

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Leonardo da Conceição Estevam

ARQUITETURA DE AMBIENTE VIRTUAL ADAPTÁVEL PARA DISPOSITIVOS
MÓVEIS: Uma Abordagem Técnica com Ênfase em Modelagem Geométrica e Interação
Tridimensional

DM: 33/2025

UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém – Pará – Brasil
2025

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Leonardo da Conceição Estevam

**ARQUITETURA DE AMBIENTE VIRTUAL ADAPTÁVEL PARA DISPOSITIVOS
MÓVEIS: Uma Abordagem Técnica com Ênfase em Modelagem Geométrica e Interação
Tridimensional**

Orientador: Prof. Dr. Marcos César da Rocha Seruffo

Dissertação apresentada à banca examinadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica, com ênfase em Telecomunicações.

UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém – Pará – Brasil
2025



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**“ARQUITETURA DE AMBIENTE VIRTUAL ADAPTÁVEL PARA DISPOSITIVOS
MÓVEIS: UMA ABORDAGEM TÉCNICA EM ÊNFASE EM MODELAGEM
GEOMÉTRICA E INTERAÇÃO TRIDIMENSIONAL”**

AUTOR: **LEONARDO DA CONCEIÇÃO ESTEVAM**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA À BANCA EXAMINADORA APROVADA PELO
COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, SENDO JULGADA
ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA NA ÁREA DE
COMPUTAÇÃO APLICADA.

APROVADA EM: 17/10/2025

BANCA EXAMINADORA:



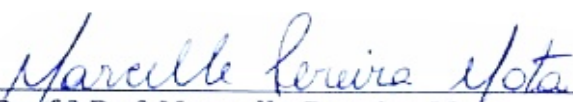
Prof. Dr. Marcos César da Rocha Seruffo
(Orientador - PPGE/ITEC/UFPA)



Prof. Dr. Diego Lisboa Cardoso
(Avaliador Interno - PPGE/ITEC/UFPA)



Prof. Dr. Miércio Cardoso de Alcântara Neto
(Avaliador Interno - PPGE/ITEC/UFPA)



Prof.ª Dr.ª Marcelle Pereira Mota
(Avaliadora Externa ao Programa - PPGCC/UFPA)

VISTO:



Prof. Dr. Diego Lisboa Cardoso
(Coordenador do PPGE/ITEC/UFPA)

Agradecimentos

Agradeço profundamente à minha família por todo o suporte, carinho e incentivo que sempre me ofereceram ao longo dos anos. Em especial, à minha avó Maria, que me criou desde a infância com amor, dedicação e paciência, sendo um exemplo constante de força, sabedoria e generosidade. Sua presença foi essencial em cada uma das minhas conquistas, e cada vitória que alcancei carrega também um pouco do esforço e do cuidado que ela teve comigo.

Estendo meus agradecimentos à Socorro Melo, que, mesmo sem laços de sangue, me acolheu como parte da família e teve um papel fundamental na minha trajetória acadêmica. Foi graças ao seu apoio — incluindo o custeio do meu cursinho — que consegui ingressar no ensino superior, concluir minha graduação e, hoje, alcançar a tão sonhada conquista do mestrado.

Existe um ditado que diz: “Diga-me com quem andas e te direi quem és.” E, nesse sentido, considero-me uma pessoa de muita sorte. Tive ao meu lado amigos incríveis, que contribuíram para a pessoa e o profissional que me tornei. Agradeço aos meus amigos de infância Kervin Ramos e Suzyane Ramos, e a todos os demais que cresceram comigo e com quem mantenho contato desde o ensino fundamental.

Sou grato também aos amigos que fiz durante o ensino superior, especialmente nos laboratórios de pesquisa LDI, LPO e LIIS, que me proporcionaram aprendizado, companheirismo e crescimento pessoal.

Agradeço com especial consideração ao meu orientador, Marcos Seruffo, por todo o suporte, paciência e orientação ao longo da minha trajetória acadêmica e profissional. Sua confiança e dedicação foram fundamentais para que este trabalho se concretizasse.

Por fim, deixo meus sinceros agradecimentos aos membros da Interceleri, que me acolheram como parte da equipe, e ao seu C.O., Walter Junior, que foi meu colega de turma, chefe e amigo, sempre demonstrando grande companheirismo e espírito de equipe, tanto comigo quanto com os demais membros do LPO-LIIS.

Leonardo da Conceição Estevam
Outubro 2025

A vida tende a começar difícil, parece piorar no caminho

Mas no final, sempre encontra um jeito de dar certo.

Lista de Acrônimos

AVM Ambiente Virtual Móvel

RV Realidade Virtual

RA Realidade Aumentada

RM Realidade Mista

HMD Head-Mounted Display

SLAM Simultaneous Localization and Mapping

DoF Degrees of Freedom

IA Inteligência Artificial

Lista de Figuras

1	Sensorama de Morton Heilig	9
2	Sword of Damocles criado por Ivan Sutherland	9
3	<i>Oculus Rift</i>	10
4	Joysticks para máquinas tridimensionais	16
5	Sony PlayStation Move Motion Controller	16
6	Etapas de Execução da Pesquisa	18
7	Revisão Sistemática da Literatura	20
8	Arquitetura modular utilizada no GeoMeta	25
9	Modelagem do personagem Matheus na ferramenta Blender	28
10	Figuras geométricas base do GeoMeta	30
11	Plataforma Unity3D	32
12	Organização das pastas por tipo e função	33
13	Realidade aumentada com Vuforia	35
14	Aplicativo Merge Cube	37
15	Aplicação AR do GeoMeta	37
16	Aplicação Quiver – Coloring App	38
17	Figura colorida do GeoMeta	38
18	Exemplos de transformações afins	43
19	Exemplos de translação em ambiente 3D	44
20	Exemplo visual de uma árvore low-poly	45
21	Mapas de Textura PBR	46
22	Exemplo visual de LODs refinados para um edifício residencial	48
23	Variação do LOD de acordo com a distância	48
24	Exemplo visual de um Occlusion Culling no Unity	49
25	Exemplo visual de Static Batching	50
26	Comparação de gráficos COD advanced warfare entre XBox, PC e PS4	53
27	Comparação de gráficos entre <i>Call of Duty Mobile</i> e <i>Warzone Mobile</i>	53
28	Comparação de gráficos entre <i>Nward Quest</i> e PC VR.	54

29	Mudanças de orientação detectadas pelo giroscópio.	56
30	Exemplo de detecção via Gaze	57
31	Exemplo do uso de camada de colisão	58
32	Exemplo de restrições de distância do raycast	59
33	Google Expeditions VR Mobile	60
34	Sequência síncrona das cenas	61
35	Criação de avatar virtual no jogo Trivia Crack	62
36	Criação de avatar virtual no GeoMeta	63
37	Sala de aula do GeoMeta	63
38	Parque do GeoMeta	64
39	Quarto do GeoMeta	66
40	Monumento em 360°	67
41	Titans of Space VR	69
42	Teletransporte via gaze no GeoMeta	70
43	Melhoria de interface para seleção de modo de jogo no GeoMeta	73
44	Melhoria de interface para combinação de texto e ícones no GeoMeta	73
45	Sinalização de objetos interativos	79
46	Setas virtuais no GeoMeta	80
47	Legendas virtuais	80

Lista de Quadros

1	Critérios de Inclusão e Exclusão adotados na Revisão Sistemática da Literatura.	21
2	Comparativo de Tecnologias RV/RA em Smartphones vs. Hardware Dedicado.	26
3	Quadro comparativo entre OpenGL ES, Vulkan e Metal.	52

Sumário

Agradecimentos	iv
Lista de Acrônimos	vi
Lista de Figuras	vii
Lista de Quadros	ix
Sumário	x
1 Introdução	1
1.1 Contextualização	3
1.2 Problema de Pesquisa	4
1.3 Objetivos	5
1.4 Justificativa	5
2 Levantamento Bibliográfico	7
2.1 Ambientes Virtuais Imersivos	7
2.1.1 Realidade Virtual: Conceitos e Implementação	8
2.1.2 Realidade Aumentada: Conceitos e Implementação	11
2.1.3 Realidade Misturada	12
2.1.4 Imersão: Aspectos Técnicos e Métricas de Sistema	15
3 Metodologia	18
3.1 Revisão Sistemática da Literatura	19
3.2 Definição da Abordagem Metodológica	21
3.2.1 Delimitação do Estudo	22
4 Desenvolvimento do Sistema Imersivo Móvel	24
4.1 Especificação Técnica do Sistema	24
4.1.1 Requisitos funcionais e não funcionais	27
4.1.2 Estrutura modular do sistema	27

4.2	Definição das Tecnologias Utilizadas	28
4.2.1	Blender (Modelagem Tridimensional)	28
4.2.2	Unity 3D	31
4.2.3	Vuforia (RA)	34
5	Implementação da Adaptabilidade	40
5.1	Computação Gráfica Aplicada	41
5.1.1	Técnicas de Modelagem 3D	41
5.1.2	Modelagem Tridimensional Poligonal	45
5.1.3	Mapeamento de Texturas, Iluminação e Shaders	45
5.2	Técnicas de Otimização de Desempenho	46
5.2.1	Nível de Detalhe	47
5.2.2	Técnicas de Oclusão	49
5.2.3	Lote	50
5.2.4	Pipeline Gráfico	50
5.3	Técnicas de Interação com Objetos Virtuais	54
5.3.1	Implementação de Movimento de Câmera	55
5.4	Técnicas de Navegação e Transição	59
5.4.1	Estrutura do Ambiente Virtual	60
5.4.2	Exploração do Usuário	67
5.5	Técnicas de <i>Feedback</i> Multissensorial	70
5.5.1	Feedback Visual	70
5.5.2	<i>Feedback</i> Auditivo	71
6	Ambientes Imersivos Móveis	72
6.1	Design de Interface e Usabilidade	72
6.1.1	Interfaces intuitivas e acessíveis	73
6.1.2	Feedback visual e auditivo para ações do usuário	74
6.1.3	Guias e tutoriais iniciais	74
6.2	Navegação e Estrutura do Ambiente	75
6.2.1	Integração de múltiplos modos de entrada	75
6.2.2	Personalização do Avatar	77
6.3	Suporte Multissensorial e Acessibilidade	78
6.3.1	Sinalização de objetos interativos	78
6.3.2	Marcadores para contextualização	79
6.3.3	Legendas e audiodescrição	80
7	Considerações Finais	82
7.1	Contribuições para a Área de Computação Aplicada	83
7.2	Limitações do Estudo	84

7.3	Trabalhos Futuros	85
7.4	Desdobramentos da Dissertação	85
7.4.1	Publicações diretamente relacionadas à dissertação	86
7.4.2	Produções indiretas (derivadas do contexto do mestrado)	86
Referências Bibliográficas		89

Abstract

This dissertation investigates the design and implementation of an adaptable virtual environment architecture for mobile devices, with emphasis on geometric modeling and three-dimensional interaction. The research addresses the challenge of developing immersive applications that employ virtual reality (Realidade Virtual (RV)) and augmented reality (Realidade Aumentada (RA)) on mobile platforms, taking into account hardware limitations, interface diversity, and the demand for fluid experiences.

As a case study, the GeoMeta application was used, developed in Unity and integrated with the Vuforia library, designed to enable interactive exploration of three-dimensional geometry in both virtual and augmented scenarios. The methodology involved a systematic literature review and a technical-computational analysis of the system, highlighting aspects such as modular architecture, real-time rendering techniques, and multi-channel interaction strategies.

The results show that adaptability, when embedded in the architectural design, directly enhances user presence and immersion levels, even across devices with different performance capacities. As a contribution, this work proposes a set of guidelines for the development of mobile virtual environments (Ambiente Virtual Móvel (AVM)), emphasizing modularity, scalability, and interaction strategies as foundations for building consistent immersive experiences in both educational and computational contexts.

Keywords: Virtual Reality. Augmented Reality. Mobile Virtual Environments. Immersion. Three-Dimensional Interaction.

Resumo

Esta dissertação investiga a concepção e implementação de uma arquitetura de ambiente virtual adaptável para dispositivos móveis, com ênfase em modelagem geométrica e interação tridimensional. O trabalho parte do desafio de desenvolver aplicações imersivas que utilizam Realidade Virtual (RV) e Realidade Aumentada (RA) em plataformas móveis, considerando as limitações de hardware, a diversidade de interfaces e a necessidade de experiências fluidas. Como estudo de caso, foi utilizado o aplicativo GeoMeta, desenvolvido em Unity e integrado à biblioteca Vuforia, projetado para possibilitar a exploração interativa da geometria tridimensional em cenários virtuais e aumentados. A metodologia envolveu uma revisão sistemática da literatura e a análise técnico-computacional do sistema, destacando aspectos de arquitetura modular, técnicas de renderização em tempo real e estratégias de interação multicanal.

Os resultados demonstram que a adaptabilidade, quando incorporada ao projeto arquitetural, contribui diretamente para ampliar a sensação de presença e o nível de imersão do usuário, mesmo em dispositivos de diferentes capacidades. Como contribuição, este trabalho apresenta um conjunto de diretrizes para o desenvolvimento de Ambiente Virtual Móvel (AVM), ressaltando modularidade, escalabilidade e estratégias de interação como fundamentos para a criação de experiências imersivas consistentes em contextos educacionais e computacionais.

Palavras-chave: Realidade Virtual. Realidade Aumentada. Ambientes Virtuais Móveis. Imersão. Interação Tridimensional.

Capítulo 1

Introdução

A rápida evolução das tecnologias imersivas tem impulsionado o desenvolvimento de sistemas computacionais cada vez mais sofisticados voltados à construção de Ambientes Virtuais Interativos (AVI). Tais ambientes têm se mostrado promissores em aplicações que exigem visualização tridimensional, manipulação de objetos digitais e interação em tempo real, como simulação técnica, treinamento profissional e sistemas de apoio ao aprendizado visual. Em particular, a integração de Realidade Virtual (RV) e Realidade Aumentada (RA) tem ampliado as possibilidades de interação homem-máquina, ao proporcionar experiências tridimensionais mais naturais, imersivas e sensíveis ao contexto de uso [1, 2].

A Realidade Estendida, que abrange tanto a RV quanto a RA, representa um campo dinâmico no qual múltiplas tecnologias convergem para criar interfaces tridimensionais imersivas. Quando aplicadas em plataformas móveis, essas tecnologias requerem abordagens específicas de engenharia que considerem as limitações computacionais dos dispositivos, como capacidade de processamento gráfico, uso eficiente de memória, consumo energético e responsividade da interface. Estas restrições impõem desafios técnicos relevantes, especialmente em relação à renderização em tempo real, gerenciamento eficiente de ativos tridimensionais e controle de entrada multimodal em ambientes virtuais móveis (AVM) [3].

A técnica de multiprojeção de ambientes virtuais, proposta por [4], marcou um ponto de inflexão no desenvolvimento de sistemas imersivos ao introduzir estruturas computacionais capazes de adaptar campos de visão estereoscópicos de acordo com a posição do usuário. Esta abordagem contribuiu para consolidar a imersão como um componente funcional essencial na concepção de interfaces tridimensionais, resultando em novas estratégias computacionais para aumentar a sensação de presença em ambientes simulados [5].

No cenário contemporâneo, a mobilidade tornou-se um dos pilares da computação aplicada. A popularização de smartphones, tablets e visores portáteis de RV ampliou o alcance de sistemas interativos, permitindo que experiências tridimensionais sejam acessadas fora de ambientes controlados, como laboratórios e centros de simulação. No entanto, essa mobilidade exige arquiteturas de software robustas e adaptativas, capazes de ajustar dinamicamente o nível de

complexidade gráfica, a lógica de interação e o fluxo de controle do sistema com base nas especificações do dispositivo em uso [6].

É nesse contexto que se insere o presente trabalho, que tem como objetivo propor diretrizes para a adaptabilidade de AVMs interativos que utilizam RV e RA, tomando como estudo de caso o aplicativo *GeoMeta*. Esta aplicação foi desenvolvida para oferecer experiências imersivas no domínio da geometria tridimensional, utilizando recursos como manipulação de formas geométricas em tempo real, navegação por cenas virtuais e sobreposição de objetos tridimensionais em ambientes reais por meio de marcadores visuais.

O aplicativo *GeoMeta* foi concebido como um ambiente modular e extensível, projetado com ênfase em desempenho, eficiência gráfica e responsividade, compatível com dispositivos móveis de médio e baixo poder computacional. Sua arquitetura explora princípios de modularização de componentes, controle baseado em eventos, técnicas de renderização otimizada e gerenciamento eficiente de malhas tridimensionais. A integração com a biblioteca *Vuforia*¹ possibilita a implementação de RA por meio da detecção de marcadores visuais, enquanto os ambientes de RV são implementados em cenas imersivas compostas por ambientes tridimensionais e imagens panorâmicas em 360°.

Diferentemente de aplicações baseadas apenas em visualização estática, o *GeoMeta* permite ao usuário realizar interações dinâmicas com entidades geométricas tridimensionais, como rotação, escalonamento, seleção e identificação de propriedades espaciais. Estas ações são realizadas em tempo de execução, e a resposta do sistema é ajustada de forma adaptativa com base nas condições do dispositivo e na carga computacional presente, favorecendo o equilíbrio entre qualidade visual e desempenho. Esse comportamento é obtido por meio da utilização de estratégias de redução de polígonos, técnicas de oclusão por região (*occlusion culling*), uso de mapas de iluminação pré-processados (*lightmaps*) e gerenciamento seletivo de ativos em memória [7].

Embora o *GeoMeta* tenha sido originalmente concebido para fins educacionais no ensino de geometria espacial, este trabalho aborda sua concepção e implementação sob uma perspectiva computacional, voltada ao desenvolvimento de sistemas interativos imersivos adaptáveis. A aplicação é adotada como estudo de caso não por seu conteúdo pedagógico, mas por representar um artefato computacional completo que exemplifica os desafios e soluções relacionados à engenharia de sistemas interativos adaptativos baseados em RV e RA. A contribuição central está na análise de como aspectos como renderização tridimensional, navegação virtual, controle de interação e alocação de recursos computacionais podem ser orquestrados para criar experiências imersivas responsivas e eficientes, mesmo em contextos heterogêneos de hardware [8].

Dessa forma, esta dissertação contribui para o avanço do estado da arte na área de Engenharia da Computação Aplicada, ao apresentar uma abordagem prática e fundamentada para o desenvolvimento de AVMs imersivos. A proposta envolve integração eficiente de tecnologias imersivas, modularidade arquitetural e estratégias de adaptação automatizada de recursos

¹ developer.vuforia.com

computacionais, contribuindo com diretrizes e subsídios para futuros projetos que demandem robustez, imersão e portabilidade em sistemas interativos tridimensionais [9].

1.1 Contextualização

A consolidação dos Ambientes Virtuais Imersivos (AVIs) tem desempenhado um papel estratégico na evolução dos sistemas computacionais voltados à simulação, visualização e experimentação em tempo real. Nos últimos anos, os chamados Ambientes Virtuais de Aprendizagem (AVA) — implementados como sistemas computacionais baseados na web ou em plataformas nativas — têm sido adaptados para dispositivos móveis, impulsionados pela crescente mobilidade dos usuários e pela popularização de smartphones e tablets com capacidade gráfica avançada [10]. Esta migração, entretanto, envolve desafios técnicos significativos relacionados à portabilidade, escalabilidade e responsividade dos sistemas, sobretudo em ambientes heterogêneos quanto a hardware, sistema operacional, resolução de tela, interfaces de entrada e conectividade de rede [11].

Neste contexto, a introdução de tecnologias imersivas, como Realidade Aumentada (RA) e Realidade Virtual (RV), adiciona uma camada adicional de complexidade computacional. Essas tecnologias exigem, por parte do sistema, a capacidade de renderizar cenas tridimensionais com alto nível de detalhe, rastrear a posição e a orientação do usuário em tempo real e responder de forma fluida às interações, tudo isso sob restrições estritas de desempenho energético, térmico e computacional características de dispositivos móveis [12].

No domínio da computação gráfica, tais exigências envolvem o uso de motores gráficos especializados, como a plataforma *Unity*², que fornece suporte para modelagem tridimensional, animação, simulação física, gerenciamento de malhas e controle de cena. A construção de aplicações móveis interativas com RA e RV requer o domínio de técnicas como otimização de polígonos, uso de mapas de iluminação pré-processados, atualização assíncrona de entidades visuais e compressão de texturas para minimizar o uso de memória e largura de banda interna [13]. Adicionalmente, o uso de bibliotecas como Vuforia, AR Foundation e sistemas de rastreamento espacial impõe requisitos sobre a calibração de sensores, latência de resposta, persistência de âncoras espaciais e compatibilidade com múltiplas plataformas [14].

A geometria, por sua natureza espacial e abstrata, apresenta um cenário computacional ideal para a aplicação de tecnologias imersivas. A possibilidade de manipular, rotacionar, escalar e visualizar formas geométricas tridimensionais com precisão espacial amplia as capacidades de exploração interativa e representa uma interface mais direta com conceitos matemáticos complexos [15, 16]. Entretanto, para que essa manipulação seja executada de forma eficiente em tempo real, são necessários algoritmos otimizados para renderização, gerenciamento de malhas e controle de transformações espaciais.

²unity.com

O desenvolvimento de sistemas interativos móveis com suporte à imersão tridimensional exige uma arquitetura de software adaptável, capaz de ajustar dinamicamente aspectos como nível de detalhe gráfico, densidade de informações na cena e tipos de controle de entrada — seja por toque, giroscópio, detecção de gestos ou foco visual. Tais sistemas devem ser projetados com modularidade e desacoplamento funcional, de modo que componentes possam ser ativados ou desativados conforme as capacidades do dispositivo em tempo de execução [17].

A convergência entre computação gráfica móvel, interação tridimensional em tempo real e tecnologias imersivas estabelece um cenário computacional desafiador e promissor. Para que sistemas interativos imersivos sejam viáveis em plataformas móveis, é necessário empregar técnicas de adaptação automática baseadas em monitoramento de desempenho, escalonamento dinâmico de qualidade visual, gestão inteligente de recursos computacionais e balanceamento entre custo gráfico e fluidez da experiência. A adaptabilidade, neste contexto, deve ser tratada como um requisito técnico de primeira ordem, essencial para garantir não apenas a usabilidade, mas também a estabilidade, eficiência e continuidade da interação, mesmo em dispositivos com restrições severas de hardware ou rede [6].

1.2 Problema de Pesquisa

Apesar dos avanços recentes nas tecnologias de RV e RA, e de sua crescente adoção em aplicações móveis interativas, a capacidade desses sistemas se adaptarem eficientemente a diferentes contextos de uso e configurações de dispositivos ainda representa um desafio técnico relevante. Aplicações imersivas operando em plataformas móveis enfrentam limitações de processamento, variações de hardware e diversidade de sensores e interfaces de entrada, o que compromete a consistência da experiência imersiva oferecida ao usuário.

Sistemas baseados em Realidade Estendida demandam não apenas desempenho gráfico e estabilidade de renderização em tempo real, mas também suporte a múltiplos modos de entrada — como toques multitoque, giroscópio, acelerômetro, detecção de foco visual e interações gestuais —, além da adaptação automática a diferentes resoluções de tela, proporções de exibição e densidades de pixels. Esta heterogeneidade impõe requisitos adicionais ao projeto arquitetônico do software, que deve ser suficientemente flexível para ajustar dinamicamente a qualidade visual, a lógica de interação e a estruturação da cena tridimensional, sem comprometer a fluidez da experiência.

Dessa forma, a questão central que se impõe é: como garantir que AVMs que utilizam RV e RA, como o aplicativo *GeoMeta*, possam se adaptar de forma automática e eficiente a diferentes dispositivos, modos de interação e cenários de uso, mantendo desempenho adequado, interatividade fluida e qualidade imersiva consistente?

1.3 Objetivos

Objetivo Geral: Apresentar e analisar a implementação do aplicativo GeoMeta como um ambiente virtual móvel baseado em Realidade Virtual (RV) e Realidade Aumentada (RA), destacando aspectos relacionados à adaptabilidade a diferentes dispositivos móveis.

Objetivos Específicos:

- Descrever a arquitetura e o design do GeoMeta voltados para mobilidade e adaptabilidade.
- Apresentar soluções técnicas implementadas para lidar com limitações de hardware e recursos computacionais em dispositivos móveis.
- Demonstrar como a adaptabilidade foi considerada durante o desenvolvimento do GeoMeta.
- Contextualizar o desenvolvimento do GeoMeta no cenário de aplicações móveis imersivas.

1.4 Justificativa

A computação imersiva em dispositivos móveis representa uma fronteira tecnológica com potencial significativo para transformar a maneira como interagimos com informações visuais tridimensionais. Com a popularização de sensores embarcados, câmeras integradas e unidades gráficas capazes de processar ambientes tridimensionais em tempo real, tornou-se possível levar experiências de RV e RA para dentro de smartphones e tablets, ampliando o alcance de aplicações que até então dependiam de infraestrutura de alto custo.

"Avanços recentes em hardware e software para computação móvel possibilitaram uma nova geração de sistemas e aplicações de realidade aumentada móvel. Uma nova geração de computação, chamada “computação ubíqua aumentada”, resultou da convergência de computação vestível, redes sem fio e interfaces de Realidade Aumentada móvel.”[18]

Nesse contexto, a construção de AVs imersivos adaptados a dispositivos móveis exige um olhar técnico rigoroso sobre os componentes fundamentais de sua arquitetura: modelagem geométrica eficiente, renderização em tempo real, gerenciamento de cenas complexas, mecanismos de interação responsivos e integração fluida entre sensores, motores gráficos e interfaces de usuário. Cada um desses aspectos apresenta desafios próprios que impactam diretamente a usabilidade, a estabilidade da aplicação e a sensação de presença nos AVs [19].

A presente dissertação justifica-se pela necessidade de aprofundar a compreensão técnica da adaptabilidade desses sistemas — isto é, sua capacidade de manter desempenho e imersão

mesmo diante da heterogeneidade de dispositivos móveis, diferenças de potência gráfica, tamanhos de tela, esquemas de entrada e contextos de uso. A adaptabilidade torna-se ainda mais crítica quando o sistema é voltado para fins educacionais, como no caso do GeoMeta, em que a clareza visual, a precisão das interações e a organização dos conteúdos influenciam diretamente o processo de aprendizagem.

"Ambientes imersivos podem ampliar significativamente o engajamento e a retenção de conteúdos educacionais, promovendo formas de aprendizagem sensorial e espacialmente contextualizadas." [20].

Dada a complexidade envolvida na construção desse tipo de sistema, é essencial analisar os princípios técnicos que o sustentam, bem como a implementação de estratégias de adaptabilidade durante o desenvolvimento do GeoMeta. Portanto, esta dissertação pretende contribuir de forma objetiva com o campo da Computação Aplicada, oferecendo subsídios técnicos e conceituais para o desenvolvimento de ambientes imersivos móveis mais eficientes, flexíveis e adaptáveis, com foco especial em aplicações educacionais que utilizam recursos tridimensionais para representar conteúdos abstratos como os da Geometria.

Capítulo 2

Levantamento Bibliográfico

A fundamentação teórica deste trabalho visa apresentar os conceitos, estruturas e tecnologias essenciais para a construção de aplicações interativas imersivas baseadas em RV e RA. Serão discutidos os modelos computacionais de representação e transformação de entidades geométricas, bem como os princípios de organização modular de sistemas interativos em dispositivos com restrições de hardware.

2.1 Ambientes Virtuais Imersivos

Os ambientes virtuais imersivos podem ser definidos como sistemas computacionais tridimensionais projetados para simular espaços digitais que proporcionam ao usuário a sensação de presença — ou seja, a percepção de estar efetivamente inserido no ambiente representado. Para atingir esse efeito, esses sistemas dependem de recursos de computação gráfica avançada, renderização em tempo real e mecanismos de interação que integram estímulos visuais, auditivos e, em alguns casos, táteis. Diferentemente da simples visualização em telas planas, a imersão envolve uma resposta interativa do ambiente aos comandos do usuário, criando uma experiência mais natural e convincente.

A arquitetura desses sistemas imersivos geralmente é composta por três elementos fundamentais. O primeiro é o *dispositivo de visualização*, responsável pela entrega da informação visual ao usuário [21]. Este pode assumir diferentes formas, como Head-Mounted Displays (HMDs) de RV com lentes estereoscópicas que oferecem profundidade de campo, óculos de RA que mesclam objetos digitais ao espaço físico captado por câmeras, ou até mesmo a tela de dispositivos móveis, que fornece uma experiência mais acessível.

O segundo elemento refere-se aos *mecanismos de entrada e controle*, responsáveis por traduzir as ações físicas do usuário em comandos digitais interpretados pelo sistema [19]. Em dispositivos móveis, isso ocorre principalmente por meio de sensores embarcados, como acelerômetro, giroscópio e magnetômetro, que detectam rotação, inclinação e movimentação do

aparelho. Já em HMDs mais avançados, o suporte é ampliado por controladores dedicados com múltiplos Degrees of Freedom (DoF) ou sistemas de rastreamento corporal, permitindo que o usuário interaja de forma mais natural com objetos tridimensionais. Esses mecanismos tornam possível desde interações simples, como toques e arrastes na tela, até manipulações complexas de elementos em um espaço tridimensional.

Por fim, o *software* de simulação constitui o núcleo lógico do ambiente virtual imersivo [22]. Ele integra gráficos, simulação física e lógica de interação, processando continuamente as entradas do usuário para atualizar o estado da cena em tempo real.

O equilíbrio entre esses três componentes é determinante para a experiência imersiva. A qualidade da visualização, a precisão da captura de movimentos e a eficiência da renderização gráfica precisam estar integradas de forma consistente. Falhas em qualquer um desses aspectos podem comprometer a sensação de presença e reduzir a naturalidade da interação. Dessa forma, ambientes virtuais imersivos exigem não apenas soluções tecnológicas avançadas, mas também um projeto arquitetural cuidadoso que considere as limitações de hardware e as demandas da interação em tempo real.

2.1.1 Realidade Virtual: Conceitos e Implementação

A RV é um campo multidisciplinar que envolve interação humano-computador, computação gráfica, percepção sensorial e dispositivos computacionais para criar experiências imersivas em ambientes gerados por computador. Em termos gerais, a RV busca simular ambientes tridimensionais nos quais os usuários podem interagir em tempo real, proporcionando a sensação de presença e imersão em um espaço alternativo à realidade física [23].

O conceito de criar mundos artificiais imersivos pode ser traçado até a antiguidade, com a criação de dispositivos ópticos e técnicas de ilusão de profundidade em pinturas e teatro. No entanto, a formulação técnica da RV, como hoje é compreendida, emergiu no século XX com os avanços da computação digital e dos sistemas interativos.

A primeira menção mais estruturada de um sistema com características de RV remonta aos anos 1960, com o desenvolvimento do *Sensorama*, criado por Morton Heilig (Figura 1). Este era um simulador multimodal que proporcionava estímulos visuais, auditivos, táteis e olfativos, com o objetivo de envolver o usuário em uma experiência cinematográfica imersiva. Embora não fosse digital, o *Sensorama* introduziu a ideia de uma experiência sensorial total.

Um marco significativo na trajetória da RV foi a criação do *Sword of Damocles*, por Ivan Sutherland, em 1968 (Figura 2). Considerado o primeiro sistema de RV com interface gráfica tridimensional, este dispositivo consistia em um display montado na cabeça (HMD – *Head-Mounted Display*) que projetava imagens tridimensionais alinhadas com o movimento da cabeça do usuário. O sistema era controlado por um computador e atualizava a perspectiva da cena conforme o usuário se movia, estabelecendo um princípio básico da RV moderna: o rastreamento da posição e orientação do usuário.

Figura 1: Sensorama de Morton Heilig



Fonte: blogs.unicamp.br/massacritica/2009/06/11/sensorama/

Figura 2: Sword of Damocles criado por Ivan Sutherland



Fonte: amturing.acm.org/photo/sutherland_3467412.cfm

A expressão “Realidade Virtual” em si foi popularizada na década de 1980 pelo pesquisador e artista Jaron Lanier, fundador da empresa VPL Research. Lanier não apenas promoveu o termo, mas também desenvolveu uma série de dispositivos pioneiros, como as primeiras luvas de dados (*DataGlove*) e HMDs comerciais, que permitiam a interação direta com AVs [24]. Ao longo das décadas de 1980 e 1990, a RV passou a ser vista como uma fronteira emergente da computação gráfica, embora tenha sido limitada por restrições tecnológicas da época. O custo elevado, o baixo desempenho gráfico e os atrasos de latência nos sistemas de rastreamento limitaram sua adoção comercial. Contudo, a área seguiu sendo explorada em setores como defesa (simuladores de voo e combate), medicina (simulação de cirurgias) e psicologia (terapias de exposição), destacando-se pelo potencial de treinamento e simulação segura de cenários complexos [25]. Com o avanço dos sistemas computacionais, sensores de movimento e processamento gráfico a partir dos anos 2000, a RV ganhou novo fôlego. Um marco da nova era foi o lançamento do *Oculus Rift*, em 2012 (Figura 3), resultado de uma campanha de financiamento coletivo. Este dispositivo catalisou o ressurgimento da RV como tecnologia de consumo e foi seguido por grandes investimentos de empresas como Facebook³ (que adquiriu a Oculus em 2014), Google⁴, Sony⁵, HTC⁶ e Valve⁷.

Figura 3: *Oculus Rift*



Fonte: https://pt.wikipedia.org/wiki/Oculus_Rift

A RV moderna é caracterizada por uma combinação de três pilares principais: imersão, interatividade e presença. Imersão refere-se à capacidade do sistema de envolver o usuário completamente no ambiente simulado, minimizando a percepção do mundo real. Interatividade diz respeito à habilidade do usuário de modificar o ambiente e receber respostas em tempo real. Presença é a sensação subjetiva de “estar lá”, ou seja, a percepção do ambiente virtual como real [26].

³meta.com/quest

⁴arvr.google.com/cardboard

⁵playstation.com/pt-br/ps-vr

⁶vive.com/us

⁷valvesoftware.com/pt-br/index/headset

Tecnicamente, um sistema de RV é composto por diversos subsistemas: um sistema de visualização (HMDs ou CAVes), dispositivos de entrada (controladores, luvas, sensores de movimento), motores gráficos para renderização em tempo real e algoritmos de rastreamento e atualização da cena. A latência, a taxa de quadros por segundo (FPS), o campo de visão (FOV) e a resolução das imagens são parâmetros críticos para garantir uma experiência de RV fluida e confortável.

Do ponto de vista de aplicações, a RV se consolidou em áreas como jogos eletrônicos, treinamento militar, simulações industriais, ensino de ciências, reabilitação médica, design de produtos, visualização arquitetônica e exposições museológicas. Sua utilização em contextos sérios, muitas vezes referida como *serious games* ou *VR for training*, tem demonstrado ganhos significativos na aprendizagem de habilidades motoras e cognitivas [27].

Apesar dos avanços, desafios ainda persistem. Entre os mais citados estão o enjoo cibernético (*motion sickness*), a ergonomia dos dispositivos, a acessibilidade econômica, a limitação de conteúdo de qualidade e as questões éticas sobre a dissociação da realidade. Entretanto, a tendência é de crescimento contínuo, com o surgimento de sistemas cada vez mais realistas, acessíveis e interconectados, especialmente com a convergência entre RV, Inteligência Artificial (IA) e redes 5G/6G [28].

2.1.2 Realidade Aumentada: Conceitos e Implementação

A RA constitui uma tecnologia emergente no campo da computação imersiva, caracterizada pela sobreposição de elementos digitais ao ambiente físico percebido pelo usuário. Essa integração se dá de maneira síncrona e responsiva, promovendo uma fusão entre os mundos real e virtual.

Diferentemente da RV — que substitui por completo os estímulos sensoriais do usuário por um ambiente tridimensional gerado computacionalmente —, a RA atua como uma camada informacional adicional, permitindo que objetos tridimensionais, textos explicativos, sons, animações e outros elementos visuais coexistam com o mundo físico em tempo real, sem desconectá-lo de seu entorno imediato [29].

A arquitetura técnica de um sistema de RA envolve a integração de três componentes essenciais: (1) um dispositivo de visualização, como smartphones, tablets, óculos inteligentes ou HMDs; (2) um mecanismo de rastreamento espacial, responsável por determinar com precisão a posição e orientação do usuário ou do dispositivo no espaço, com base em marcadores visuais, superfícies planas, sensores inerciais ou geoposicionamento; e (3) um motor de renderização gráfica em tempo real, que projeta os elementos virtuais de forma consistente com a perspectiva do usuário e com o contexto do ambiente real capturado pela câmera. Para garantir essa coerência visual e interativa, o sistema depende de algoritmos robustos de detecção e reconhecimento de padrões, reconstrução de superfícies, calibração de sensores embarcados e sincronização entre os módulos de entrada, processamento e exibição.

O termo “Realidade Aumentada” foi cunhado formalmente por Tom Caudell e David Mizell em

1992, no contexto de um sistema assistivo à montagem de estruturas aeronáuticas na empresa Boeing [30]. No entanto, os princípios técnicos que sustentam essa tecnologia têm origens anteriores, com destaque para o trabalho de Ivan Sutherland e sua proposta do “Ultimate Display” na década de 1960 [31], que já previa a criação de ambientes computacionais que fundissem representação gráfica e interação física.

O estudo seminal de [12] estabeleceu três propriedades fundamentais para um sistema de RA ser considerado completo e funcional: (i) a fusão entre elementos reais e virtuais em uma única cena coerente; (ii) a interatividade em tempo real, permitindo que o usuário influencie diretamente o comportamento dos objetos virtuais; e (iii) o alinhamento espacial preciso dos conteúdos virtuais com o mundo físico, também conhecido como registro tridimensional. Estas características formam a base técnica para qualquer aplicação robusta de RA e continuam sendo referências para o desenvolvimento de sistemas contemporâneos em ambientes móveis e imersivos.

O avanço de componentes computacionais embarcados — como giroscópios, acelerômetros, magnetômetros, câmeras RGB e sensores de profundidade — viabilizou a transição da RA dos laboratórios de pesquisa para os dispositivos móveis do cotidiano. Essa evolução tecnológica, aliada ao surgimento de plataformas de desenvolvimento como o *ARKit*⁸ (Apple), *ARCore*⁹ (Google) e *Vuforia*, tem impulsionado a popularização de aplicações educacionais, industriais e comerciais que utilizam a RA como meio para enriquecer a experiência do usuário em tarefas cotidianas, simulações técnicas e processos de aprendizagem interativos.

2.1.3 Realidade Misturada

A Realidade Mista (RM) representa um avanço significativo dentro do campo das tecnologias imersivas, caracterizando-se por sua capacidade de integrar, de maneira contínua e interativa, elementos do mundo real com conteúdos digitais tridimensionais. Ao contrário da RA, na qual os objetos virtuais são apenas sobrepostos ao cenário físico, ou da RV, que imerge o usuário em um ambiente completamente simulado, a RM estabelece um espaço híbrido no qual componentes físicos e digitais compartilham não apenas o mesmo campo visual, mas também a mesma lógica de interação, comportamento físico e contexto situacional [29].

Para que essa integração seja viável, os sistemas de RM precisam ser capazes de realizar o mapeamento dinâmico do ambiente físico com alta precisão, bem como manter a persistência e coerência espacial dos objetos virtuais inseridos. Isso implica em desafios computacionais relacionados à detecção e modelagem de superfícies, compreensão semântica do ambiente, reconhecimento de gestos e movimentos do usuário, simulação de interações físicas e adaptação em tempo real às mudanças do espaço real. Tais capacidades demandam arquiteturas sofisticadas que combinem processamento gráfico, algoritmos de visão computacional, redes neurais e motores físicos tridimensionais altamente otimizados.

⁸developer.apple.com/augmented-reality/arkit/

⁹developers.google.com/ar

2.1.3.1 Histórico e Evolução da RM

O conceito de RM não surgiu isoladamente, mas como uma evolução natural da convergência entre os campos da RV e da RA. A primeira formulação teórica do espectro da realidade foi proposta por Paul Milgram e Fumio Kishino em 1994, em seu artigo seminal “A Taxonomy of Mixed Reality Visual Displays” [29]. Nesse trabalho, os autores introduziram o conceito de *Virtuality Continuum* (ou Continuum da Virtualidade), um espectro contínuo que vai desde o mundo real totalmente não computacional até ambientes completamente virtuais, passando por diversos graus de mistura entre os dois domínios.

No centro desse espectro, Milgram situou a RM, como o espaço onde elementos físicos e digitais coexistem e se influenciam mutuamente. Na extremidade mais próxima do mundo real encontra-se a RA, na qual elementos virtuais são sobrepostos ao ambiente físico sem interação profunda. Já na extremidade oposta, mais próxima do virtual, está a RV, na qual elementos do mundo real (como vídeo ou sensores) são introduzidos em um ambiente predominantemente virtual. A RM, portanto, compreende todas as formas em que essas realidades se combinam de maneira responsiva e imersiva [32]. Essa intersecção entre o tangível e o digital permite a criação de experiências em que objetos virtuais podem ser manipulados como se fossem parte do cenário físico, e o ambiente real pode interagir com o conteúdo simulado.

A consolidação da RM como uma categoria própria começou a ganhar força na década de 2010, com o avanço de dispositivos e algoritmos capazes de realizar mapeamento espacial em tempo real. Tecnologias como Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) (*Simultaneous Localization and Mapping*) [33], rastreamento de profundidade com câmeras RGB-D, sensores LiDAR e IA embarcada permitiram que os sistemas não apenas sobrepussem elementos virtuais ao mundo real, mas também os integrassem funcionalmente ao espaço físico.

Além da capacidade de integrar elementos virtuais e reais, a RM se destaca pela interação bidirecional entre os dois mundos. Isso significa que não apenas o conteúdo digital pode ser projetado no ambiente real, mas também o ambiente real pode influenciar o comportamento do conteúdo digital. Por exemplo, um objeto virtual pode colidir com uma parede física, ou a iluminação do ambiente real pode afetar a aparência de um objeto virtual. Essa sinergia complexa requer sistemas de computação gráfica robustos e algoritmos de rastreamento de alta precisão [34]. A importância da RM reside em sua capacidade de oferecer experiências que transcendem tanto a RV, pela manutenção da conexão com o mundo físico, quanto a RA pela profundidade da interação e integração contextual dos elementos virtuais.

2.1.3.2 RM em Dispositivos Móveis

Embora as experiências mais sofisticadas de RM ainda estejam concentradas em dispositivos dedicados — como o *Microsoft HoloLens*¹⁰, o *Magic Leap*¹¹ e o *Apple Vision Pro*¹² —, os telefones inteligentes e computadores portáteis modernos já começam a oferecer funcionalidades compatíveis com esse paradigma. Por meio de bibliotecas como o *ARKit* (Apple), o *ARCore* (Google) e o *Vuforia* (PTC), torna-se possível realizar mapeamento de superfícies, reconhecimento de planos, ancoragem espacial, oclusão visual e até simulação de iluminação ambiental. Ainda que essas aplicações sejam, do ponto de vista técnico, geralmente classificadas como RA, muitas delas já incorporam características da RM, como interações físicas entre objetos reais e digitais, além de respostas adaptativas a variações no ambiente físico.

Essa evolução tecnológica representa um avanço notável nas capacidades dos dispositivos móveis, permitindo que desenvolvedores criem experiências cada vez mais imersivas e interativas, nas quais as fronteiras entre o mundo físico e o digital tornam-se progressivamente menos perceptíveis. A capacidade de um telefone inteligente detectar, mapear e interpretar tridimensionalmente o espaço ao seu redor constitui um marco fundamental para a ampliação do uso da RM em larga escala, com potencial para ultrapassar contextos experimentais e alcançar o cotidiano de usuários comuns. Essa convergência entre sensores embarcados e plataformas de desenvolvimento acessíveis está pavimentando o caminho para um cenário em que a RM se tornará uma tecnologia ubíqua, integrada a diversas atividades humanas, incluindo a educação, a indústria e o entretenimento.

Apesar de os dispositivos móveis ainda não atingirem o mesmo nível de fidelidade imersiva proporcionado por dispositivos vestíveis de alto desempenho, a crescente sofisticação dos sensores embarcados e dos algoritmos computacionais permite que aplicações desenvolvidas para tais plataformas simulem aspectos fundamentais da RM. A funcionalidade de oclusão, por exemplo — em que um objeto virtual pode ser corretamente ocultado por um objeto físico situado à frente do observador —, ou a simulação de iluminação, que adapta a aparência dos objetos digitais à luz ambiente real, são evidências concretas dessa transição tecnológica. Tais recursos, anteriormente restritos a equipamentos especializados, tornam-se agora acessíveis a partir de um telefone inteligente, promovendo a democratização do acesso a experiências imersivas e interativas [35].

No campo da educação, e particularmente em aplicações como o *GeoMeta*, os princípios da RM demonstram alto potencial pedagógico [36]. Ao permitir a inserção de objetos geométricos tridimensionais no ambiente físico, que podem ser manipulados por meio de gestos naturais e respondem dinamicamente ao espaço em que se encontram, o sistema promove uma experiência imersiva que vai além da visualização passiva. O estudante não apenas observa as formas geométricas, mas atua dentro de um espaço híbrido no qual o conteúdo digital e o mundo físico

¹⁰learn.microsoft.com/pt-br/hololens

¹¹magic Leap.com

¹²apple.com/apple-vision-pro

interagem continuamente. Essa abordagem potencializa a construção do conhecimento espacial de maneira ativa, contextualizada e sensorialmente enriquecida.

Para o ensino de conceitos abstratos, como os encontrados na geometria, a possibilidade de projetar uma esfera virtual sobre uma superfície real, ou de observar o corte transversal de uma pirâmide como se ela estivesse flutuando no espaço, transforma o processo de aprendizagem em uma atividade exploratória. Os estudantes podem experimentar, manipular e internalizar os conceitos, superando as limitações das representações bidimensionais convencionais. Dessa forma, a natureza prática e envolvente das experiências baseadas em RM, mesmo quando executadas em um dispositivo portátil, apresenta-se como uma alternativa inovadora para tornar o ensino mais intuitivo, significativo e memorável.

2.1.4 Imersão: Aspectos Técnicos e Métricas de Sistema

Nos primórdios da RV, entre as décadas de 1960 e 1980, as interfaces eram compostas por equipamentos robustos e dedicados, como o *Sensorama* e o *Dataglove*, que permitiam algum nível de manipulação de objetos virtuais por meio de sensores acoplados ao corpo do usuário. Esses dispositivos foram os primeiros a traduzir movimentos físicos em comandos para ambientes simulados, inaugurando o conceito de *interface espacial* — ou seja, uma interface que depende do posicionamento e movimento do corpo no espaço tridimensional [37].

Com o avanço dos sistemas de RV na década de 1990, sobretudo em ambientes de pesquisa e simuladores industriais, as interfaces físicas evoluíram para incluir dispositivos como joysticks tridimensionais, *trackers* magnéticos e controladores com múltiplos eixos de liberdade (*DoF* – *Degrees of Freedom*) (Figura 4). Essas tecnologias permitiram maior precisão na manipulação e navegação em AVs, ao mesmo tempo em que consolidaram a separação entre dispositivos de entrada (controle) e de saída (visualização). A interação era ainda amplamente baseada em ações discretas, como apontar, selecionar ou mover, refletindo uma fase em que a prioridade estava na fidelidade técnica e não necessariamente na acessibilidade ou ubiquidade das interfaces [38].

O início do século XXI marcou uma inflexão significativa com o surgimento de interfaces mais acessíveis ao consumidor final, como as desenvolvidas para jogos eletrônicos. Tecnologias como o *Nintendo Wii Remote*¹³ e, posteriormente, o *Microsoft Kinect*¹⁴, popularizaram a ideia de interação corporal com ambientes digitais. Esses dispositivos incorporaram sensores de movimento, acelerômetros e câmeras de profundidade, permitindo que os movimentos do corpo fossem utilizados diretamente como forma de controle. Embora não fossem, à época, desenvolvidos especificamente para RV ou RA, essas interfaces ajudaram a moldar os paradigmas contemporâneos de interação imersiva.

Com o avanço dos *headsets* comerciais de RV — como o *Oculus Rift*, *HTC Vive* e *PlayStation VR* — surgiram interfaces específicas para RV, como os *motion controllers* (Figura 5), que

¹³nintendo.com

¹⁴azure.microsoft.com/en-us/products/kinect-dk

Figura 4: Joysticks para máquinas tridimensionais



Fonte:

vectormetric.com.br/produto/joysticks-para-maquinas-tridimensionais/

combinam sensores de posição com botões táteis e *feedback háptico*. Tais controladores foram projetados para operar em sincronia com o movimento da cabeça e das mãos, recriando no ambiente virtual a noção de presença corporal e manipulação direta. Conceitualmente, isso representou o amadurecimento da ideia de “interface natural”, na qual os gestos e ações do usuário são mapeados diretamente para o mundo virtual, sem intermediações simbólicas como teclas ou comandos abstratos.

Figura 5: Sony PlayStation Move Motion Controller



Fonte:

playstation.com/pt-br/accessories/playstation-move-motion-controller/

A transição das experiências imersivas para o contexto móvel, iniciada com a consolidação dos *smartphones* como plataformas computacionais completas, forçou uma nova adaptação nas interfaces. Como os dispositivos móveis possuem sensores embarcados (acelerômetro,

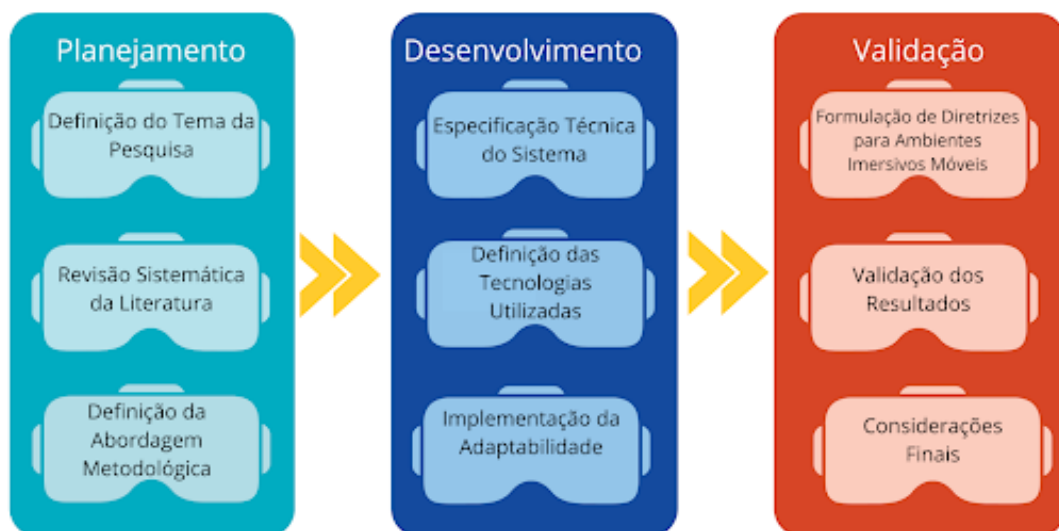
giroscópio, câmera, GPS), eles próprios passaram a funcionar como interfaces físicas. Em aplicações de RA, por exemplo, o movimento do dispositivo no espaço tridimensional é utilizado como mecanismo de navegação e controle, permitindo ao usuário mover a câmera, posicionar objetos e interagir com o ambiente sem a necessidade de controladores adicionais [39]. Nesse novo contexto, surgiram também interfaces virtuais que operam diretamente sobre a tela sensível ao toque dos dispositivos móveis. Botões sobrepostos ao ambiente, menus contextuais, gestos multitoque e interfaces baseadas em *gaze* (olhar) passaram a compor o repertório de interação, especialmente em aplicações que combinam RA com visualização 3D. Do ponto de vista teórico, essas soluções se fundamentam nos princípios da interação direta e da RM, nos quais o usuário atua sobre elementos digitais como se estivessem fisicamente presentes no ambiente real, ainda que o controle ocorra por meio de abstrações visuais ou táteis [40].

Capítulo 3

Metodologia

A presente dissertação adota uma abordagem metodológica voltada à análise técnica da adaptação de aplicações imersivas para plataformas móveis, seguindo os passos demonstrados na Figura 6, com ênfase na construção e nos ajustes realizados no aplicativo *GeoMeta*, utilizado como artefato computacional de referência. O objetivo central é investigar as estratégias de adaptação de ambientes virtuais tridimensionais, com ênfase em aspectos de arquitetura, modelagem geométrica e interação tridimensional, de modo a possibilitar seu funcionamento eficiente, interativo e responsivo em dispositivos móveis com restrições de hardware e interface.

Figura 6: Etapas de Execução da Pesquisa



Fonte: Elaborada pelo Autor.

O foco da pesquisa concentra-se na investigação de como ambientes virtuais imersivos podem ser reestruturados e otimizados para execução em dispositivos móveis, considerando

especialmente os aspectos de arquitetura de software, modelagem geométrica e interação tridimensional. A proposta não está restrita à funcionalidade pedagógica do aplicativo; busca-se compreender como o projeto, o código e a infraestrutura técnica de uma aplicação imersiva podem ser transformados para operar em plataformas móveis sem perda significativa de desempenho, usabilidade ou imersão. Isso envolve a análise de elementos como a estrutura modular do sistema, o uso de técnicas de renderização em tempo real otimizadas, o design das interações por toque e movimento, o controle da navegação espacial e a reorganização de cenas e ativos gráficos para operação fluida em dispositivos com menor capacidade computacional. A metodologia parte da decomposição da aplicação *GeoMeta* em seus componentes técnicos fundamentais — modelagem tridimensional, lógica de cena, subsistema gráfico, mecanismos de entrada e resposta sensorial — para investigar os impactos das adaptações realizadas na experiência final. A análise é conduzida com base em observações diretas da aplicação em funcionamento, na documentação do processo de desenvolvimento e na avaliação das decisões técnicas empregadas.

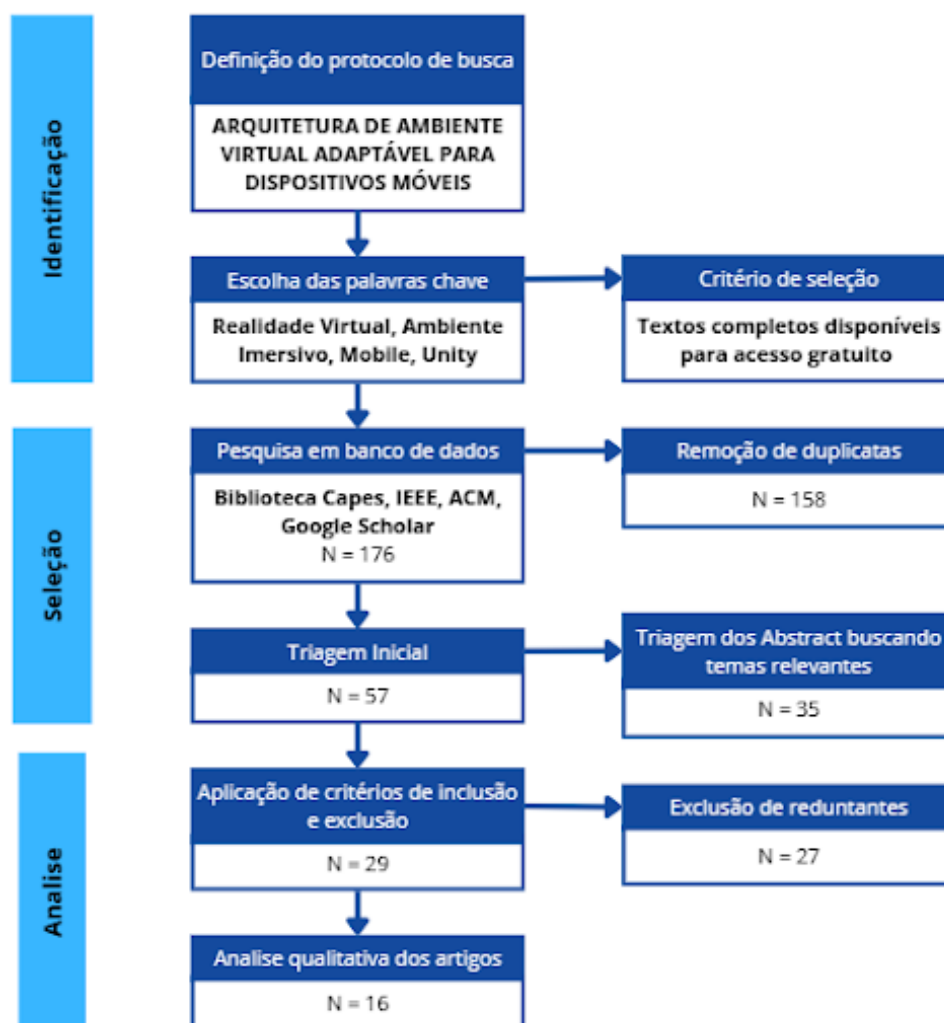
A partir dessa abordagem, busca-se formular diretrizes para o desenvolvimento de aplicações imersivas móveis adaptadas, que possam preservar características essenciais da RV e RA — como presença, interação tridimensional e resposta sensorial — mesmo sob as limitações impostas pelos dispositivos móveis.

3.1 Revisão Sistemática da Literatura

Para a construção da base teórica e o mapeamento do estado da arte sobre ambientes imersivos móveis em RV e RA, foi conduzida uma Revisão Sistemática da Literatura (do inglês, Systematic Literature Review – SLR) [41]. Diferente de uma revisão narrativa ou exploratória, a SLR segue protocolos definidos que buscam garantir rigor, replicabilidade e transparência no processo de seleção das referências.

O protocolo de busca foi estruturado a partir da definição do tema central da investigação — Arquitetura de Ambiente Virtual Adaptável para Dispositivos Móveis — e da escolha das palavras-chave: RV, Ambiente Imersivo, Mobile e Unity. Essas combinações foram aplicadas por meio de operadores booleanos em quatro bases de dados de ampla relevância científica: Biblioteca CAPES, IEEE Xplorer, ACM Digital Library e Google Scholar.

Para melhor representar a SLR e o que espera alcançar em cada etapa, é mostrada a Figura 7 que mostra o passo a passo desta pesquisa e seus valores de n .

Figura 7: Revisão Sistemática da Literatura

Fonte: Elaborada pelo Autor

A busca inicial resultou em 176 artigos, que em seguida passaram por uma triagem preliminar por meio da leitura de títulos e resumos, eliminando publicações sem relação direta com o tema. Essa filtragem foi necessária para reduzir o volume de material irrelevante e garantir que apenas estudos alinhados ao objeto da pesquisa fossem considerados. Na etapa seguinte, aplicaram-se critérios de inclusão e exclusão, considerando aspectos como: relevância para a área de Engenharia de Software e Computação Gráfica, foco em aplicações móveis, presença de métricas de desempenho ou interação e delimitação temporal. Tais critérios foram adotados a fim de assegurar que a revisão contemplasse apenas trabalhos tecnicamente pertinentes, atualizados e capazes de contribuir de forma efetiva para a análise proposta nesta dissertação, conforme detalhado no Quadro 1.

Quadro 1: Critérios de Inclusão e Exclusão adotados na Revisão Sistemática da Literatura.

Nº	Critérios de Inclusão	Critérios de Exclusão
1	Foco em Arquitetura/Framework para AV Adaptáveis em Dispositivos Móveis.	Visões gerais de RV/RA ou mobile learning sem foco específico na arquitetura adaptável ou interação 3D.
2	Artigos que detalham aspectos de implementação, uso de motores de jogo específicos.	Foco exclusivo em ambientes ou interações 2D.
3	Artigos que detalham a criação, manipulação e visualização de objetos geométricos 3D em ambientes de RV.	Abordagem primária em metodologias educacionais ou aspectos pedagógicos, sem detalhes técnicos relevantes.
4	Ênfase em Interação Tridimensional em RV/RA.	Foco em desenvolvimento de jogos genéricos, sem ênfase específica em ambientes adaptáveis relevantes para o tema.
5	Artigos sobre tópicos técnicos muito específicos e de baixo nível que contribuem para a compreensão da arquitetura geral.	Artigos sobre tópicos técnicos muito específicos e de baixo nível que não contribuem para a compreensão da arquitetura geral ou adaptabilidade do ambiente virtual.

Fonte: Elaborada pelo Autor

Na fase de análise qualitativa, procedeu-se à leitura integral dos trabalhos, com avaliação em profundidade de metodologias, técnicas e resultados, focando na compreensão aprofundada de fenômenos, experiências, percepções e significados. Ao final, 16 artigos foram selecionados para compor a revisão final, servindo como base para a fundamentação teórica desta dissertação. Esse procedimento sistemático assegurou que a revisão bibliográfica não se limitasse à descrição de estudos isolados, mas sim à identificação de padrões, lacunas de pesquisa e oportunidades de inovação no desenvolvimento de ambientes imersivos adaptáveis para dispositivos móveis.

3.2 Definição da Abordagem Metodológica

A metodologia adotada nesta dissertação está centrada na análise técnico-computacional aprofundada de sistemas interativos imersivos móveis, com ênfase na proposição de diretrizes

voltadas à sua adaptabilidade. Tal abordagem se mostra pertinente diante dos desafios inerentes à transposição de experiências de RV e RA para ambientes de execução com restrições significativas de hardware e variações de interface, como é o caso de dispositivos móveis.

A aplicação GeoMeta é utilizada como referência concreta para essa investigação, por se tratar de um sistema funcional que integra múltiplos recursos de imersão em um contexto de execução móvel [35]. A análise do aplicativo parte de sua decomposição em componentes estruturais e funcionais, incluindo: arquitetura modular, controle de cena, sistema de entrada multicanal, estratégias de movimentação espacial, renderização otimizada e mecanismos de feedback sensorial.

Essa abordagem permite observar, de forma prática e contextualizada, como decisões técnicas e arquiteturais influenciam diretamente a flexibilidade da aplicação frente a diferentes cenários de uso. Ao explorar os recursos de interação e renderização em tempo real em dispositivos com distintas capacidades gráficas e sensoriais, torna-se possível identificar padrões de adaptação, gargalos operacionais e soluções reusáveis que possam ser transpostos para outras aplicações imersivas móveis.

A proposta metodológica não apenas avalia o estado atual do sistema, mas também projeta caminhos para o aprimoramento de sua escalabilidade, portabilidade e responsividade em contextos computacionalmente heterogêneos. Dessa forma, a análise prioriza os aspectos técnico-computacionais envolvidos no processo de adaptação de uma aplicação móvel.

3.2.1 Delimitação do Estudo

O objeto de estudo desta dissertação é o aplicativo GeoMeta, uma aplicação móvel interativa que integra tecnologias de RV e RA com foco na implementação de um ambiente virtual móvel capaz de se adaptar a diferentes capacidades de hardware. Ao enfatizar sua arquitetura computacional, suas soluções de otimização e os mecanismos que garantem desempenho e escalabilidade, o GeoMeta configura-se como um artefato adequado para analisar os desafios técnicos associados ao desenvolvimento de sistemas imersivos em plataformas móveis — alinhando-se ao objetivo geral desta pesquisa.

A presente análise concentra-se nos aspectos técnicos do sistema, descrevendo sua concepção arquitetural, modelagem computacional e estratégias de implementação, conforme previsto nos objetivos específicos. Dessa forma, o estudo destaca como a estrutura do aplicativo foi projetada para atender tanto à mobilidade quanto à adaptabilidade, abordando soluções aplicadas para mitigar limitações de hardware e garantir desempenho estável em dispositivos com perfis distintos. Ressalta-se que elementos pedagógicos e efeitos educacionais foram deliberadamente excluídos do escopo, de modo a manter o foco estritamente nas dimensões de engenharia de software e computação móvel.

A delimitação técnica organiza-se nos seguintes eixos, diretamente relacionados aos objetivos específicos:

- **Arquitetura modular e design orientado à mobilidade:** compreendendo o uso de componentes reutilizáveis, separação de responsabilidades, desacoplamento funcional e controle por eventos, permitindo escalabilidade, manutenção facilitada e compatibilidade com diferentes modos de operação do sistema;
- **Gestão de cenas e recursos tridimensionais:** incluindo a modelagem dos objetos, texturização e iluminação, com diretrizes de simplificação visual e redução de carga gráfica para garantir performance em dispositivos móveis de médio e baixo desempenho;
- **Mecanismos de interação e entrada:** contemplando suporte a toque multitoque, sensores de movimento, gaze simulado e reconhecimento por marcadores visuais, assegurando responsividade e naturalidade na navegação e manipulação dos objetos virtuais;
- **Técnicas de renderização em tempo real:** como occlusion culling, lightmaps, compressão de ativos e agrupamento de objetos, empregadas para manter estabilidade de quadros por segundo, coerência da iluminação e fluidez visual;
- **Adaptação dinâmica da lógica e do conteúdo visual:** englobando ajustes automáticos conforme o dispositivo, levando em conta variações de resolução, proporção de tela, memória disponível, capacidade de processamento e sensores integrados.

O GeoMeta foi estruturado para alternar de forma fluida entre modos de RV e RA, uma característica que impõe requisitos adicionais de engenharia e reforça seu papel como base apropriada para o estudo da adaptabilidade em sistemas tridimensionais móveis. Essa alternância envolve desafios relacionados ao rastreamento espacial, à responsividade da interface e à eficiência computacional, especialmente quando o dispositivo opera sob diferentes níveis de carga gráfica.

Assim, o aplicativo constitui um ambiente empírico robusto para examinar soluções técnicas, boas práticas de engenharia e limitações implícitas no desenvolvimento de sistemas imersivos móveis. Sua natureza híbrida e seu foco em desempenho e adaptabilidade permitem demonstrar, na prática, como requisitos de mobilidade e imersão podem ser conciliados por meio de decisões arquiteturais, estratégias de otimização e design computacional orientado à eficiência.

Capítulo 4

Desenvolvimento do Sistema Imersivo

Móvel

O GeoMeta é um aplicativo móvel desenvolvido com foco na criação de experiências imersivas para o ensino de geometria tridimensional, integrando tecnologias de RV e RA. Sua arquitetura foi projetada de forma modular, permitindo a reutilização de componentes e a separação entre lógica, visualização e controle. Essa escolha foi feita porque uma arquitetura modular facilita a manutenção do sistema, possibilita a inclusão de novos recursos e torna a aplicação mais adaptável a diferentes contextos de uso [3].

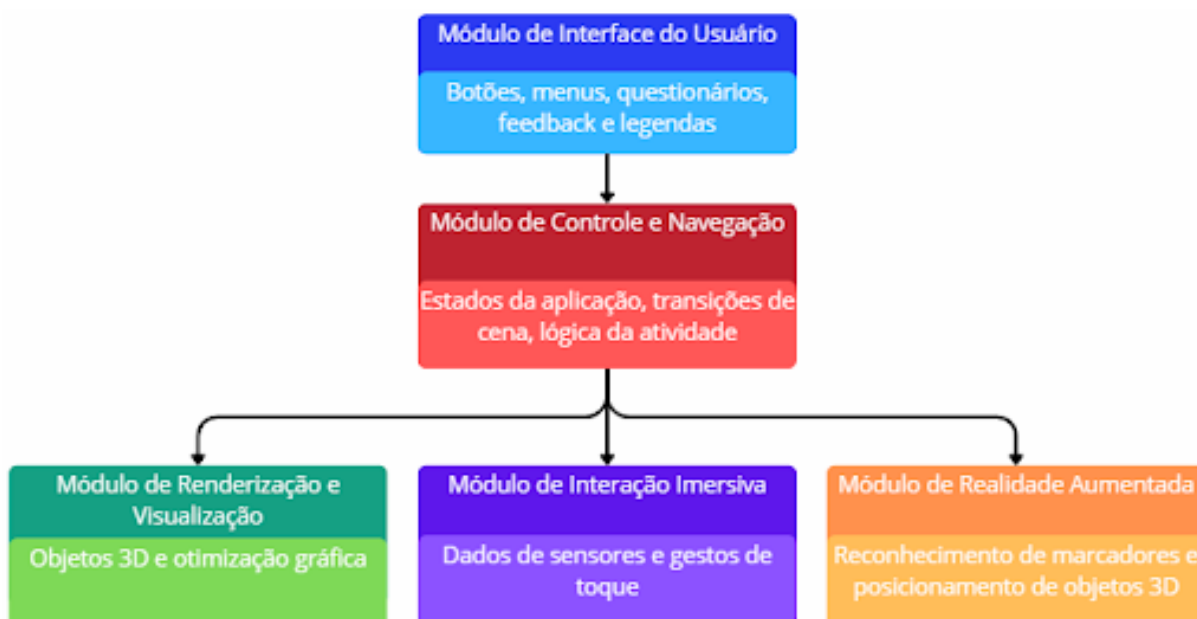
Os módulos que compõem o sistema estão representados na Figura 8.

O desenvolvimento foi realizado na plataforma Unity devido à sua robustez como motor gráfico, suporte multiplataforma e ampla comunidade de desenvolvedores. A organização baseada em *GameObjects* e componentes foi adotada porque esse padrão favorece a escalabilidade do sistema e simplifica o mapeamento entre objetos virtuais e suas funcionalidades. A lógica da aplicação foi implementada em linguagem C#, escolhida por sua integração nativa com o Unity e por oferecer recursos eficientes para o controle de comportamento dos objetos, navegação entre cenas, interações com a interface e ativação dos modos de RV e RA.

Para a RA, o GeoMeta utiliza a biblioteca Vuforia, selecionada por sua confiabilidade no reconhecimento e rastreamento de marcadores visuais em tempo real. Essa solução permite a sobreposição precisa dos objetos tridimensionais no ambiente físico observado pela câmera do dispositivo móvel, garantindo maior estabilidade, precisão e imersão na experiência do usuário.

4.1 Especificação Técnica do Sistema

O avanço das tecnologias de RV e RA tem gerado soluções que variam desde implementações em smartphones até hardwares dedicados de alto desempenho. Cada abordagem apresenta vantagens e limitações específicas relacionadas a custo, acessibilidade, nível de imersão,

Figura 8: Arquitetura modular utilizada no GeoMeta

Fonte: Elaborada pelo Autor

desempenho gráfico e requisitos de hardware.

O Quadro 2 apresenta um comparativo entre aplicações baseadas em smartphones — como o GeoMeta aliado a dispositivos simples (por exemplo, Miritiboard) — e soluções baseadas em equipamentos dedicados, como Meta Quest, HTC Vive e Apple Vision Pro.

Esse comparativo é importante porque permite compreender os compromissos técnicos envolvidos na adoção de dispositivos móveis para ambientes imersivos [27]. Embora apresentem restrições em termos de desempenho e nível de imersão, os smartphones oferecem alta acessibilidade e baixo custo, o que os torna uma plataforma estratégica para pesquisas e aplicações em escala educacional e cotidiana. Já os hardwares dedicados, por sua vez, fornecem experiências mais completas e fluidas, mas com menor alcance devido ao custo elevado e à complexidade de desenvolvimento.

Quadro 2: Comparativo de Tecnologias RV/RA em Smartphones vs. Hardware Dedicado.

Critério	RV/RA Baseada em Smartphone (Ex.: Meta com Miritiboard)	Hardware RV/RA Dedicado (Ex.: Meta Quest, HTC Vive, Apple Vision Pro)
Custo	Baixo a moderado (aproveita o smartphone existente)	Alto (requer investimento em hardware específico)
Acessibilidade	Muito alta (a maioria dos smartphones é habilitada para RA)	Limitada (menor penetração de mercado)
Nível de Imersão	Imersão básica a semi-imersiva; limitada pelo tamanho da tela e campo de visão (FOV)	Imersão total, com FOV amplo e gráficos de alta qualidade
Gráficos e Desempenho	Limitado pela GPU e CPU do smartphone; menor resolução e taxa de quadros	Alto desempenho, gráficos detalhados e altas taxas de quadros (75–90 FPS)
Hardware Necessário	Smartphone + headset simples (ex.: Miritiboard, Google Cardboard)	Headset dedicado, controladores e sensores
Conforto do Usuário	Pode causar desconforto em sessões longas devido à estabilidade e peso	Maior conforto e ergonomia, mas ainda sujeito a enjoo
Vida Útil da Bateria	Drenagem rápida da bateria do smartphone	Bateria dedicada e otimizada para uso contínuo
Complexidade de Desenvolvimento	Menor barreira inicial; otimização para dispositivos móveis é desafiadora	Maior complexidade e custo de desenvolvimento
Capacidades de Rastreamento	Geralmente 3 Graus de Liberdade (3DoF); 6DoF limitado	Rastreamento completo com 6 Graus de Liberdade (6DoF)

Fonte: Elaborado pelo Autor.

4.1.1 Requisitos funcionais e não funcionais

Os requisitos funcionais do GeoMeta correspondem às funcionalidades que o sistema oferece para cumprir seu propósito. Entre os principais estão:

- Permitir a visualização e manipulação de formas geométricas tridimensionais em RV e RA.
- Reconhecer marcadores visuais e posicionar objetos virtuais sobre o ambiente físico com precisão.
- Executar uma sequência didática baseada em navegação por cenas interativas, contendo quizzes, ambientes simulados e transições entre modos imersivos.
- Adaptar a interface gráfica e os controles às características do dispositivo, como orientação da tela e resolução.

Os requisitos não funcionais dizem respeito à qualidade da aplicação e ao seu comportamento sob diferentes condições de uso:

- Garantir desempenho gráfico estável em dispositivos móveis de médio desempenho.
- Oferecer responsividade nas interações com o toque, giroscópio e reconhecimento de marcadores.
- Manter a modularidade do código para facilitar a manutenção e futuras extensões.
- Operar de forma consistente em diferentes sistemas operacionais móveis, com suporte a Android e iOS.
- Carregar cenas de forma eficiente, com transições suaves entre modos de visualização e atividades.

4.1.2 Estrutura modular do sistema

O sistema GeoMeta foi implementado com base em uma estrutura modular orientada a componentes reutilizáveis, alinhada ao paradigma de desenvolvimento promovido pela Unity. Cada módulo é isolado funcionalmente e representa uma unidade lógica de responsabilidade.

- Os objetos do sistema são representados por *GameObjects* organizados em hierarquias, com *scripts* (componentes) que definem comportamentos específicos. Scripts são desacoplados e acionados por eventos assíncronos, como toques, colisões, detecção de marcador ou mudança de cena.

- As cenas são organizadas de forma independente, contendo apenas os elementos necessários para a atividade proposta, o que reduz o uso de memória e melhora o tempo de carregamento.
- Elementos comuns, como controladores de interface, menus e sistemas de feedback, são carregados por meio de *prefabs* reutilizáveis, promovendo consistência e padronização da aplicação.

4.2 Definição das Tecnologias Utilizadas

A construção e a análise do sistema GeoMeta baseiam-se em um conjunto de tecnologias, ferramentas computacionais e linguagens de programação selecionadas para o desenvolvimento de aplicações imersivas tridimensionais em dispositivos móveis. As tecnologias utilizadas no projeto GeoMeta foram selecionadas com base em sua maturidade no mercado de desenvolvimento imersivo, documentação consolidada, comunidade ativa de suporte e critérios de desempenho, compatibilidade multiplataforma e escalabilidade arquitetural.

4.2.1 Blender (Modelagem Tridimensional)

A ferramenta Blender (Figura 9) foi utilizada como ambiente principal para a modelagem tridimensional no desenvolvimento do aplicativo GeoMeta. Trata-se de uma suíte de código aberto amplamente consolidada na indústria da computação gráfica, reconhecida por sua versatilidade, extensibilidade e suporte à exportação de ativos compatíveis com motores gráficos em tempo real, como o Unity.

Figura 9: Modelagem do personagem Matheus na ferramenta Blender



Fonte: Elaborada pelo Autor

No contexto do projeto GeoMeta, o Blender foi empregado tanto na criação das formas geométricas elementares — incluindo quadrados, círculos, cubos, pirâmides, esferas e prismas

— quanto na construção dos cenários tridimensionais imersivos que compõem o ambiente interativo, como a sala de aula, o parque e o quarto virtual. Esses ambientes foram projetados com o objetivo de fornecer contexto visual significativo às atividades, mantendo o equilíbrio entre fidelidade estética e restrições computacionais impostas pelos dispositivos móveis. A técnica de modelagem adotada baseou-se na utilização de malhas poligonais de baixa densidade de modelagem adotada baseou-se em malhas de baixa densidade (*low-poly*). Essa abordagem permite a redução do número de polígonos por objeto tridimensional, minimizando o custo computacional de renderização em tempo real sem comprometer a clareza visual das formas geométricas. Tal escolha foi decisiva para garantir um desempenho gráfico consistente e responsivo em plataformas móveis com diferentes capacidades de processamento e memória gráfica.

Além disso, o Blender foi utilizado para modelar cenários temáticos como uma sala de aula, um parque e um quarto, que servem como ambientes para a navegação e interação do usuário. A possibilidade de aplicar materiais leves, mapear texturas de forma eficiente e gerar arquivos otimizados para importação direta no Unity contribuiu para o fluxo de trabalho entre as etapas de modelagem e implementação.

4.2.1.1 Seleção e Criação de Formas Geométricas

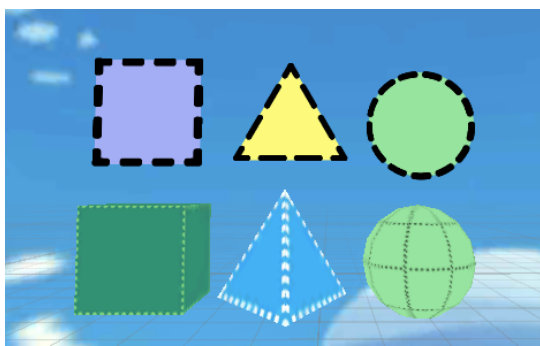
A seleção das formas geométricas utilizadas no aplicativo GeoMeta foi guiada por sua relevância didática no contexto do ensino de geometria plana e espacial. O critério principal para a escolha dos modelos foi a representatividade conceitual das figuras no processo de aprendizagem, priorizando aquelas que permitem a exploração de propriedades visuais, espaciais e relacionais de maneira intuitiva.

Foram criados modelos tridimensionais de figuras elementares, como quadrado, círculo, triângulo, cubo, esfera e pirâmide, com o objetivo de ilustrar de forma concreta os conceitos geométricos abordados nos currículos escolares (Figura 10). Essas formas foram desenvolvidas com atenção à clareza visual, simplicidade estrutural e compatibilidade com o desempenho exigido por dispositivos móveis.

As figuras planas utilizadas no GeoMeta — círculo, quadrado e triângulo — foram criadas no Blender por meio de primitivas geométricas básicas, adaptadas conforme a necessidade de controle sobre a malha e otimização para uso em tempo real. O quadrado foi gerado a partir do plano padrão da ferramenta, com subdivisões mínimas e vértices fixos, garantindo simplicidade e compatibilidade com o motor gráfico. O círculo foi construído utilizando a primitiva *Circle*, ajustada para conter um número reduzido de vértices, de modo a equilibrar suavidade visual com leveza computacional. Já o triângulo foi modelado manualmente a partir de vértices posicionados em coordenadas planas, formando uma malha com três lados perfeitamente simétricos.

Embora sejam objetos geometricamente bidimensionais, todas as figuras foram exportadas como

Figura 10: Figuras geométricas base do GeoMeta



Fonte: Elaborada pelo Autor

objetos tridimensionais com profundidade mínima, a fim de possibilitar sua manipulação no ambiente tridimensional do GeoMeta. Essa espessura foi aplicada por meio do modificador *Solidify* no Blender, garantindo que os objetos sejam fisicamente interativos e visíveis de qualquer ângulo durante a experiência imersiva em RV móvel. Esse cuidado evita problemas de renderização associados a superfícies planas sem volume em engines 3D.

Os sólidos geométricos utilizados no GeoMeta — esfera, cubo e pirâmide — foram modelados no Blender a partir de primitivas tridimensionais padrão. O cubo foi gerado diretamente com a primitiva *Cube* e manteve sua estrutura básica, com vértices e faces uniformes, representando com clareza o conceito de volume em um espaço tridimensional. Para a esfera, optou-se pelo uso da primitiva *UV Sphere*, configurada com um número reduzido de segmentos e anéis, mantendo o equilíbrio entre fidelidade visual e desempenho. A pirâmide, por sua vez, foi modelada manualmente com base na primitiva *Cone*, ajustando o número de vértices da base para quatro, formando assim uma pirâmide de base quadrada, simétrica e proporcional aos demais sólidos do conjunto.

Após a modelagem, todas as figuras foram exportadas em formato compatível com a Unity e convertidas em *prefabs* dentro do ambiente de desenvolvimento. Esses *prefabs* permitem a reutilização eficiente das figuras em múltiplas cenas e interações, facilitando o controle de lógica de comportamento, animações e resposta ao toque. Essa abordagem contribui diretamente para a escalabilidade do sistema e garante consistência visual e funcional ao longo das atividades do GeoMeta. As figuras planas — círculo, quadrado e triângulo — foram criadas no Blender por meio de primitivas geométricas básicas, com malhas otimizadas para renderização em tempo real. Embora sejam objetos bidimensionais, foram exportadas com espessura mínima por meio do modificador *Solidify*, garantindo boa visualização em qualquer ângulo dentro do ambiente tridimensional.

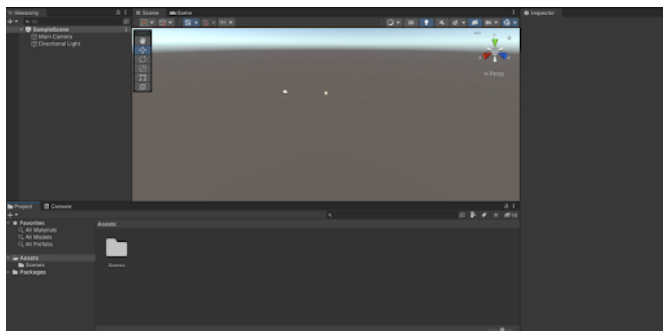
Os sólidos geométricos — esfera, cubo e pirâmide — foram modelados a partir de primitivas padrão (*Cube*, *UV Sphere* e *Cone* modificada), ajustadas para manter baixo número de polígonos e coerência visual entre os modelos. Após a modelagem, todas as figuras foram exportadas para

a Unity e convertidas em *prefabs*, permitindo reutilização, controle de comportamento e integração eficiente às diversas cenas do sistema GeoMeta.

4.2.2 Unity 3D

A plataforma Unity 3D (Figura 11) foi adotada como motor principal de desenvolvimento no projeto GeoMeta em virtude de sua arquitetura orientada a componentes, capacidade de renderização em tempo real e suporte nativo a múltiplos dispositivos e sistemas operacionais. Reconhecida pela sua flexibilidade e desempenho em aplicações gráficas interativas, a Unity permite a criação de experiências tridimensionais com alta responsividade, o que a torna especialmente adequada para projetos imersivos executados em dispositivos móveis com recursos computacionais limitados. A plataforma oferece suporte completo à construção de projetos multiplataforma, com ferramentas nativas para Android e iOS, além de compatibilidade com padrões industriais como OpenXR, que possibilitam abstrair diferentes dispositivos e sensores de entrada.

A Unity opera com base na estrutura de *GameObjects* e *Componentes*, permitindo o encapsulamento de comportamentos (scripts), transformações espaciais e propriedades físicas de maneira modular e reutilizável. Essa abordagem favorece a separação de responsabilidades dentro da arquitetura do sistema, facilitando a manutenção do código, a extensão do projeto e a adaptação a diferentes contextos de execução. Além disso, o sistema de gerenciamento hierárquico de cenas possibilita o controle eficiente da ativação e descarregamento de ativos (*assets*), o que é essencial para otimização de memória e desempenho em ambientes móveis.

Figura 11: Plataforma Unity3D

Fonte: Elaborada pelo Autor

A Unity disponibiliza ainda o *Scriptable Render Pipeline* (SRP), que permite personalizar os estágios do pipeline gráfico, otimizando a renderização para cenários específicos, como ambientes de baixa complexidade poligonal com iluminação estática ou cenas baseadas em mapas de luz (*lightmaps*). O *Universal Render Pipeline* (URP) foi adotado no GeoMeta para equilibrar qualidade gráfica e desempenho, possibilitando que a aplicação seja executada com fluidez em dispositivos de média e baixa potência.

No contexto do GeoMeta, foram utilizados os seguintes conjuntos de ferramentas (*toolkits*):

- **XR Interaction Toolkit:** biblioteca oficial da Unity voltada à padronização de interações em aplicações de RV e RA. A ferramenta fornece uma camada de abstração sobre os dispositivos de entrada, facilitando a implementação de mecanismos como toque, rastreamento de olhar (*gaze*), movimentação baseada em controle de câmera, interação por proximidade e manipulação direta de objetos tridimensionais. O toolkit também suporta eventos assíncronos e interação contínua com objetos do tipo *XR Grab Interactable*, fundamentais para a manipulação de formas geométricas no GeoMeta.
- **OpenXR:** padrão aberto e multiplataforma mantido pelo Khronos Group, utilizado como interface entre o motor Unity e o hardware imersivo subjacente. O OpenXR permite que a aplicação funcione em diferentes sistemas operacionais e dispositivos — como Android, HoloLens, Oculus e Magic Leap — reduzindo dependências de APIs proprietárias e promovendo maior portabilidade do código. No GeoMeta, o OpenXR garante acesso unificado e estável a recursos como rastreamento espacial, orientação da câmera e controle de entrada.

A integração dessas ferramentas permitiu a criação de um sistema capaz de alternar entre RV e RA com reuso de componentes de entrada e renderização, simplificando o fluxo de navegação entre modos imersivos e contribuindo para a adaptabilidade do sistema frente a diferentes configurações de hardware, exigindo apenas ajustes mínimos no pipeline e na interface de interação.

A implementação da lógica de controle foi realizada em C#, linguagem nativamente suportada pela Unity e que oferece integração eficiente com *GameObjects*, transformações espaciais, eventos do ciclo de vida da aplicação e interfaces gráficas. O uso de C# possibilita uma arquitetura orientada a componentes, na qual cada comportamento é encapsulado em scripts modulares e reutilizáveis — característica essencial para aplicações imersivas que exigem coordenação entre múltiplos sistemas, como controle de câmera, lógica de interação, transições de cena e manipulação de objetos tridimensionais.

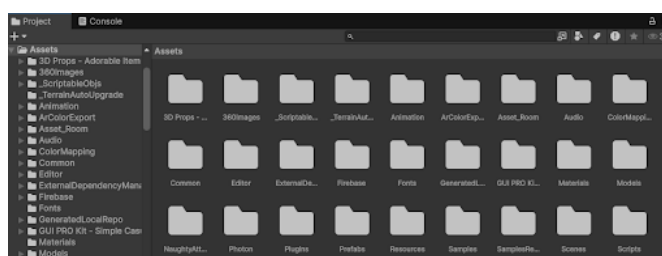
Além disso, a programação em C# na Unity facilita a integração com sistemas externos, bibliotecas de RV e RA, motores físicos, serviços de armazenamento local e recursos nativos dos dispositivos móveis, incluindo sensores de movimento e câmeras.

4.2.2.1 Organização dos Assets e Cenas

Em projetos de RV voltados para dispositivos móveis, a organização dos recursos digitais (*assets*) dentro do ambiente Unity é fundamental para permitir a reutilização de componentes, facilitar a navegação entre elementos e otimizar o processo de construção de aplicações imersivas.

A estratégia adotada envolve uma hierarquia de pastas clara e padronizada, na qual os ativos são agrupados por tipo e por função (Figura 12). Modelos tridimensionais são armazenados em diretórios separados de texturas, materiais, arquivos de áudio e scripts. Componentes reutilizáveis — como botões interativos, painéis, animações ou elementos de interface — são estruturados como *prefabs*, permitindo sua instância em diferentes contextos sem duplicação de lógica. A padronização de nomenclaturas também é uma prática essencial, pois melhora a consistência do projeto e facilita processos como carregamento dinâmico ou referenciamento via código.

Figura 12: Organização das pastas por tipo e função



Fonte: Elaborada pelo Autor

Quanto à estrutura de cenas, a abordagem recomendada para aplicações móveis é o carregamento sequencial de ambientes (*scene load sync*). Cada ambiente imersivo — como fases, atividades ou áreas temáticas — é implementado como uma cena independente no Unity. Nesse modelo, a nova cena substitui completamente a anterior assim que o carregamento é

concluído. Embora essa abordagem possa gerar pequenas pausas — especialmente em dispositivos de menor capacidade — ela é eficaz para transições estruturadas, como a passagem entre fases ou a entrada em ambientes isolados.

Para que a transição entre cenas seja fluida e não interrompa a experiência de imersão, são aplicadas técnicas de transição suaves. Isso pode incluir o uso de telas de carregamento com elementos interativos, animações de entrada e saída, transições em fade, ou o pré-carregamento assíncrono de cenas em segundo plano. Em RV móvel, é essencial que não ocorram pausas abruptas ou mudanças bruscas no ambiente visual, pois isso pode causar desconforto ao usuário e quebrar a sensação de presença.

4.2.3 Vuforia (RA)

A biblioteca Vuforia ¹⁵ Engine foi utilizada no desenvolvimento do aplicativo GeoMeta como a principal ferramenta de suporte à implementação da funcionalidade de RA baseada em marcadores visuais. Trata-se de uma plataforma consolidada e amplamente adotada na indústria para aplicações de RA, com suporte nativo ao ambiente Unity, integração eficiente com dispositivos móveis Android e iOS, e capacidade de detecção visual de alta precisão em tempo real.

O Vuforia fornece a infraestrutura computacional necessária para o reconhecimento, rastreamento e alinhamento espacial de imagens físicas (chamadas de *Image Targets*) com objetos tridimensionais gerados digitalmente. Esses marcadores podem ser impressos em papel ou exibidos em superfícies visuais, e quando capturados pela câmera do dispositivo móvel, são processados por algoritmos de visão computacional que extraem suas características visuais, como cantos, arestas e padrões de textura. Uma vez identificado o marcador, o Vuforia calcula em tempo real a pose (posição e orientação) relativa entre a câmera e o marcador no espaço tridimensional.

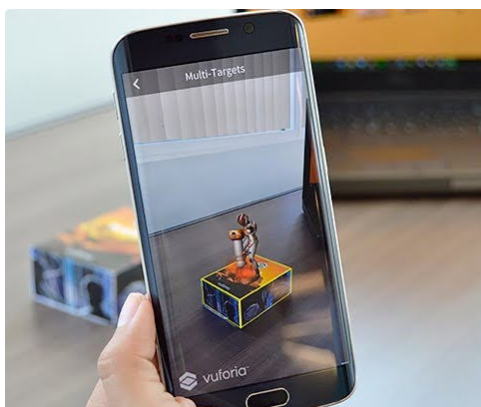
A Figura 13 ilustra esse processo: nela, o marcador físico é reconhecido pela câmera do dispositivo móvel, e o objeto tridimensional correspondente é corretamente sobreposto e alinhado no ambiente de realidade aumentada.

Essa pose é então utilizada como referência para a projeção precisa dos objetos 3D no ambiente real, garantindo que as figuras geométricas virtuais — como cubos, esferas ou pirâmides — sejam renderizadas sobre o marcador com fidelidade espacial e alinhamento consistente. Esse processo é fundamental para assegurar que os usuários possam interagir fisicamente com as entidades virtuais, observando-as de diferentes ângulos e distâncias ao mover o dispositivo, sem que haja deslocamento incorreto ou instabilidade perceptual no posicionamento dos objetos.

Além do rastreamento de imagens estáticas, o Vuforia oferece suporte a recursos adicionais de RA avançada, como detecção simultânea de múltiplos marcadores, mapeamento de área estendida (Extended Tracking) e persistência de objetos virtuais mesmo quando os marcadores

¹⁵ developer.vuforia.com/downloads/sdk

Figura 13: Realidade aumentada com Vuforia



Fonte: developer.vuforia.com/library/vuforia-engine/images-and-objects/multi-targets/multi-targets/

saem temporariamente do campo de visão. Esses recursos contribuem diretamente para a continuidade da experiência imersiva e para a naturalidade da interação, permitindo que o usuário explore os objetos geométricos de forma livre, sem depender constantemente da visibilidade direta do marcador.

A integração com a câmera do dispositivo é gerenciada pelo Vuforia através de seu sistema interno de controle de vídeo, que abstrai as chamadas de baixo nível para os sensores de imagem e oferece um pipeline unificado de entrada visual. Isso facilita o desenvolvimento e melhora a estabilidade da aplicação, ao mesmo tempo em que garante o acesso ao fluxo contínuo da câmera para fins de reconhecimento e renderização. A utilização do feed de vídeo como plano de fundo da cena virtual contribui para a imersão perceptiva, permitindo que os elementos virtuais pareçam verdadeiramente incorporados ao ambiente físico.

No que diz respeito à usabilidade, o Vuforia oferece uma interface de configuração visual integrada à Unity, permitindo o posicionamento e escala dos modelos 3D diretamente sobre os marcadores em tempo de desenvolvimento. Isso acelera o processo de design interativo e viabilizou ajustes finos na projeção espacial e na escala relativa dos objetos geométricos.

4.2.3.1 Detecção de Múltiplos Marcadores

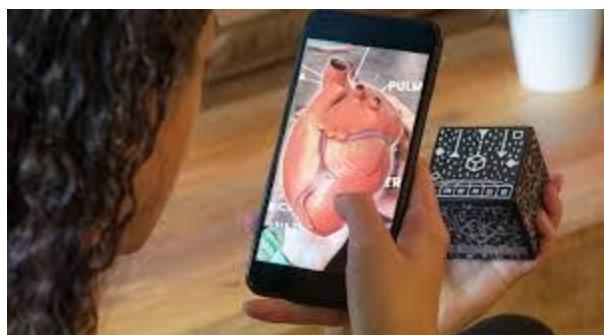
Em aplicações de RA, é possível utilizar múltiplos marcadores distintos dentro do mesmo aplicativo, de forma que cada marcador seja associado a um objeto virtual diferente ou simultaneamente, permitindo que diferentes objetos 3D sejam sobrepostos em posições distintas do ambiente físico. Essa abordagem aumenta a complexidade e a riqueza da experiência, pois possibilita que o usuário interaja com diversos conteúdos, cada um ancorado a um marcador específico.

No Merge Cube (Figura 14), cada face do cubo funciona como um marcador distinto.

Dependendo do aplicativo e do assunto em estudo, cada face do cubo, ou ele como um todo,

pode apresentar um modelo 3D diferente ou uma versão específica de um objeto digital. Por exemplo, em um aplicativo educacional de anatomia, o cubo pode exibir o coração, permitindo que o aluno explore diferentes sistemas do corpo humano apenas girando o cubo.

Figura 14: Aplicativo Merge Cube



Fonte: thesciencebank.org/products/merge-ar-vr-cube-and-headset

No GeoMeta, o conceito de *Image Targets* é aplicado utilizando marcadores impressos diretamente no livro didático. Cada imagem do livro representa uma figura geométrica ou um conceito específico. Ao apontar a câmera do dispositivo para uma dessas imagens, o GeoMeta detecta o marcador e renderiza em tempo real o objeto tridimensional correspondente, como ilustrado na Figura 15, que mostra um robô sendo sobreposto à imagem do livro.

Quando o usuário direciona a câmera para outra imagem, o sistema deixa de rastrear o marcador anterior, removendo o objeto 3D associado, e exibe o novo objeto correspondente. Dessa forma, cada figura geométrica ou conceito é apresentado isoladamente, evitando sobreposição de objetos virtuais e mantendo a interação clara e intuitiva.

Figura 15: Aplicação AR do GeoMeta



Fonte: Elaborada pelo autor

4.2.3.2 Aplicação de Cor aos Objetos 3D

A aplicação de cor aos objetos 3D em RA consiste em alterar dinamicamente o material ou a aparência dos modelos virtuais de acordo com a interação do usuário ou com o marcador

detectado. Essa funcionalidade permite destacar características específicas, reforçar conceitos e tornar a experiência mais intuitiva e visualmente atrativa.

No Quiver – Coloring App (Figura 16), o sistema transforma desenhos físicos coloridos em modelos 3D animados. A imagem ilustra como, ao detectar o marcador correspondente, o aplicativo aplica as cores do desenho diretamente ao objeto virtual, mantendo a consistência entre o mundo físico e o digital.

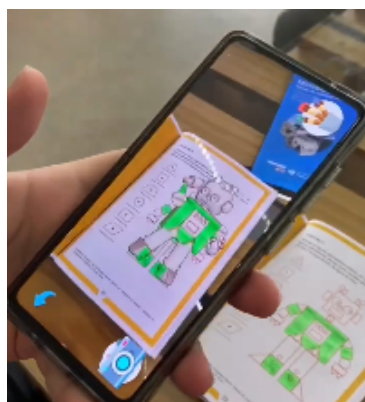
Figura 16: Aplicação Quiver – Coloring App



Fonte: quivervision.com/coloring-packs/Quiver-Vol.-3

No GeoMeta, os alunos podem colorir as figuras geométricas impressas no livro conforme desejarem. Quando a câmera do dispositivo detecta o marcador correspondente, o aplicativo aplica as cores escolhidas diretamente ao objeto 3D, como ilustrado na Figura 17. Essa funcionalidade integra interação física e digital, tornando o aprendizado ativo e criativo.

Figura 17: Figura colorida do GeoMeta



Fonte: Elaborada pelo autor

Além da demonstração visual, a funcionalidade de coloração reforça o aprendizado conceitual, permitindo que os estudantes associem cores e formas a elementos geométricos específicos. No GeoMeta, essa abordagem estimula a memória visual, facilita a distinção de componentes

tridimensionais e promove uma aprendizagem mais interativa e significativa.

Capítulo 5

Implementação da Adaptabilidade

A implementação da adaptabilidade em ambientes imersivos móveis envolve um conjunto de soluções técnicas que permitem ao sistema ajustar-se às limitações e potencialidades dos dispositivos, garantindo uma experiência estável e coerente para diferentes perfis de usuário [3]. Inicialmente, isso requer a construção cuidadosa dos elementos tridimensionais, definindo suas formas, geometria, texturas e propriedades espaciais de modo que possam ser explorados e manipulados de maneira intuitiva no ambiente virtual. Essa etapa estabelece a base sobre a qual todas as outras funcionalidades são aplicadas, determinando a qualidade visual e a consistência do espaço imersivo.

Em seguida, torna-se fundamental ajustar o desempenho do sistema às capacidades do dispositivo móvel. Isso inclui otimizações gráficas, gerenciamento eficiente de recursos e redução da carga computacional, permitindo que a renderização dos elementos tridimensionais ocorra de forma fluida mesmo em hardware limitado. Essas estratégias asseguram que a experiência não seja comprometida por atrasos, quedas de frames ou inconsistências visuais, mantendo a coerência do ambiente.

Com a base construída e otimizada, o próximo passo é permitir que o usuário interaja de forma natural com os objetos virtuais. Por meio de gestos, movimentos do dispositivo e controles intuitivos, é possível explorar, manipular e personalizar os elementos do ambiente, preservando a funcionalidade pedagógica e a sensação de autonomia [6]. Além disso, mecanismos de interação adaptativa garantem que diferentes perfis de usuários consigam compreender e utilizar o sistema de maneira eficiente, mesmo sem equipamentos especializados.

O sistema também orienta o usuário durante a exploração do ambiente, fornecendo transições suaves entre diferentes objetos e perspectivas, de modo a criar uma experiência contínua e intuitiva. Além disso, organiza a progressão de conteúdos de forma coerente, guiando o aluno na sequência lógica de aprendizagem e prevenindo confusões ou frustrações decorrentes de movimentos abruptos ou dificuldades de navegação.

Por fim, a experiência é reforçada por respostas visuais e auditivas que confirmam as ações do usuário e aumentam a sensação de presença. Destaques visuais, alterações de cor, animações e

sinais sonoros discretos contribuem para uma percepção clara do ambiente e para o engajamento do usuário. Mesmo com limitações de hardware, essas estratégias permitem que o ambiente imersivo seja envolvente, intuitivo e eficaz como ferramenta de aprendizagem.

No caso do GeoMeta, essas abordagens integradas permitem criar um sistema que equilibra limitações técnicas e potencial pedagógico, oferecendo uma experiência fluida, interativa e escalável [1]. Além disso, possibilita que estudantes explorem objetos tridimensionais, manipulem figuras geométricas e acompanhem a progressão de conteúdos de forma personalizada, promovendo maior engajamento, autonomia e efetividade no processo de aprendizagem.

5.1 Computação Gráfica Aplicada

A Computação Gráfica Aplicada constitui a espinha dorsal de qualquer sistema tridimensional interativo, sendo a área responsável por fornecer as estruturas matemáticas, técnicas de visualização e processos computacionais utilizados para a criação, manipulação e exibição de imagens digitais. Em especial, no desenvolvimento de aplicações móveis baseadas em RV e RA, como o aplicativo GeoMeta, a computação gráfica desempenha papel central, pois precisa conciliar fidelidade visual com limitações de processamento gráfico, memória e energia dos dispositivos móveis [19]. Esta seção apresenta os fundamentos técnicos e as práticas computacionais que sustentam a geração e o controle visual dos ambientes imersivos no contexto de plataformas móveis.

5.1.1 Técnicas de Modelagem 3D

Antes de qualquer interação ou renderização, é necessário criar os objetos e ambientes tridimensionais. Esta etapa define a geometria, texturas e propriedades físicas que serão manipulados no ambiente, estabelecendo a base visual e estrutural para toda a experiência imersiva [42]. A modelagem 3D envolve a construção de superfícies, vértices e polígonos, permitindo que cada elemento possua volume, proporções e relações espaciais coerentes com o mundo virtual que se pretende simular.

Além disso, nesta fase são considerados aspectos como a complexidade dos modelos e a densidade de polígonos, de modo a equilibrar qualidade visual e desempenho em dispositivos móveis. É também nesse momento que se planeja o mapeamento de texturas, iluminação e shaders, garantindo que cores, sombras e efeitos de reflexão ou transparência contribuam para a percepção de profundidade e realismo.

A modelagem tridimensional vai além da simples criação de formas; ela deve levar em conta a interatividade futura do usuário [43]. Objetos precisam ser projetados de maneira que possam ser rotacionados, escalados ou manipulados sem distorções ou problemas de colisão. Em

ambientes educacionais, como o GeoMeta, isso significa que sólidos geométricos e figuras planas devem manter suas propriedades matemáticas mesmo quando submetidos a ações do usuário, assegurando consistência pedagógica e coerência visual.

5.1.1.1 Tipos de Modelos Geométricos e Métodos de Geração

Historicamente, os primeiros sistemas de modelagem tridimensional surgiram no contexto da engenharia e da computação gráfica nos anos 1960 e 1970. John W. Tucker, Ivan Sutherland e outras figuras pioneiras desenvolveram abordagens para representação de formas geométricas complexas com base em conceitos da geometria analítica e da álgebra linear [44]. As primeiras representações baseavam-se em malhas poligonais e modelos de arame (wireframe), que descrevem a forma de um objeto através de seus vértices e arestas. Com o tempo, essas representações evoluíram para formas mais sofisticadas, como modelos de superfícies e modelos sólidos (solid modeling), que possibilitam a definição precisa de volume e contorno.

Do ponto de vista matemático, a forma mais comum de modelar um objeto tridimensional é por meio de uma malha poligonal, na qual a superfície de um objeto é aproximada por um conjunto de polígonos — geralmente triângulos. Cada triângulo é definido por três vértices, onde cada vértice é uma coordenada no espaço tridimensional:

A coleção desses triângulos forma uma superfície discreta que pode ser renderizada e manipulada computacionalmente. A simplicidade e eficiência do modelo triangular tornaram-no padrão em tempo real, especialmente em ambientes móveis e aplicações imersivas.

Além das malhas, outras representações matemáticas relevantes incluem:

- **Modelagem por superfícies paramétricas**, como superfícies NURBS (Non-Uniform Rational B-Splines), que descrevem formas suaves e contínuas através de funções paramétricas.
- **Modelagem volumétrica**, como voxels ou funções implícitas, em que os objetos são definidos por regiões ocupadas no espaço, úteis para simulações físicas ou ambientes destrutíveis.
- **Representações baseadas em primitivas geométricas**, que combinam formas básicas (cubos, esferas, cilindros) usando operações booleanas (união, interseção, subtração), conforme a lógica da Constructive Solid Geometry (CSG).

Em aplicações móveis imersivas, como o GeoMeta, o uso de versões simplificadas de modelos tridimensionais — conhecidos como *Level of Detail* (LOD) — permite a adaptação dinâmica da complexidade geométrica em função da distância do observador, contribuindo significativamente para a economia de processamento sem comprometer a legibilidade visual.

Adicionalmente, entidades geométricas tridimensionais podem ser enriquecidas com atributos visuais. Cada vértice da malha pode conter coordenadas UV (mapeamento bidimensional para

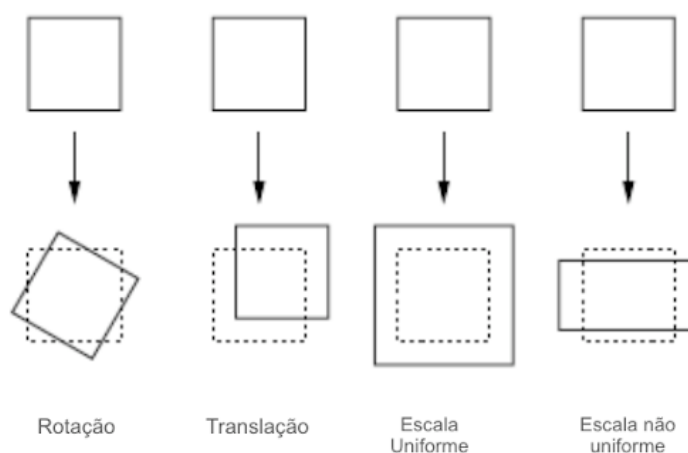
aplicação de texturas) e normais de superfície, vetores perpendiculares à superfície usados para o cálculo de iluminação. A normal de um triângulo pode ser obtida pelo produto vetorial entre dois de seus lados.

Tais elementos são fundamentais para efeitos de sombreado, realce de superfícies e resposta visual em ambientes tridimensionais [45]. Em RA, por exemplo, a precisão na definição do modelo é essencial para garantir o correto alinhamento com o mundo real, enquanto em RV a fidelidade da malha influencia diretamente na sensação de presença e imersão [46].

5.1.1.2 Transformações Espaciais: Translação, Rotação e Escala

Em ambientes imersivos, a coerência entre os movimentos físicos do usuário e o comportamento dos objetos virtuais depende diretamente das transformações espaciais (Figura 18). Essas transformações são operações matemáticas aplicadas aos modelos geométricos para ajustar sua posição, orientação e escala dentro do ambiente tridimensional, com base em dados capturados por sensores como câmeras, giroscópios e acelerômetros.

Figura 18: Exemplos de transformações afins



Fonte: panda.ime.usp.br/introcg/static/introcg/11-transformacoes.html

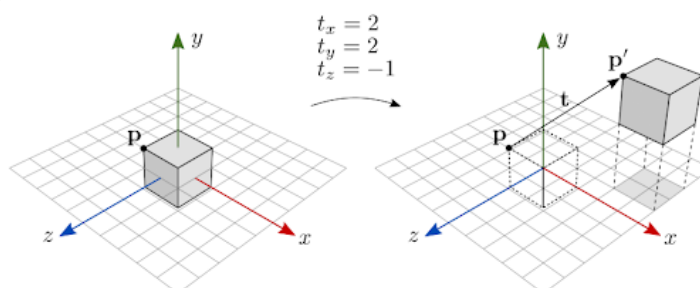
O pipeline de transformação geralmente segue uma cadeia de espaços de coordenadas: modelo, mundo, visão e projeção. Cada objeto tridimensional passa por uma série de matrizes de transformação que definem:

- **Translação:** deslocamento do objeto para uma posição específica;
- **Rotação:** giro em torno de eixos definidos (geralmente X, Y e Z);
- **Escala:** aumento ou redução do tamanho do objeto.

A translação ocorre principalmente para posicionar objetos 3D no mundo virtual ou físico (Figura 19). Em RA, por exemplo, se o sistema detecta uma superfície plana (como uma mesa),

ele define uma matriz de pose para o ponto detectado e aplica essa matriz como uma translação à malha 3D do objeto. Isso faz com que o objeto pareça “ancorado” naquela posição do mundo real.

Figura 19: Exemplos de translação em ambiente 3D



Fonte: brunodorta.com.br/cg/transforms

Enquanto isso, a rotação é fundamental para alinhar objetos com o ambiente e com o ponto de vista do usuário. Em RV, a rotação da cabeça é capturada por Unidades de Medição Inercial (IMU) ou por rastreamento óptico, e é convertida em uma matriz de rotação que atualiza a orientação da câmera virtual. Isso significa que, ao girar a cabeça, o usuário vê outras partes do ambiente — a base da imersão.

Em RA, o sistema também aplica rotações para alinhar objetos ao plano detectado (por exemplo, para que uma cadeira virtual fique alinhada com o chão real). A rotação pode ser representada por uma matriz 3×3 ou por quaternions, que são mais eficientes e estáveis numericamente para interpolação e animação.

Por fim, a escala é utilizada para ajustar o tamanho relativo dos objetos digitais. Em RV, ela pode ser aplicada de forma interativa (por exemplo, aumentar ou reduzir um modelo com gestos ou comandos), ou automaticamente, de acordo com a lógica da simulação.

Nos motores gráficos modernos, como Unity, essas transformações são automaticamente gerenciadas, mas sua compreensão é fundamental para a precisão de posicionamento em RA. Por exemplo, ao detectar uma superfície plana, como uma mesa, o sistema aplica uma matriz de pose ao modelo tridimensional, ancorando-o virtualmente naquela posição real.

Nos dispositivos móveis, como smartphones e tablets, o desafio é garantir que essas transformações sejam aplicadas com baixa latência e alta precisão, apesar das limitações de processamento e energia. Bibliotecas como ARCore (Android) e ARKit (iOS) oferecem APIs de alto nível que encapsulam essas transformações:

- fornecem matrizes de pose para câmeras e objetos ancorados;
- usam otimizações de fusão de sensores, combinando dados da câmera com IMUs para calcular translações e rotações suaves;

- suportam atualizações contínuas da escala, com ajustes baseados na percepção visual.

5.1.2 Modelagem Tridimensional Poligonal

A modelagem tridimensional consiste na criação de representações matemáticas e visuais de objetos no espaço tridimensional. Em sistemas como o GeoMeta, que utilizam representações geométricas para o ensino de formas planas e espaciais, a modelagem precisa garantir precisão estrutural e otimização de recursos computacionais.

Os objetos tridimensionais são comumente representados por malhas poligonais, compostas por triângulos ou quadriláteros interconectados que formam a superfície dos modelos. Em aplicações móveis, a modelagem de baixa contagem poligonal (conhecida como *low-poly*) (Figura 20) é amplamente utilizada, pois permite manter o desempenho gráfico sem comprometer a clareza visual das formas geométricas[47].

Figura 20: Exemplo visual de uma árvore low-poly



Fonte: 3dstudio.co/pt/low-and-high-poly-modeling/

Ferramentas como o software Blender são empregadas para construir tanto as figuras geométricas elementares (como quadrados, círculos, cubos e pirâmides) quanto os cenários virtuais que contextualizam a experiência imersiva — por exemplo, a sala de aula, o parque e o quarto modelados no projeto GeoMeta. Esses ambientes funcionam como espaços de interação, sendo visualmente elaborados, mas tecnicamente balanceados em complexidade para não exceder os limites computacionais dos dispositivos móveis.

5.1.3 Mapeamento de Texturas, Iluminação e Shaders

A aparência final de um modelo tridimensional depende da aplicação de texturas, da configuração da iluminação e da utilização de shaders, que definem como os materiais interagem com a luz.

O mapeamento de texturas (Figura 21) é a técnica que projeta imagens bidimensionais sobre a superfície dos modelos tridimensionais, adicionando padrões de cor, relevo e rugosidade. Essa prática permite economizar recursos computacionais, evitando que todos os detalhes precisem ser modelados geometricamente.

Figura 21: Mapas de Textura PBR



Fonte: 3dstudio.co/pt/3d-texture-mapping/

A iluminação é outro fator essencial para o realismo e para a percepção espacial. Em plataformas móveis, o uso de mapas de iluminação pré-calculados (também conhecidos como *lightmaps*) é uma estratégia comum para reduzir o custo computacional associado à iluminação dinâmica. Os *shaders* são pequenos programas executados diretamente na unidade de processamento gráfico que definem como cada pixel será renderizado. São usados para efeitos visuais avançados, como reflexos, transparência e variações de material. No entanto, em dispositivos móveis, os shaders devem ser otimizados para garantir execução eficiente sem sobrecarregar o sistema gráfico.

No projeto GeoMeta, todos esses recursos são aplicados de forma balanceada, contribuindo para uma experiência visual envolvente e funcional mesmo em dispositivos com menor capacidade de processamento.

5.2 Técnicas de Otimização de Desempenho

Após a modelagem dos objetos tridimensionais, é fundamental garantir que o ambiente virtual funcione de maneira fluida e estável em dispositivos móveis, que possuem limitações de processamento, memória e capacidade gráfica. As técnicas de otimização de desempenho

permitem equilibrar qualidade visual e responsividade, assegurando que os elementos tridimensionais sejam renderizados de forma eficiente, mantendo a coerência e a imersão [48]. Essas estratégias englobam a gestão cuidadosa de todos os recursos do sistema, desde a memória disponível até a capacidade de processamento da GPU, de modo que cada cena, objeto ou efeito gráfico seja tratado de forma eficiente. O objetivo é reduzir sobrecargas desnecessárias, evitar atrasos ou quedas de frames e garantir que a interação com os elementos tridimensionais permaneça contínua e previsível [19].

Além disso, a otimização contribui para a adaptabilidade do ambiente, permitindo que ele se ajuste automaticamente às características de diferentes dispositivos, mantendo desempenho consistente independentemente das limitações técnicas [49]. Essa abordagem assegura que a experiência do usuário seja sempre estável, minimizando frustrações e preservando a sensação de presença e engajamento, elementos essenciais para a eficácia pedagógica e imersiva do sistema. Por fim, a atenção à performance influencia diretamente a qualidade da interação e da exploração do ambiente. Um sistema bem otimizado permite que ações, movimentos e transições ocorram de maneira natural, reforçando a sensação de controle do usuário e a continuidade da experiência imersiva. Dessa forma, a otimização de desempenho não apenas melhora a renderização gráfica, mas também sustenta todos os outros aspectos da adaptabilidade em ambientes móveis.

5.2.1 Nível de Detalhe

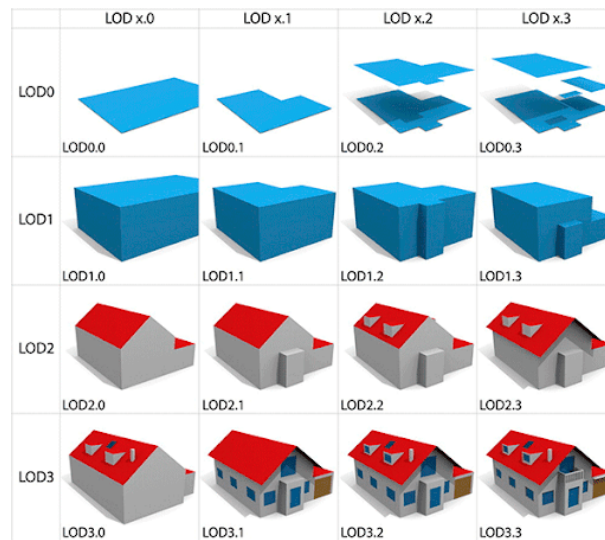
O LOD, como visto anteriormente, é uma técnica fundamental para otimização de desempenho em ambientes tridimensionais, especialmente em dispositivos móveis, onde os recursos gráficos são limitados. Essa abordagem consiste na substituição dinâmica de modelos detalhados por versões simplificadas à medida que o objeto se afasta da câmera ou se torna menos relevante para a cena (Figura 22). Ao reduzir a complexidade geométrica de elementos distantes, o LOD diminui significativamente a carga sobre a GPU, mantendo a fluidez da renderização sem comprometer a percepção visual do usuário.

Para complementar o LOD, o *Mipmapping* é frequentemente utilizado no mapeamento de texturas. Ele gera múltiplas versões de uma textura em diferentes resoluções, permitindo que a GPU selecione a versão mais adequada conforme a distância do objeto em relação à câmera (Figura 23). Essa técnica reduz *aliasing*, melhora a qualidade visual e diminui o uso de memória, contribuindo para a performance geral do sistema.

Outro recurso relacionado é o **Culling por Distância**, que impede a renderização de objetos que se encontram além de uma certa distância da câmera. Combinado ao LOD, essa estratégia evita que recursos sejam desperdiçados em elementos que o usuário dificilmente perceberia, permitindo que a atenção do processamento seja direcionada a objetos mais próximos e visualmente importantes.

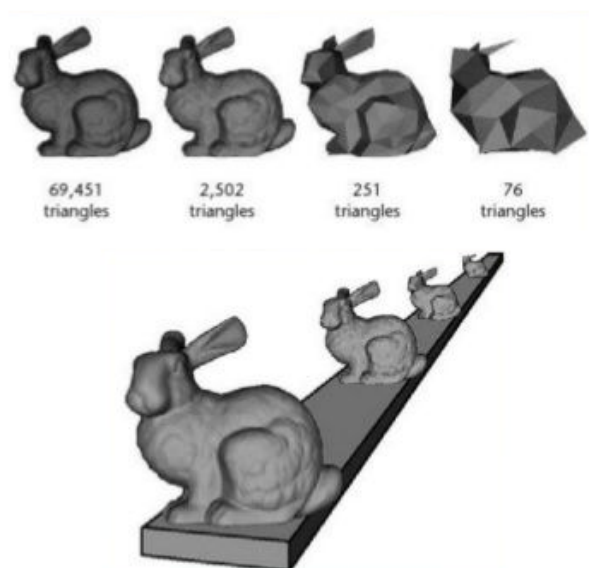
A integração dessas técnicas garante que o ambiente tridimensional permaneça visualmente consistente e imersivo, mesmo em dispositivos móveis com capacidade limitada. Ao reduzir o

Figura 22: Exemplo visual de LODs refinados para um edifício residencial



Fonte: [sciencedirect.com/science/article/pii/S0198971516300436](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0198971516300436)

Figura 23: Variação do LOD de acordo com a distância



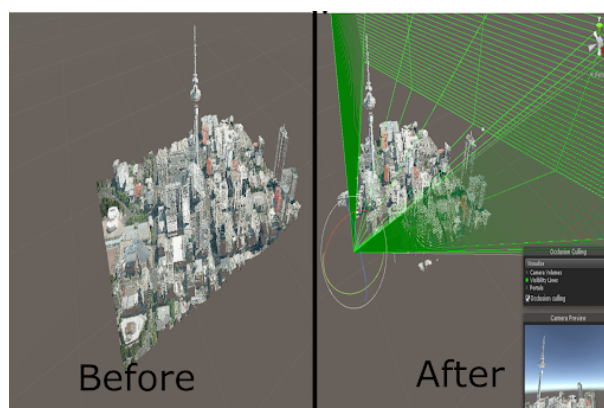
Fonte: uk.pinterest.com/pin/498703358733321316/

detalhamento e omitir elementos irrelevantes de forma dinâmica, o sistema consegue manter altas taxas de quadros, reduzir consumo de memória e preservar a sensação de presença — elementos essenciais para experiências educativas e interativas como as implementadas no GeoMeta.

5.2.2 Técnicas de Oclusão

O *Occlusion Culling* é uma técnica de otimização que consiste na remoção de objetos que estão ocultos por outros elementos ou que não contribuem visualmente para a cena, evitando que sejam processados ou renderizados pela GPU (Figura 24). Ao eliminar a renderização de objetos totalmente bloqueados da visão do usuário, essa abordagem reduz significativamente a carga computacional, permitindo que o sistema concentre recursos em elementos visíveis e relevantes, mantendo a fluidez da experiência em dispositivos móveis. Essa técnica é especialmente útil em ambientes complexos, nos quais múltiplos objetos tridimensionais coexistem em diferentes planos e profundidades, garantindo que a GPU não desperdice ciclos de processamento com elementos invisíveis.

Figura 24: Exemplo visual de um Occlusion Culling no Unity



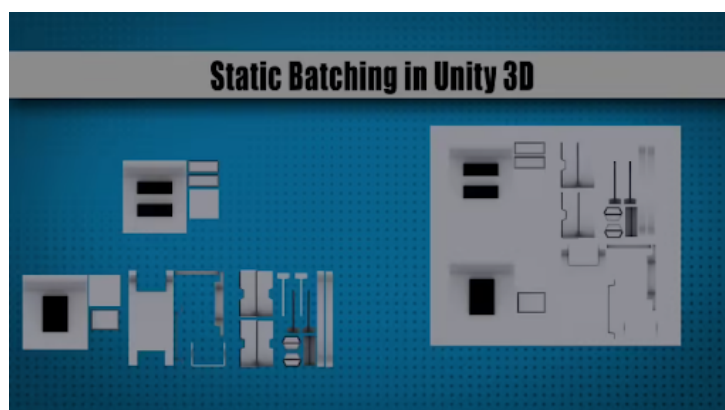
Fonte: manningcopelandsoftwaredevelopment.wordpress.com/point-cloud-occlusion-culling-in-unity/

Complementando o *Occlusion Culling*, o *Frustum Culling* atua filtrando objetos com base no campo de visão da câmera, conhecido como *frustum*. Objetos localizados fora desse espaço visual não são enviados para renderização, evitando processamento desnecessário e contribuindo para a estabilidade do desempenho. Juntas, essas técnicas asseguram que apenas os elementos realmente perceptíveis pelo usuário sejam processados em cada frame, otimizando o uso da GPU e da memória do dispositivo, e permitindo que a experiência permaneça fluida mesmo em cenários densos ou com dispositivos de capacidade limitada.

5.2.3 Lote

O *Batching* é uma técnica de otimização que consiste no agrupamento de objetos semelhantes ou que compartilham propriedades comuns para que possam ser processados e renderizados em conjunto pela GPU (Figura 25). Em vez de enviar cada objeto individualmente para a unidade de processamento gráfico, o sistema envia um único lote de objetos, reduzindo significativamente o número de chamadas de desenho (*draw calls*).

Figura 25: Exemplo visual de Static Batching



Fonte: otus.ru/nest/post/2132/

Essa abordagem é especialmente relevante em ambientes tridimensionais complexos, nos quais múltiplos elementos repetidos, como cadeiras, árvores ou figuras geométricas, aparecem simultaneamente. Ao reduzir o *overhead* gerado por chamadas separadas, o *Batching* permite que o dispositivo móvel mantenha uma taxa de quadros estável, economize memória e recursos de processamento, e evite quedas de desempenho. Além disso, o *Batching* contribui para a coerência da experiência do usuário, pois a renderização de múltiplos objetos ocorre de forma mais eficiente, garantindo fluidez nas interações e preservando a sensação de imersão.

5.2.4 Pipeline Gráfico

O pipeline gráfico é uma cadeia de processamento que transforma dados tridimensionais (como modelos geométricos, materiais e luzes) em imagens bidimensionais renderizadas na tela. Essa cadeia é composta por várias etapas sequenciais, que devem ser executadas de forma altamente eficiente para garantir taxas de quadros elevadas (geralmente 60 a 90 FPS em aplicações imersivas) e baixa latência na resposta ao usuário — requisitos indispensáveis para evitar desconforto, náusea e perda de imersão.

“...essa cadeia deve ser executada de forma altamente eficiente para garantir taxas de quadros elevadas (geralmente sessenta a noventa quadros por segundo

em aplicações imersivas) e baixa latência na resposta ao usuário — requisitos indispensáveis para evitar desconforto, náusea e perda de imersão.”[19]

As principais etapas do pipeline gráfico são:

- **Modelagem e transformação geométrica:** Os modelos tridimensionais são posicionados, escalados e rotacionados no espaço por meio de transformações matriciais. Essa etapa também inclui a conversão de coordenadas locais para coordenadas de mundo, de câmera e, finalmente, para a tela.
- **Culling e clipping:** Partes invisíveis da cena (como faces voltadas para trás ou fora do campo de visão da câmera) são descartadas para otimizar o desempenho da renderização.
- **Rasterização:** As primitivas gráficas (geralmente triângulos) são convertidas em pixels na tela, formando o esqueleto da imagem final.
- **Interpolação e shading:** Durante essa etapa, os pixels recebem atributos como cor, brilho, textura, reflexo e transparência. É aqui que entram os *shaders*, controlando como cada pixel será visualizado.
- **Composição final:** As múltiplas camadas da cena — como objetos opacos, transparentes, partículas, iluminação e efeitos especiais — são combinadas na imagem final apresentada ao usuário.

Em dispositivos móveis, o pipeline gráfico é implementado por meio de APIs gráficas específicas, como OpenGL ES¹⁶, Vulkan¹⁷, Metal¹⁸ (no iOS), ou por meio de motores gráficos como Unity e Unreal Engine¹⁹, que abstraem boa parte dessa complexidade. Para facilitar a compreensão das características, vantagens e limitações de cada API no contexto móvel, um quadro comparativo detalhado é apresentado no Quadro 3, permitindo visualizar rapidamente como cada tecnologia lida com performance, compatibilidade e suporte a recursos avançados. Contudo, para alcançar níveis elevados de performance visual, é fundamental compreender e manipular as etapas do pipeline de forma consciente e adaptativa ao contexto da aplicação.

¹⁶opengl.org

¹⁷vulkan.org

¹⁸developer.apple.com/documentation/metall

¹⁹unrealengine.com

Quadro 3: Quadro comparativo entre OpenGL ES, Vulkan e Metal.

Característica	OpenGL ES	Vulkan	Metal
Plataforma	Android, iOS (antigo)	Android 7+	iOS, iPadOS, macOS
Nível de API	Alto nível	Baixo nível	Baixo nível
Complexidade de uso	Mais simples, fácil de implementar	Mais complexo, exige maior controle da GPU	Intermediário/avançado, bem integrado ao ecossistema Apple
Desempenho	Limitado por abstrações, menor otimização	Alto desempenho, controle detalhado sobre GPU	Alto desempenho, otimizado para dispositivos Apple
Controle sobre GPU	Limitado	Total, permite otimização fina	Total para dispositivos Apple
Suporte 2D/3D	Sim	Sim	Sim
Foco de uso	Jogos, aplicativos 3D tradicionais	Jogos e aplicações 3D de alta performance, VR/AR	Jogos e apps 3D de alta performance em Apple
Portabilidade	Alta entre Android e iOS	Alta entre Android, Linux e outros	Restrita a dispositivos Apple
Aprendizado	Mais rápido para iniciantes	Curva de aprendizado acentuada	Intermediário, exige conhecimento do ecossistema Apple

Fonte: Próprio Autor

O jogo *Call of Duty*, em suas diversas versões para computador pessoal, dispositivos móveis e RV, é um exemplo notável de como podem empregar técnicas avançadas de otimização e escalonamento dinâmico para se adaptar a diferentes plataformas, mantendo uma experiência imersiva consistente.

Na versão para computadores pessoais ou consoles, o jogo aproveita o alto poder computacional para renderizar cenas com modelos de alta complexidade geométrica, texturas em alta definição, sombras dinâmicas, efeitos de iluminação em tempo real e partículas volumétricas (Figura 26).

A capacidade gráfica robusta permite o uso intensivo da unidade de processamento gráfico, promovendo um realismo visual elevado e com mínima limitação de desempenho.

Figura 26: Comparação de gráficos COD advanced warfare entre Xbox, PC e PS4



Fonte: otus.ru/nest/post/2132/

Já na versão *Call of Duty: Mobile*, os mesmos conceitos visuais são traduzidos para dispositivos com capacidade significativamente inferior. Para isso, são aplicadas diversas estratégias de otimização gráfica, como o uso de modelos em baixa contagem de polígonos (*low-poly*), texturas comprimidas e LOD, que ajusta automaticamente a complexidade dos objetos com base na distância do jogador (Figura 27). Além disso, a renderização de iluminação e sombras costuma ser baseada em *lightmaps* pré-calculados, reduzindo drasticamente o custo computacional da iluminação em tempo real.

Figura 27: Comparação de gráficos entre *Call of Duty Mobile* e *Warzone Mobile*



Fonte: reddit.com/r/WarzoneMobile/comments/1c3s89n

Na versão para RV, como ocorre em experiências criadas com *mods* no SteamVR ou através de integrações específicas (como o "Call of Duty VR" via plataformas como Oculus ou HTC Vive),

a exigência por alta taxa de atualização visual força o sistema a combinar qualidade gráfica com extrema eficiência (Figura 28). Mesmo com hardware avançado, são utilizados recursos como redução de resolução adaptativa, *shaders* simplificados e renderização estéreo otimizada para dois olhos, garantindo que o usuário não perceba artefatos visuais ou atrasos que comprometam a sensação de presença.

Figura 28: Comparação de gráficos entre *Nward Quest* e PC VR.



Fonte: [youtube.com/watch?v=-DLSqfftsnE](https://www.youtube.com/watch?v=-DLSqfftsnE)

5.3 Técnicas de Interação com Objetos Virtuais

A interação em ambientes imersivos em dispositivos móveis é realizada por meio da combinação de entradas sensoriais e gestuais que permitem ao sistema interpretar comandos do usuário. Toques e gestos na tela, como arrastar, pinçar ou rotacionar com múltiplos dedos, são traduzidos em manipulações de objetos ou ajustes de câmera [50].

Da mesma forma, sensores embarcados como acelerômetro e giroscópio possibilitam a detecção de movimentos e orientação do dispositivo, permitindo simular mudanças de perspectiva no espaço virtual. Nesse contexto, as interfaces naturais e gestuais têm papel relevante, pois integram esses mecanismos de forma coerente, tornando os comandos mais consistentes e reduzindo a necessidade de controles externos.

Diferente das interfaces tradicionais baseadas em periféricos físicos como teclado e mouse, as interfaces naturais procuram aproximar a linguagem de interação digital da linguagem corporal e gestual humana, utilizando movimentos, toques, posturas e expressões como meios diretos de comunicação com o sistema computacional [51].

Nos dispositivos móveis, essa aproximação é ainda mais evidente devido à presença de sensores embarcados que tornam o próprio corpo do dispositivo uma interface física. A combinação de sensores de toque, acelerômetros, giroscópios, magnetômetros, câmeras de profundidade e sensores de proximidade permite que os dispositivos móveis interpretem comandos naturais do

usuário, como toques múltiplos, deslizes, inclinações, rotações do dispositivo, gestos com as mãos ou mesmo o movimento dos olhos e da cabeça [52].

Essa característica torna os dispositivos móveis altamente apropriados para a construção de ambientes imersivos interativos que dispensam o uso de dispositivos periféricos dedicados. Em um aplicativo de RV ou aumentada, por exemplo, é possível interagir com objetos tridimensionais por meio de gestos simples na tela sensível ao toque, como o gesto de pinça para ampliar ou reduzir a escala de um objeto, ou o arraste com um dedo para transladar um elemento no espaço. Esses gestos são mapeados para transformações geométricas computacionais, permitindo ao usuário modificar a posição, orientação ou escala de entidades virtuais de forma intuitiva e em tempo real [53].

Além da tela sensível ao toque, muitas aplicações utilizam o movimento do dispositivo como forma de controle. A rotação do smartphone, capturada pelo giroscópio, pode ser utilizada para navegar pelo ambiente virtual, simulando o movimento da cabeça do usuário. Da mesma forma, a movimentação do dispositivo no espaço pode ser usada para deslocar o ponto de vista em uma cena tridimensional [54].

Entretanto, o desenvolvimento de interfaces gestuais eficazes enfrenta desafios técnicos importantes. Um dos principais é garantir que os gestos sejam reconhecidos com precisão e consistência, mesmo em ambientes com iluminação variável, interferência de objetos ou ruído visual. A latência na detecção e resposta ao gesto também é um fator crítico, pois qualquer atraso perceptível compromete a continuidade da experiência imersiva e pode causar desconforto ao usuário [55].

Além disso, é necessário considerar aspectos de acessibilidade e inclusão. Usuários com limitações motoras, visuais ou cognitivas podem encontrar barreiras ao utilizar determinadas formas de interação gestual. Assim, sistemas interativos devem oferecer alternativas de controle e feedback multimodal [56].

5.3.1 Implementação de Movimento de Câmera

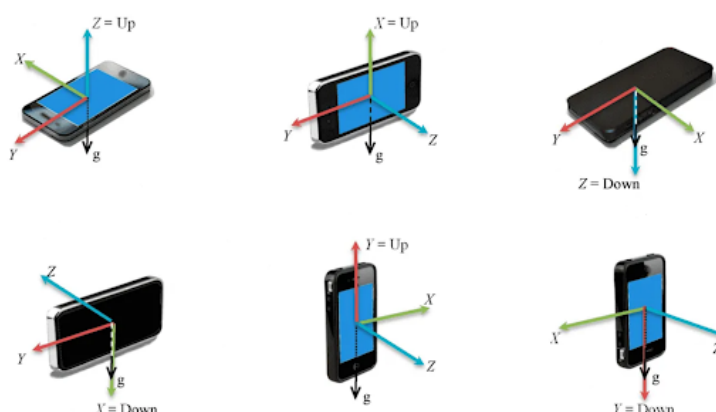
Em aplicações imersivas desenvolvidas para RV, o movimento da câmera desempenha um papel central na criação da sensação de presença e na navegação pelo ambiente tridimensional.

Existem diferentes formas de movimentação de câmera, como movimento livre, rotação em torno de um ponto, teletransporte, *snap turn* e trajetória automatizada.

No contexto de dispositivos móveis, essas estratégias precisam ser adaptadas para operar com sensores embarcados e sem controladores dedicados (Figura 29). A rotação da câmera é frequentemente vinculada ao giroscópio do dispositivo, permitindo que a orientação física do smartphone ou tablet seja convertida em rotação da câmera virtual.

O giroscópio detecta a rotação do dispositivo em torno de seus eixos (*pitch*, *yaw*, *roll*). Essa rotação é mapeada diretamente para a câmera do ambiente 3D, permitindo que o usuário “olhe ao redor” apenas movendo o smartphone. No Unity, a rotação do giroscópio pode ser capturada

Figura 29: Mudanças de orientação detectadas pelo giroscópio.



Fonte: androidgeek.pt/giросcopio-smartphone-saber-vosso-smartphone

via `Input.gyro.attitude` e aplicada ao objeto da câmera, permitindo que o ambiente virtual siga os movimentos do dispositivo em tempo real. Para maior estabilidade, podem ser aplicadas suavizações e ajustes de orientação, e o plugin *Unity OpenXR* oferece configurações prontas para implementação de movimentos em ambientes virtuais.

Também é possível aplicar suavizações e ajustes de orientação para compensar discrepâncias entre o mundo real e o virtual. Para facilitar a implementação, pode ser utilizado o *plugin Unity OpenXR*, o qual já possui configurações nativas para a implementação de movimentos em AVs. Entre os exemplos de movimentação em ambientes móveis, destacam-se:

- **Navegação por rotação física do dispositivo:** o usuário move o smartphone ou tablet, e os sensores embarcados (acelerômetro e giroscópio) atualizam a orientação da câmera no ambiente virtual.
- **Movimentação com *joystick* virtual:** botões exibidos na interface simulam deslocamento, permitindo navegação mesmo sem movimentar fisicamente o dispositivo.
- **Controle por joysticks físicos:** dispositivos externos conectados via USB ou Bluetooth ao smartphone, possibilitando comandos mais precisos e familiares a usuários de jogos tradicionais.
- **Controle baseado em *gaze*:** a posição do olhar simulada — geralmente o centro da tela — é utilizada para ativar ações ou selecionar objetos no ambiente virtual, funcionando como uma forma de interação sem toques.

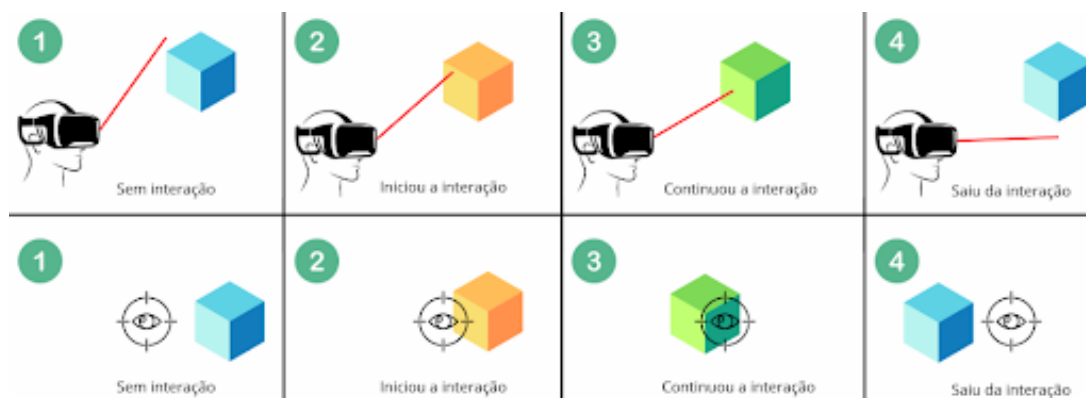
A combinação de múltiplas técnicas é recomendada para garantir acessibilidade e flexibilidade, permitindo que o sistema se adapte a diferentes tipos de dispositivos e necessidades dos usuários.

5.3.1.1 Detecção de Gaze e Olhar Fixo

A detecção de *gaze*, ou seja, a direção do olhar do usuário, é uma técnica comumente utilizada em sistemas de RV que empregam *headsets* com rastreamento ocular. Em dispositivos móveis, onde sensores de rastreamento ocular não estão presentes, essa funcionalidade é simulada a partir da posição central da câmera virtual, assumindo que o usuário está olhando para o centro da tela [57]. Essa técnica, chamada de *gaze simulado* ou *gaze proxy*, permite inferir a atenção do usuário e possibilita interações como seleção de objetos ou ativação de menus, mesmo sem hardware específico de rastreamento ocular.

Os elementos destacados na Figura 30 representam a projeção do ponto de gaze na tela e o alinhamento com os objetos virtuais de interesse.

Figura 30: Exemplo de detecção via Gaze



Fonte: Elaborada pelo Autor.

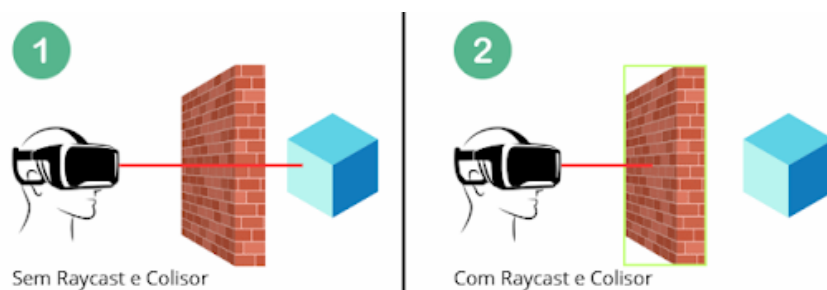
Essa abordagem permite que a navegação e a interação com objetos tridimensionais sejam ativadas quando um objeto permanece centralizado no campo de visão por um determinado período. Essa técnica é amplamente utilizada para ações como seleção de botões, ativação de animações ou transição de cenas. Por exemplo, ao olhar fixamente para um botão virtual por dois segundos, o sistema interpreta isso como um clique, reduzindo a necessidade de interfaces táteis e aumentando a imersão em experiências *hands-free*.

Apesar de eficiente em contextos móveis, a detecção de gaze simulada enfrenta limitações técnicas. A precisão da seleção pode ser comprometida se os objetos estiverem muito próximos uns dos outros, e a latência da resposta visual após a fixação pode afetar a fluidez da experiência. Além disso, como o sistema não detecta diretamente o movimento dos olhos, o campo de interação é limitado à área visível da câmera, exigindo boa centralização dos elementos importantes no design da interface.

Outro problema é a interação indesejada com objetos ocultos por obstáculos, como paredes, móveis ou barreiras visuais. Isso ocorre porque o gaze simulado não leva automaticamente em consideração o contexto físico da cena, podendo detectar objetos que não estão visíveis, mas que

estão tecnicamente alinhados com o centro da câmera atrás de uma obstrução. Para resolver esse problema, utiliza-se a camada de colisão (*colliders*) para impedir que o *raycast* atravesse paredes (Figura 31). O objeto deve estar no campo de visão e sem obstáculos físicos.

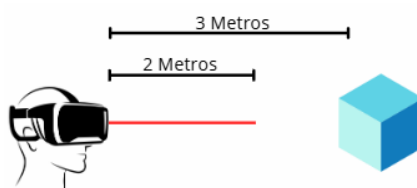
Figura 31: Exemplo do uso de camada de colisão



Fonte: Elaborada pelo Autor.

Outra forma de evitar seleções incorretas é impor restrições de distância mínima ou máxima e ângulo de visão para ativar a interação por *gaze* (Figura 32), evitando que objetos distantes ou lateralmente encobertos sejam selecionados acidentalmente.

Figura 32: Exemplo de restrições de distância do raycast



Fonte: Elaborada pelo Autor.

5.3.1.2 Toque e Arraste em Dispositivos Móveis

Em ambientes de RV adaptados para dispositivos móveis, o toque e o arraste na tela representam uma alternativa direta ao uso do giroscópio para controlar a movimentação e a rotação da câmera. Essa forma de interação simula a rotação ou a navegação por meio de gestos unidimensionais ou multitoque realizados diretamente na superfície do dispositivo.

A manipulação da perspectiva em ambientes virtuais móveis também pode ser realizada por meio de gestos de toque na tela. Nesse caso, o deslocamento do dedo é mapeado como uma rotação incremental da câmera ao redor dos eixos horizontal e vertical. Por exemplo, arrastar o dedo horizontalmente resulta na rotação da câmera em torno do eixo Y, simulando a visualização lateral, enquanto o movimento vertical gera inclinação para cima ou para baixo. Sistemas mais avançados podem incluir gestos multitoque, como pinça para *zoom* ou rotação com dois dedos, permitindo manipulação direta de objetos tridimensionais.

A principal vantagem dessa técnica é a acessibilidade: permite que o ambiente virtual seja explorado mesmo sem o uso de sensores embarcados ou em dispositivos com giroscópios imprecisos. Além disso, torna o sistema compatível com usuários que não desejam movimentar fisicamente o dispositivo, o que é especialmente útil em ambientes públicos ou em situações de acessibilidade motora.

5.4 Técnicas de Navegação e Transição

As técnicas de navegação e transição dizem respeito à forma como o usuário explora o ambiente virtual como um todo e como o sistema organiza a passagem entre diferentes estados ou cenas. Enquanto a interação com objetos foca na manipulação direta de elementos tridimensionais, a navegação concentra-se na estrutura espacial, no percurso do usuário e na condução narrativa que garante continuidade e coerência na experiência.

A navegação envolve desde o planejamento do espaço virtual — definindo pontos de interesse, rotas de exploração e hierarquia de conteúdos — até os mecanismos que permitem ao usuário avançar entre etapas, observar diferentes perspectivas e compreender a lógica da progressão

pedagógica. Já as transições, por sua vez, asseguram que as mudanças entre objetos, cenários ou níveis de informação ocorram de maneira fluida, evitando rupturas abruptas que possam comprometer a sensação de imersão. Além do aspecto funcional, a navegação e as transições orientam o usuário dentro do ambiente imersivo, promovendo engajamento e apoiando a compreensão gradual dos conteúdos.

5.4.1 Estrutura do Ambiente Virtual

A estruturação do ambiente virtual define como os objetos, cenários e interações são organizados no espaço digital. Essa organização influencia diretamente a navegabilidade, já que um ambiente mal estruturado pode gerar desorientação, sobrecarga cognitiva ou dificuldade em compreender a lógica da aplicação. Em ambientes imersivos móveis, onde o poder de processamento é mais limitado, a estrutura deve ser planejada de forma otimizada, priorizando clareza visual, simplicidade espacial e coerência na disposição dos elementos.

A estratégia de construção do ambiente imersivo móvel envolve a definição de uma hierarquia entre cenas e objetos e como os diferentes espaços virtuais se conectam entre si. Além disso, a organização espacial deve considerar pontos de interesse e percursos de exploração, orientando o usuário de forma intuitiva e mantendo o equilíbrio entre liberdade de navegação e direcionamento pedagógico.

Um exemplo prático pode ser observado no aplicativo Google Expeditions VR (Figura 33) (descontinuado em 2021), que organizava ambientes em “pontos de exploração” dentro de cenas panorâmicas. O usuário podia navegar entre diferentes locais de uma mesma experiência e, em cada um deles, visualizar informações complementares de forma progressiva. Essa estrutura permitia uma exploração controlada, sem perder a sensação de liberdade espacial, servindo como guia para o aprendizado dentro do ambiente imersivo.

Figura 33: Google Expeditions VR Mobile

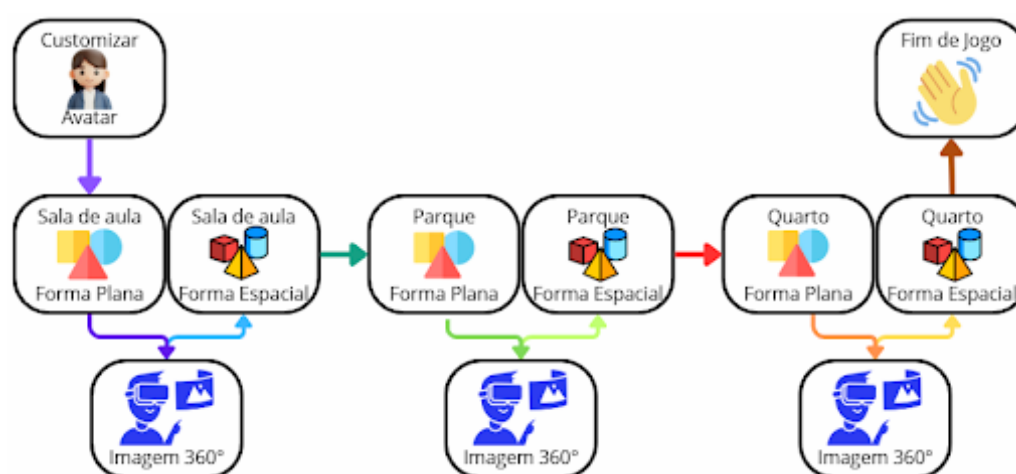


Fonte: eduporium.com/blog/google-expeditions-app-alternatives-in-education/

No contexto do GeoMeta, essa organização também é essencial, onde o ambiente estrutura os

objetos geométricos em sequências, como mostra a Figura 34, favorecendo tanto a exploração livre quanto a progressão lógica dos conteúdos, garantindo equilíbrio entre imersão, clareza e objetivo pedagógico. Foram desenvolvidos três principais ambientes: sala de aula, quarto e parque, cada um com a função de contextualizar pedagogicamente as figuras geométricas utilizadas nas atividades de RV e RA. Também foi criada uma cena adicional de ambiente 360°, a qual aloca apenas os objetos geométricos.

Figura 34: Sequência síncrona das cenas



Fonte: Elaborada pelo Autor.

A sala de aula foi composta com móveis básicos, quadro interativo e iluminação global indireta, simulando um ambiente educacional tradicional. O quarto apresenta elementos domésticos como cama, estante e objetos decorativos, enquanto o parque explora vegetação estilizada e objetos urbanos simples, como bancos e postes, a fim de representar um espaço externo de forma leve, porém expressiva.

Cada cenário foi exportado do Blender em partes, permitindo sua modularização dentro do motor Unity. Dessa forma, os elementos de cada ambiente foram organizados como *prefabs* reutilizáveis, facilitando o carregamento seletivo e a transição dinâmica entre as cenas, além de possibilitar a reutilização de recursos gráficos sem redundância.

A definição dos cenários buscou também favorecer a navegação intuitiva e a percepção espacial em ambientes tridimensionais. Para isso, a composição das cenas seguiu princípios de legibilidade visual, com cores contrastantes, iluminação direcional bem definida e espaçamento adequado entre os elementos geométricos. Essa estratégia permite que os usuários identifiquem e interajam com os objetos com maior precisão, mesmo utilizando apenas os sensores embarcados dos dispositivos móveis.

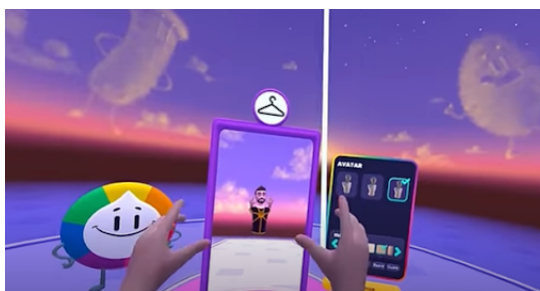
5.4.1.1 Customização do Avatar

A funcionalidade de customização do avatar foi incorporada ao cenário do quarto no GeoMeta com o objetivo de ampliar a identificação do estudante com o ambiente virtual e fortalecer a sensação de presença durante as atividades de aprendizagem imersiva. Essa funcionalidade permite ao usuário editar características visuais do personagem representado, incluindo gênero, cor da pele, camisa, calça e sapato, por meio de um quadro interativo posicionado no interior da cena. A escolha do quarto como local para essa interação foi estratégica, pois remete a um espaço pessoal e familiar ao usuário, favorecendo o vínculo subjetivo com a experiência, a qual transmite a ideia de que o estudante estaria se arrumando para ir à aula.

A personalização do avatar funciona como um mecanismo de imersão psicológica, permitindo que o estudante se reconheça ou se projete no espaço tridimensional, o que é um fator importante para a sensação de presença e para o fortalecimento do engajamento em ambientes de Realidade Virtual. Além dos aspectos afetivos e motivacionais, a customização também contribui para a autonomia e a agência do estudante, reforçando sua participação ativa no ambiente virtual.

Entretanto, é importante destacar que a presença do avatar nem sempre é integrada diretamente à jogabilidade. Um exemplo é o jogo em Realidade Virtual Trivia Crack (Figura 35), que permite ao usuário criar e personalizar seu avatar, mas na experiência principal de perguntas e respostas o personagem não aparece. Isso acontece porque a aplicação adota um ponto de vista em primeira pessoa, no qual a customização inicial funciona apenas como registro de identidade e elemento simbólico de personalização, sem impacto direto na interação dentro da cena.

Figura 35: Criação de avatar virtual no jogo Trivia Crack



Fonte: [youtube.com/watch?v=QPgWaIrrGNk](https://www.youtube.com/watch?v=QPgWaIrrGNk)

No caso do GeoMeta, a customização do avatar não se limita a um aspecto estético ou de registro, mas também atua como parte da preparação para a experiência imersiva (Figura 36). Essa etapa inicial funciona como um momento de exploração e familiarização com o sistema, reduzindo a ansiedade diante da interface tridimensional e promovendo maior conforto com os controles de navegação e seleção, ao mesmo tempo em que reforça a sensação de presença ao longo das atividades geométricas.

Figura 36: Criação de avatar virtual no GeoMeta



Fonte: Elaborada pelo Autor.

5.4.1.2 Sala de Aula

A cena da sala de aula foi concebida como o cenário inicial e central das atividades de RV do aplicativo GeoMeta (Figura 37). Seu objetivo principal é oferecer um ambiente virtual que seja familiar ao estudante, remetendo a elementos do cotidiano escolar, ao mesmo tempo em que organiza de forma clara e funcional os objetos geométricos tridimensionais que serão explorados durante as atividades.

Figura 37: Sala de aula do GeoMeta



Fonte: Elaborada pelo Autor.

Entre os elementos específicos da sala de aula tradicional incorporados ao cenário estão: carteiras escolares, uma lousa de giz posicionada em destaque frontal, um mapa-múndi afixado na parede lateral, janelas que simulam iluminação natural, armários de apoio e prateleiras com objetos decorativos. Esses componentes não apenas reforçam o reconhecimento visual do ambiente, mas também servem como referências espaciais para orientar o deslocamento e a interação do estudante.

A disposição dos elementos na sala foi cuidadosamente planejada para guiar as ações do usuário em uma sequência lógica de aprendizagem. Os objetos geométricos tridimensionais, como

esferas, cubos e pirâmides estão distribuídos na sala de aula, permitindo manipulação direta. Porém, elas não estão em suas formas base, mas para estimular a exploração pelo aluno elas estão convertidas em objetos que remetem a sua forma como bolas (esfera) quadros na parede (quadrados), régua triangulares (triângulos) etc. O mapa-múndi, por sua vez, é utilizado como referência visual para conduzir o aluno a experiências complementares em cenas panorâmicas, relacionando monumentos reais a figuras geométricas específicas.

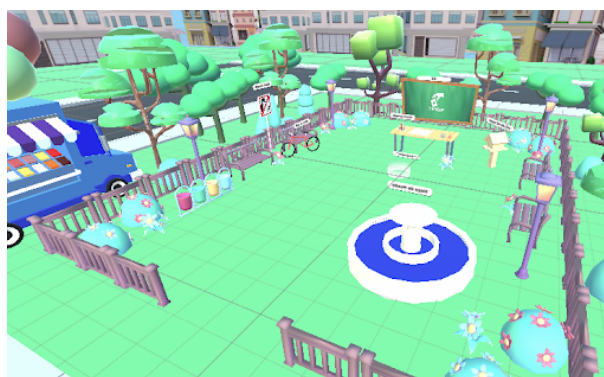
A iluminação global é simulada por meio de lightmaps, ou seja, mapas de luz pré-calculados que reproduzem a incidência de luz e sombras de forma estática, sem demandar cálculos dinâmicos em tempo real. Os materiais aplicados aos objetos utilizam shaders otimizados, com baixo custo computacional, mantendo o equilíbrio entre fidelidade visual e desempenho gráfico. As texturas empregadas foram compactadas e reutilizadas entre diferentes objetos, reduzindo o consumo de memória.

5.4.1.3 Parque

A cena do parque (Figura 38), foi desenvolvida com o objetivo de oferecer uma ambientação externa e visualmente contrastante em relação à sala de aula, mantendo, no entanto, a clareza e a funcionalidade necessárias para a realização das atividades de geometria. A proposta é ampliar a diversidade contextual do GeoMeta, promovendo maior envolvimento do aluno por meio da variação de cenários que simulam diferentes espaços do cotidiano.

Foram incorporados elementos naturais e urbanos, como árvores de diferentes tamanhos, gramado contínuo, bancos de praça, postes de luz e brinquedos infantis estilizados. Esses componentes foram organizados em áreas delimitadas que facilitam a navegação e a localização de objetos geométricos tridimensionais distribuídos pelo cenário. O objetivo foi manter um ambiente visualmente rico, mas ao mesmo tempo funcional, evitando a dispersão do foco cognitivo.

Figura 38: Parque do GeoMeta



Fonte: Elaborada pelo Autor.

O parque apresentou desafios específicos de otimização, por se tratar de um cenário aberto. A

ausência de paredes e tetos implica em uma maior área de renderização simultânea, exigindo cuidados adicionais com o desempenho gráfico.

Para lidar com isso, foram aplicadas as seguintes estratégias de otimização:

- Uso de objetos low-poly para toda a vegetação e mobiliário urbano, reduzindo a contagem de vértices por objeto.
- Agrupamento de objetos semelhantes por material (*static batching*) para diminuir o número de chamadas de desenho (*draw calls*).
- Substituição de modelos 3D de fundo por imagens 2D planas, como silhuetas de prédios, posicionadas em painéis distantes no cenário. Essa técnica economiza recursos sem comprometer a ilusão de profundidade e a composição visual.

Com isso, a cena do parque não apenas diversifica o ambiente de aprendizagem, mas também demonstra a capacidade técnica do sistema de adaptar a experiência imersiva a diferentes contextos espaciais, respeitando os limites de desempenho gráfico em plataformas móveis.

5.4.1.4 Quarto

A cena do quarto (Figura 39), foi concebida como a última fase da experiência imersiva no GeoMeta, servindo como encerramento do percurso do aluno no jogo. Assim como nas demais cenas — sala de aula e parque —, o ambiente do quarto mantém as mesmas funcionalidades de exploração geométrica, com foco na busca por formas planas e espaciais, interação com quizzes e associação entre figuras.

Figura 39: Quarto do GeoMeta



Fonte: Elaborada pelo Autor.

Um aspecto pedagógico fundamental desta cena é sua contribuição para a progressão lógica das atividades: a cada fase concluída, a forma geométrica escolhida anteriormente é desabilitada nas fases seguintes. Por exemplo, se o aluno interagir com o quadrado na sala de aula e com o triângulo no parque, ao chegar ao quarto, restará apenas o círculo para ser explorado. Essa estratégia garante que o estudante visualize e manipule todas as formas geométricas básicas ao longo da experiência completa, promovendo a fixação dos conceitos sem repetições redundantes. Em termos de ambientação, o quarto foi projetado como o menor dos três cenários, com dimensões compactas e menor densidade de objetos. Do ponto de vista técnico, o espaço é reduzido e simplificado, o que favorece o desempenho em dispositivos móveis mais limitados; do ponto de vista imersivo, o quarto representa um ambiente familiar, introspectivo e pessoal, reforçando a sensação de fechamento da jornada.

Por ser a última etapa do percurso, o quarto serve como um ambiente mais focado e direto, onde o aluno conclui a exploração das figuras geométricas e revisa os conhecimentos adquiridos. A disposição dos objetos e a organização da cena foram desenhadas para minimizar distrações, facilitando a navegação e garantindo que a interação com a forma geométrica remanescente seja clara, intuitiva e satisfatória.

5.4.1.5 Monumentos em 360°

Em cada uma das cenas principais do aplicativo GeoMeta — sala de aula, parque e quarto — há uma etapa especial dedicada à exploração de monumentos históricos do mundo real, representados por meio de imagens panorâmicas em 360 graus (Figura 40). Essa funcionalidade foi projetada para ampliar a compreensão do aluno sobre a presença e aplicação das formas geométricas na arquitetura e no cotidiano, estabelecendo conexões entre o conhecimento abstrato da geometria e exemplos concretos do mundo físico.

A mecânica funciona da seguinte maneira: ao interagir com uma figura geométrica plana (como o triângulo, o círculo ou o quadrado) e responder corretamente às questões apresentadas no quadro interativo, o aluno é orientado a olhar para um mapa-múndi fixado na parede do

ambiente virtual. Esse mapa exhibe pontos de interesse turísticos e culturais relacionados à forma escolhida. Por exemplo, se a forma selecionada for o triângulo, o sistema pode destacar locais como as Pirâmides de Gizé ou Torre Eiffel — todos monumentos reais cuja estrutura envolve a geometria triangular em alguma dimensão.

Figura 40: Monumento em 360°



Fonte: Elaborada pelo Autor.

Ao focar em um desses pontos no mapa, o sistema realiza a transição para uma cena esférica em 360 graus, onde o aluno é colocado no centro de uma imagem panorâmica interativa do monumento. Nessa cena, o estudante pode olhar ao redor livremente, simulando uma visita imersiva ao local real. Essa abordagem proporciona uma experiência de contextualização visual, enriquecendo o aprendizado ao mostrar como as formas estudadas estão presentes em construções icônicas do mundo.

Após a exploração do monumento em 360 graus, o aluno é automaticamente reconduzido ao ambiente anterior — sala de aula, parque ou quarto — para dar continuidade à atividade. Nessa nova etapa, ele deverá encontrar e interagir com a forma geométrica espacial correspondente à figura plana previamente estudada. Por exemplo, após ter iniciado com o triângulo e explorado um monumento triangular, ele deve agora localizar e manipular a pirâmide tridimensional, promovendo a associação entre figura plana e forma espacial.

Esse ciclo de atividades — escolha da figura plana, exploração do monumento relacionado, retorno e busca pela figura espacial — se repete ao longo das três fases do GeoMeta. O sistema foi projetado para eliminar progressivamente as formas já escolhidas, garantindo que ao final da experiência o aluno tenha interagido com todas as figuras geométricas disponíveis, tanto planas quanto espaciais.

5.4.2 Exploração do Usuário

A navegação e a manipulação em espaço tridimensional representam duas capacidades essenciais para aplicações imersivas baseadas em RV, RA e RM, sobretudo quando aplicadas à aprendizagem de conceitos espaciais como os da geometria. Ao contrário de interfaces bidimensionais, ambientes tridimensionais exigem que o usuário compreenda e atue em três

eixos simultaneamente — altura, largura e profundidade — o que aumenta significativamente a complexidade técnica do sistema e cognitiva da interação [58].

Existem diferentes estratégias para implementar o deslocamento do usuário em ambientes virtuais móveis, cada uma com impactos distintos sobre a imersão e o desempenho [59]. A navegação contínua, em que o usuário se move de forma fluida pelo espaço tridimensional, oferece maior sensação de presença e naturalidade, pois simula o movimento real e o teletransporte, ou deslocamento por saltos entre pontos de interesse predefinidos, reduz significativamente a complexidade computacional e evita problemas de desconforto visual ou enjoo virtual, embora possa diminuir a sensação de continuidade espacial.

Esse deslocamento pode ocorrer por meio de diversas estratégias, tais como o movimento do dispositivo móvel (tracking absoluto ou relativo), o toque em interfaces específicas (joysticks virtuais, botões de direção, menus de teletransporte) ou gestos livres detectados por câmeras e sensores [60].

5.4.2.1 Navegação Contínua Manual

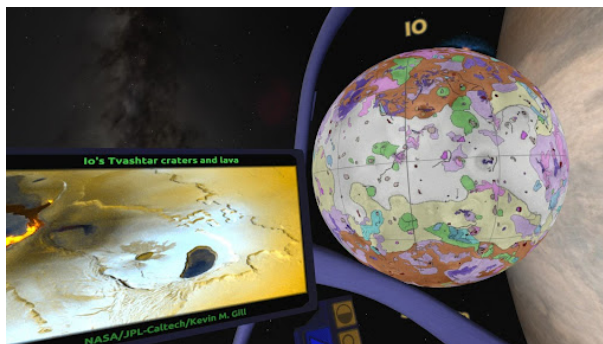
Na navegação contínua manual, o usuário mantém controle total sobre seu deslocamento dentro do ambiente tridimensional, decidindo não apenas o caminho, mas também a velocidade e os pontos de interesse que deseja explorar. Essa abordagem exige interação constante com a interface do dispositivo, seja por gestos na tela, joysticks virtuais, botões de direção ou pela movimentação física do aparelho, para avançar, retroceder ou alterar a perspectiva. A liberdade proporcionada por esse tipo de navegação aumenta significativamente a sensação de presença, pois cada escolha do usuário tem impacto direto na experiência, tornando a exploração mais natural e envolvente do que em trajetórias predefinidas.

No entanto, essa abordagem exige cálculos constantes de colisão, rastreamento e renderização, aumentando a carga sobre o dispositivo e podendo comprometer a fluidez em smartphones e tablets com hardware limitado.

Um exemplo prático dessa abordagem é o **Titans of Space VR** (Figura 41), que permite ao usuário percorrer uma versão em escala reduzida do sistema solar. O jogador controla manualmente a trajetória, escolhendo em quais planetas ou luas se aproximar e em que ordem explorar os corpos celestes. Os movimentos são realizados por toques na tela ou joystick via bluetooth, enquanto a orientação da câmera acompanha a direção do olhar do usuário. Essa liberdade possibilita uma exploração personalizada, em que o usuário decide seu ritmo e percurso, enquanto o sistema mantém a coerência espacial e pedagógica, apresentando informações sobre os planetas de forma contextualizada e progressiva.

5.4.2.2 Navegação Contínua Automática

Na navegação contínua automática, o deslocamento do usuário pelo ambiente virtual ocorre de forma predefinida, com trajetórias controladas pelo sistema. Diferentemente da navegação

Figura 41: Titans of Space VR

Fonte: [E meta.com/experiences/titans-of-space-plus/2359857214088490/](https://www.meta.com/experiences/titans-of-space-plus/2359857214088490/)

manual, o usuário não decide a rota ou a velocidade do movimento, possuindo geralmente controle apenas sobre a rotação da câmera ou o ponto de visão.

Essa abordagem é útil em dispositivos móveis, pois reduz a carga de processamento associada a cálculos de colisão e renderização de trajetórias dinâmicas, mantendo a fluidez e estabilidade do aplicativo mesmo em hardware limitado.

A navegação automática também oferece vantagens em termos de condução narrativa e progressão pedagógica. Como o sistema define a sequência de movimento, é possível garantir que o usuário visualize conteúdos na ordem planejada, evitando que elementos importantes sejam pulados ou mal compreendidos. Transições suaves entre pontos de interesse ajudam a manter a coerência espacial e a sensação de continuidade, reduzindo desconforto visual ou enjôo.

5.4.2.3 Teletransporte

O teletransporte é uma técnica de deslocamento em ambientes virtuais que permite ao usuário se mover instantaneamente entre pontos predeterminados no cenário, em vez de percorrer o espaço de forma contínua. Em dispositivos móveis, essa abordagem reduz a carga de processamento associada à navegação manual, evitando cálculos constantes de colisão e atualização de câmera, e ao mesmo tempo minimiza desconforto visual ou enjoo virtual.

Uma forma comum de teletransporte em ambientes móveis é a seleção de destinos através do gaze, ou ponto de atenção do usuário. Nesse método, o sistema identifica onde o usuário está olhando, destacando visualmente os pontos de interesse disponíveis. Ao fixar o olhar sobre um desses pontos por um período curto, o teletransporte é ativado, movendo a câmera ou o avatar automaticamente para a nova posição. Essa técnica simplifica a interação, dispensando toques ou gestos complexos, e mantém a exploração guiada de forma natural e intuitiva.

No GeoMeta, o teletransporte via gaze (Figura 42) é utilizado para permitir que o estudante explore conteúdos geométricos tridimensionais de forma organizada. Cada ponto de teletransporte corresponde a uma posição estratégica para perto dos principais objetos de

interação. Ao combinar teletransporte com controle de rotação da câmera, o GeoMeta proporciona liberdade de observação detalhada, enquanto mantém a coerência da narrativa e da progressão de aprendizado.

Figura 42: Teletransporte via gaze no GeoMeta



Fonte: Elaborada pelo Autor.

5.5 Técnicas de *Feedback* Multissensorial

As técnicas de *feedback* multissensorial em ambientes imersivos móveis consistem na implementação de mecanismos que fornecem respostas perceptíveis ao usuário em função de suas ações, decisões ou do contexto do ambiente virtual. Esses mecanismos vão além de simples sinais de interação, atuando de forma a orientar, reforçar e complementar a percepção do usuário sobre o espaço, os objetos e os eventos presentes na cena. O principal objetivo é aumentar a consciência situacional e a imersão, garantindo que o usuário compreenda de forma imediata e intuitiva os efeitos de suas interações, a relevância de determinados elementos e a progressão das tarefas ou atividades propostas.

O *feedback* multissensorial utiliza múltiplos canais sensoriais, sendo os sentidos visual e auditivo os mais explorados em dispositivos móveis, devido às limitações físicas desses aparelhos e à ausência de controladores hápticos avançados. A integração coordenada desses canais permite reforçar informações importantes, como indicar ações concluídas, destacar objetos de interesse ou sinalizar eventos relevantes, além de ajudar a manter o engajamento do usuário e reduzir erros de interpretação.

5.5.1 Feedback Visual

O *feedback* visual é, em geral, o canal mais explorado em aplicações imersivas, pois lida diretamente com a representação gráfica dos objetos, das ações e dos estados do sistema. Ele

inclui desde a simples alteração da cor de um botão ao toque, até efeitos visuais complexos como *highlighting* de objetos manipuláveis, projeção de sombras dinâmicas, linhas de guia geométrica, transformações animadas e indicadores de erro.

Um recurso visual avançado cada vez mais utilizado em interfaces imersivas é o *gaze point*, ou ponto de olhar. Essa técnica envolve a identificação da direção do olhar do usuário — seja por rastreamento ocular (em headsets avançados) ou pela centralização da câmera em dispositivos móveis — e a utilização dessa informação para destacar objetos, acionar eventos ou oferecer pistas contextuais. No caso de aplicações móveis sem rastreamento ocular dedicado, o *gaze* é frequentemente simulado pela posição central da tela (ou da câmera), de forma que ao alinhar um objeto com o centro da visão, o sistema possa interpretá-lo como “focado”. Essa abordagem permite implementar interações baseadas em atenção visual, como menus que se expandem ao serem encarados por um tempo mínimo, ou dicas visuais que aparecem quando um objeto é observado por tempo prolongado [61].

Outro aspecto fundamental do *feedback* visual é a inclusão de legendas e audiodescrição que possam ser visualizadas na tela. Isso é especialmente relevante em contextos educacionais, onde a acessibilidade deve ser considerada desde a concepção da aplicação. Em situações onde há falas automatizadas ou *feedback* sonoro, é essencial que essas mensagens sejam acompanhadas por equivalentes textuais, seja como legendas sincronizadas ou como descrições contextuais de ações. Além de garantir acesso para usuários com deficiência auditiva, esse tipo de *feedback* também beneficia ambientes ruidosos ou situações de uso sem fones de ouvido [62].

5.5.2 *Feedback* Auditivo

O *feedback* auditivo complementa o canal visual ao fornecer respostas sonoras que reforçam ou substituem elementos da interação. Em interfaces imersivas móveis, sons discretos como cliques, *pings*, transições suaves e *beeps* podem comunicar que uma ação foi registrada, que um objeto foi selecionado ou que uma transformação foi concluída com sucesso.

Além de sinais sonoros básicos, a utilização de voz sintetizada ou narração contextual pode ser empregada para ampliar a acessibilidade e fornecer orientações detalhadas. Em ambientes educacionais, isso permite que o sistema funcione como um tutor virtual, explicando conceitos geométricos, guiando etapas de construção de figuras ou alertando sobre erros conceituais.

Quando combinada com legendas ou audiodescrição visual (em tela), a narração torna-se ainda mais eficaz, pois atinge simultaneamente diferentes perfis sensoriais de usuários [63].

O *feedback* auditivo também é útil como mecanismo de alerta em segundo plano, especialmente em cenários onde o usuário não está olhando diretamente para a interface. Por exemplo, um som de aviso pode ser reproduzido quando a câmera perde o rastreamento do ambiente físico em uma experiência de RA, indicando que a interação foi temporariamente suspensa. Ou ainda, sons de erro podem informar que determinada ação não é válida naquele contexto (por exemplo, girar uma figura além do limite permitido) [63].

Capítulo 6

Ambientes Imersivos Móveis

Este capítulo tem como objetivo consolidar os achados obtidos durante o desenvolvimento do sistema imersivo móvel e a implementação da adaptabilidade, organizando-os em um conjunto de diretrizes gerais aplicáveis ao design de ambientes imersivos para dispositivos móveis. Diferente dos capítulos anteriores, que detalham processos técnicos específicos, aqui a ênfase está na sistematização de boas práticas que orientam futuras implementações. O capítulo aborda de forma sistemática dimensões essenciais do design e da interação em ambientes imersivos móveis. Entre elas destacam-se: a concepção de interfaces intuitivas, que favoreçam a interação com baixo custo cognitivo; a estruturação espacial do ambiente virtual, que deve manter clareza na disposição dos objetos e coerência nas transições; e, por fim, os recursos de feedback multissensorial, que ampliam a percepção de presença e reforçam a orientação do usuário [23, 61, 62, 63].

6.1 Design de Interface e Usabilidade

Interfaces em ambientes imersivos móveis devem ser projetadas para que o usuário compreenda de forma imediata como agir e como o sistema responderá, sem a necessidade de treinamento extenso ou tentativas repetidas [61]. Isso significa que os elementos interativos — como botões, ícones ou áreas sensíveis ao toque — precisam ser claramente distinguíveis do restante da cena, possuindo tamanho adequado, contraste suficiente e posicionamento lógico dentro da tela. A ausência desses cuidados pode gerar confusão, atrasar a navegação e comprometer a imersão. Além da visibilidade, é fundamental que esses elementos sejam fáceis de interpretar, ou seja, que transmitam sua função de forma intuitiva. Ícones universais, como uma lupa para busca ou uma seta para avançar, reduzem a necessidade de instruções textuais e permitem que usuários com diferentes níveis de familiaridade tecnológica compreendam rapidamente sua utilidade. A consistência visual entre cores, formatos e funções ao longo da aplicação também é crucial, pois estabelece um padrão cognitivo: uma mesma cor ou símbolo sempre representará o mesmo tipo

de ação, evitando erros de navegação e aumentando a confiança do usuário na interação [62].

6.1.1 Interfaces intuitivas e acessíveis

Um aspecto relevante é a implementação de onboarding informativo, que introduz progressivamente o ambiente virtual, apresentando de forma clara quais ações são necessárias para prosseguir nas telas ou ajustes, como mostrado na Figura 43. Esse processo de introdução deve orientar o usuário sobre a lógica de interação sem sobrecarregá-lo com explicações extensas, funcionando como um guia prático que proporciona autonomia já nos primeiros contatos com o sistema.

Figura 43: Melhoria de interface para seleção de modo de jogo no GeoMeta



Fonte: Elaborada pelo Autor

Para reforçar a legibilidade das opções, recomenda-se o uso combinado de texto e ícones informativos (Figura 44). Enquanto a linguagem textual fornece instruções explícitas, os ícones facilitam a compreensão imediata, independentemente do nível de familiaridade do usuário com a aplicação. Essa estratégia reduz a dependência exclusiva da leitura e amplia a acessibilidade, beneficiando usuários com diferentes níveis de letramento digital.

Figura 44: Melhoria de interface para combinação de texto e ícones no GeoMeta



Fonte: Elaborada pelo Autor

Outro ponto consiste em tornar a seleção dos botões clara e inequívoca. Mudanças visuais, como realce, alteração de cor ou animações discretas ao passar o cursor (ou ao aproximar o olhar em

sistemas com detecção de gaze), auxiliam na identificação de qual elemento está ativo, prevenindo interações incorretas. Além disso, a manutenção de padrões de design consistentes em todas as telas assegura continuidade cognitiva, evitando que o usuário precise reaprender comandos em cada nova etapa da experiência [61, 62].

6.1.2 Feedback visual e auditivo para ações do usuário

No campo visual, recomenda-se a utilização de alterações sutis, mas informativas, como realces em torno de objetos interativos, mudanças de cor ao selecionar botões ou transições animadas que indiquem o progresso de estado. Essas variações funcionam como sinais de confirmação, tornando evidente quando um comando foi recebido ou quando um objeto está disponível para manipulação. Além disso, animações discretas, como pulsar levemente um botão ou destacar um objeto com brilho temporário, contribuem para manter a atenção do usuário sem comprometer a imersão [61].

Em complemento, os sinais auditivos contextuais oferecem uma camada adicional de reforço perceptivo. Pequenos efeitos sonoros podem ser aplicados para confirmar seleções, indicar erros, alertar sobre mudanças de estado ou reforçar a conclusão de uma tarefa. Essa integração entre estímulos visuais e auditivos é particularmente útil em dispositivos móveis, onde o espaço de tela limitado pode restringir a quantidade de informação visual apresentada de forma simultânea. Outro ponto relevante é a necessidade de consistência. O mesmo tipo de ação deve gerar respostas semelhantes em todo o sistema, criando um padrão cognitivo que facilite a aprendizagem e reduza a carga mental do usuário [63].

6.1.3 Guias e tutoriais iniciais

Guias e tutoriais iniciais desempenham um papel fundamental na adaptação do usuário a qualquer ambiente, especialmente em sistemas que exploram interações tridimensionais e múltiplos modos de feedback sensorial. A implementação de instruções claras, concisas e contextuais permite que o usuário compreenda rapidamente os mecanismos de navegação, manipulação de objetos e utilização de ferramentas interativas, reduzindo a curva de aprendizado e minimizando erros de operação [61].

Durante o desenvolvimento do sistema imersivo, verificou-se que tutoriais curtos, integrados ao próprio ambiente virtual, são mais eficazes do que instruções externas ou manuais extensos. No caso do sistema desenvolvido, utilizou-se um vídeo tutorial incorporado ao ambiente, que orientava o usuário de forma visual e sequencial sobre as principais interações e funcionalidades. Estratégias complementares, como dicas contextuais acionadas pelo usuário e feedback imediato ao executar ações corretas, reforçam a aprendizagem e promovem a exploração segura do espaço virtual [62].

Além disso, os guias iniciais devem ser projetados de forma adaptável, respeitando diferentes

níveis de familiaridade tecnológica e estilos de aprendizagem. Para usuários novatos, recomenda-se a disponibilização de trajetórias passo a passo e explicações simplificadas, enquanto usuários mais experientes podem acessar versões condensadas ou pular etapas, garantindo flexibilidade sem comprometer a experiência [61, 63].

6.2 Navegação e Estrutura do Ambiente

A navegação e a estrutura do ambiente virtual garantem que o usuário explore o sistema de forma eficiente e com sensação de presença. A experiência acumulada durante o desenvolvimento do sistema imersivo indicou que ambientes organizados de forma lógica facilitam a orientação e que a forma como o usuário se movimenta e percebe o espaço está intimamente ligada aos modos de entrada disponíveis, às preferências sensoriais individuais e à representação pessoal por meio de avatares [6, 60].

A consolidação dos achados indica que a exploração eficiente do espaço virtual requer atenção à integração de modos de entrada, à adaptação a preferências sensoriais e à representação do usuário por meio de avatares. Embora nem todos os modos de entrada ou ajustes sensoriais tenham sido implementados no sistema desenvolvido, o estudo evidencia que a possibilidade de combinar diferentes formas de interação — como toque na tela, gestos multi-touch e sensores de movimento — pode favorecer estilos de navegação variados, acomodando diferentes níveis de familiaridade tecnológica. De forma similar, permitir que os usuários ajustem as intensidades de feedback visual, auditivo ou tátil poderia reduzir a sobrecarga sensorial e aumentar a percepção de presença [64].

A personalização do avatar, ainda que não explorada de forma completa, também se mostra relevante para a autoidentificação e engajamento do usuário, indicando que a representação pessoal no ambiente virtual contribui para tornar a navegação mais intuitiva e as interações mais significativas [65].

6.2.1 Integração de múltiplos modos de entrada

A integração de múltiplos modos de entrada em ambientes imersivos móveis constitui uma diretriz essencial para promover navegabilidade, adaptabilidade e acessibilidade do sistema. A consolidação dos achados obtidos durante o desenvolvimento evidencia que oferecer diferentes formas de interação permite acomodar usuários com distintos estilos de exploração e níveis variados de familiaridade tecnológica, contribuindo para uma experiência mais intuitiva e fluida [64].

Embora nem todos os modos de entrada tenham sido implementados no sistema analisado, a revisão comparativa de aplicações de realidade virtual móvel, apresentada no Quadro 6.1, evidencia que a diversidade de interfaces de controle é uma prática consolidada para aumentar a

flexibilidade da navegação e reduzir barreiras de interação. Essa comparação mostra que sistemas que incorporam múltiplos modos de entrada tendem a proporcionar maior engajamento, facilidade de aprendizado e adaptação a diferentes contextos de uso [64].

Tabela 6.1: Modos de entrada utilizados em diferentes aplicativos de Realidade Virtual móvel.

Aplicativo de RV Móvel	Toque na tela	Gestos multi-touch	Sensores de movimento	Botões físicos do dispositivo	Controle externo	Interação via AR
GeoMeta	X	X	X			X
Pokémon GO	X	X	X			X
Ingress	X	X	X			X
Google Lens	X	X	X			X
Wander			X	X	X	
Tilt Brush			X	X	X	
Rec Room			X	X	X	
Beat Saber			X	X	X	

Fonte: Elaborada pelo Autor

A importância de integrar diferentes modos de entrada reside na capacidade de permitir que cada usuário escolha ou alterne entre formas de interação mais diretas e mais imersivas, conforme suas preferências ou limitações físicas. Além disso, a flexibilidade de entrada contribui para a replicabilidade do sistema em larga escala, pois permite que a mesma aplicação seja utilizada em dispositivos distintos, com diferentes capacidades de controle, sem comprometer a experiência do usuário.

6.2.2 Personalização do Avatar

A personalização do avatar em ambientes imersivos móveis constitui uma diretriz relevante para fortalecer a autoidentificação do usuário com o espaço virtual e promover engajamento durante a interação [66]. A possibilidade de ajustar características visuais do personagem, como gênero, cor da pele, roupas e acessórios, permite que o usuário se reconheça ou se projete no ambiente tridimensional, intensificando a sensação de presença e favorecendo uma experiência mais envolvente e motivadora.

A utilização de avatares, como a apresentada na Figura 13, mostrada no Capítulo 5.4.1.1 (Customização do Avatar), pode auxiliar na visualização de boas práticas de personalização e na

compreensão de como avatares integrados harmonicamente ao ambiente contribuem para uma experiência imersiva consistente e agradável.

Outros elementos importantes a considerar incluem a autonomia na personalização, permitindo que o usuário faça escolhas significativas, e o equilíbrio entre detalhamento e simplicidade do avatar, de modo a não sobrecarregar o sistema ou comprometer a performance em dispositivos móveis. A presença de um avatar adaptável também pode atuar como referência espacial para a navegação, auxiliando o usuário a se localizar e a compreender melhor sua posição dentro do ambiente.

6.3 Suporte Multissensorial e Acessibilidade

O suporte multissensorial e a acessibilidade influenciam diretamente a percepção de presença, a compreensão do espaço e a eficiência na execução de tarefas. A adoção de recursos que ampliem a percepção sensorial, combinando estímulos visuais, auditivos e táteis, permite que usuários com diferentes níveis de habilidade e estilos de aprendizagem interajam de forma mais natural e confortável com o ambiente virtual.

A organização de sinais e indicações dentro do cenário, a utilização de elementos contextuais que orientem o usuário e a implementação de feedback dinâmico contribuem para que a navegação seja intuitiva, potencializando a interação com objetos e elementos relevantes. A atenção a cores, destaques, animações e efeitos sonoros integra a experiência sensorial, enquanto mecanismos adicionais de suporte, como legendas e audiodescrição, promovem acessibilidade e inclusão, ampliando o alcance do ambiente a diferentes perfis de usuário.

Nos próximos tópicos, serão detalhadas estratégias para sinalização de objetos interativos, uso de marcadores contextuais, recursos de destaque visual e auditivo, e mecanismos de acessibilidade que reforcem a orientação do usuário e a percepção de presença, consolidando práticas aplicáveis a sistemas imersivos móveis escaláveis e adaptáveis.

6.3.1 Sinalização de objetos interativos

A sinalização de objetos interativos ajuda a guiar a atenção do usuário e facilitar a exploração de ambientes imersivos móveis. Em sistemas tridimensionais, a identificação clara de elementos que podem ser manipulados ou ativados reduz a carga cognitiva e promove uma navegação mais fluida, garantindo que o usuário compreenda rapidamente onde e como interagir.

A importância dessa prática reside tanto na usabilidade quanto na percepção de presença.

Objetos pouco perceptíveis ou sem indicação de interatividade podem gerar frustração ou inibição da exploração, enquanto sinalizações visuais consistentes reforçam a compreensão do espaço e aumentam o engajamento do usuário.

Entre as estratégias recomendadas, destacam-se o uso de destaques visuais, como contornos,

brilho ou animações sutis que indicam que um objeto é interativo, como mostrado na Figura 45; e alterações de cor que sinalizam o estado ativo ou disponível de um elemento. Adicionalmente, é possível combinar esses recursos com feedback auditivo, como sons discretos quando o usuário se aproxima de um objeto interativo, reforçando a percepção sensorial e a orientação espacial.

Figura 45: Sinalização de objetos interativos



Fonte: Elaborada pelo Autor

6.3.2 Marcadores para contextualização

O uso de marcadores orienta o usuário na compreensão do ambiente virtual. Marcadores, sejam visuais, auditivos ou simbólicos, funcionam como referências que ajudam o usuário a localizar-se, a identificar áreas de interesse e a compreender a relação entre diferentes elementos do cenário.

A importância desses recursos está em facilitar a exploração eficiente e reduzir a carga cognitiva. Em ambientes imersivos complexos, a ausência de referências claras pode gerar desorientação, diminuição da percepção de presença e dificuldades na execução de tarefas. Por outro lado, a presença de marcadores bem posicionados permite que o usuário navegue de forma mais segura, intuitiva e engajada.

Entre as estratégias recomendadas estão o uso de marcadores visuais discretos, como ícones ou padrões de destaque no chão ou em paredes, que indicam caminhos ou objetos relevantes; marcadores contextuais animados, que chamam a atenção para ações específicas ou mudanças de estado no ambiente; e marcadores auditivos, como sinais sonoros que orientam ou alertam o usuário sobre eventos ou áreas importantes. A combinação de diferentes tipos de marcadores reforça a percepção sensorial e auxilia na integração do usuário ao espaço, promovendo uma experiência mais coesa e imersiva.

No caso do GeoMeta, foram utilizadas setas visuais como marcadores (Figura 46), indicando caminhos e direcionando a atenção do usuário para objetos e áreas de interesse dentro do ambiente. Essa abordagem é simples, intuitiva e facilmente reconhecível, contribuindo para a orientação espacial sem sobrecarregar visualmente o cenário.

Figura 46: Setas virtuais no GeoMeta



Fonte: Elaborada pelo Autor

6.3.3 Legendas e audiodescrição

A inclusão de legendas e audiodescrição em ambientes imersivos móveis constitui uma diretriz essencial para garantir a acessibilidade e a compreensão das informações apresentadas. Esses recursos permitem que usuários com diferentes capacidades sensoriais, como deficiências auditivas ou visuais, participem plenamente das experiências virtuais, promovendo equidade e inclusão.

As legendas oferecem suporte textual para diálogos, instruções ou efeitos sonoros relevantes, facilitando a compreensão de conteúdos auditivos e reforçando a orientação do usuário dentro do ambiente (Figura 47). Já a audiodescrição fornece uma descrição verbal de elementos visuais importantes, permitindo que usuários com baixa visão percebam a disposição dos objetos, eventos e interações essenciais à experiência.

Figura 47: Legendas virtuais



Fonte: Elaborada pelo Autor

As legendas podem se apresentar de formas variadas, dependendo do contexto e da necessidade do usuário. Entre as alternativas mais comuns estão: caixas de texto fixas, que garantem

legibilidade constante; textos sem fundo, que se integram ao cenário sem obstruir elementos visuais; legendas animadas, que aparecem gradualmente ou destacam palavras-chave; e apresentação frase a frase, que facilita o acompanhamento de diálogos ou instruções mais longas, evitando sobrecarga de informação. Cada forma de exibição deve ser escolhida considerando a clareza, a visibilidade e a harmonização com o ambiente, garantindo que a informação seja acessível sem comprometer a imersão.

Capítulo 7

Considerações Finais

O presente trabalho teve como objetivo investigar, projetar e validar um ambiente imersivo móvel com suporte a mecanismos de adaptabilidade, tomando como estudo de caso o aplicativo GeoMeta. A partir do desenvolvimento do sistema e das análises realizadas, foi possível consolidar um conjunto de diretrizes voltadas ao design de ambientes imersivos móveis, que se destacam não apenas como um resumo das etapas técnicas implementadas, mas como uma sistematização dos achados, identificando o que funcionou de forma eficaz, o que deve ser replicado em futuras aplicações e quais limitações se mostraram relevantes ao longo do processo. Um primeiro achado refere-se ao ajuste de preferências sensoriais, que se mostrou determinante para a sensação de presença e para a redução da sobrecarga cognitiva. Ao permitir a adaptação de elementos visuais, auditivos e táteis, ampliou-se a acessibilidade do sistema e demonstrou-se a importância da customização em ambientes de aprendizagem imersiva [66, 23].

Outro aspecto consolidado diz respeito à integração de múltiplos modos de entrada. A implementação de múltiplas formas de interação demonstrou ser fundamental para acomodar diferentes perfis de usuários e estilos de interação. Essa flexibilidade reduziu barreiras de usabilidade e indicou que a pluralidade de opções de entrada é essencial para aumentar a robustez de sistemas móveis imersivos, sobretudo quando se projeta sua escalabilidade para contextos mais amplos [64, 27].

A personalização do avatar também foi identificada como um mecanismo central para o engajamento e a autoidentificação. A experiência de permitir que o usuário ajuste características do avatar reforçou a sensação de pertencimento ao ambiente virtual e evidenciou a importância da coerência estética entre personagem e cenário [66, 6].

Em relação à estrutura espacial e à navegação, observou-se que ambientes logicamente organizados e apoiados em recursos de sinalização — como setas e marcadores visuais — contribuem para reduzir a desorientação e aumentar a fluidez da exploração. Essa constatação destaca a importância de se adotar princípios de clareza espacial e orientação contextual como parte de diretrizes de design que possam ser replicadas em sistemas voltados a diferentes finalidades [67, 65].

De maneira transversal a todos esses aspectos, a pesquisa destacou a relevância de uma arquitetura adaptável como condição para a viabilidade em larga escala. A adaptabilidade mostrou-se indispensável para que sistemas imersivos móveis possam ser ajustados a diferentes dispositivos, condições de uso e perfis de usuários, garantindo escalabilidade e potencial de replicação. Assim, a principal contribuição deste trabalho está na demonstração de que não basta projetar um ambiente imersivo funcional: é necessário consolidar boas práticas de adaptabilidade que viabilizem sua aplicação em cenários reais e diversos [47, 19].

7.1 Contribuições para a Área de Computação Aplicada

As contribuições desta pesquisa para a área de computação aplicada concentram-se na consolidação de princípios técnicos, arquiteturais e metodológicos que visam ampliar a eficiência, a acessibilidade e a escalabilidade de sistemas imersivos móveis. O estudo não se limitou à implementação do GeoMeta como caso de uso, mas buscou extrair diretrizes generalizáveis que possam orientar o desenvolvimento de aplicações semelhantes em diferentes domínios [2, 1].

Uma das principais contribuições consiste na integração de requisitos de acessibilidade diretamente ao processo de projeto, e não como elementos adicionados posteriormente. A incorporação de legendas, recursos de sinalização e feedback multimodal foi tratada como parte da arquitetura, o que representa um avanço metodológico: ao invés de pensar a acessibilidade como funcionalidade complementar, este trabalho a posiciona como princípio estruturante da engenharia de sistemas imersivos móveis [62, 63].

Além disso, a pesquisa contribui para a área ao demonstrar a importância da coerência estética e semântica entre os diferentes elementos de um ambiente virtual. Essa perspectiva vai além do design visual: envolve decisões de engenharia relacionadas à consistência de modelos, à padronização de escalas e à uniformidade de representações. O resultado é uma diretriz que pode ser aplicada tanto em contextos educacionais quanto em simulações técnicas, onde a clareza e a naturalidade das interações são determinantes [19, 60].

Do ponto de vista da engenharia de software, este trabalho oferece uma contribuição no que diz respeito ao balanceamento entre desempenho e imersão em dispositivos móveis. A análise dos limites de processamento gráfico e de memória orientou a definição de práticas que preservam a experiência do usuário sem comprometer a viabilidade em equipamentos de baixo custo. Essa diretriz é particularmente valiosa para a computação aplicada, pois amplia o alcance de sistemas imersivos a contextos onde recursos computacionais são limitados [13, 49, 6].

Por fim, destaca-se a contribuição metodológica da produção de diretrizes generalizáveis a partir de um estudo de caso concreto. Ao sistematizar os achados e apresentá-los como princípios replicáveis, a pesquisa reforça a importância de transformar experiências localizadas em conhecimento de engenharia com potencial de transferência. Essa abordagem fortalece o papel

da computação aplicada como área que conecta teoria e prática, oferecendo caminhos claros para inovação tecnológica em escala [18, 20].

7.2 Limitações do Estudo

O desenvolvimento de ambientes imersivos tridimensionais em dispositivos móveis apresenta um conjunto de limitações técnicas que afetam diretamente a qualidade da experiência interativa e a viabilidade de implementação de soluções mais complexas. Um dos principais entraves é a limitação dos recursos computacionais disponíveis nesses dispositivos, como a capacidade reduzida da unidade de processamento gráfico e a quantidade restrita de memória disponível para operações em tempo real. Tais limitações impõem barreiras ao uso de malhas com alta densidade de polígonos, texturas com elevada resolução, efeitos de iluminação dinâmica e shaders complexos, que são comuns em experiências desenvolvidas para computadores de alto desempenho ou headsets dedicados à RV [19, 49].

Além disso, a ausência de controladores específicos para interação tridimensional em smartphones obriga a adaptação de mecanismos de entrada. A interação se dá majoritariamente por meio de sensores embarcados, como giroscópio, acelerômetro e câmera, além da própria tela sensível ao toque. Esses sensores, embora úteis, não oferecem a mesma precisão e liberdade de movimento que dispositivos com seis graus de liberdade normalmente presentes em sistemas imersivos avançados. A simulação de interações espaciais precisas com base em sensores inerciais é limitada pela qualidade do hardware embarcado e pela ausência de referência espacial absoluta, comprometendo a naturalidade da navegação e a fidelidade da manipulação de objetos tridimensionais [33, 6].

A tela bidimensional dos dispositivos móveis também representa uma restrição perceptual importante, pois limita a profundidade de campo e reduz a intuição na manipulação de objetos tridimensionais, exigindo adaptações na interface e no design das interações para mitigar a sobrecarga cognitiva. Do ponto de vista da RA, a qualidade do rastreamento espacial é diretamente afetada por fatores ambientais como baixa iluminação, superfícies homogêneas ou movimentos rápidos. Em tais condições, o sistema pode apresentar falhas no registro espacial ou na ancoragem de objetos virtuais, prejudicando a imersão e a continuidade da experiência. Ainda que bibliotecas como o Vuforia ofereçam algoritmos robustos de visão computacional baseados em câmera RGB, a ausência de sensores de profundidade, como o LiDAR, limita a capacidade do sistema em realizar oclusões realistas e mapear com precisão a geometria do ambiente físico [34, 40].

Outra limitação significativa diz respeito à diversidade de dispositivos móveis existentes no mercado. As diferenças entre sistemas operacionais, tamanhos de tela, resoluções, capacidades gráficas e versões de hardware dificultam a padronização do desempenho e da usabilidade. Projetar um ambiente imersivo que se comporte de maneira consistente em diferentes

configurações é um desafio técnico considerável, exigindo estratégias de escalabilidade, testes exaustivos e adaptabilidade dinâmica de recursos gráficos, interfaces e interações. Tais práticas ainda enfrentam entraves devido à falta de ferramentas automatizadas de validação multiespaço de hardware, tornando o processo altamente dependente de testes manuais [47, 64].

7.3 Trabalhos Futuros

A presente dissertação concentrou-se na proposição e implementação de uma arquitetura de ambiente virtual adaptável para dispositivos móveis, com ênfase na modelagem geométrica, otimização gráfica e interação tridimensional. Apesar dos resultados obtidos, diversas oportunidades de continuidade e aprofundamento foram identificadas.

Um primeiro eixo de trabalhos futuros refere-se à ampliação da adaptabilidade para diferentes dispositivos de entrada e periféricos, a exemplo do MiritiBoard VR. A investigação mostrou que a preferência dos usuários nem sempre coincide com os sistemas que apresentam maior desempenho técnico, indicando que a engenharia de interação deve considerar não apenas métricas de usabilidade, mas também aspectos de conforto, acessibilidade e personalização. Nesse sentido, recomenda-se explorar a integração com controladores externos, sensores vestíveis e dispositivos multissensoriais, avaliando seu impacto na experiência imersiva e no desempenho da aplicação [65, 27].

Outro caminho promissor consiste na incorporação de técnicas de Inteligência Artificial para expandir a adaptabilidade dinâmica do sistema. Estudos preliminares com o GeoMeta evidenciaram que a IA pode contribuir para geração automática de desafios, personalização de cenários e adequação de níveis de dificuldade, resultando em experiências mais engajantes e responsivas ao perfil do usuário. Investigações futuras podem integrar módulos de aprendizado de máquina para ajuste em tempo real da complexidade gráfica, da lógica de interação e da seleção de conteúdos geométricos [17, 26].

Por fim, recomenda-se a investigação de novos paradigmas de interação em realidade mista, com ênfase na fusão de objetos físicos e virtuais em tempo real. Essa linha pode aprofundar a integração entre o espaço físico do usuário e o ambiente digital, ampliando a naturalidade da navegação e das manipulações geométricas [14, 29].

7.4 Desdobramentos da Dissertação

A presente dissertação resultou em um conjunto de publicações científicas e atividades acadêmicas que contribuíram para a disseminação e aprofundamento do tema *ambientes virtuais adaptáveis em dispositivos móveis*. Tais desdobramentos podem ser classificados em produções diretamente relacionadas à pesquisa aqui apresentada e produções indiretas, decorrentes do processo formativo no mestrado.

7.4.1 Publicações diretamente relacionadas à dissertação

- **GeoModel: Technology and Innovation for a Diverse and Interactive Geometric Education** ([67]): O trabalho aborda como a educação matemática, especialmente o ensino de geometria, enfrenta dificuldades históricas relacionadas à falta de interatividade, engajamento estudantil e recursos didáticos de qualidade. Propõe a integração de tecnologias emergentes, como RA e IA, como ferramentas capazes de promover experiências de aprendizado mais envolventes, personalizadas e eficazes, contribuindo para a inovação pedagógica e para o aumento do interesse e da compreensão dos alunos em geometria.
- **Perception of Guardians on the Use of Artificial Intelligence in Educational Geometry Games for Children** ([68], artigo aceito): O trabalho investiga como a aplicação de IA em jogos educacionais de geometria é percebida pelos *guardians*, analisando aspectos como eficácia pedagógica, engajamento infantil, segurança e confiabilidade da tecnologia. O estudo fornece insights sobre a aceitação e expectativas dos responsáveis, contribuindo para o desenvolvimento de ferramentas educacionais mais adequadas, interativas e adaptadas às necessidades das crianças.
- **Realidade Virtual e Aumentada no Ensino de Geometria: Um Estudo de Caso com GeoMeta** ([6]): Estudo de caso que apresenta o GeoMeta, destacando a utilização de RV e RA para o ensino de geometria, os resultados obtidos em sala de aula e o impacto no aprendizado dos alunos. Fornece dados sobre compreensão conceitual, engajamento e progressão dos estudantes.
- **Integração de Periféricos no MiritiBoard VR: Análise de Usabilidade e Preferências** ([1]): Aborda a aplicação do GeoMeta em dispositivos móveis, discutindo interação do usuário, usabilidade e resultados em contextos educacionais, incluindo análises de interfaces e preferências de estudantes.
- **GeoMeta: Realidade Virtual e Aumentada no Ensino de Geometria** ([6]): O trabalho apresenta o desenvolvimento e implementação do GeoMeta, destacando como a aplicação cria experiências imersivas e interativas que auxiliam na compreensão de conceitos geométricos, enfrentando desafios tradicionais do ensino, como a abstração dos conteúdos e o baixo engajamento dos alunos. Além disso, o estudo avalia o impacto pedagógico da ferramenta em ambientes virtuais de sala de aula, evidenciando melhorias na aprendizagem e no progresso dos estudantes.

7.4.2 Produções indiretas (derivadas do contexto do mestrado)

- 2022 - Atual: Desenvolvimento de um Protótipo de Aplicativo Móvel e Avaliação de sua Usabilidade para Jogos Educativos Adaptados em Libras.

- 2022 - Atual: Curso para Desenvolvimento de Games 2D em Unity.
- SERUFFO, M. C. R.; ESTEVAM, L. C.: Curso de Excel Básico e Intermediário. 2024.
- ESTEVAM, L. C.; SERUFFO, M. C. R.: Curso Ferramentas Para Elaboração de E-book Interativo. 2023.
- SERUFFO, M. C. R.; ESTEVAM, L. C.: Curso de Ferramenta para Auxílio na Elaboração de Documentos Jurídicos. 2023.
- ESTEVAM, L. C.; SERUFFO, M. C. R.: Curso de Elaboração de Material Didático para EAD. 2022.
- **Innovation and Social Impact in Software Engineering: A Practical Experience From the Fábrica de Software ([69]):** O estudo apresenta como a Fábrica de Software oferece um ambiente de aprendizagem prática para estudantes universitários, combinando metodologias ágeis e estruturadas, com apoio frequente do corpo docente, visando o desenvolvimento profissional dos participantes. Além do aspecto acadêmico, a iniciativa também destaca seu impacto social e comunitário.
- **Libras Tech: Software educacional para o ensino gamificado da informática adaptado a libras ([70]):** Apresenta o desenvolvimento de um software educativo que integra gamificação e acessibilidade em Libras, permitindo que estudantes surdos aprendam conceitos de informática de forma interativa e envolvente.
- **Substantivando: An Educational Game for Teaching Nouns in Elementary School ([71]):** Apresenta o desenvolvimento e validação de um jogo educacional que integra quizzes, sistema de pontuação e feedback imediato, com o objetivo de tornar o aprendizado mais lúdico, motivador e eficaz.
- **A Criação de um Jogo para Auxiliar Surdos na Escrita em Português ([72]):** Apresenta um aplicativo educacional desenvolvido em Android usando Unity3D, permitindo aos alunos surdos visualizar representações gestuais animadas de palavras e construir frases em português de forma interativa.
- **Linsin App: Promovendo a Acessibilidade por Meio de Jogos Interativos na Educação ([73]):** Apresenta uma ferramenta educativa acessível, integrando componentes teóricos e práticos do ensino de informática, promovendo inclusão e acessibilidade no aprendizado.
- **Melldia: Aprimorando o Controle do Diabetes Mellitus por Meio de um Aplicativo Móvel ([74]):** Apresenta uma ferramenta digital desenvolvida em Unity3D que apoia endocrinologistas e pacientes no gerenciamento do DM, permitindo registrar hábitos alimentares e níveis glicêmicos de forma prática e offline.

- **Desenvolvimento de um Aplicativo Gamificado para Aprimorar o Estudo dos Substantivos no Ensino Fundamental I ([75]):** Apresenta o desenvolvimento de um jogo educacional que integra quizzes, sistemas de pontuação, rankings, feedback imediato e tutoriais, com o objetivo de tornar o aprendizado dos substantivos mais lúdico, motivador e eficaz.

Referências Bibliográficas

- [1] P. N. de Oliveira, “Criação de um aplicativo de realidade aumentada para o ensino da geometria,” Ph.D. dissertation, [sn], 2019.
- [2] S. M. P. de Azevedo Pedrosa and M. A. Zappala-Guimarães, “Realidade virtual e realidade aumentada: refletindo sobre usos e benefícios na educação,” *Revista Educação e Cultura Contemporânea*, vol. 16, no. 43, pp. 123–146, 2019.
- [3] V. F. Bartholo, M. A. Amaral, and M. I. Cagnin, “Uma contribuição para a adaptabilidade de ambientes virtuais de aprendizagem para dispositivos móveis,” *Revista Brasileira de informática na educação*, vol. 17, no. 02, p. 36, 2009.
- [4] C. Cruz-Neira, J. Leigh, M. Papka, C. Barnes, S. M. Cohen, S. Das, R. Engelmann, R. Hudson, T. Roy, L. Siegel *et al.*, “Scientists in wonderland: A report on visualization applications in the cave virtual reality environment,” in *Proceedings of 1993 IEEE research properties in virtual reality symposium*. IEEE, 1993, pp. 59–66.
- [5] M. W. S. Ribeiro and E. R. Zorzal, “Realidade virtual e aumentada: Aplicações e tendências,” *XIII Simpósio de Realidade Virtual e Aumentada, Uberlândia-MG-Brasil*, vol. 15, 2011.
- [6] F. Herpich, F. B. Nunes, G. Petri, L. M. R. Tarouco *et al.*, “How mobile augmented reality is applied in education? a systematic literature review,” *Creative Education*, vol. 10, no. 07, p. 1589, 2019.
- [7] V. M. R. da Cunha, “Remoção hierárquica de geometria por oclusão em simulações em tempo real,” Master’s thesis, Instituto Politecnico do Porto (Portugal), 2009.
- [8] F. A. Fernandes, “Visar3d-dynamic: uma abordagem para apoiar a compreensão do comportamento dinâmico de software por meio de realidade virtual,” 2017.
- [9] V. C. Feijó, B. S. Gonçalves, and L. S. R. Gomez, “Heurística para avaliação de usabilidade em interfaces de aplicativos smartphones: utilidade, produtividade e imersão,” *Design & Tecnologia*, vol. 3, no. 6, pp. 33–42, 2013.

- [10] D. A. Lobo and R. Barwaldt, “Práticas pedagógicas inovadoras e tecnologias digitais imersivas na educação infantil,” *Periferia*, vol. 13, no. 3, pp. 230–256, 2021.
- [11] D. Chatzopoulos, C. Bermejo, Z. Huang, and P. Hui, “Mobile augmented reality survey: From where we are to where we go,” *Ieee Access*, vol. 5, pp. 6917–6950, 2017.
- [12] R. T. Azuma, “A survey of augmented reality,” *Presence: teleoperators & virtual environments*, vol. 6, no. 4, pp. 355–385, 1997.
- [13] T. Akenine-Mo, E. Haines, N. Hoffman *et al.*, “Real-time rendering. ak peters,” 2018.
- [14] M. Billinghurst, A. Clark, G. Lee *et al.*, “A survey of augmented reality,” *Foundations and Trends® in Human–Computer Interaction*, vol. 8, no. 2-3, pp. 73–272, 2015.
- [15] C. G. Ferreira, “A contribuição da realidade virtual para o ensino e a aprendizagem de geometria espacial,” 2023.
- [16] A. S. L. Figueiredo, “Realidade virtual no ensino e na aprendizagem de geometria descritiva,” Master’s thesis, Universidade do Porto (Portugal), 2007.
- [17] J. Cao, K.-Y. Lam, L.-H. Lee, X. Liu, P. Hui, and X. Su, “Mobile augmented reality: User interfaces, frameworks, and intelligence,” *ACM Computing Surveys*, vol. 55, no. 9, pp. 1–36, 2023.
- [18] G. Papagiannakis, G. Singh, and N. Magnenat-Thalmann, “A survey of mobile and wireless technologies for augmented reality systems,” *Computer Animation and Virtual Worlds*, vol. 19, no. 1, pp. 3–22, 2008.
- [19] J. Jerald, *The VR book: Human-centered design for virtual reality*. Morgan & Claypool, 2015.
- [20] C. Dede, “Immersive interfaces for engagement and learning,” *science*, vol. 323, no. 5910, pp. 66–69, 2009.
- [21] M. Slater, S. Wilbur *et al.*, “A framework for immersive virtual environments (five): Speculations on the role of presence in virtual environments,” *Presence: Teleoperators and virtual environments*, vol. 6, no. 6, pp. 603–616, 1997.
- [22] G. C. Burdea and P. Coiffet, *Virtual reality technology*. John Wiley & Sons, 2003.
- [23] J. Mütterlein, “The three pillars of virtual reality? investigating the roles of immersion, presence, and interactivity,” 2018.
- [24] J. Lanier, *Who owns the future?* Simon and Schuster, 2014.

- [25] C. Kirner and T. G. Kirner, “Evolução e tendências da realidade virtual e da realidade aumentada,” *Realidade Virtual e Aumentada: Aplicações e Tendências. Cap*, vol. 1, pp. 10–25, 2011.
- [26] Y. Gao and C. Spence, “Enhancing presence, immersion, and interaction in multisensory experiences through touch and haptic feedback,” in *Virtual Worlds*, vol. 4, no. 1. MDPI, 2025, p. 3.
- [27] A. Menin, R. Torchelsen, and L. Nedel, “An analysis of vr technology used in immersive simulations with a serious game perspective,” *IEEE computer graphics and applications*, vol. 38, no. 2, pp. 57–73, 2018.
- [28] J. Wallace and A. Valdivia, “A high-performance 5g/6g infrastructure for augmented, virtual, and extended reality,” in *2021 International Conference on Computational Science and Computational Intelligence (CSCI)*. IEEE, 2021, pp. 1291–1296.
- [29] P. Milgram and F. Kishino, “A taxonomy of mixed reality visual displays,” *IEICE TRANSACTIONS on Information and Systems*, vol. 77, no. 12, pp. 1321–1329, 1994.
- [30] P. C. Thomas and W. David, “Augmented reality: An application of heads-up display technology to manual manufacturing processes,” in *Hawaii international conference on system sciences*, vol. 2. ACM SIGCHI Bulletin, 1992, pp. 659–669.
- [31] I. E. Sutherland *et al.*, “The ultimate display,” in *Proceedings of the IFIP Congress*, vol. 2, no. 506-508. New York, 1965, pp. 506–508.
- [32] C. Sandor, M. Fuchs, A. Cassinelli, H. Li, R. Newcombe, G. Yamamoto, and S. Feiner, “Breaking the barriers to true augmented reality,” *arXiv preprint arXiv:1512.05471*, 2015.
- [33] H. Durrant-Whyte and T. Bailey, “Simultaneous localization and mapping: part i,” *IEEE robotics & automation magazine*, vol. 13, no. 2, pp. 99–110, 2006.
- [34] L. Chen, C. Cao, F. De la Torre, J. Saragih, C. Xu, and Y. Sheikh, “High-fidelity face tracking for ar/vr via deep lighting adaptation,” in *Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition*, 2021, pp. 13 059–13 069.
- [35] W. d. S. O. Júnior, L. da Conceição Estevam, B. C. da Silva, J. V. Silva, M. C. M. V. Reis, and M. C. da Rocha Seruffo, “Geometa: Realidade virtual e aumentada no ensino de geometria,” in *Workshop sobre Interação e Pesquisa de Usuários no Desenvolvimento de Jogos (WIPlay)*. SBC, 2023, pp. 43–53.
- [36] —, “Geometa: Realidade virtual e aumentada no ensino de geometria,” in *Workshop sobre Interação e Pesquisa de Usuários no Desenvolvimento de Jogos (WIPlay)*. SBC, 2023, pp. 43–53.

- [37] Z. Abes, N. Fairchild, S. Lin, M. Wahba, K. Xiao, and S. S. Fisher, “The immersive archive: Archival strategies for the sensorama & sutherland hmd,” in *2025 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and eXtended and Virtual Reality (AIxVR)*. IEEE, 2025, pp. 307–312.
- [38] K. N. Tarchanidis and J. N. Lygouras, “Data glove with a force sensor,” *IEEE Transactions on Instrumentation and measurement*, vol. 52, no. 3, pp. 984–989, 2003.
- [39] P. Lang, A. Kusej, A. Pinz, and G. Brasseur, “Inertial tracking for mobile augmented reality,” in *IMTC/2002. Proceedings of the 19th IEEE instrumentation and measurement technology conference (IEEE Cat. No. 00CH37276)*, vol. 2. IEEE, 2002, pp. 1583–1587.
- [40] J. Y. Oh, J. H. Park, and J.-M. Park, “Virtual object manipulation by combining touch and head interactions for mobile augmented reality,” *Applied sciences*, vol. 9, no. 14, p. 2933, 2019.
- [41] B. Kitchenham *et al.*, “Procedures for performing systematic reviews,” *Keele, UK, Keele University*, vol. 33, no. 2004, pp. 1–26, 2004.
- [42] C. Ware, *Information visualization: perception for design*. Morgan Kaufmann, 2019.
- [43] J. F. Hughes, *Computer graphics: principles and practice*. Pearson Education, 2014.
- [44] I. E. Sutherland, “Sketch pad a man-machine graphical communication system,” in *Proceedings of the SHARE design automation workshop*, 1964, pp. 6–329.
- [45] R. F. d. C. Carreira, “Determinação de fatores de sombreamento com recurso a modelos 3d,” Ph.D. dissertation, 2017.
- [46] N. K. Quintino, I. de Souza Sierra, A. Catapan, G. C. D. Lopes, and M. F. Catapan, “Diretrizes para desenvolvimento de experiências imersivas em realidade virtual,” *Caderno Pedagógico*, vol. 21, no. 13, pp. e11 374–e11 374, 2024.
- [47] X. Gao, K. Wu, and Z. Pan, “Low-poly mesh generation for building models,” in *ACM SIGGRAPH 2022 Conference Proceedings*, 2022, pp. 1–9.
- [48] C. Ware, *Visual thinking for design*. Elsevier, 2010.
- [49] J. D. Foley, *Computer graphics: principles and practice*. Addison-Wesley Professional, 1996, vol. 12110.
- [50] M. Hancock, S. Carpendale, and A. Cockburn, “Shallow-depth 3d interaction: design and evaluation of one-, two-and three-touch techniques,” in *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*, 2007, pp. 1147–1156.

- [51] J. O. Wobbrock, A. D. Wilson, and Y. Li, “Gestures without libraries, toolkits or training: a \$1 recognizer for user interface prototypes,” in *Proceedings of the 20th annual ACM symposium on User interface software and technology*, 2007, pp. 159–168.
- [52] L.-P. Bergé, M. Serrano, G. Perelman, and E. Dubois, “Exploring smartphone-based interaction with overview+ detail interfaces on 3d public displays,” in *Proceedings of the 16th international conference on Human-computer interaction with mobile devices & services*, 2014, pp. 125–134.
- [53] J. Hertel, S. Karaosmanoglu, S. Schmidt, J. Bräker, M. Semmann, and F. Steinicke, “A taxonomy of interaction techniques for immersive augmented reality based on an iterative literature review,” in *2021 IEEE international symposium on mixed and augmented reality (ISMAR)*. IEEE, 2021, pp. 431–440.
- [54] S. Srinivasan, Z. Fang, R. Iyer, S. Zhang, M. Espig, D. Newell, D. Cermak, Y. Wu, I. Kozintsev, and H. Haussecker, “Performance characterization and optimization of mobile augmented reality on handheld platforms,” in *2009 IEEE International Symposium on Workload Characterization (IISWC)*. IEEE, 2009, pp. 128–137.
- [55] C. Harrison, S. Ramamurthy, and S. E. Hudson, “On-body interaction: armed and dangerous,” in *Proceedings of the Sixth International Conference on Tangible, Embedded and Embodied Interaction*, 2012, pp. 69–76.
- [56] K. Z. Gajos, J. O. Wobbrock, and D. S. Weld, “Improving the performance of motor-impaired users with automatically-generated, ability-based interfaces,” in *Proceedings of the SIGCHI conference on Human Factors in Computing Systems*, 2008, pp. 1257–1266.
- [57] P. Piotrowski and A. Nowosielski, “Gaze-based interaction for vr environments,” in *International Conference on Image Processing and Communications*. Springer, 2019, pp. 41–48.
- [58] J. J. LaViola Jr, E. Kruijff, R. P. McMahan, D. Bowman, and I. P. Poupyrev, *3D user interfaces: theory and practice*. Addison-Wesley Professional, 2017.
- [59] I. Herbst, A.-K. Braun, R. McCall, and W. Broll, “Timewarp: interactive time travel with a mobile mixed reality game,” in *Proceedings of the 10th international conference on Human computer interaction with mobile devices and services*, 2008, pp. 235–244.
- [60] M. R. Mine, “Virtual environment interaction techniques,” *UNC Chapel Hill CS Dept*, 1995.

- [61] C. Spina, “Wcag 2.1 and the current state of web accessibility in libraries,” *Weave: Journal of Library User Experience*, vol. 2, no. 2, 2019.
- [62] S. A. Brewster and L. M. Brown, “Tactons: structured tactile messages for non-visual information display,” 2004.
- [63] G. Kramer, “An introduction to auditory display, in auditory display: Sonification, audification and auditory interfaces,” *SFI Studies in the Sciences of Complexity*, 1994.
- [64] W. d. S. O. Júnior, J. F. M. de Carvalho, L. da Conceição Estevam, M. C. da Rocha Seruffo, A. V. N. Alves, L. V. L. Pinto, D. L. Cardoso, and P. A. I. Pontes, “Integração de periféricos no miritiboard vr: Análise de usabilidade e preferências,” in *Workshop sobre Interação e Pesquisa de Usuários no Desenvolvimento de Jogos (WIPlay)*. SBC, 2024, pp. 25–36.
- [65] —, “Integração de periféricos no miritiboard vr: Análise de usabilidade e preferências,” in *Workshop sobre Interação e Pesquisa de Usuários no Desenvolvimento de Jogos (WIPlay)*. SBC, 2024, pp. 25–36.
- [66] M. Slater, “Immersion and the illusion of presence in virtual reality,” *British journal of psychology*, vol. 109, no. 3, pp. 431–433, 2018.
- [67] F. F. Dimas, V. H. Barbosa Melo, L. d. C. Estevam, F. T. Moura, R. A. Lima, W. Junior, D. L. Cardoso, and M. C. d. R. Seruffo, “Geomodel: Technology and innovation for a diverse and interactive geometric education,” in *Proceedings of the 2025 ACM International Conference on Interactive Media Experiences*, 2025, pp. 338–341.
- [68] L. d. C. Estevam, V. H. B. Melo, J. F. M. de Carvalho, B. C. da Silva, W. d. S. O. Júnior, M. P. Mota, D. L. Cardoso, and M. C. d. R. Seruffo, “Perception of guardians on the use of artificial intelligence in educational geometry games for children,” in *Brazilian Conference on Intelligent Systems (BRACIS)*. SBC, 2025.
- [69] L. L. Pinto, L. D. C. Estevam, A. V. N. Alves, D. X. Da Costa, C. T. R. dos Santos, M. I. B. Seruffo, and M. C. da Rocha Seruffo, “Innovation and social impact in software engineering: A practical experience from the fábrica de software,” in *Empowering Students and Elevating Universities With Innovation Centers*. IGI Global Scientific Publishing, 2024, pp. 231–242.
- [70] P. D. da Cunha Lima, L. d. C. Estevam, W. G. S. Pereira, M. C. da Rocha Seruffo, and P. A. I. Pontes, “Libras tech: Software educacional para o ensino gamificado da informática adaptado a libras,” *Anais do Computer on the Beach*, vol. 15, pp. 051–056, 2024.
- [71] D. X. da Costa, W. G. S. Pereira, P. D. d. C. Lima, S. T. dos Santos, L. d. C. Estevam, P. A. I. Pontes, J. G. d. S. Fernandes, and M. C. d. R. Seruffo, “Substantivando: An

- educational game for teaching nouns in elementary school,” in *Simpósio Brasileiro de Jogos e Entretenimento Digital (SBGames)*. SBC, 2024, pp. 965–977.
- [72] E. A. d. S. Melo, L. da Conceição, and M. C. da Rocha Seruffo, “A criação de um jogo para auxiliar surdos na escrita em português,” in *IX Congresso Nacional de Educação (Conedu)*, 2024.
- [73] L. da Conceição Estevam, P. D. da Cunha Lima, P. A. I. Pontes, and M. C. da Rocha Seruffo, “Linsin app: Promovendo a acessibilidade por meio de jogos interativos na educação,” in *Escola Regional de Computação do Ceará, Maranhão e Piauí (ERCEMAPI)*. SBC, 2023, pp. 72–81.
- [74] L. da Conceição Estevam, W. G. S. Pereira, L. V. L. Pinto, S. S. F. S. Fadul, F. d. S. F. Ribeiro Filho, and M. C. da Rocha Seruffo, “Melldia: Aprimorando o controle do diabetes mellitus por meio de um aplicativo móvel,” *Anais do Computer on the Beach*, vol. 15, pp. 322–324, 2024.
- [75] W. G. S. Pereira, L. da Conceição Estevam, S. T. dos Santos, P. A. I. Pontes, and M. C. da Rocha Seruffo, “Desenvolvimento de um aplicativo gamificado para aprimorar o estudo dos substantivos no ensino fundamental i,” in *Simpósio Brasileiro sobre Fatores Humanos em Sistemas Computacionais (IHC)*. SBC, 2024, pp. 159–164.

