmo para médicos especialistas (SACKS; AXELROD, 2020).

Essas dificuldades ocorrem porque o coração humano possui uma estrutura tridimensional complexa (SACKS; AXELROD, 2020) e compreender as relações que se estabelecem entre os seus componentes, a partir de uma imagem mental em três

dimensões (3D), pode ser difícil (AMORIM JÚNIOR, 2020). Além disso, sabendo que as alterações cardíacas possuem uma grande variabilidade, podendo se apresentar como uma combinação de mais de um defeito distinto (STANFORD CHILDREN 'S HEALTH, 2019a), analisar essas variações anatômicas por meio de imagens bidimensionais pode ser complicado (SACKS; AXELROD, 2020).

O surgimento de metodologias que fazem uso de representações em 3D, seja através de reconstruções de angiotomografia e angioressonância (AMORIM JÚNIOR, 2020) ou com o uso de modelos em 3D virtuais, trouxe benefícios para o estudo de imagens médicas. Entretanto, ainda há limitações, uma vez que visualizar a anatomia cardíaca 3D em telas bidimensionais pode ocasionar interpretações equivocadas (BYL *et al*., 2020).

Com isso, técnicas inovadoras que possibilitam a visualização de imagens tridimensionais, como a realidade virtual (RV), surgem como um artifício empolgante para auxiliar os profissionais da saúde no entendimento de casos patológicos e no ensino de habilidades clínicas (SACKS; AXELROD, 2020). A utilização desse novo método pode colaborar no tratamento de crianças diagnosticadas com cardiopatias congênitas (RAIMONDI *et al.*, 2021), ao permitir uma melhor visualização, manipulação e avaliação da estrutura cardíaca (ONG *et al*., 2018).

Sendo assim, o objetivo deste trabalho consiste no desenvolvimento de uma ferramenta em realidade virtual (RV), que possa contribuir na visualização e no entendimento da anatomia de bebês e crianças com irregularidades cardíacas, auxiliando, assim, em possíveis intervenções cirúrgicas. Essa aplicação possibilitará que reconstruções em 3D do coração de pacientes com doenças cardíacas congênitas (DCCs) sejam analisadas em um ambiente imersivo.

Vale ressaltar que, dados os custos elevados para a aquisição de equipamentos capazes de reproduzir conteúdos em realidade virtual (RV), este trabalho também apresenta como finalidade desenvolver um recurso tecnológico mais acessível nesse quesito. Desta forma, a aplicação será implementada priorizando o uso de dispositivos de baixo valor financeiro.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo Geral

Desenvolver uma ferramenta em um ambiente de realidade virtual para visualização de modelos em três dimensões de corações de bebês e crianças acometidos por doenças cardíacas congênitas, através da aplicação de técnicas de processamento digital de imagens (PDI) de angiotomografia.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Estudar a área de saúde específica abordada no trabalho, neste caso, as cardiopatias congênitas que acometem bebês e crianças;
- Estudar sobre o processo de modelagem 3D em imagens médicas;
- Estudar as aplicações de realidade virtual na Medicina;
- Estudar as aplicações de realidade virtual na cardiologia pediátrica;
- Estudar e analisar os modelos dos corações tridimensionais escolhidos para visualização no ambiente de realidade virtual;
- Pesquisar e selecionar o *software* de realidade virtual que será utilizado;
- Pesquisar e estudar os *softwares* e as plataformas que serão utilizados durante o desenvolvimento do trabalho;
- Pesquisar e estudar os modelos de *headset* de realidade virtual disponíveis no mercado;
- Pesquisar e selecionar o modelo de um *smartphone* com sistema operacional *Android* que seja compatível com o *software* e com o *headset* utilizados;
- Desenvolver o ambiente em realidade virtual no *software*;
- Desenvolver a aplicação para demonstração do ambiente de realidade virtual no *smartphone*;
- Avaliar os modelos tridimensionais dos corações no ambiente virtual juntamente com o *headset*.

1.2. ESTRUTURA DO TRABALHO

A segunda seção do trabalho descreve o cenário epidemiológico, a etiologia e os tipos de doenças cardíacas congênitas existentes, assim como a fisiopatologia, os sintomas, os tratamentos possíveis para essas alterações e as modalidades de diagnóstico. Na terceira seção, são abordados o emprego das imagens em três dimensões (3D) na Medicina e o uso de modelos em 3D de corações. A quarta seção apresenta conceitos sobre realidade virtual (RV), bem como as suas diversas aplicações na área médica e, especificamente, a sua utilização na cardiologia pediátrica. A quinta seção discorre sobre todo o processo de desenvolvimento da ferramenta proposta e sobre os testes realizados. Na sexta seção são apresentados os resultados obtidos por meio dos testes executados. A sétima seção expõe as considerações finais do estudo e as perspectivas de trabalhos futuros.

2. DOENÇAS CARDÍACAS CONGÊNITAS

As doenças cardíacas congênitas (DCCs) são condições patológicas que geralmente se manifestam durante a infância (JARVIS, 2018), definidas como alterações ou irregularidades na estrutura anatômica do coração ou nos seus vasos sanguíneos (SOARES, 2020). Os problemas cardíacos congênitos surgem durante o desenvolvimento do coração do feto no útero, normalmente nas oito primeiras semanas de gestação, e são os defeitos congênitos mais recorrentes (STANFORD CHILDREN'S HEALTH, 2019a), sendo quatro vezes mais comuns do que defeitos do tubo neural e seis vezes mais comuns do que as anormalidades cromossômicas (ROCHA *et al*., 2018).

De acordo com a Organização Mundial da Saúde (OMS), no mundo, cerca de 130 milhões de crianças possuem algum tipo de cardiopatia congênita (CARDIOL, 2020). No Brasil, conforme dados do Ministério da Saúde, a taxa de incidência das doenças cardíacas congênitas (DCC) foi de um caso para cada cem nascidos vivos, sendo a malformação congênita mais frequente e a que apresenta a mais alta mortalidade em bebês com idade inferior a um ano. Foi estimado que, por ano, 30 mil crianças nascem com cardiopatia congênita. Dessas, 23.800 crianças, cerca de 80%, precisam de cirurgia cardíaca para correção (SOARES, 2020), e em torno de 6% vêm a óbito antes de completar o primeiro ano de vida (CARDIOL, 2020).

Essa situação se torna mais crítica nas regiões mais carentes do Brasil, como as regiões Norte e Nordeste, onde 80% das crianças acometidas por algum problema cardíaco congênito não conseguem diagnóstico nem tratamento adequado (LEITE, 2021), havendo também um índice significativo de diagnósticos imprecisos de malformação cardíaca como causa de morte nas declarações de óbito (SOARES, 2020).

As malformações cardíacas congênitas possuem uma etiologia multifatorial e complexa, uma vez que qualquer alteração durante os processos de desenvolvimento da estrutura embrionária poderá ocasionar defeitos cardíacos (UPADHYAY *et al*., 2019). As causas dessas patologias, na maioria das vezes, não são inteiramente conhecidas. Em alguns casos, a sua origem pode estar associada a distúrbios genéticos, como por exemplo, defeitos cromossômicos, a alguma doença que a gestante teve durante o período gestacional ou ao uso de determinados medicamentos (STANFORD CHILDREN'S HEALTH, 2019a).

Estudos genômicos para identificar possíveis causas genéticas de doenças

cardíacas congênitas (DCCs), mencionam a descoberta de genes específicos e outros genes previamente identificados que ocasionam essas malformações, e também relatam defeito genético no cromossomo 1. Diante disso, a terapia genética ou o reparo de defeitos genéticos no sangue se torna um possível tratamento para essas patologias em crianças, adolescentes e adultos (SUN *et al*., 2015).

Essas irregularidades cardíacas podem ser simples ou complexas, e se apresentam em diferentes tipos ou até mesmo como uma combinação de defeitos de categorias distintas (STANFORD CHILDREN'S HEALTH, 2019a). Além disso, as doenças cardíacas congênitas (DCC) são classificadas em cardiopatias congênitas acianóticas e cardiopatias congênitas cianóticas.

A doença cardíaca congênita acianótica, considerada a malformação cardíaca mais comum, está subclassificada em lesões de *shunt* e lesões obstrutivas. Enquanto que a doença cardíaca congênita cianótica, vista como uma emergência cardíaca, se caracteriza pela cianose, isto é, uma coloração azulada da pele e das membranas mucosas observada no período neonatal, que ocorre em virtude da redução da oxigenação do sangue ou da mistura de sangue oxigenado e sangue desoxigenado (ROHIT; SHRIVASTAVA, 2018).

2.1. DOENÇAS CARDÍACAS CONGÊNITAS ACIANÓTICAS

Sabendo que as estruturas do sistema cardiovascular que transportam sangue oxigenado e sangue desoxigenado são totalmente separadas e relativamente paralelas, uma comunicação irregular entre elas irá provocar desvio no fluxo sanguíneo, ou seja, um *shunt*. As doenças cardíacas congênitas acianóticas são aquelas em que há lesões de *shunt* (ROHIT; SHRIVASTAVA, 2018).

No *shunt* da esquerda para a direita, o sangue venoso pulmonar, isto é, o sangue oxigenado, retorna para os pulmões sem ser bombeado para o corpo. Nesse caso, há uma redução na distribuição de oxigênio para os tecidos do corpo, uma vez que o volume do débito cardíaco fica reduzido pela quantidade de volume desviado (UPADHYAY *et al*., 2019).

No *shunt* da direita para a esquerda, o sangue venoso sistêmico, ou seja, o sangue desoxigenado, retorna diretamente para o corpo desviando dos pulmões, ocasionando uma diminuição na quantidade de oxigênio do sangue arterial sistêmico e reduzindo a entrega de oxigênio aos tecidos do corpo (UPADHYAY *et al*., 2019).

2.1.1. Comunicação interatrial (CIA)

Nessa condição, também conhecida como defeito do septo atrial, há a presença de uma pequena abertura entre o átrio direito e o átrio esquerdo, ocasionando um *shunt* da esquerda para a direita. Esse defeito foi responsável por 8% a 12% das doenças cardíacas congênitas (ROHIT; SHRIVASTAVA, 2018), e ocorre devido ao fechamento incorreto do forame oval após o nascimento do bebê.

Essa irregularidade permite que o sangue rico em oxigênio no lado esquerdo do coração se misture com o sangue pobre em oxigênio no lado direito do coração (JARVIS, 2018), acarretando em uma sobrecarga de volume sanguíneo no lado direito do coração, o que por sua vez ocasiona a dilatação da câmara direita.

A maioria das crianças com defeito do septo atrial são assintomáticas, e há casos em que esse defeito se fecha normalmente com a idade (ROHIT; SHRIVASTAVA, 2018). Contudo, esse tipo de cardiopatia congênita pode ser diagnosticado quando se detecta um sopro cardíaco em crianças com quatro (4) ou seis (6) meses de idade, decorrente do aumento do fluxo sanguíneo através da válvula pulmonar. Um sopro diastólico adicional pode ser percebido em virtude do fluxo sanguíneo excessivo na valva tricúspide (PURI *et al*., 2017).

2.1.2. Comunicação interventricular (CIV)

Denominadas também de defeitos do septo ventricular, as CIVs são consideradas os defeitos cardíacos congênitos mais comuns, afetando 1 em cada 500 bebês nascidos vivos (JARVIS, 2018). Esse tipo de cardiopatia pode estar presente em 50% a 60% de crianças com DCC (PURI *et al*., 2017) e estar associadas a outras lesões fisiológicas do sistema cardíaco (UPADHYAY *et al*., 2019).

Nesse caso, há uma abertura no septo ventricular, localizado entre o ventrículo direito e o ventrículo esquerdo. A CIV corresponde a um *shunt* da esquerda para a direita, que ocasiona o fluxo de sangue oxigenado do ventrículo esquerdo para o ventrículo direito (JARVIS, 2018), fazendo com que uma quantidade extra de sangue atinja os pulmões pelo ventrículo direito (STANFORD CHILDREN'S HEALTH, 2019a).

Na CIV haverá duas vias sistólicas para o fluxo sanguíneo ventricular, isto é, a via de saída comum do ventrículo e uma outra via de saída através da lesão para o ventrículo (UPADHYAY *et al*., 2019). As manifestações clínicas dependem do tamanho do orifício entre os ventrículos (ROHIT; SHRIVASTAVA, 2018), e um bebê recém-nascido pode

não apresentar um sopro cardíaco, a princípio. Todavia, com o seu crescimento, a resistência pulmonar irá diminuir e um sopro cardíaco poderá ser identificado (PURI *et al*., 2017).

Bebês e crianças com uma CIV hemodinamicamente relevante podem ter características de insuficiência cardíaca congestiva (ICC) e de hiper circulação pulmonar. Um exame de eletrocardiografia irá exibir hipertrofia biventricular ou do lado esquerdo, e uma radiografia do tórax mostrará cardiomegalia com congestão vascular pulmonar (PURI *et al*., 2017).

2.1.3. Defeito do septo atrioventricular total (DSAV)

Esse problema cardíaco congênito corresponde a 5% das DCCs (PURI *et al*., 2017), sendo também conhecido como canal atrioventricular. Abrange malformações da válvula mitral e/ou válvula tricúspide, um defeito do septo atrial e um defeito do septo ventricular (STANFORD CHILDREN'S HEALTH, 2019a), do tipo *inlet* (PURI *et al*., 2017).

Os pacientes com DSAV normalmente possuem características de insuficiência cardíaca congestiva (ICC) e déficit de crescimento. Além disso, podem apresentar ejeção sistólica ou sopro holossistólico proveniente da CIV, sopros de regurgitação da válvula atrioventricular e um ruído diastólico. O exame de eletrocardiograma irá mostrar hipertrofia biventricular, direita ou esquerda (PURI *et al*., 2017).

2.1.4. Canal arterial patente

A estrutura responsável por conectar a artéria pulmonar ao arco da aorta durante o período fetal, se denomina canal arterial ou ducto arterial. Funcionalmente esse canal arterial se fecha nas primeiras 24 horas de vida bebê e anatomicamente em torno de 72 horas após o nascimento, ou ainda entre a terceira e quarta semana de vida da criança (PURI *et al*., 2017). Caso o fechamento desse canal ocorra de modo irregular (JARVIS, 2018), o canal arterial patente se forma, resultando em um *shunt* da esquerda para a direita (ROHIT; SHRIVASTAVA, 2018).

Desse modo, o sangue oxigenado na aorta irá se misturar com o sangue desoxigenado da artéria pulmonar, fazendo com que uma quantidade extra de sangue flua para os pulmões (STANFORD CHILDREN'S HEALTH, 2019a), elevando as pressões pulmonares. Em recém-nascidos com pressões e resistência pulmonares maiores, o sopro cardíaco pode ser inaudível, pois não há um grande desvio de sangue. Em crianças, se

observa um sopro sistólico alto e contínuo ao longo de todo o ciclo cardíaco (PURI *et al*., 2017).

O *shunt* proveniente desse defeito leva também a características de insuficiência cardíaca congestiva (ICC). O exame de eletrocardiograma exibe hipertrofia do ventrículo esquerdo e o ecocardiograma Doppler pode mostrar, além do aumento do átrio e do ventrículo esquerdo, a anatomia do canal arterial patente (PURI *et al*., 2017).

Os defeitos cardíacos congênitos acianóticos com lesões obstrutivas surgem nas vias de entrada ventricular, nas vias de saída e nos grandes vasos (ROHIT; SHRIVASTAVA, 2018), e podem ser:

2.1.5. Coarctação da aorta (CoA)

Defeito cardíaco que contribui com 5% a 8% das cardiopatias congênitas (ROHIT; SHRIVASTAVA, 2018) e que corresponde a um estreitamento da artéria aorta, obstruindo o fluxo sanguíneo para o corpo e elevando a pressão arterial acima da constrição (STANFORD CHILDREN'S HEALTH, 2019a). A CoA provoca uma hipertensão ventricular esquerda, devido ao aumento da resistência à saída do fluxo sanguíneo do ventrículo esquerdo. Com isso, um paciente com essa condição desenvolve hipertensão arterial na extremidade superior do corpo (UPADHYAY *et al*., 2019).

Essa patologia pode ser identificada na triagem neonatal, ao ser detectado um menor nível de saturação na região pós-ductal, ou por suspeita clínica ao serem observados pulsos podais ou femorais fracos. Durante a infância, um sopro sistólico, mais alto nas costas, pode ser ouvido. Além disso, pacientes com CoA podem se apresentar *in extremis* com letargia, diminuição do débito urinário e acidose metabólica, entre a segunda e a terceira semana de vida (PURI *et al*., 2017).

2.1.6. Obstrução da via de saída do ventrículo direito

Essa obstrução frequentemente está associada a outras lesões, como o defeito do septo ventricular, e pode ocorrer em nível valvar, supravalvar ou subvalvar ou nos ramos das artérias pulmonares. A estenose da válvula pulmonar, apontada como o tipo mais recorrente, constitui entre 5% a 8% das cardiopatias congênitas (PURI *et al*., 2017).

Crianças com estenose pulmonar leve e moderada são assintomáticas (ROHIT; SHRIVASTAVA, 2018). No caso de pacientes sintomáticos, pode ser identificado um

sopro sistólico mais alto na região da válvula e o exame de eletrocardiograma exibe hipertrofia ventricular do ventrículo direito (PURI *et al*., 2017).

2.1.7. Obstrução da via de saída do ventrículo esquerdo

Pode ocorrer em três níveis: valvar, supravalvar ou subvalvar, sendo a estenose aórtica a obstrução mais comum (ROHIT; SHRIVASTAVA, 2018). Nesse caso, a válvula aórtica, situada entre o ventrículo esquerdo e a aorta, se desenvolve de forma incorreta, ficando estreitada, e tornando o bombeamento do sangue para o corpo mais difícil (STANFORD CHILDREN'S HEALTH, 2019a).

Pacientes que possuem estenose aórtica leve e moderada são assintomáticos (ROHIT; SHRIVASTAVA, 2018). Os pacientes sintomáticos apresentam um sopro sistólico no local da válvula, assim como hipertrofia ventricular do ventrículo esquerdo (PURI *et al*., 2017).

2.2. DOENÇAS CARDÍACAS CONGÊNITAS CIANÓTICAS

No caso das doenças cardíacas congênitas cianóticas, ocorre a distribuição de sangue pobre em oxigênio pelo corpo humano, ocasionando a cianose nos recém nascidos (STANFORD CHILDREN'S HEALTH, 2019a). Esses defeitos podem ser:

2.2.1. Transposição das grandes artérias

Segunda cardiopatia congênita mais comum, responsável por em torno de 2% dos casos, e também a cardiopatia cianótica que se apresenta com maior frequência na primeira semana de vida do bebê. Ocorre quando há uma alteração ventrículo-arterial, fazendo com que as posições da artéria aorta e da artéria pulmonar estejam invertidas (PURI *et al*., 2017).

Sendo assim, nessa condição, a aorta se origina do ventrículo direito, permitindo que o sangue desoxigenado retorne para o corpo sem ir, inicialmente, para os pulmões, e a artéria pulmonar deriva do ventrículo esquerdo, fazendo com que o sangue oxigenado volte para os pulmões (STANFORD CHILDREN'S HEALTH, 2019a). Além disso, pode haver mistura de sangue por meio de um forame oval patente, por uma CIA, ou ainda através de uma CIV (PURI *et al*., 2017).

Bebês recém-nascidos com essa patologia apresentam cianose nas primeiras 12 horas de vida e não respondem ao oxigênio ou à ventilação mecânica. O exame de eletrocardiograma pode estar normal ou indicar hipertrofia do ventrículo direito (PURI *et*

al., 2017). Essa DCC se caracteriza pela presença de cianose com insuficiência cardíaca congestiva (ICC), e em alguns casos pode não ser percebida, causando a morte da criança antes mesmo do seu diagnóstico (ROHIT; SHRIVASTAVA, 2018).

2.2.2. Dupla saída do ventrículo direito (DSVD)

Defeito cardíaco congênito complexo, no qual a artéria aorta e a artéria pulmonar estão ligadas ao ventrículo direito (STANFORD CHILDREN'S HEALTH, 2019a).

2.2.3. Truncus Arteriosus

Cardiopatia congênita que corresponde entre 2% a 5% das DCCs (PURI *et al*., 2017). Essa estrutura se estabelece quando o grande vaso sanguíneo que se forma durante o desenvolvimento fetal não se separa completamente (STANFORD CHILDREN'S HEALTH, 2019a), e desse modo não há formação do septo aórtico-pulmonar (PURI *et al*., 2017). Assim, uma grande conexão entre a artéria pulmonar e a artéria aorta se constitui.

No caso dessa patologia, há uma CIV associada e uma válvula troncular comum, tricúspide ou quadricúspide. Os pacientes apresentam sintomas de hiper circulação profunda nas primeiras 48 horas de vida e sopro sistólico (PURI *et al*., 2017).

2.2.4. Tetralogia de Fallot (ToF)

Doença cardíaca congênita (DCC) cianótica mais comum em bebês recém-nascidos (PURI *et al*., 2017), caracterizada por uma condição complexa, em que há a combinação de quatro defeitos cardíacos congênitos distintos. São eles: defeito do septo ventricular, estenose da válvula pulmonar, espessamento do ventrículo direito e a aorta sobreposta, isto é, posicionada sobre o defeito do septo ventricular (STANFORD CHILDREN'S HEALTH, 2019a).

Essa malformação torna insuficiente o fornecimento de oxigênio sanguíneo para o corpo dos bebês, tornando-os cianóticos. Além disso, os pacientes com essa cardiopatia congênita possuem um sopro sistólico de ejeção sobre a área pulmonar, o que indica estenose pulmonar, e podem apresentar ataques hiper cianóticos que causam agitação, aumentando a resistência vascular pulmonar e a frequência cardíaca (PURI *et al*., 2017).

2.2.5. Atresia pulmonar

Defeito em que a válvula pulmonar ou a artéria pulmonar está subdesenvolvida. Desse modo, distúrbios durante o desenvolvimento dessa válvula, que se localiza entre o

ventrículo direito e a artéria pulmonar, irão impedir que o sangue flua do ventrículo direito para os pulmões (STANFORD CHILDREN'S HEALTH, 2019a).

2.2.6. Atresia tricúspide

Nessa condição, a válvula tricúspide não se forma e um pequeno ventrículo direito se desenvolve. Com isso, o fluxo sanguíneo para os pulmões se torna insuficiente, pois o sangue não flui do átrio direito para o ventrículo direito (STANFORD CHILDREN'S HEALTH, 2019a).

2.2.7. Síndrome do coração esquerdo hipoplásico

Patologia cardíaca tida como quarto tipo mais comum de DCC cianótica (PURI *et al*., 2017), e que corresponde a uma combinação de anormalidades em que o ventrículo esquerdo, a válvula mitral, a aorta e a válvula aórtica são estruturas subdesenvolvidas (STANFORD CHILDREN'S HEALTH, 2019a). Devido à essas alterações, o ventrículo esquerdo está hipoplásico e fica impedido de bombear sangue para o corpo, uma vez que há uma redução no fluxo sanguíneo do átrio esquerdo para o ventrículo esquerdo, assim como do ventrículo esquerdo para a artéria aorta (PURI *et al*., 2017).

Essa síndrome pode ser fatal na ausência de tratamento (STANFORD CHILDREN'S HEALTH, 2019a). Os pacientes podem apresentar hiper circulação pulmonar e sinais de má perfusão sistêmica com pulsos fracos e diurese. As radiografias de tórax mostram congestão vascular pulmonar e uma possível cardiomegalia, em razão da ventriculomegalia no lado direito (PURI *et al*., 2017).

2.3. TRATAMENTOS

Para o tratamento das cardiopatias congênitas, geralmente são realizados métodos cirúrgicos, procedimentos utilizando cateter (SUN *et al*., 2015) e tratamentos farmacológicos. Alguns bebês que nascem com determinadas alterações mais simples, se desenvolvem normalmente sem a necessidade de um recurso terapêutico específico, uma vez que esses defeitos podem se regularizar durante o crescimento da criança (STANFORD CHILDREN'S HEALTH, 2019a).

No caso de tratamentos com medicamentos, as condições fisiopatológicas da cardiopatia são consideradas como base (UPADHYAY *et al*., 2019). Bebês e crianças com canal arterial patente podem ser submetidas às terapias médicas utilizando fármacos, como ibuprofeno e indometacina, para o fechamento do canal (PURI *et al*., 2017).

As técnicas de cateter, como as intervenções percutâneas, são mecanismos mais simples que em alguns casos podem substituir as cirurgias, sendo utilizadas para reparar defeitos cardíacos como a estenose da válvula pulmonar (SUN *et al*., 2015). Pacientes com essa condição ou com estenose aórtica crítica realizam, ainda no período neonatal, o procedimento de valvoplastia por balão com cateter (PURI *et al*., 2017).

Além disso, pacientes com alguns tipos de CIV podem ter o reparo do defeito realizado através do cateterismo cardíaco, assim como crianças com coarctação da aorta, que fazem a correção cirúrgica em laboratórios de cateterismo, com angioplastia com balão e colocação de um *stent*. A maioria das crianças diagnosticadas com transposição das grandes artérias são submetidas a um procedimento baseado em cateter, denominado septostomia atrial com balão. Essa técnica auxilia na formação ou no aumento de um defeito do septo atrial, com o intuito de que haja uma maior mistura de sangue até o momento da cirurgia (PURI *et al*., 2017).

Em situações de maior gravidade, a cirurgia com o peito aberto se torna necessária para corrigir a malformação cardíaca. O método pode ser utilizado para fechar cavidades no coração, reparar ou substituir válvulas cardíacas e corrigir outros defeitos mais complexos (SUN *et al*., 2015). Pacientes com CIA hemodinamicamente relevante passam por intervenção cirúrgica entre três (3) e quatro (4) anos de idade, sendo o reparo realizado com um *patch* ou por meio do fechamento da irregularidade septal com sutura primária (PURI *et al*., 2017).

A Tetralogia de Fallot pode ser corrigida com procedimentos paliativos, como por exemplo com um *shunt* de *Blalock-Taussig-Thomas* (BTT), ou ainda por meio de uma cirurgia completa, na qual se realiza uma ressecção da obstrução do ventrículo direito e o fechamento da CIV. Enquanto que pacientes diagnosticados com transposição das grandes artérias necessitam de um reparo cirúrgico, denominado troca arterial, para alterar os grandes vasos para os ventrículos adequados. Após esses tipos de operações, os pacientes precisam de um acompanhamento cardiológico constante ao longo de sua vida (PURI *et al*., 2017).

Vale ressaltar que, existem procedimentos híbridos, envolvendo a combinação de mais de um tipo de intervenção, capazes de obter melhores resultados do que em suas abordagens individuais e sendo menos invasivos. Além disso, a terapia regenerativa com células-tronco, que envolve uma investigação das cardiopatias congênitas, vem sendo

estudada de forma ampla. Alguns estudos demonstram que as funções do ventrículo direito, especialmente a função diastólica nos casos de sobrecarga de volume do ventrículo, são preservadas com o transplante de células mononucleares do sangue do cordão umbilical (UPADHYAY *et al*., 2019).

2.4. MODALIDADES DE DIAGNÓSTICO

No Brasil, o Ministério da Saúde reforça a importância do diagnóstico e tratamento precoce das doenças cardíacas congênitas (DCC), sendo o acompanhamento médico durante o pré-natal fundamental para o diagnóstico, principalmente quando existem suspeitas clínicas de problemas cardíacos no feto (PENIDO, 2020). Bebês e crianças com cardiopatias congênitas são assistidas por médicos cardiologistas pediátricos, responsáveis por realizar o diagnóstico dessas patologias e gerenciar a saúde de pacientes com essa condição antes e após a intervenção cirúrgica (STANFORD CHILDREN'S HEALTH, 2019a).

Alguns testes e exames de imagem são capazes de indicar a presença de uma cardiopatia, como por exemplo, o ultrassom morfológico e o ecocardiograma fetal, feitos no período gestacional, e o teste do coraçãozinho, realizado após o nascimento do bebê, entre as primeiras 24 horas e 48 horas de vida, antes da alta hospitalar (PENIDO, 2020). Além disso, a oximetria de pulso, que mensura a quantidade de oxigênio no sangue, pode indicar também a presença de algum problema cardíaco (SUN *et al*., 2015).

Outro tipo de avaliação diagnóstica importante, o ecocardiograma, pode ser realizado depois do nascimento da criança. Esse exame produz imagens do coração com defeito e permite avaliar os batimentos cardíacos, identificando irregularidades nas válvulas cardíacas e no músculo cardíaco (SUN *et al*., 2015), e tornando possível um planejamento clínico apropriado por neonatologistas e cardiologistas. Recentemente, foram adicionadas novas técnicas de ecocardiografia, como a imagem Doppler e a análise de tensão tecidual (UPADHYAY *et al*., 2019).

A ecocardiografia 3D se tornou mais comum nas práticas clínicas a partir do ano 2000, com o surgimento dos transdutores matriciais. Esse método de imagem possibilita a análise do volume e do tamanho da câmara cardíaca, assim como sua função segmentar e global. Todavia, as imagens adquiridas por meio desse tipo de exame são limitadas, uma vez que a sua exibição ocorre apenas em duas dimensões, com a percepção de profundidade construída através de alterações na escala de cores (SANZ *et al*., 2017).

No caso da ressonância magnética (RM), a técnica de imagem dispõe de vantagens como uma melhor resolução temporal e oferece uma boa diferenciação entre o miocárdio e o sangue, sem a necessidade do uso de contraste intravenoso e da exposição dos pacientes à radiação ionizante. Contudo, apresenta uma resolução espacial menor, as imagens são obtidas em tempos mais longos e podem ser suscetíveis a artefatos ferromagnéticos, fazendo com que o conjunto de dados de origem tenha uma qualidade inferior (SANZ *et al*., 2017).

Esse exame proporciona uma avaliação precisa da anatomia, fisiologia e função do coração (UPADHYAY *et al*., 2019), e para a criação de um modelo em 3D pode ser realizado por meio de duas sequências distintas que são, a angiografia por ressonância magnética e a precessão livre em estado estacionário balanceado 3D (SANZ *et al*., 2017).

A angiografia por tomografia computadorizada (TC), também denominada angiotomografia, pode denotar estruturas extracardíacas vasculares e não vasculares, assim como a anatomia coronariana com alto contraste tecidual entre o miocárdio e o lúmen. Esse método proporciona uma resolução espacial superior à ressonância magnética e as imagens podem ser obtidas em tempos mais curtos. Além disso, essa modalidade produz conjuntos de dados de imagens 3D de boa qualidade e com informações precisas para a prototipagem rápida (SANZ *et al*., 2017).

Entretanto, a angiotomografia possui uma resolução temporal menor, necessita da administração de contraste através de um acesso intravenoso, o que pode ocasionar efeitos colaterais nefrotóxicos e alérgicos, e expõe os pacientes à radiação ionizante, sendo especialmente preocupante na faixa etária comum dos pacientes que possuem cardiopatias congênitas. Atualmente, o exame vem sendo realizado com controle de eletrocardiograma (ECG), pois proporciona a diminuição do artefato de movimento, melhorando a qualidade da imagem (SANZ *et al*., 2017).

Exames complementares podem auxiliar no diagnóstico dos defeitos cardíacos. A radiografia do tórax, apesar de ser pouco específica (DAMIANO, 2020), permite visualizar se o coração está dilatado ou se os pulmões estão apresentando sangue ou outro fluido em excesso. O eletrocardiograma irá registrar a atividade elétrica do coração por meio de eletrodos posicionados no tórax do paciente (SUN *et al*., 2015), identificando a frequência cardíaca e o ritmo cardíaco, assim como arritmias, sobrecargas, bloqueios e

desvios do eixo cardíaco, que podem sugerir um tipo de cardiopatia congênita (DAMIANO, 2020).

3. IMAGENS MÉDICAS EM 3D

Com a descoberta dos raios-X, no ano de 1895, o diagnóstico clínico através de imagens médicas se tornou de fundamental importância para a Medicina. Os avanços nas tecnologias de imagem com o desenvolvimento da ultrassonografia, da tomografia computadorizada (TC) e da ressonância magnética (RM), foram capazes de viabilizar uma melhor visualização de ossos e tecidos moles do corpo humano (BYL *et al*., 2020).

Entretanto, mesmo diante de um progresso significativo, normalmente, as imagens são reproduzidas em uma tela plana de computador, com percepção de profundidade limitada, o que dificulta o entendimento da anatomia que está sendo analisada (BRUN *et al*., 2020). Com isso, a possibilidade da renderização volumétrica 3D, juntamente com o surgimento de imagens médicas tridimensionais, promoveram inovações nos métodos de diagnósticos tradicionais e tornaram o estudo de imagem mais elucidativo, inclusive nos casos de cardiopatias congênitas (BYL *et al*., 2020), ao fornecer detalhes sobre o comprimento, a localização e a relação entre as estruturas (BASSO *et al*., 2021).

Assim, imagens em três dimensões (3D) de pacientes com irregularidades cardíacas vêm atuando como fonte de dados para técnicas avançadas de visualização, como a realidade virtual (RV), a realidade aumentada (RA), a realidade mista e a impressão em 3D (GOO *et al*., 2020). Essas tecnologias revolucionaram o modo de uso desses conjuntos de dados de imagens por médicos e outros profissionais da saúde (BYL *et al*., 2020).

Em particular, a impressão em 3D está se tornando um método útil como complemento as técnicas convencionais de diagnóstico. No campo da Medicina, a sua primeira aplicação envolveu a personalização de implantes e o planejamento cirúrgico na área da ortopedia. A partir disso, outras estruturas do corpo, como por exemplo, o crânio, a mandíbula e o quadril puderam ser impressos (AL'AREF *et al*., 2018).

Desse modo, sistemas que utilizam imagens médicas em 3D promoveram melhorias significativas no que diz respeito a visualização das relações espaciais das estruturas cardíacas (BYL *et al*., 2020), sendo eficientes no entendimento da morfologia dessas patologias, auxiliando no diagnóstico, no tratamento e no acompanhamento pós-terapêutico dos pacientes (GOO *et al*., 2020). Além disso, o uso de imagens médicas em 3D pode ser útil para o treinamento médico e planejamento cirúrgico, assim como para a

educação do paciente e dos seus familiares (BYL *et al*., 2020), permitindo, por exemplo, a participação dos pais na escolha dos tratamentos apresentados (JAWORSKI *et al*., 2017).

3.1. MODELOS DO CORAÇÃO EM 3D

As etapas que envolvem o processo de produção de um modelo do coração em 3D vão desde a aquisição de um conjunto de dados de imagem de alta qualidade até a fase de pós-processamento (SANZ *et al*., 2017). Imagens ideais, com características importantes para que o pós-processamento ocorra com maior precisão e rapidez, devem apresentar artefatos mínimos, baixos ruídos, bom contraste entre o sangue e o miocárdio e alta resolução espacial isotrópica. Diante disso, a tomografia computadorizada (TC) pode ser apontada como a modalidade de imagem mais adequada (GOO *et al*., 2020).

Sabendo da complexidade dos defeitos cardíacos congênitos, o uso de modelos em 3D, que reproduzem a anatomia cardíaca de pacientes acometidos por essas irregularidades, está se tornando frequente (WHITE *et al*., 2018). A sua aplicação como uma ferramenta educacional pode auxiliar no ensino de médicos, residentes e estudantes de Medicina ao permitir a visualização e uma manipulação mais livre desses modelos (AL'AREF *et al*., 2018), promovendo melhorias na compreensão e no aprendizado viso espacial das estruturas anatômicas (WHITE *et al*., 2018).

O emprego de tecnologias como a impressão 3D na cardiologia e na cirurgia cardíaca pediátrica vem sendo mencionado em estudos desde 2006 (AMORIM JÚNIOR, 2020). Esse método inovador permite que os profissionais de saúde tenham uma representação física da estrutura anatômica do paciente antes de entrar em contato com ela de fato, tornando possível a realização de simulações no planejamento cirúrgico (WHITE *et al*., 2018). Além disso, como muitas vezes as cardiopatias congênitas se manifestam em anatomias únicas e complexas, modelos em 3D impressos possibilitam intervenções mais precisas e individualizadas (AL'AREF *et al*., 2018).

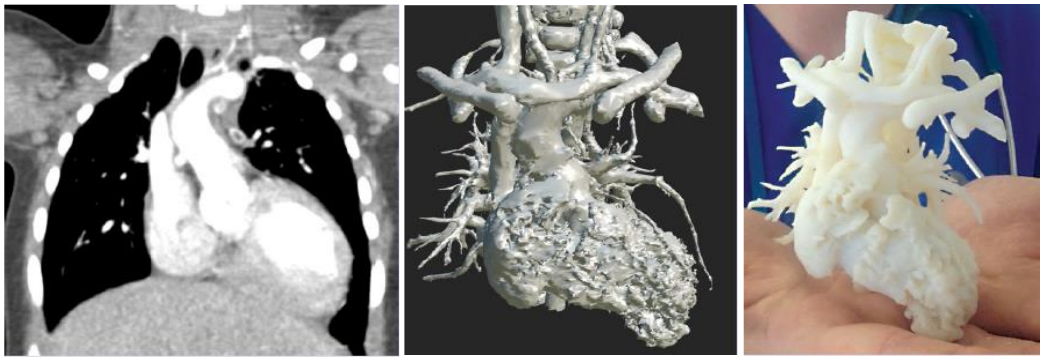
Os modelos digitais em 3D do coração também surgem como uma alternativa, podendo ser visualizados por diferentes meios (GOO *et al*., 2020). No estudo de Awori *et al.* (2020), foi realizada uma análise comparativa da eficácia de protótipos cardíacos tridimensionais virtuais e físicos de malformações cardíacas, para a educação de profissionais da saúde e dos pais de crianças que apresentavam esses defeitos.

Os corações em 3D foram construídos a partir de dados de imagens de exames de tomografia computadorizada (TC) e de ressonância magnética (RM), para vinte (20) cardiopatias congênitas comuns. Após a etapa do pós-processamento, os modelos foram impressos e visualizados através de um *tablet*. Para os médicos e os pais, o emprego dos corações em 3D impressos e digitais proporcionaram um entendimento significativamente maior da patologia analisada, sendo os modelos físicos considerados de maior benefício. Contudo, vale ressaltar que, os participantes que se sentiram mais confortáveis com o uso de tecnologias modernas apresentaram preferência pelos modelos virtuais, quando comparados com as técnicas bidimensionais comuns e os modelos impressos.

Jaworski *et al*. (2017), em seu artigo, descreveu o caso de um paciente de seis (6) meses de idade diagnosticado com comunicação interventricular (CIV) e atresia pulmonar, com agenesia completa do tronco pulmonar e ausência das artérias pulmonares direita e esquerda. Inicialmente, o paciente foi submetido a intervenções, e após alguns meses, foi realizada uma tomografia computadorizada (TC) com contraste. Os dados de imagem obtidos a partir do exame foram segmentados e processados, e posteriormente foi realizada a impressão em 3D da anatomia cardíaca da criança.

A escolha pelo uso dessa técnica ocorreu devido à complexidade das irregularidades cardíacas. Assim, os modelos anatômicos impressos em 3D desse caso, permitiram que os membros da equipe médica analisassem e planejassem qual seria a melhor conduta para reconstruir a via de saída do ventrículo direito, e os preparou para o procedimento cirúrgico. Na Figura 1 (a) pode ser visualizado o exame de tomografia computadorizada (TC) do paciente, e na Figura 1 (b) e Figura 1 (c) está sendo mostrado o modelo em 3D do coração desse mesmo paciente, de modo virtual e impresso.

Figura 1. (a) Tomografia computadorizada do paciente, (b) Modelo tridimensional virtual do coração e (c) Modelo tridimensional impresso do coração.



(a) **(b)** **(c)**

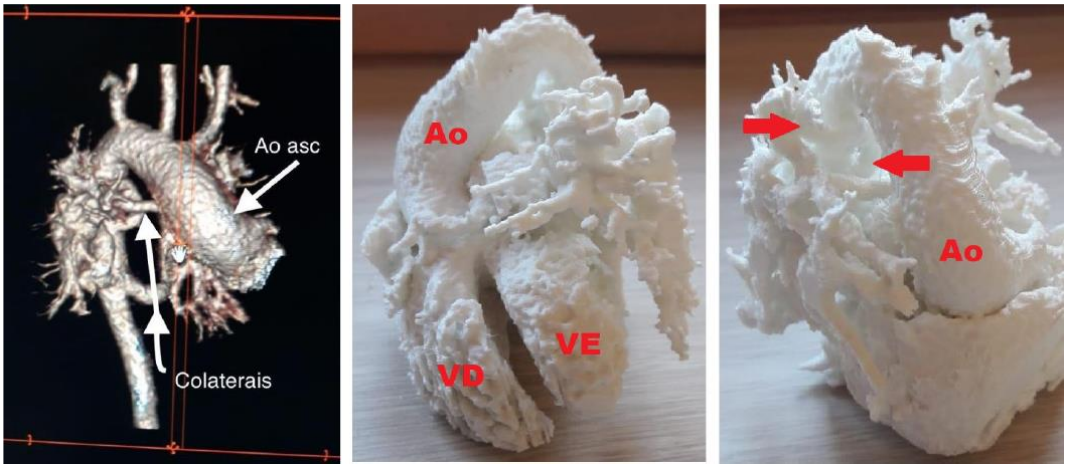
Fonte: JAWORSKI *et al*., 2017.

No estudo de Basso *et al*. (2021), foi feita a impressão de protótipos tridimensionais de corações com cardiopatias congênitas para uma análise e comparação com imagens bidimensionais de angiotomografia computadorizada. As malformações cardíacas escolhidas foram atresia pulmonar com comunicação interventricular (CIV) e hipoplasia do coração esquerdo após a colocação de *stent* no canal arterial e cerclagem dos ramos da artéria pulmonar.

As imagens foram adquiridas em um tomógrafo e processadas no *software Slic3r* para a segmentação. Após isso, os modelos do coração foram impressos. Os protótipos construídos possuíam o mesmo tamanho da anatomia dos pacientes, o que tornou possível realizar uma análise comparativa das dimensões entre as estruturas. Além disso, os modelos em 3D permitiram observar as cardiopatias a partir de diversos ângulos, facilitando o entendimento.

No caso da atresia pulmonar com comunicação interventricular (CIV) foi possível observar de modo comparativo as cavidades ventriculares e no caso da hipoplasia do coração esquerdo se pôde ver o grau da hipoplasia. A Figura 2 (a) demonstra o primeiro caso do estudo, através de uma representação virtual em 3D do coração do paciente. A Figura 2 (b) e a Figura 2 (c) exibem os protótipos em 3D desse mesmo coração, a partir da visão frontal e lateral direita, respectivamente.

Figura 2. (a) Modelo virtual do coração com atresia pulmonar e comunicação interventricular (CIV), (b) e (c) Protótipos em 3D do coração.



(a) **(b)** **(c)**

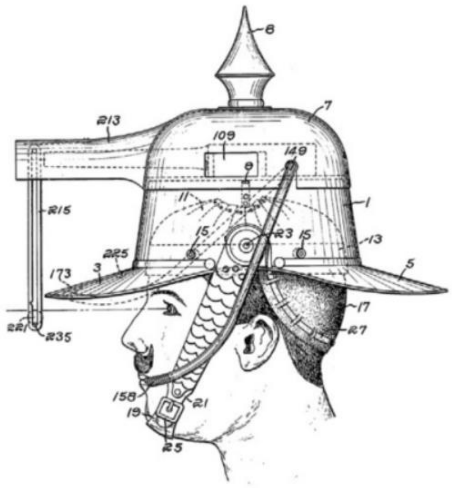
Fonte: BASSO *et al*., 2021.

4. REALIDADE VIRTUAL

A realidade virtual (RV) pode ser definida como uma simulação tridimensional do mundo real em um ambiente virtual (ONG *et al*., 2018), que por sua vez consiste em um espaço simulado no interior de uma cena virtual, no qual objetos físicos podem ser inseridos. Essa tecnologia pode ser capaz de permitir a interação direta do usuário (ONG *et al*., 2018), induzindo a sensação física e mental de estar presente naquele espaço (ISAR, 2018). O seu surgimento ocorreu, inicialmente, na comunidade de jogos (ONG *et al*., 2018), mas o uso da RV também desempenhou um papel nas aplicações industriais, especialmente nos setores automotivo e militar, desde a década de 1970 (EL BEHEIRY *et al.*, 2019).

Contudo, o conceito do *head-mounted display* (HMD) remonta o ano de 1916, quando uma patente dos Estados Unidos da América (EUA) foi concedida a Albert Bacon Pratt pela criação de um *helmet-mounted*, intitulado "*Weapon*". Esse capacete de soldado, ilustrado na Figura 3, era utilizado para mirar e acionar uma pequena arma, e embora tenha muitas diferenças em relação aos *designs* atuais dos HMDs, apresentava paralelos interessantes (FOOTE, 2015).

Figura 3. Primeiro *head-mounted display* patenteado em 1916.



Fonte: Adaptado de SHERMAN; CRAIG, 2003.

No ano de 1960, nos EUA, Morton Heilig obteve uma patente de um aparelho de televisão estereoscópico, de uso individual e com mecanismos que permitem exibir sensações visuais, olfativas e auditivas, similar com os HMDs da década de 1990. Somente em 1965, a ideia de uma tela em que os usuários são capazes de interagir com os objetos, sem que seja necessário seguir as leis da realidade física, foi apresentada por

Ivan Sutherland. Três anos depois, esse mesmo cientista da computação desenvolveu o primeiro *head-mounted display* (HMD), expondo assim o potencial da nova tecnologia de realidade virtual (SHERMAN; CRAIG, 2003).

Assim, em 1989, foi divulgado um sistema completo de realidade virtual, denominado *Reality Built for 2* (RB-2) (SHERMAN; CRAIG, 2003). Essa ferramenta se desenvolve a partir da combinação de três efeitos distintos, que são: visão estereoscópica, na qual cada um dos olhos vê uma mesma cena por meio de ângulos diferentes; captura de movimento, que permite rastrear os movimentos no interior das cenas renderizadas, e experiência imersiva, em que os usuários utilizam um *headset* opticamente hermético (EL BEHEIRY *et al.*, 2019).

Toda a imersão dos usuários nesse ambiente interativo e explorável se torna possível devido a *feedbacks* sensoriais, sejam eles visuais, sonoros ou táteis, gerados com base na posição física do usuário à medida em que ele se move (SACKS; AXELROD, 2020), ou seja, por meio do rastreamento de movimento.

Nesse sistema, a saída gráfica em 3D, produzida através da integração dos dados de imagem, pode ser visualizada com um *headset* (RAD *et al*., 2022), isto é, um *head-mounted display* (HMD). Desse modo, as imagens gráficas são apresentadas em um par de telas e um sensor de rastreamento, posicionado na altura da cabeça do usuário, indica para qual local o usuário está olhando. Assim, a exibição da imagem ocorre do ponto de vista da posição do participante (SHERMAN; CRAIG, 2003).

Outros dispositivos podem ser acrescentados para que haja uma maior interação, como por exemplo, sistemas de reconhecimento de voz, luvas ou um *joystick* (SHERMAN; CRAIG, 2003), como demonstrado na Figura 4. No caso dos controladores de movimento, os sensores posicionados em sua superfície permitem que, futuramente, análises computadorizadas automáticas sejam realizadas através do mapeamento do movimento da mão, por exemplo (MAZUREK *et al*., 2019).

Figura 4. Participante de um estudo utilizando óculos de realidade virtual e controladores portáteis.

Fonte: LAU; GUPTA; SUN, 2021.

Uma grande vantagem da tecnologia de RV se refere à liberdade e a autonomia para explorar e interagir com o ambiente virtual. Além disso, como os objetos virtuais são observados de ângulos arbitrários, as ações dos usuários são estimuladas e orientadas de acordo com a sua própria curiosidade. Sendo assim, as estruturas de interesse podem ser mais facilmente identificadas e as possibilidades de novas descobertas, na área de estudo que está sendo analisada, aumentam (EL BEHEIRY *et al.*, 2019).

Com os avanços no campo tecnológico, a RV se tornou acessível a novas aplicações e os seus efeitos na pesquisa científica podem ser notados (EL BEHEIRY *et al.*, 2019). Na área médica, a tecnologia de RV vem obtendo notoriedade, sendo utilizada para diferentes propósitos, como por exemplo, na assistência cirúrgica, seja no planejamento pré-operatório ou no suporte pós-operatório aos pacientes, na reabilitação de Acidente Vascular Cerebral (AVC), no ensino de técnicas cirúrgicas e na educação médica (RAD *et al*., 2022).

4.1. APLICAÇÕES EM REALIDADE VIRTUAL NA MEDICINA

No campo da Medicina, a tecnologia de realidade virtual (RV) foi adotada no início da década de 1990, a partir da necessidade de analisar dados médicos complexos, especialmente para o planejamento cirúrgico (MAZUREK *et al*., 2019), e com o intuito

de oferecer treinamentos para aperfeiçoar habilidades cirúrgicas e tornar as intervenções mais bem sucedidas (JAVAID; HALEEM, 2020). Atualmente, a RV está sendo empregada não só nas simulações cirúrgicas, como na psicologia, na telemedicina e nos processos de reabilitação (MAZUREK *et al*., 2019).

Na terapia cognitivo-comportamental tradicional, para o tratamento de distúrbios psicológicos como transtornos de ansiedade e condições de fobias complexas (acrofobia, claustrofobia e fobia social generalizada), os pacientes são submetidos a uma abordagem denominada terapia de exposição (LIL *et al*., 2017). Esse método consiste em expor os pacientes, de maneira progressiva, a cenários que provocam medo, receio ou aversão (MAZUREK *et al*., 2019). Entretanto, muitas vezes, esse tipo de procedimento se torna difícil de ser executado, uma vez que recriar determinadas situações em um ambiente real pode ser desafiador (LIL *et al*., 2017).

Com isso, a utilização da tecnologia de RV surgiu como uma nova alternativa para a psicoterapia (LIL *et al*., 2017). O conceito do seu uso para tratar transtornos mentais foi apresentado em 1992 na *Clark Atlanta University*. Desde então, a RV tem se mostrado como um recurso terapêutico eficiente (MAZUREK *et al*., 2019) ao fazer com que os pacientes vivenciem um ambiente virtual realista, capaz de estimular as emoções ansiosas decorrentes do seu transtorno mental (LIL *et al*., 2017).

Além disso, estudos sugerem que usar uma ferramenta em RV pode ser útil no tratamento de transtornos depressivos. A aplicação dessa técnica colabora na redução da depressão (JAVAID; HALEEM, 2020), por meio de jogos de computador que incentivam a atividade física e causam sensações de relaxamento (MAZUREK *et al*., 2019). Na Espanha, pesquisadores utilizaram um sistema em RV em crianças com transtorno do espectro autista (TEA) para melhorar as suas habilidades emocionais. As crianças praticavam suas respostas emocionais quando interagiam com personagens em 3D e ao fazer tarefas para reconhecer suas emoções (LIL *et al*., 2017).

Na reabilitação, o uso de tecnologias computacionais com base na RV, também conhecido como “reabilitação virtual”, pode tratar disfunções variadas, de maneira presencial ou à distância. Através da combinação de imagens, efeitos e determinadas atividades, o emprego dessa técnica promove um maior interesse do paciente, tornando esse tipo de tratamento mais envolvente do que o tratamento motor convencional (MAZUREK *et al*., 2019).

Com isso, esse novo tipo de metodologia pode auxiliar na recuperação da função motora dos membros superiores em pacientes que foram acometidos por um Acidente Vascular Cerebral (AVC). Alguns estudos retratam a utilização da RV com o intuito de melhorar a função do membro superior dentro de um intervalo de seis (6) meses após o AVC (MAZUREK *et al*., 2019).

Para o controle e modulação da dor, a aplicação da RV foi apresentada pela primeira vez em 1998, como uma opção aos tratamentos farmacológicos tradicionais com analgésicos e anestésicos. Apesar de estar em fases iniciais de desenvolvimento, a sua utilização se mostra eficaz no manejo da dor aguda e crônica, por meio do aumento da distração do paciente, reduzindo a ansiedade e a intensidade da dor (LIL *et al*., 2017).

Isso se torna possível pois, em um ambiente virtual totalmente imersivo, a percepção da dor se altera com o bloqueio de estímulos dolorosos externos provenientes do ambiente real (LIL *et al*., 2017). A *Stanford Childhood Anxiety Reduction*, através do programa *Innovation and Technology* (CHARIOT), utiliza equipamentos de RV para distrair pacientes, facilitando a realização de procedimentos, como a troca de curativos e a colocação intravenosa. Essa conduta pode ser válida para pacientes submetidos frequentemente a essas pequenas intervenções, como aqueles que estão se recuperando de uma cirurgia de correção de cardiopatia congênita (SACKS; AXELROD, 2020).

Desse modo, como muitas crianças associam o ambiente hospitalar a um cenário temido e estressante, o *Lucile Packard Children's Hospital Stanford* utiliza essa nova tecnologia para acalmar os pacientes durante o seu tratamento, por meio de uma distração visualmente atraente. As crianças utilizam um *headset* personalizado acompanhado de um *smartphone* com jogos adaptados para o ambiente hospitalar, que requerem movimentos limitados da cabeça e dos braços (Figura 5). Elas podem voar em aviões de papel no céu, nadar no fundo do mar e agarrar bolas de basquete usando a cabeça, aliviando a dor e diminuindo os níveis de ansiedade. O efeito positivo causado pelo uso da RV pode perdurar após o procedimento (DETREMPE, 2017).

Figura 5. Paciente utilizando um dispositivo de realidade virtual no *Lucile Packard Children's Hospital Stanford*.

Fonte: DETREMPE, 2017.

Na educação médica, as aplicações dessa tecnologia são baseadas em simulações inovadoras no processo de ensino-aprendizagem, o que o torna mais qualificado (JAVAID; HALEEM, 2020). Além de poder ser acessada de forma assíncrona e em locais geograficamente distintos, ou seja, onde for mais adequado para o usuário, a ferramenta em RV proporciona realismo, boas análises dos dados apresentados e uma retenção de conhecimento consideravelmente superior, quando comparada com os modelos de didática padrões (KASSUTTO; BASTON; CLANCY, 2021).

Para o planejamento cirúrgico, modelos em três dimensões (3D) virtuais podem ser utilizados para que os cirurgiões programem e estruturem, com maior precisão e detalhamento, o processo cirúrgico de um determinado paciente. Além disso, o uso desse método inovador permite que cientistas, pesquisadores, cirurgiões, médicos e estudantes estabeleçam uma melhor comunicação no estudo de casos complexos, e a partir disso determinem o tratamento ideal (JAVAID; HALEEM, 2020).

Com o contínuo avanço de técnicas cirúrgicas, apenas observar a realização de procedimentos cirúrgicos para o desenvolvimento de habilidades operatórias específicas não era mais o bastante (LIL *et al*., 2017). Juntamente a isso, o interesse por novos métodos mais precisos e estimulantes, capazes de apoiar o desempenho cirúrgico, impulsionaram o surgimento de tecnologias interativas, como a RV, para o treinamento em cirurgia através de simuladores (RAD *et al*., 2022).

Por meio dessa metodologia, estudantes de Medicina, médicos recém-formados e cirurgiões podem adquirir e praticar técnicas cirúrgicas básicas, interagindo em tempo real com todos os componentes anatômicos, como ossos, vasos sanguíneos, músculos e pele. As mudanças que acontecem durante cada etapa da cirurgia também podem ser observadas e analisadas (LIL *et al*., 2017).

Dessa forma, a experiência imersiva permite o entendimento de estruturas corporais complexas e de suas relações anatômicas, assim como o manuseio de instrumentos cirúrgicos em um ambiente livre de riscos (LIL *et al*., 2017). Através disso, o desempenho e a qualidade das intervenções cirúrgicas tendem a aumentar, uma vez que os estudantes e profissionais desenvolvem uma maior segurança na realização dos procedimentos de modo seguro e controlado, sem ocasionar danos (JAVAID; HALEEM, 2020).

Em institutos de treinamento laparoscópico, simuladores em realidade virtual (RV) não imersivos estão sendo utilizados, possibilitando a prática de técnicas laparoscópicas sem expor os pacientes. De acordo com Lil *et al.* (2017), os quatro simuladores mais populares são o *LapSim* (*Surgical Science*, Suécia), *Lap Mentor* (3D *System*, EUA), MIST-VR (*Minimally Invasive Surgical Trainer - Virtual Reality*, *Mentice* AB, Suécia) e o *Simendo* (*Simendo*, Holanda).

Outras aplicações diversas na chamada “cirurgia virtual” estão surgindo, com grandes expectativas para a área da cardiologia pediátrica (SACKS; AXELROD, 2020). O uso desse recurso pode simular o procedimento cirúrgico, diminuindo o seu tempo de execução e possíveis riscos (JAVAID; HALEEM, 2020). Na neurocirurgia, técnicas microcirúrgicas em amostras simuladas ou em recriações digitais do cérebro de pacientes estão sendo realizadas por neurocirurgiões em ambientes de RV (SACKS; AXELROD, 2020).

Além disso, especialistas em câncer de mama fazem o uso de imagens tridimensionais de massas cancerosas para sobrepor ao tecido de um paciente real, com o intuito de melhor conduzir procedimentos como ressecções e biópsias. Na cardiologia, eletrofisiologistas utilizam um coração virtual para guiar procedimentos de ablação cardíaca, de acordo com resultados de imagem personalizados (SACKS; AXELROD, 2020).

Na cirurgia cardíaca, uma das futuras aplicações em RV de grande potencial, diz respeito ao auxílio nas mudanças dos acessos cirúrgicos de esternotomia aberta para procedimentos minimamente invasivos. O uso da tecnologia poderá melhorar a visualização dos alvos cirúrgicos e consequentemente os resultados. Dessa forma, o trauma intraoperatório do paciente pode ser reduzido assim como o tempo de recuperação pós-cirúrgico (RAD *et al*., 2022).

Apesar de ter a sua eficiência amplamente demonstrada no treinamento para intervenções cirúrgicas, há indicativos crescentes do uso da RV no ensino de procedimentos não cirúrgicos. Estudos citam o treinamento em endoscopia, que está se tornando padrão para o treinamento endoscópico em gastroenterologia, e a educação em broncoscopia. Este último mostrou efetividade em comparação ao treinamento em broncoscopia tradicional, sendo observada uma melhora no desenvolvimento de habilidades e no tempo preciso para realizar o processo (KASSUTTO; BASTON; CLANCY, 2021).

Sistemas para treinar a comunicação entre médico e paciente também fazem uso dessa tecnologia. Médicos, enfermeiros e outros profissionais da saúde podem interagir com pacientes padronizados virtuais, com o intuito de desenvolver competências clínicas e aprimorar as suas tomadas de decisões (KASSUTTO; BASTON; CLANCY, 2021).

Na área das moléculas e nanomoléculas, técnicas de RV estão sendo implementadas. Luvas virtuais tornam possível a interação com átomos individuais por meio do chamado “toque virtual”. Através disso, os pesquisadores podem sentir, fisicamente, a força dessas partículas e compreender a biologia molecular de patologias como o mal de Alzheimer, o mal de Parkinson e a doença de Huntington (MAZUREK *et al*., 2019).

Desse modo, ferramentas em RV estão surgindo com a finalidade de melhorar tanto o ensino de intervenções médicas cirúrgicas e não-cirúrgicas, quanto a qualidade de vida dos pacientes. Segundo Mazurek *et al.* (2019), futuramente, essa tecnologia imersiva irá se tornar a metodologia de treinamento mais comum para cirurgiões mais jovens, sendo também capaz de auxiliar profissionais especialistas na aquisição de novas habilidades.

4.2. USO DA REALIDADE VIRTUAL NA CARDIOLOGIA PEDIÁTRICA

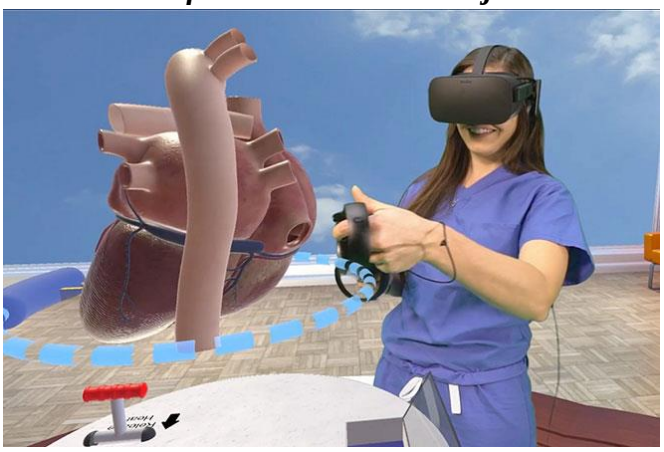
Tendo em vista a complexidade da estrutura tridimensional do coração humano e a importância de compreender os seus componentes e as relações entre eles, na área da cardiologia pediátrica, a tecnologia de realidade virtual (RV) surge como uma ferramenta empolgante, sendo uma de suas grandes aplicações a educação de estudantes e de profissionais. O uso dessa técnica pode auxiliar no entendimento de casos patológicos, por parte do próprio paciente e de seus familiares, e na preparação cirúrgica (SACKS; AXELROD, 2020).

Considerando que os defeitos cardíacos congênitos apresentam muitas variações, uma das vantagens de utilizar um ambiente 3D interativo se relaciona ao fato de que o planejamento cirúrgico dessas patologias envolve discussões detalhadas entre os membros da equipe médica. Diante disso, a RV está sendo usada para o treinamento de estudantes de Medicina e residentes, e alguns estudos demonstram que aqueles que fazem o seu uso concluem tarefas de aprendizagem em um menor tempo em comparação aos que não a utilizam (ONG *et al*., 2018).

O *Stanford Virtual Heart Project* tem como objetivo principal oferecer uma experiência imersiva, em que pode ser possível visualizar corações com malformações cardíacas e navegar em seu interior (SACKS; AXELROD, 2020), observando o fluxo sanguíneo e como o defeito cardíaco está prejudicando a função do órgão. Essa tecnologia de RV está sendo utilizada por estudantes de Medicina da *Stanford University School of Medicine* e vem sendo relatada como uma estratégia mais interessante e atraente para o entendimento de conceitos anatômicos e fisiológicos (STANFORD CHILDREN'S HEALTH, 2019b).

Além de analisar as relações espaciais de cada parte do coração (SACKS; AXELROD, 2020), os alunos podem observar a realização de reparos cirúrgicos por cirurgiões cardíacos pediátricos para a correção da irregularidade. A Figura 6 mostra uma estudante utilizando um *headset* de realidade virtual e um *joystick* para manusear o coração no ambiente virtual. No *Lucile Packard Children's Hospital Stanford*, os cardiologistas pediátricos também fazem uso dessa ferramenta inovadora para que os familiares possam compreender a condição cardíaca dos seus filhos (STANFORD CHILDREN'S HEALTH, 2019b).

Figura 6. Estudante manipulando o coração em um ambiente de realidade virtual - *Stanford Virtual Heart Project*.



Fonte: STANFORD CHILDREN'S HEALTH, 2019b.

Em virtude da grande variabilidade de anatomia do paciente acometido por alguma doença cardíaca congênita, a cirurgia cardíaca congênita pode ser definida como uma das abordagens cirúrgicas mais desafiadoras (RAIMONDI *et al.*, 2021). Desse modo, a utilização da RV no planejamento pré-cirúrgico proporciona benefícios como uma experiência mais imersiva e minuciosa, com uma melhor percepção e visualização de profundidade das estruturas anatômicas (RAD *et al*., 2022).

No trabalho de Mendez *et al.* (2019) foi relatado o caso de uma criança com dezoito (18) meses de idade, com diagnóstico de um grande defeito do septo ventricular. Para o planejamento cirúrgico foi desenvolvido um modelo 3D em realidade virtual (RV) da anatomia cardiovascular do paciente, a partir de imagens de ressonância magnética (RM). A ferramenta em RV tornou possível a realização de movimentos, ampliações e rotações em 360 graus (360º) do modelo elaborado. Assim, foram obtidas visualizações únicas e abrangentes que permitiram uma maior compreensão do tamanho do defeito e de outras estruturas cardíacas que não são acessíveis por meio de uma imagem convencional.

Ayerbe *et al.* (2020) propuseram em seu estudo um sistema de realidade virtual (RV), com o objetivo de realizar uma melhor análise da anatomia intracardíaca e de componentes próximos em um ambiente imersivo. Nesse caso, a paciente tinha nove (9) anos de idade e apresentava uma dupla via de saída do ventrículo direito com defeito do septo ventricular e posicionamento incorreto das grandes artérias, tendo sido submetida a intervenções cirúrgicas para correção dessas irregularidades anteriormente.

Para o desenvolvimento da aplicação, inicialmente, foi realizada uma angiografia por tomografia computadorizada com aquisição volumétrica. Após isso, os modelos 3D

da anatomia da paciente foram elaborados usando os *softwares Mimics* e *3-Matic* da *Materialise* e o ambiente em RV foi construído com os *softwares Unity* e *SteamVR*. Assim, a equipe médica pôde visualizar e manipular os modelos da reconstrução em 3D, avaliando a estrutura anatômica completa do coração. Foi possível definir a localização e a gravidade da malformação cardíaca e identificar o que estava ocasionando uma obstrução na via de saída do ventrículo esquerdo.

A chamada "cirurgia virtual", que vem sendo empregada em outras especialidades cirúrgicas, também tem aplicação na cirurgia cardíaca de defeitos congênitos. Esse tipo de modalidade cirúrgica pode ser usado no planejamento de implante de dispositivos de suporte circulatório mecânico, para prever qual deve ser o tamanho ideal da prótese que será implantada (ONG *et al*., 2017).

Ong *et al.* (2017) demonstraram o uso desse método virtual no caso de um paciente com 13 anos de idade, com diagnóstico de Tetralogia de Fallot com atresia pulmonar, e com histórico de procedimentos cirúrgicos para correção e reconstrução dessas malformações durante a sua infância. Para produzir o modelo em 3D do coração do paciente e simular os diferentes tamanhos de próteses em relação às dimensões estruturais de sua anatomia cardíaca, foram utilizados dados de ressonância magnética. A simulação cirúrgica possibilitou também predizer qual tamanho do implante se manteria adequado diante do crescimento contínuo do paciente.

Milano *et al.* (2019), em seu artigo, descreveram o uso de uma plataforma em realidade virtual (RV) durante a fase de planejamento para o reparo de uma malformação cardíaca congênita. O paciente tinha onze (11) meses de idade e o seu diagnóstico era de uma dupla via de saída do ventrículo direito com grandes artérias lado a lado, defeito do septo ventricular não comprometido e um pequeno defeito do septo ventricular muscular apical.

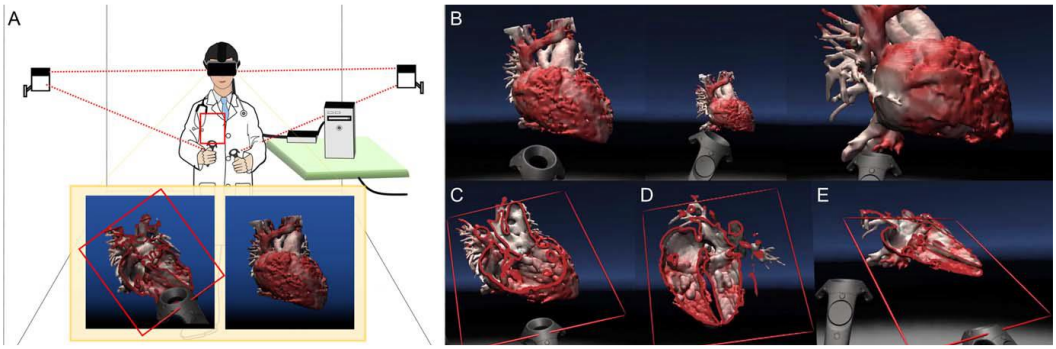
Por meio do uso dessa aplicação em RV, a equipe cirúrgica conseguiu simular um caminho defletor sem obstruções. Os cirurgiões puderam interagir com o modelo da anatomia do paciente a partir de vistas cirúrgicas convencionais e através de outros ângulos e vistas cirúrgicas não convencionais, que geralmente não são acessados durante a correção da dupla via de saída do ventrículo direito.

O estudo de Ong *et al.* (2018) apresenta o uso da técnica de realidade virtual (RV) para o planejamento cirúrgico de dois bebês acometidos por cardiopatias congênitas

complexas. O objetivo dessa aplicação era possibilitar que a representação da anatomia cardíaca dos pacientes pudesse ser visualizada e manipulada de forma interativa, em tempo real. Desse modo, a ferramenta atuou como um auxílio para as visualizações em 2D tradicionais no entendimento dos casos estudados, aprimorando a etapa do planejamento pré-cirúrgico.

Com o uso de imagens de tomografia computadorizada, os modelos 3D dos corações dos pacientes virtualmente renderizados foram criados por meio do *software* de segmentação 3D denominado DICOM *to Print* (D2P). Para a visualização em RV, foram utilizados um *headset* e dois controladores, como está esquematizado na Figura 7 (a), que permitiram a manipulação, ampliação e rotação dos modelos em 3D, assim como a realização de planos de corte para observar a estrutura intracardíaca. O usuário também podia se mover para ficar mais próximo do coração, explorando ângulos distintos. A Figura 7 (b) a (e) mostra como o modelo do coração pode ser manipulado e visualizado de forma dinâmica no ambiente virtual.

Figura 7. (a) Configuração da plataforma de RV e (b) a (e) Visualização do modelo 3D do coração em diferentes ângulos e planos no ambiente virtual.



Fonte: ONG *et al.*, 2018.

Desse modo, diante dos estudos apresentados, a tecnologia em RV surge como um importante complemento ao diagnóstico realizado através de imagens 2D e reconstruções em 3D visualizadas em um monitor convencional (AYERBE *et al*., 2020). O seu uso pode permitir uma manipulação específica pelo usuário e viabilizar a análise da anatomia do paciente na "perspectiva do cirurgião" (ONG *et al*., 2018).

A realidade virtual (RV) também pode ser útil para ensinar habilidades necessárias para noticiar diagnósticos clínicos delicados às famílias de pacientes com problemas cardíacos pediátricos. Esse tipo de plataforma de treinamento torna possível que estudantes e profissionais conduzam um diálogo com uma figura do familiar produzida

por computador, isto é, um personagem virtual, e após isso, avaliem a sua comunicação do ponto de vista do familiar (SACKS; AXELROD, 2020).

Vale ressaltar que, no planejamento pré-cirúrgico, a tecnologia de RV se mostra como uma alternativa mais econômica e com bom custo-efetividade, a longo prazo (ONG *et al*., 2018). Isso porque, embora haja custos iniciais significativos para a sua configuração e implementação, como por exemplo a aquisição de equipamentos, não há necessidade de compras regulares de materiais e não há descarte de resíduos plásticos (RAD *et al*., 2022).

4.3. *UNITY*

Para que ferramentas que utilizam a tecnologia de realidade virtual (RV) sejam desenvolvidas e aplicadas, se torna necessário o uso de mecanismos de jogos que sejam capazes de suportá-la. Atualmente, o *Unity*, o *Unreal Engine* e o *CryEngine* são as três plataformas com maior notoriedade no universo da RV. Dentre elas, o *Unity*, *software* fundado e lançado pela *Unity Technologies*, se apresenta como a mais interessante (ISAR, 2018).

Definido como uma *game engine* (NEVES FILHO; FREITAS; QUINTA, 2018), o *Unity* possibilita a elaboração de conteúdos em duas dimensões (2D), três dimensões (3D), realidade virtual (RV) e realidade aumentada (RA) (DEALESSANDRI, 2020), permitindo a criação de aplicações com recursos de simulações físicas, suporte multimídia, capacidade multiplataforma e *networking*. Esse motor de jogo está disponível para sistemas operacionais como o *Windows*, *iPhone OS* (iOS) e *Linux* (NEVES FILHO; FREITAS; QUINTA, 2018), e possui uma excelente portabilidade, sendo compatível com mais de 25 plataformas distintas (DEALESSANDRI, 2020).

Um dos motivos para a sua grande popularidade, se deve ao fato de que o *software* pode ser adquirido através de uma licença pessoal gratuita, que permite o desenvolvimento de jogos comerciais desde que o desenvolvedor não ganhe mais de cem mil dólares (US$ 100.000) em financiamento ou em receitas provenientes da sua utilização (DEALESSANDRI, 2020).

Conforme dados da própria companhia, em setembro de 2019, 52% dos mil (1.000) principais jogos para aparelhos celulares eram distribuídos pela *Unity*, assim como 60% de todo o conteúdo de RV e de RA (DEALESSANDRI, 2020). Em 2020, existiam 2,8 bilhões de usuários ativos utilizando programas da plataforma, e, além disso,

noventa e quatro (94) dos cem (100) principais estúdios de desenvolvimento de jogos eram clientes do *Unity* (DAVE, 2022).

Para gerar e estruturar aplicações no *Unity*, as linguagens de programação que podem ser utilizadas são a *JavaScript* e a C# (NEVES FILHO; FREITAS; QUINTA, 2018), sendo esta última definida como uma linguagem orientada a objetos, com funções variadas e de aprendizado simples (ISAR, 2018). Essa característica do *software* o torna um mecanismo de jogo adequado para estudantes e desenvolvedores iniciantes. Em julho de 2020, a ferramenta de *script* visual *Bolt* foi adicionada em todos os planos disponibilizados pela *Unity*, sem custos adicionais, tornando possível realizar a lógica dos projetos sem a implementação de códigos e aumentando a facilidade de uso da plataforma (DEALESSANDRI, 2020).

5. FERRAMENTA EM REALIDADE VIRTUAL

5.1. BASE DE IMAGENS

Este trabalho faz parte do projeto "Construção de modelos impressos em 3D e avaliação da validade do método no ensino de ecocardiografia pediátrica", que tem o Comitê de Ética em Pesquisa da UFPE (Universidade Federal de Pernambuco) número 3.745.360. Para o seu desenvolvimento, foram utilizadas imagens médicas de exames de angiotomografia de pacientes diagnosticados com doença cardíaca congênita (DCC).

Os exames e os dados clínicos dos pacientes faziam parte do banco de dados do setor de imagens do Hospital Rio Grande e do Instituto do Coração de Natal (INCOR), localizados em Natal, no Rio Grande do Norte. A angiotomografia foi realizada em um tomógrafo *MultiSlice* de 64 canais da linha *Philips* e as imagens obtidas estavam em DICOM (*Digital Imaging and Communications in Medicine*).

A partir dessas imagens, foram produzidos modelos do coração em três dimensões (3D). Para este trabalho, foram selecionados modelos de corações para a visualização no ambiente de realidade virtual (RV), de crianças com menos de um ano de idade diagnosticadas com cardiopatias congênitas. Os modelos escolhidos foram os seguintes:

- 1 modelo de coração com coarctação da aorta (CoA);
- 1 modelo de coração com coarctação da aorta (CoA) com correção cirúrgica;
- 1 modelo de coração com t*runcus arteriosus* com interrupção;
- 2 modelos de corações com drenagem anômala total das veias pulmonares.

5.2. DESENVOLVIMENTO DA FERRAMENTA

A ferramenta em realidade virtual (RV) desenvolvida foi implementada no *software Unity* e tem como principal objetivo auxiliar estudantes de Medicina, residentes, médicos especialistas e cirurgiões na visualização e no entendimento da anatomia cardíaca de crianças acometidas por cardiopatias congênitas, através de uma experiência imersiva. Além disso, essa aplicação poderá contribuir na programação cirúrgica desses pacientes, uma vez que possibilita a visualização intracardíaca e extracardíaca do coração, permitindo analisar a estrutura completa do órgão.

Inicialmente, foi necessário realizar uma modificação na orientação espacial dos modelos em 3D do coração, para que, posteriormente, no ambiente simulado o objeto fosse capaz de executar determinados movimentos, como por exemplo, a rotação. Essa alteração foi feita no *software Meshmixer* da *Autodesk*, e os modelos em 3D do coração, que estavam no formato de arquivo STL (*Standard Tessellation Language*), foram convertidos para OBJ (*Object File*).

Para a criação do ambiente virtual, primeiramente, foi construído um cenário para representar uma sala, cuja coloração mais escura foi definida de modo que os modelos do coração pudessem ser visualizados com maior nitidez. Neste espaço, foi inserida uma mesa para dar suporte ao modelo em 3D do coração que será analisado. Os elementos que constituem essa cena foram obtidos na página do próprio *Unity*. Após a elaboração do cenário, os protótipos do coração em formato de arquivo OBJ (*Object File*) foram importados para o espaço criado.

A Figura 8 ilustra como o cenário pode ser visto de modo frontal, com a presença de alguns objetos e decorações e com a mesa de apoio, enquanto que a Figura 9 e a Figura 10 mostram as visões das laterais direita e esquerda do cenário, respectivamente.

Figura 8. Visão frontal do cenário.

Fonte: desenvolvido pela autora.

Figura 9. Visão lateral direita do cenário.

Fonte: desenvolvido pela autora.

Figura 10. Visão lateral esquerda do cenário.

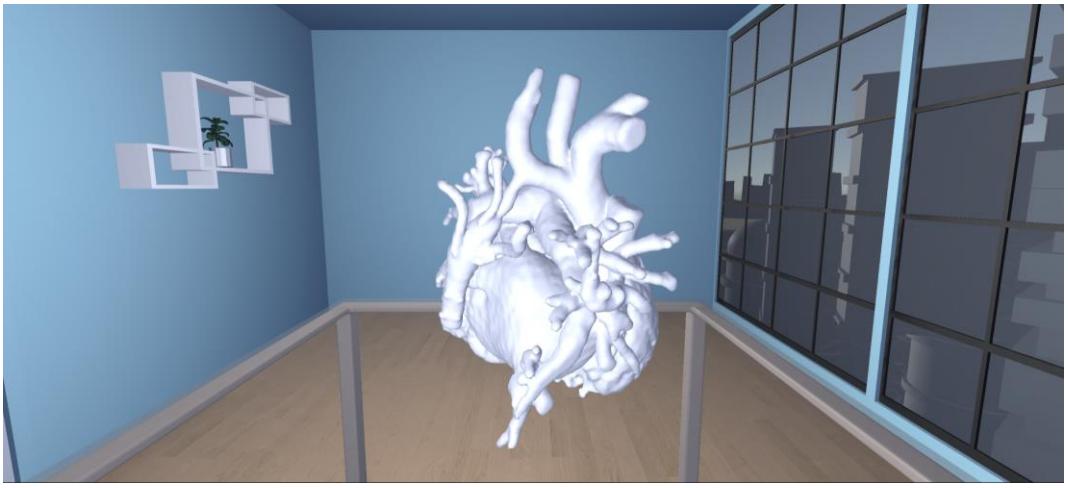
Fonte: desenvolvido pela autora.

Os cinco (5) modelos tridimensionais dos corações dos casos definidos foram importados para o *software* e posicionados na mesa. As escalas de tamanho e a coloração dos protótipos foram alteradas e ajustadas visando proporcionar uma melhor visualização para o usuário. Para a avaliação dos casos selecionados, foram desenvolvidos recursos de animações no *software* que tornassem possível uma análise completa dos modelos em 3D dos corações. As animações foram elaboradas de acordo com a necessidade que cada irregularidade cardíaca apresentou para que fossem avaliadas as estruturas anatômicas internamente ou externamente, com orientação de um médico cardiologista pediátrico.

No caso em que o paciente apresenta como diagnóstico a coarctação da aorta (CoA), por exemplo, uma avaliação da anatomia externa do coração se mostra importante para o estudo desse defeito cardíaco congênito. Assim, para observar em detalhes essa alteração na artéria aorta, foi implementada uma única animação. Com isso, o protótipo em 3D do coração irá executar uma rotação em 360 graus (360^{o}), por um tempo

aproximado de 55 segundos. O modelo então ficará estático, exibindo o local em que está a malformação cardíaca (Figura 11). Os demais casos configurados no ambiente de realidade virtual estão sendo apresentados e analisados no Capítulo 6 deste trabalho.

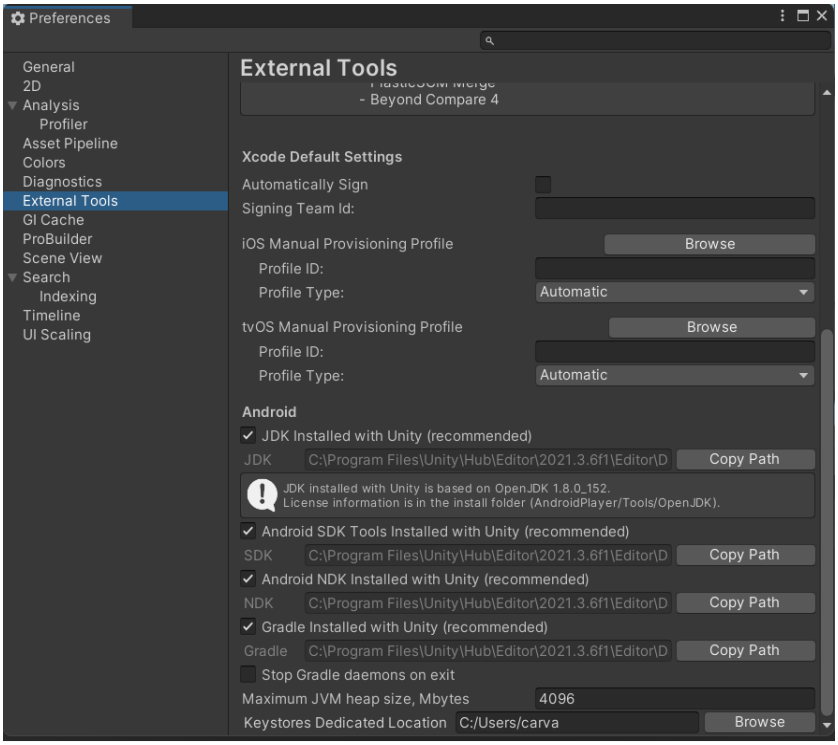
Figura 11. Ambiente de realidade virtual com coração com coarctação da aorta.



Fonte: desenvolvido pela autora.

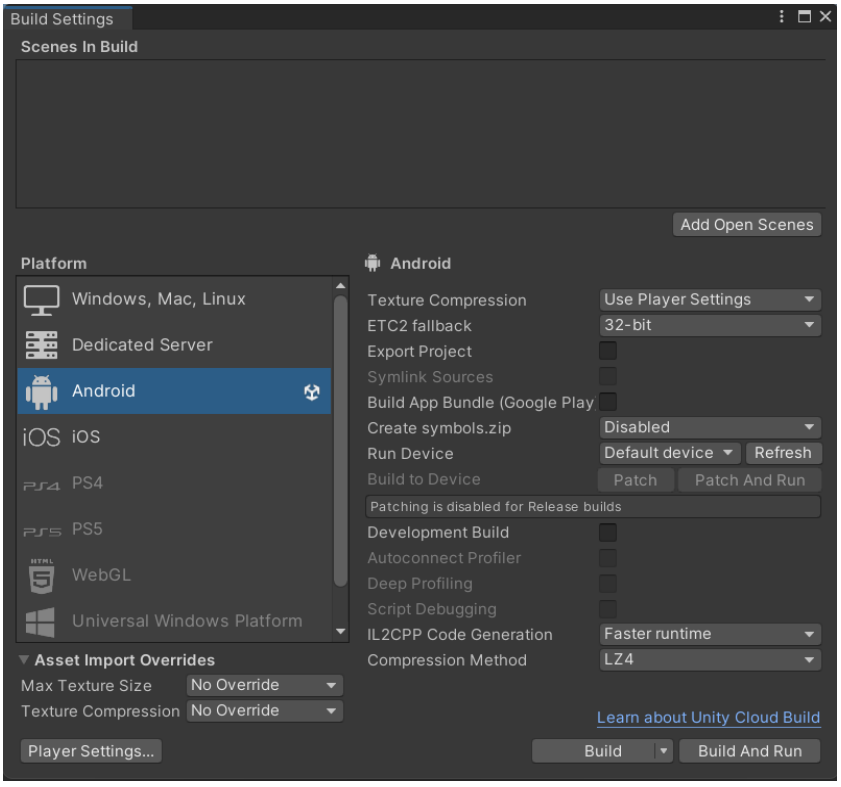
Após a configuração e implementação das animações nos cinco (5) modelos em 3D que foram inseridos no ambiente virtual, foi desenvolvido um aplicativo para demonstração em realidade virtual (RV) para ser executado em *smartphones* com sistema operacional *Android*. Primeiramente, foi necessário instalar o componente *Android Build Support* no *Unity*, e em seguida, foi realizada a verificação de todos os pacotes *Android* instalados, como exibido na Figura 12. Na aba *Build Settings* no *software*, a plataforma de desenvolvimento foi alterada para *Android* (Figura 13).

Figura 12. Verificação da instalação dos pacotes *Android*.



Fonte: desenvolvido pela autora.

Figura 13. Configuração da plataforma de desenvolvimento.



Fonte: desenvolvido pela autora.

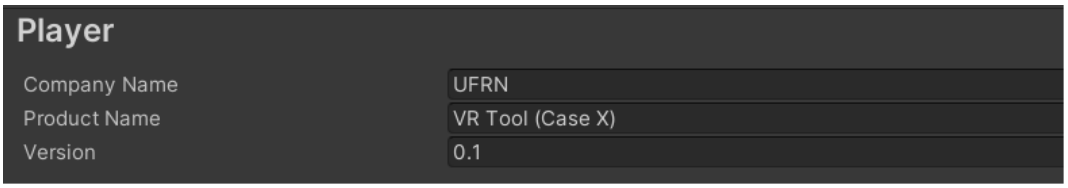
Durante o desenvolvimento foi observado a necessidade da instalação do pacote de SDK (*Software Development Kit*) do *Google Cardboard*, para que o *smartphone*

funcione como uma plataforma de realidade virtual (RV), exibindo as cenas em 3D com renderização estereoscópica e rastreando os movimentos da cabeça do usuário. Para isso, na janela *Package Manager*, foi instalado o *Google Cardboard* XR *Plugin for Unity*.

Depois da instalação, algumas configurações foram feitas na janela *Project Settings*, na aba *Player*, como por exemplo, a definição do nome que aparecerá na aplicação desenvolvida e a sua versão (Figura 14). Ainda na mesma aba, em *Resolution and Presentation*, a orientação padrão, isto é, a forma como o ambiente simulado estará disposto na tela do *smartphone*, foi configurado como *landscape left*, definido como modo paisagem, para otimizar a visualização por parte do usuário (Figura 15).

Em *Other Settings*, foi selecionada a versão mínima do *Android* que o *smartphone* deve possuir para que a aplicação seja executada (Figura 16). A versão definida foi a *Android* 5.1 '*Lollipop*', com nível da API (*Application Programming Interface*) sendo 22, que por sua vez era a versão mínima disponível no *software*.

Figura 14. Definição do nome da aplicação.



Fonte: desenvolvido pela autora.

Figura 15. Definição da orientação padrão.

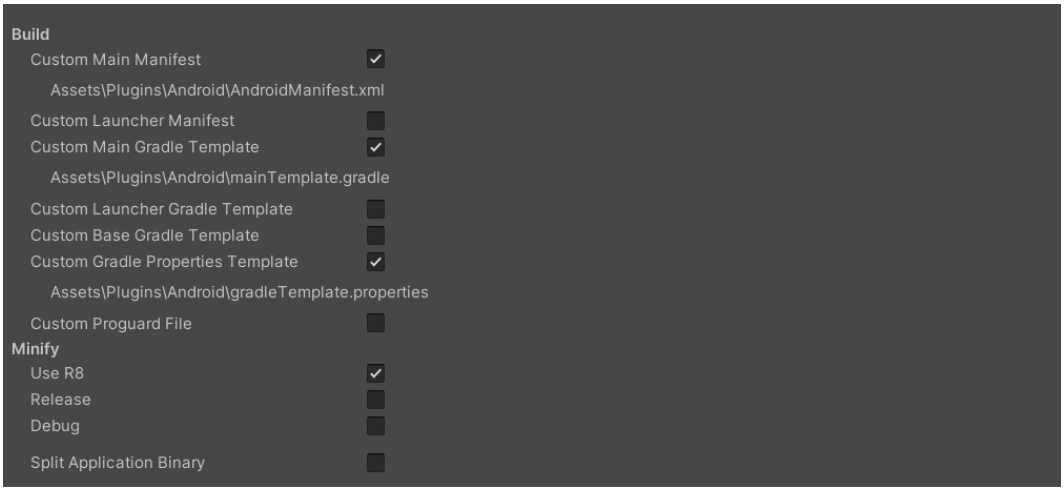
Fonte: desenvolvido pela autora.

Figura 16. Definição da versão mínima do *Android*.

Fonte: desenvolvido pela autora.

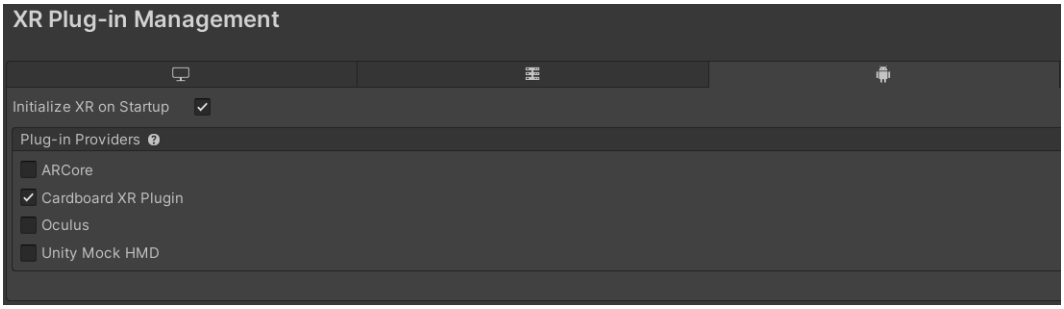
Para finalizar as configurações, em *Publishing Settings*, na seção *Build*, foram selecionados alguns arquivos (Figura 17), para que, posteriormente, possam ser modificados no *software*. Em seguida, na mesma janela *Project Settings*, na aba XR *Plug-in Management*, a opção *Cardboard* XR *Plugin* foi selecionada (Figura 18).

Figura 17. Arquivos selecionados na seção *Build*.



Fonte: desenvolvido pela autora.

Figura 18. Opção *Cardboard* XR *Plugin*.



Fonte: desenvolvido pela autora.

Com todas as alterações necessárias realizadas, a ferramenta em realidade virtual (RV) foi construída e o arquivo obtido foi exportado para o *smartphone* em formato de APK (*Android Application Pack*). O *smartphone* escolhido para executar a aplicação foi o *Samsung Galaxy* A8, com a versão *Android* 9.0 '*Pie*', exibido na Figura 19 (a) e o óculos de realidade virtual definido para os testes finais foi o VR *Box*, mostrado na Figura 19 (b).

Figura 19. (a) *Smartphone Samsung Galaxy* A8 e (b) *Headset* de realidade virtual VR *Box*.

(a) **(b)**

Fonte: a) (SAMSUNG SUPPORT BR, 2020) e b) (TESLA AND I, 2016).

Como este estudo também apresentou o propósito de desenvolver um recurso tecnológico de maior acessibilidade, o uso dos óculos VR *Box* foi definido após ser realizada uma pesquisa de mercado, sendo este dispositivo o que apresentou o menor valor em real (R$). A Tabela 1 exibe uma análise entre cinco (5) modelos distintos de óculos que reproduzem conteúdos de realidade virtual (RV) e os seus respectivos valores.

Tabela 1. Comparativo de valores entre modelos de *headsets* disponíveis no mercado nacional.

Modelos de headsets	Valor em real (R$)
Oculus Quest 2 *Advanced All-in-One*	R$ 2.889,00
Oculus Rift CV1	R$ 2.399,15
Bobo VR Z6	R$ 592,52
Óculos VR *Shinecon* 6.0	R$ 180,40
Óculos VR *Box*	R$ 69,99

Fonte: desenvolvido pela autora.

O *headset* escolhido se mostrou apropriado para a reprodução da ferramenta desenvolvida. Além de possuir o menor valor de custo do mercado, o VR *Box* permitiu uma boa visualização do ambiente simulado, assim como das animações implementadas nos casos estudados, o que o torna um dispositivo válido para o emprego de tecnologias de realidade virtual (RV) em instituições públicas de saúde no país.

O ambiente simulado desenvolvido foi demonstrado no *smartphone* que estava inserido no *headset* de realidade virtual. Assim, através da exibição dos casos implementados, o usuário pôde ter uma experiência imersiva. A Figura 20 demonstra como funcionou essa ferramenta virtual.

Figura 20. União dos dispositivos para demonstração do ambiente virtual desenvolvido.

Fonte: desenvolvido pela autora.

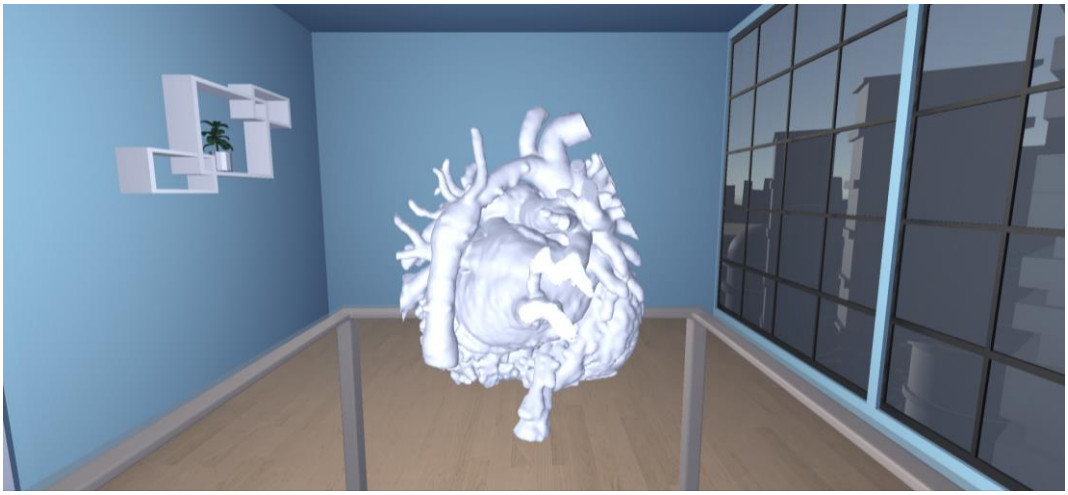
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

No trabalho desenvolvido, após a elaboração do cenário virtual e das animações, que por sua vez permitiram que os modelos em 3D dos corações com cardiopatias congênitas pudessem ser explorados internamente e externamente, se obteve os resultados descritos abaixo, que foram reproduzidos no *smartphone* com o auxílio de um *headset* de realidade virtual (RV).

Para o primeiro caso, cujo paciente tem como diagnóstico uma coarctação da aorta (CoA), também foi possível analisar um outro modelo do coração desse mesmo paciente, após a correção cirúrgica do estreitamento na aorta. O protótipo em 3D do coração pós reparo cirúrgico realizou as mesmas animações do modelo em que o coração apresentava a irregularidade cardíaca, ou seja, o modelo em 3D executou uma rotação em 360 graus (360º), por um tempo aproximado de 55 segundos, exibindo a sua estrutura externa, e em seguida, ficou estático.

A Figura 21 mostra o modelo do coração com a coarctação da aorta (CoA) pós intervenção cirúrgica em sua posição final, isto é, depois que as animações foram executadas.

Figura 21. Ambiente de realidade virtual com coração com coarctação da aorta corrigida pós cirurgia.



Fonte: desenvolvido pela autora.

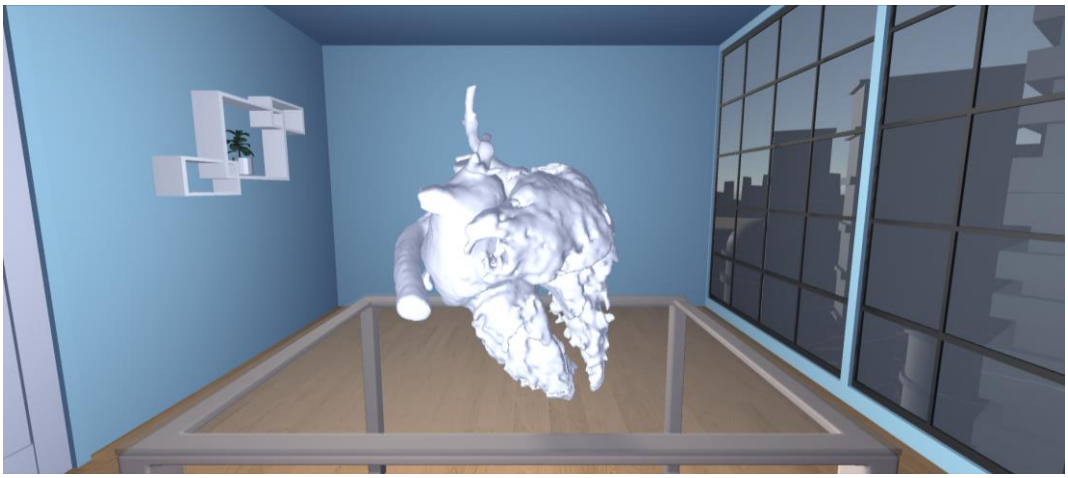
O segundo caso analisado neste estudo, se trata de uma paciente diagnosticada com um *truncus arteriosus* com interrupção. Para uma avaliação mais precisa e eficaz desse defeito cardíaco, foram implementadas cinco (5) animações distintas, capazes de permitir a observação pelo usuário das estruturas externas e internas do protótipo em 3D do coração. Para esta análise, com auxílio de um médico especialista, o corte

ecocardiográfico escolhido, a partir dos modelos em 3D fornecidos, foi o eixo longo, pois possibilitava uma melhor visualização da alteração cardíaca.

Em um primeiro momento, o coração rotaciona em um ângulo de 360 graus (360º) por um intervalo de 55 segundos, aproximadamente. Em seguida, o protótipo do coração se reparte em duas metades, de forma que a sua anatomia interna seja apresentada. Por fim, as porções segmentadas executam uma outra rotação de 360 graus (360º), exibindo tanto o aspecto interior quanto o exterior das estruturas cardíacas, simultaneamente.

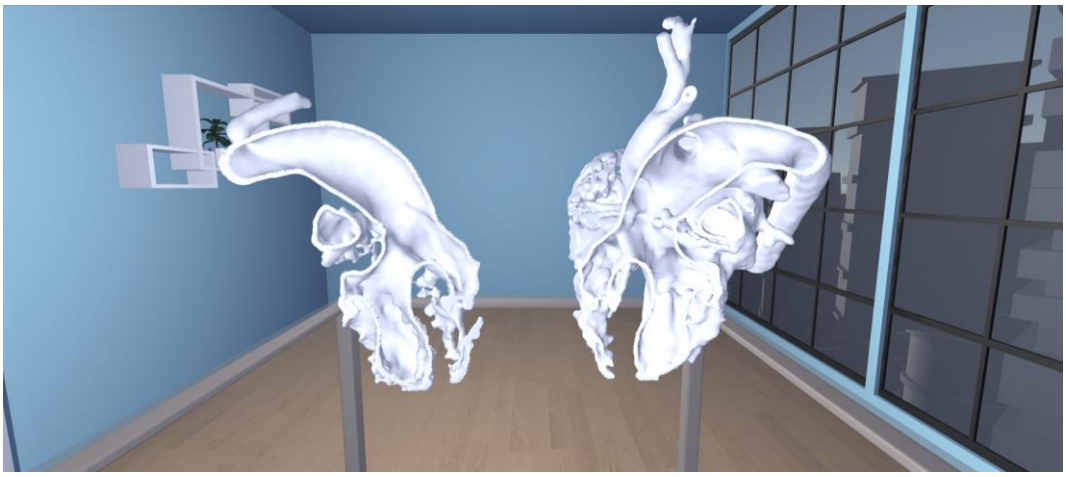
A Figura 22 ilustra o modelo do coração em 3D, inserido no ambiente de realidade virtual e em sua posição inicial, antes que as animações sejam acionadas. A Figura 23 exibe o modelo do coração em 3D dividido em duas metades, após a execução das animações.

Figura 22. Ambiente de realidade virtual com coração com *truncus arteriosus*.



Fonte: desenvolvido pela autora.

Figura 23. Coração com *truncus arteriosus* em duas metades.



Fonte: desenvolvido pela autora.

No terceiro caso, um paciente com diagnóstico de drenagem anômala total das veias pulmonares. Para avaliar a irregularidade cardíaca presente, foi preciso analisar toda a anatomia externa do coração. Desse modo, foi implementada apenas uma animação que permite ao usuário observar a estrutura extracardíaca do protótipo em 3D. Nesta animação, o coração rotaciona em um ângulo de 360 graus (360º) por um intervalo próximo de 55 segundos, e logo após há uma pausa na região em que há a malformação, como apresentado na Figura 24.

Figura 24. Ambiente de realidade virtual com coração com drenagem anômala total das veias pulmonares.

Fonte: desenvolvido pela autora.

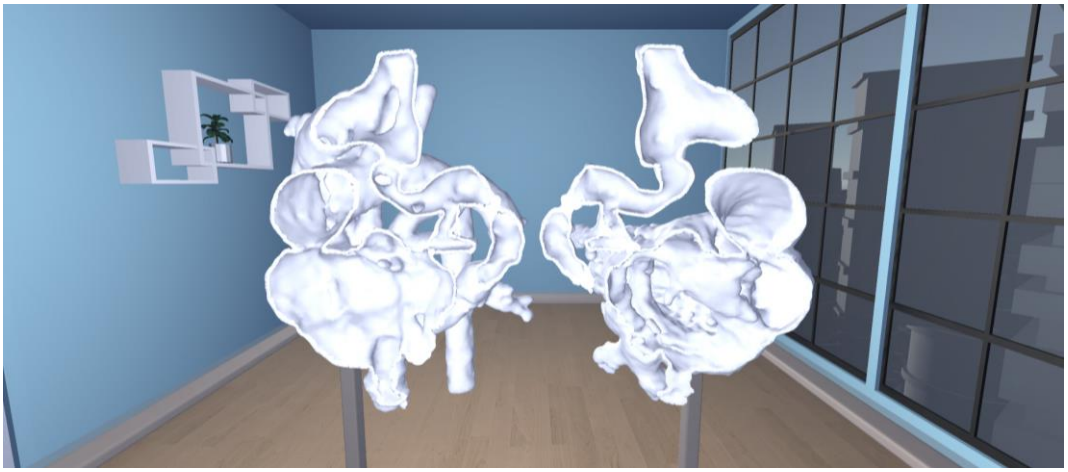
O quarto caso desse estudo analisou a anatomia cardíaca de um outro paciente com diagnóstico de drenagem anômala total das veias pulmonares. Para uma avaliação completa e mais específica desse defeito cardíaco, foi necessário visualizar o modelo em 3D do coração externamente e também internamente. Assim, foram implementadas três (3) animações distintas que possibilitassem essa análise.

Inicialmente, o protótipo do coração rotaciona em um ângulo de 360 graus (360º) por, aproximadamente, 55 segundos, permitindo que o usuário observe a estrutura extracardíaca. Depois, o modelo se reparte em duas metades, apresentando a estrutura intracardíaca. A Figura 25 mostra o coração com a drenagem anômala total das veias pulmonares no ambiente virtual, enquanto que a Figura 26 exibe o mesmo protótipo do coração dividido em duas metades, expondo o seu aspecto interno.

Figura 25. Coração com drenagem anômala total das veias pulmonares.

Fonte: desenvolvido pela autora.

Figura 26. Coração com drenagem anômala total das veias pulmonares em duas metades.



Fonte: desenvolvido pela autora.

Com isso, a tecnologia em realidade virtual (RV) proposta neste trabalho foi útil para apresentar informações adquiridas através de um exame de imagem, das cardiopatias congênitas dos pacientes. Assim, o uso dessa ferramenta surge como um novo método capaz de complementar o diagnóstico realizado a partir de imagens em duas dimensões (2D).

A aplicação proposta e desenvolvida neste estudo pode auxiliar estudantes de Medicina, residentes, médicos especialistas e cirurgiões ao permitir uma melhor visualização da anatomia cardíaca de bebês e crianças diagnosticados com doenças cardíacas congênitas (DCCs). A experiência imersiva proporcionada pelo uso da técnica de realidade virtual (RV), torna possível que as estruturas de interesse que compõem um órgão tão complexo como o coração, sejam identificadas com maior facilidade.

Como apresentado no estudo de Ong *et al*. (2018), quando comparado com os métodos de imagem convencionais, como a tomografia computadorizada (TC) e a ressonância magnética (RM), a utilização da RV possui vantagens, uma vez que a demonstração espacial de modelos tridimensionais não fica limitada a monitores bidimensionais. Neste trabalho, a integração entre a renderização virtual e a visão estereoscópica, manteve a percepção de um espaço em três dimensões (3D), com profundidade, e possibilitou uma avaliação anatômica imersiva do coração.

As cinco estruturas cardíacas, reproduzidas no ambiente virtual implementado, puderam ser visualizadas e exploradas pelo usuário com o uso de um *headset*, a partir de diferentes ângulos e vistas cirúrgicas não tradicionais. Com isso, foi possível observar detalhes intracardíacos e extracardíacos, havendo um melhor entendimento da anatomia específica do paciente, como descrito no trabalho de Milano *et al*. (2019).

Essa ferramenta inovadora também pode contribuir no tratamento dessas crianças. Como demonstrado nos estudos abordados ao longo deste trabalho, as cardiopatias congênitas possuem uma grande variabilidade. Em virtude disso, nos casos em que há a necessidade de intervenção cirúrgica, determinar a melhor estratégia para o procedimento que será realizado, requer discussões detalhadas entre os membros da equipe médica.

Sendo assim, a representação avançada das estruturas anatômicas, juntamente com os movimentos executados pelos modelos em 3D do coração, proporcionou uma análise do órgão por meio da perspectiva do cirurgião. Desta forma, bem como no trabalho de Ayerbe *et al*. (2020), a visualização desses protótipos em um ambiente imersivo pode permitir uma melhor definição da localização da irregularidade cardíaca nos casos patológicos e promover um estudo mais individualizado, por meio de simulação no planejamento pré-cirúrgico.

Além disso, como declarado no estudo de Milano *et al*. (2019), também há a possibilidade de exibir o ambiente virtual desenvolvido na tela de um monitor, separadamente, durante o uso dos óculos de realidade virtual (RV) por um determinado participante. Com isso, demais membros da equipe médica e até mesmo estudantes de Medicina poderão visualizar, analisar e entender as anatomias cardíacas que estarão sendo estudadas. Isso demonstra como o uso do método de realidade virtual (RV) pode atuar como uma ferramenta educacional, capaz de permitir comunicações interdisciplinares.

Desse modo, neste trabalho, foi proporcionada uma visualização espacial dos protótipos em 3D e foi possível avaliar a anatomia extracardíaca e intracardíaca do paciente. O sistema desenvolvido permitiu que as estruturas cardíacas analisadas fossem observadas de modo mais abrangente e completo, facilitando a compreensão da anatomia dos pacientes.

7. CONCLUSÃO

Tecnologias emergentes, como a de realidade virtual (RV), vêm sendo amplamente aplicadas na área da saúde, e os seus benefícios nos campos da reabilitação, psicologia, no treinamento cirúrgico, na educação médica e entre outros, estão sendo descritos em estudos. Na cardiologia pediátrica, o uso dessa técnica inovadora no desenvolvimento de ferramentas facilita o entendimento de conceitos anatômicos e fisiológicos do sistema cardíaco, se tornando uma estratégia interessante para estudantes e profissionais da saúde.

Sabendo que o coração possui uma estrutura complexa e que as doenças cardíacas congênitas apresentam muitas variações e podem se manifestar até mesmo como uma combinação de defeitos, a sua compreensão se torna complicada. Além disso, as limitações existentes nas modalidades de imagens convencionais, como por exemplo, exames de tomografia computadorizada (TC) e de ressonância magnética (RM), demonstram a necessidade do uso de técnicas complementares, que possam ser capazes de viabilizar uma análise mais eficaz e específica dessas irregularidades cardíacas.

Desta forma, através de um ambiente virtual simulado, gerado por *software*, o uso da técnica de realidade virtual (RV) proporciona uma experiência imersiva e interativa, permitindo que os usuários visualizem e explorem com maior realismo objetos físicos. Neste estudo, modelos em três dimensões (3D) de corações de bebês e crianças, diagnosticados com defeitos cardíacos congênitos, foram reproduzidos em realidade virtual (RV), tornando possível uma avaliação da estrutura anatômica completa do órgão.

A ferramenta desenvolvida poderá desempenhar um importante papel como uma metodologia de aprendizado, auxiliando estudantes de Medicina e residentes no entendimento dos defeitos cardíacos. Essa aplicação poderá possibilitar o acesso a componentes cardiovasculares do paciente, de modo não invasivo e com precisão, proporcionando melhorias na visualização dos modelos de reconstrução em 3D dos corações analisados.

O ambiente em realidade virtual implementado foi visualizado com o uso de um *headset* de RV que possuía o menor valor de custo no mercado nacional. Desse modo, além de permitir a observação das estruturas cardíacas por meio da imersão do usuário, a aplicação implementada se apresentou mais acessível.

A constante evolução da então chamada “medicina virtual” permite a elaboração de dispositivos poderosos, que podem aperfeiçoar os conhecimentos e as habilidades médicas. Assim, o propósito de fornecer métodos de tratamentos com maior eficácia e segurança para o paciente juntamente com os avanços computacionais, surgem como uma nova perspectiva, capaz de fomentar o desenvolvimento de recursos tecnológicos que ofereçam mais realismo e interação nos processos médicos no mundo virtual.

7.1. TRABALHOS FUTUROS

Como sequência deste trabalho, se propõem o desenvolvimento de alguns pontos, como:

- Apresentar a ferramenta desenvolvida para médicos especialistas e realizar questionários para avaliar a sua eficácia;
- Implementar ações em um controle (*joystick*), para que o usuário possa manipular o modelo em 3D do coração de modo livre;
- Realizar uma análise comparativa entre as técnicas de impressão 3D e de realidade virtual;
- Aplicar questionários comparativos entre as técnicas de impressão 3D e realidade virtual com médicos especialistas;
- Analisar as respostas dos questionários e os dados que podem ser produzidos.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AL'AREF, Subhi J.; MOSADEGH, Bobak; DUNHAM, Simon; MIN, James K; **3D Printing Applications in Cardiovascular Medicine**. 1 ed. Academic Press, 2018. ISBN: 978-0-12-803917-5.

AMORIM JÚNIOR, Raimundo Francisco de; **Construção de modelos impressos em 3D e avaliação da validade do método no ensino da ecocardiografia pediátrica**. 2020. Dissertação (Mestrado em Biologia Aplicada à Saúde) – Centro de Biociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2020.

AWORI, Jonathan; FRIEDMAN, Seth; CHAN, Titus; HOWARD, Christopher; SESLAR, Stephen; SORIANO, Brian; BUDDHE, Sujatha. 3D Models Improve Understanding of Congenital Heart Disease. **Research Square**, [*s.l.*], p. 1-18, 28 de ago. de 2020. Disponível em: http://dx.doi.org/10.21203/rs.3.rs-66207/v1.

AYERBE, Victor Manuel Caicedo; MORALES, Martha Lucía Velasco; ROJAS, Carlos Javier Latorre; CORTÉS, María Lucía Arango. Visualization of 3D Models Through Virtual Reality in the Planning of Congenital Cardiothoracic Anomalies Correction: an initial experience. **World Journal For Pediatric And Congenital Heart Surgery**, [*s.l.*], v. 11, n. 5, p. 627-629, 2020. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1177/2150135120923618.

BASSO, Maíra Levorato; GEBRAN, Alessandra Möbius; OLIVEIRA, Julia Dullius; GEBRAN, Katrin Möbius; BONATTO, Letícia Carlota; FARAH, Maria Cecília Knoll. Impressão de Protótipo Tridimensional (P3d) de Coração para Aplicação na Cardiologia Pediátrica: uma experiência inicial. **Arquivos Brasileiros de Cardiologia**, [*s.l.*], v. 116, n. 3, p. 507-509, mar. de 2021. Sociedade Brasileira de Cardiologia. Disponível em: http://dx.doi.org/10.36660/abc.20200086.

BRUN, Henrik; PELANIS, Egidijus; WIIG, Ola; LUZON, Javier Armando; BIRKELAND, Sigurd; KUMAR, Rahul Prasanna; FRETLAND, Åsmund Avdem; SUTHER, Kathrine Rydén; EDWIN, Bjørn; ELLE, Ole Jacob. Blandet virkelighet – ny bildeteknologi i klinisk utprøving. **Tidsskrift for Den Norske Legeforening**, [*s.l.*], 2020. Disponível em: https://doi.org/10.4045/tidsskr.20.0498.

BYL, John L.; SHOLLER, Rebecca; GOSNELL, Jordan M.; SAMUEL, Bennett P.; VETTUKATTIL, Joseph J.. Moving beyond two-dimensional screens to interactive three-dimensional visualization in congenital heart disease. **The International Journal Of Cardiovascular Imaging**, [*s.l.*], v. 36, n. 8, p. 1567-1573, 25 de abr. de 2020. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1007/s10554-020-01853-1.

CARDIOL, 2020 - Cardiopatia congênita afeta 29 mil crianças/ano e 6% morrem antes de completar um ano de vida. **Sociedade Brasileira de Cardiologia**, São Paulo, 12 de jun. de 2020. Disponível em: https://www.portal.cardiol.br/post/cardiopatia-cong%C3%AAnita-afeta-29-mil-crian%C3%A7as-ano-e-6-morrem-antes-de-completar-um-ano-de-vida. Acesso em: 04 de nov. de 2021.

DAMIANO, Ana Paula. Cardiopatias congênitas: bases do diagnóstico na consulta pediátrica. **Pediatra Atualize-se | SPSP: Boletim da Sociedade de Pediatria de São**

Paulo, São Paulo, ano 5, n. 6, p. 4-6, 2020. Disponível em: https://www.spsp.org.br/site/asp/boletins/AtualizeA5N6.pdf.

DAVE, Ankit. Why Choose Unity 3D for Your Next Game Development Project? **MindInventory**, 6 de abr. de 2022. Disponível em: https://www.mindinventory.com/blog/unity-3d-game-development/. Acesso em: 08 de ago. de 2022.

DEALESSANDRI, Marie. What is the best game engine: is Unity right for you? **Games Industry.biz**, 16 de jan. de 2020. Disponível em: https://www.gamesindustry.biz/what-is-the-best-game-engine-is-unity-the-right-game-engine-for-you. Acesso em: 08 de ago. de 2022.

DETREMPE, Kate. Virtual reality alleviates pain, anxiety for pediatric patients. **Stanford Medicine | News Center**, 7 de set. de 2017. Disponível em: https://med.stanford.edu/news/all-news/2017/09/virtual-reality-alleviates-pain-anxiety-for-pediatric-patients.html. Acesso em: 28 de ago. de 2022.

EL BEHEIRY, Mohamed; DOUTRELIGNE, Sébastien; CAPORAL, Clément; OSTERTAG, Cécilia; DAHAN, Maxime; MASSON, Jean-Baptiste. Virtual Reality: Beyond Visualization. **Journal of Molecular Biology**, [*s.l.*], v. 431, n. 7, p. 1315–1321, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jmb.2019.01.033.

FOOTE, Bob; MELZER, James. A History of Helmet Mounted Displays at Rockwell Collins. **Rockwell Collins**, [*s.l.*], v. 9470, p. 155-165, 2015. Disponível em:

GOO, Hyun Woo; PARK, Sang Joon; YOO, Shi-Joon. Advanced Medical Use of Three-Dimensional Imaging in Congenital Heart Disease: augmented reality, mixed reality, virtual reality, and three-dimensional printing. **Korean Journal Of Radiology**, [*s.l.*], v. 21, n. 2, p. 133-145, 2020. The Korean Society of Radiology. Disponível em: http://dx.doi.org/10.3348/kjr.2019.0625.

ISAR, Cosmina. A Glance into Virtual Reality Development Using Unity. **Informatica Economica**, [*s.l.*], v. 22, n. 3, p. 14-22, 2018. Bucharest University of Economic Studies. Disponível em: http://dx.doi.org/10.12948/issn14531305/22.3.2018.02.

JARVIS, Selina. Cardiac system 2: congenital heart disease and pathophysiology. **Nursing Times**, [*s.l.*], 26 de fev. de 2018. Disponível em: https://www.nursingtimes.net/clinical-archive/cardiovascular-clinical-archive/cardiac-system-2-congenital-heart-disease-and-pathophysiology-26-02-2018/. Acesso em: 4 nov. 2021.

JAVAID, Mohd; HALEEM, Abid. Virtual reality applications toward medical field. **Clinical Epidemiology And Global Health**, [*s.l.*], v. 8, n. 2, p. 600-605, jun. 2020. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.cegh.2019.12.010.

JAWORSKI, Radosław; HAPONIUK, Ireneusz; CHOJNICKI, Maciej; OLSZEWSKI, Henryk; LULEWICZ, Paweł. Three-dimensional printing technology supports surgery planning in patients with complex congenital heart defects. **Kardiologia Polska**, [*s.l.*], v. 75, n. 2, p. 185-185, 15 de fev. de 2017. Disponível em: http://dx.doi.org/10.5603/kp.2017.0029.

KASSUTTO, Stacey M.; BASTON, Cameron; CLANCY, Caitlin. Virtual, Augmented, and Alternate Reality in Medical Education: socially distanced but fully immersed. **ATS Scholar**, [*s.l.*], v. 2, n. 4, p. 651-664, dez. 2021. American Thoracic Society. Disponível em: http://dx.doi.org/10.34197/ats-scholar.2021-0002re.

LAU, Ivan; GUPTA, Ashu; SUN, Zhonghua. Clinical Value of Virtual Reality versus 3D Printing in Congenital Heart Disease. **Biomolecules**, [*s.l.*], v. 11, n. 6, p. 884, 2021. http://dx.doi.org/10.3390/biom11060884.

LEITE, Gisele. Cardiopatia Congênita. **Cartilha Dicas de Saúde**, Natal, 22 de jun. de 2021. Disponível em: https://www.gov.br/ebserh/pt-br/hospitais-universitarios/regiao-nordeste/huol-ufrn/saude/coronavirus-covid-19/cartilha-dicas-de-saude. Acesso em: 04 de nov. de 2021.

LIL, Lan; YU, Fei; SHI, Dongquan; SHI, Jianping; TIAN, Zongjun; YANG, Jiquan; WANG, Xingsong; JIANG, Qing. Application of virtual reality technology in clinical medicine. **American Journal of Translational Research**, [*s.l.*], v. 9, n. 9, p. 3867-3880, 2017. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1097/hco.0000000000000694.

MAZUREK, Justyna; KIPER, Paweł; CIEŚLIK, Błażej; RUTKOWSKI, Sebastian; MEHLICH, Krzysztof; TUROLLA, Andrea; SZCZEPAńSKA-GIERACHA, Joanna. Virtual reality in medicine: a brief overview and future research directions. **Human Movement**, [*s.l.*], v. 20, n. 3, p. 16-22, 2019. Disponível em: http://dx.doi.org/10.5114/hm.2019.83529.

MENDEZ, Ana; HUSSAIN, Tarique; HOSSEINPOUR, Amir-Reza; VALVERDE, Israel. Virtual reality for preoperative planning in large ventricular septal defects. **European Heart Journal**, [*s.l.*], v. 40, n. 13, p. 1092–1092, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1093/eurheartj/ehy685.

MILANO, Elena Giulia; PAJAZITI, Endrit; SAUVAGE, Emilie; COOK, Andrew; SCHIEVANO, Silvia; MORTENSEN, Kristian H.; TAYLOR, Andrew M.; MAREK, Jan; KOSTOLNY, Martin; CAPELLI, Claudio. Taking Surgery Out of Reality. **Circulation: Cardiovascular Imaging**, [*s. l.*], v. 12, n. 7, p. 1-3, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1161/circimaging.119.009297.

NEVES FILHO, Hernando Borges; FREITAS, Luiz Alexandre Barbosa de; QUINTA, Nicolau Chaud de Castro. **Introdução ao desenvolvimento de softwares para analistas do comportamento**. 1 ed. São Paulo: Associação Brasileira de Psicologia e Medicina Comportamental – ABPMC, 2018.187 p. ISBN: 978-85-65768-07-8.

ONG, Chin Siang; KRISHNAN, Aravind; HUANG, Chen Yu; SPEVAK, Philip; VRICELLA, Luca; HIBINO, Narutoshi; GARCIA, Juan R.; GAUR, Lasya. Role of virtual reality in congenital heart disease. **Congenital Heart Disease**, [*s.l.*], v. 13, n. 3, p. 357-361, 2018. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1111/chd.12587.

ONG, Chin Siang; LOKE, Yue-Hin; OPFERMANN, Justin; OLIVIERI, Laura; VRICELLA, Luca; KRIEGER, Axel; HIBINO, Narutoshi. Virtual Surgery for Conduit Reconstruction of the Right Ventricular Outflow Tract. **World Journal For Pediatric And Congenital Heart Surgery**, [*s.l.*], v. 8, n. 3, p. 391-393, 2017. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1177/2150135117692777.

PENIDO, Alexandre. MS alerta para o diagnóstico precoce de cardiopatia congênita entre as crianças. **Ministério da Saúde**, [*s.l.*], 12 de jun. de 2020. Disponível em: https://antigo.saude.gov.br/noticias/agencia-saude/47051-ms-alerta-para-o-diagnostico-precoce-de-cardiopatia-congenita-entre-as-criancas. Acesso em: 04 de nov. de 2021.

PURI, Kriti; ALLEN, Hugh D.; QURESHI, Athar M.. Congenital Heart Disease. **Pediatrics In Review**, [*s.l.*], v. 38, n. 10, p. 471-486, 2017. American Academy of Pediatrics (AAP). Disponível em: https://doi.org/10.1542/pir.2017-0032.

RAD, Arian Arjomandi; VARDANYAN, Robert; LOPUSZKO, Aleksandra; ALT, Christina; STOFFELS, Ingo; SCHMACK, Bastian; RUHPARWAR, Arjang; ZHIGALOV, Konstantin; ZUBAREVICH, Alina; WEYMANN, Alexander. Virtual and Augmented Reality in Cardiac Surgery. **Brazilian Journal Of Cardiovascular Surgery**, São Paulo, v. 37, n. 1, p. 123-127, 2022. Sociedade Brasileira de Cirurgia Cardiovascular. Disponível em: http://dx.doi.org/10.21470/1678-9741-2020-0511.

RAIMONDI, Francesca; VIDA, Vladimiro; GODARD, Charlotte; BERTELLI, Francesco; REFFO, Elena; BODDAERT, Nathalie; EL BEHEIRY Mohamed; MASSON, Jean-Baptiste. Fast-track virtual reality for cardiac imaging in congenital heart disease. **Journal of Cardiac Surgery**, [*s.l.*], v. 36, n. 7, p. 2598–2602, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1111/jocs.15508.

ROCHA, Luciane Alves; FROIO, Sthefane Catib; SILVA, Célia Camelo; FIGUEIRA, Simone de Araujo Negreiros; GUILHEN, José Cícero Stocco; GUINSBURG, Ruth; ARAUJO JÚNIOR, Edward. Risk Factors for Mortality in Children with Congenital Heart Disease Delivered at a Brazilian Tertiary Center. **Brazilian Journal Of Cardiovascular Surgery**, [*s.l.*], v. 33, n. 6, p. 603-607, 2018. Sociedade Brasileira de Cirurgia Cardiovascular. Disponível em: http://dx.doi.org/10.21470/1678-9741-2018-0174.

ROHIT, Manojkumar; SHRIVASTAVA, Smit. Acyanotic and Cyanotic Congenital Heart Diseases. **The Indian Journal of Pediatrics**, [*s.l.*], v. 85, n. 6, p. 454–460, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s12098-017-2454-6.

SACKS, Loren D.; AXELROD, David M.. Virtual reality in pediatric cardiology. **Current Opinion In Cardiology**, [*s.l.*], v. 35, n. 1, p. 37-41, 2020. Ovid Technologies (Wolters Kluwer Health). Disponível em: http://dx.doi.org/10.1097/hco.0000000000000694.

SAMSUNG SUPPORT BR. **Galaxy A8 | Samsung Support BR,** 2020. Disponível em: https://www.samsung.com/br/support/model/SM-A530FZKSZTO/. Acesso em: 29 de out. de 2022.

SANZ, Javier; FAROOQI, Kanwal Majeed; NIELSEN, James C.; SRIVASTAVA, Shubhika. Image Acquisition for Creation of a 3D Model: CT, CMR, and Echocardiography. **Rapid Prototyping In Cardiac Disease**, [*s.l.*], p. 21-30, 2017. Rapid Prototyping in Cardiac Disease. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-53523-4_3.

SHERMAN, William R.; CRAIG, Alan B. **Understanding Virtual Reality: Interface, Application, and Design**. 1 ed. Estados Unidos da América: Morgan Kaufmann, 2003. 582 p. ISBN: 1558603530.

SOARES, Andressa. Mortalidade em Doenças Cardíacas Congênitas no Brasil - o que sabemos? **Arquivos Brasileiros de Cardiologia**, [*s.l.*], v. 115, n. 6, p. 1174–1175, dez. de 2020. Sociedade Brasileira de Cardiologia. Disponível em: https://doi.org/10.36660/abc.20200589.

STANFORD CHILDREN'S HEALTH. Congenital Heart Disease. **Stanford Medicine | Children's Health**, 2019a. Disponível em: https://www.stanfordchildrens.org/en/topic/default?id=congenital-heart-disease-90-P02346. Acesso em: 4 de nov. de 2021.

STANFORD CHILDREN'S HEALTH. The Stanford Virtual Heart – Revolutionizing Education on Congenital Heart Defects. **Stanford Medicine | Children's Health**, 2019b. Disponível em: https://www.stanfordchildrens.org/en/innovation/virtual-reality/stanford-virtual-heart. Acesso em: 4 de nov. de 2021.

SUN, RongRong; LIU, Min; LU, Lei; ZHENG, Yi; ZHANG, Peiying. Congenital Heart Disease: Causes, Diagnosis, Symptoms, and Treatments. **Cell Biochemistry and Biophysics**, [*s.l.*], v. 72, n. 3, p. 857–860, 2015. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s12013-015-0551-6.

TESLA AND I. VR Box 2.0 – QR code and vague review. **Tesla and I** | Everything I do, I do with Nikolas Tesla. Disponível em: https://teslaandi.wordpress.com/2016/01/22/vr-box-2-0-qr-code-and-vague-review/. Acesso em: 29 de out. de 2022.

UNITY TECHNOLOGIES. **Unity**. Disponível em: https://unity.com.

UPADHYAY, Jyoti; TIWARI, Nidhi; RANA, Mahendra; RANA, Amita; DURGAPAL, Sumit; BISHT, Satpalsingh. Pathophysiology, etiology, and recent advancement in the treatment of congenital heart disease. **Journal of Indian College Of Cardiology**, [*s.l.*], v. 9, n. 2, p. 67-77, 2019. Disponível em: http://dx.doi.org/10.4103/jicc.jicc_11_19.

WHITE, Shelby C.; SEDLER, Jennifer; JONES, Trahern W.; SECKELER, Michael. Utility of three-dimensional models in resident education on simple and complex intracardiac congenital heart defects. **Congenital Heart Disease**, [*s.l.*], v. 13, n. 6, p. 1045-1049, 19 set. 2018. Computers, Materials and Continua (Tech Science Press). Disponível em: http://dx.doi.org/10.1111/chd.12673.