

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**



**Uma arquitetura baseada em técnicas de Realidade Mista
para favorecer a sensação de incorporação de próteses
mioelétricas por indivíduos com amputação de membros
superiores**

Diogo Aparecido Cavalcante de Lima

**Uberlândia - MG
2025**

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**Uma arquitetura baseada em técnicas de Realidade Mista para
favorecer a sensação de incorporação de próteses mioelétricas por
indivíduos com amputação de membros superiores**

Diogo Aparecido Cavalcante de Lima

Texto apresentado à Universidade Federal de Uberlândia, perante a banca de examinadores abaixo, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Doutor em Ciências.

Banca Examinadora:

Prof. Alexandre Cardoso, Dr. – Orientador (UFU)

Prof. Alcimar Barbosa Soares, PhD – Coorientador (UFU)

Prof. Renato de Aquino Lopes, Dr. (UFU)

Prof. Adriano Alves Pereira, Dr. (UFU)

Prof. Claysson Bruno Santos Vimieiro, Dr. (UFMG)

Profa. Fátima de Lourdes dos Santos Nunes Marques, Dra. (USP)

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

L732 Lima, Diogo Aparecido Cavalcante de, 1985-
2025 Uma arquitetura baseada em técnicas de Realidade Mista para favorecer a sensação de incorporação de próteses mioelétricas por indivíduos com amputação de membros superiores [recurso eletrônico] / Diogo Aparecido Cavalcante de Lima. - 2025.

Orientador: Alexandre Cardoso.

Coorientador: Alcimar Barbosa Soares.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia, Pós-graduação em Engenharia Elétrica.

Modo de acesso: Internet.

DOI <http://doi.org/10.14393/ufu.te.2026.18>

Inclui bibliografia.

1. Engenharia elétrica. I. Cardoso, Alexandre, 1964-, (Orient.). II. Soares, Alcimar Barbosa, 1965-, (Coorient.). III. Universidade Federal de Uberlândia. Pós-graduação em Engenharia Elétrica. IV. Título.

CDU: 621.3

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:

Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091

Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Elétrica

Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 3N - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-MG, CEP
38400-902

Telefone: (34) 3239-4707 - www.posgrad.feelt.ufu.br - cobel@ufu.br



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Elétrica				
Defesa de:	Tese de Doutorado, 354, PPGEELT				
Data:	Dezessete de dezembro de dois mil e vinte e cinco	Hora de início:	9:00	Hora de encerramento:	12:30
Matrícula do Discente:	11923EEL010				
Nome do Discente:	Diogo Aparecido Cavalcante de Lima				
Título do Trabalho:	Uma arquitetura baseada em técnicas de Realidade Mista para favorecer a sensação de incorporação de próteses mioelétricas por indivíduos com amputação de membros superiores				
Área de concentração:	Processamento da Informação				
Linha de pesquisa:	Metodologia e Técnicas da Computação				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Coordenador do projeto: Edgard Afonso Lamounier Júnior. Título do projeto: Metodologias para desenvolvimento de Jogos/Jogos Sérios. Agência financiadora: Não se aplica. Número do processo na agência financiadora: Não se aplica. Vigência do projeto: 2019 – 2025.				

Reuniu-se através de videoconferência, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, assim composta:

Doutores: Renato de Aquino Lopes (UFU), Adriano Alves Pereira (UFU), Claysson Bruno Santos Vimieiro (UFMG), Fátima de Lourdes dos Santos Nunes Marques (USP) e Alexandre Cardoso (UFU), orientador do discente.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa, Prof. Dr. Alexandre Cardoso, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato, agradeceu a presença do público, e concedeu ao discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir, o senhor presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos examinadores, que passaram a arguir o candidato. Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o candidato:

APROVADO.

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor. O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação

interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme, foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Alexandre Cardoso, Professor(a) do Magistério Superior**, em 17/12/2025, às 12:06, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Fátima de Lourdes dos Santos Nunes Marques, Usuário Externo**, em 17/12/2025, às 12:15, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Renato de Aquino Lopes, Professor(a) do Magistério Superior**, em 19/12/2025, às 15:48, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Claysson Bruno Santos Vimieiro, Usuário Externo**, em 19/12/2025, às 16:51, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Adriano Alves Pereira, Professor(a) do Magistério Superior**, em 19/12/2025, às 18:08, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **6947260** e o código CRC **2BB5E13E**.

AGRADECIMENTOS

A Deus por ter me dado saúde e força para superar as dificuldades.

*A minha mãe Elizabete por ter sempre me incentivado a estudar cada vez mais e por
me apoiar sempre.*

*Aos meus avós Francisco e Antônia que mesmo analfabetos me ensinaram a
importância da educação na vida.*

*A minha esposa Nayara pelo apoio, incentivo e principalmente compreensão que
teve durante essa jornada/desafio.*

*A meus filhos Geovana e Davi por sempre me proporcionarem momentos de carinho,
atenção e amor.*

*Aos meus irmãos Thiago e Laís pela confiança e companheirismo em todos os
momentos da minha vida.*

*A minha família, pois foi com ela que aprendi o valor da minha fé e da razão, e por
me incentivarem mesmo em momentos muitos difíceis durante minha vida.*

Aos meus amigos do Lab-CG UFU, por toda ajuda durante este período.

*Aos meus orientadores, Prof. Dr. Alexandre Cardoso e Prof. Dr. Edgard Afonso
Lamounier Jr., pela valiosa orientação, sabedoria e coerência durante as orientações.*

*Ao meu coorientador Alcimar Barbosa Soares, por toda ajuda, confiança e por me
mostrar sempre o caminho correto a se seguir.*

*Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de
Uberlândia, em especial os professores e secretaria, pelo suporte prestado.*

Obrigado!

FINANCIADORES

Este trabalho foi financiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais, sendo vinculado ao projeto de pesquisa Metodologias para desenvolvimento de Jogos/Jogos Sérios, coordenado pelo professor Edgard Afonso Lamounier Jr.

Resumo

Lima, Diogo A. C. **Uma arquitetura baseada em técnicas de Realidade Mista para favorecer a sensação de incorporação de próteses mioelétricas por indivíduos com amputação de membros superiores**, Uberlândia, Faculdade de Engenharia Elétrica – UFU, 2025.

Palavras-chave: Realidade Mista, Sensação de Incorporação, Próteses Mioelétricas, Rastreamento sem Marcadores, Jogos Sérios

O treinamento tradicional de reabilitação de indivíduos com amputação de membros superiores que utilizam próteses costuma iniciar-se cerca de 12 meses após a amputação, o que contribui para altas taxas de abandono e evidencia a necessidade de abordagens mais eficazes. Sistemas de realidade mista têm se mostrado promissores nesse contexto, desde que sejam capazes de promover a sensação de incorporação da prótese virtual. Esta tese investigou a sensação de incorporação em ambientes de treinamento para amputados de membros superiores, a partir do desenvolvimento de uma arquitetura de realidade mista composta por cinco características integradas: rastreamento sem marcadores fiduciais, integração de objetos virtuais ao membro amputado, movimentação em tempo real, atividades de treinamento e jogos sérios. O sistema resultante foi denominado MRProsthesis. Através dele foi adaptado o teste *Box and Blocks* para o formato de jogo sério em realidade mista. O experimento envolveu dois grupos de voluntários, com e sem amputação, submetidos a três sessões com intervalo mínimo de duas semanas. Foram avaliadas a usabilidade, a sensação de incorporação e o desempenho funcional. Os resultados evidenciaram ganhos consistentes em ambos os grupos, com destaque para o grupo com amputação, que apresentou 27 indicadores superiores, 8 empates e 4 inferiores na primeira avaliação. Na terceira sessão, progrediu para 32 superiores, 6 empates e 1 inferior, além de menor desvio-padrão em 88% dos casos. As evidências sugerem que o MRProsthesis foi capaz de favorecer a sensação de incorporação e o controle mioelétrico.

Abstract

Lima, Diogo A. C.; **An architecture based on Markerless Augmented Reality techniques for training the use of prostheses by individuals with upper limb amputation**, Uberlândia, Faculty of Electrical Engineering – UFU, 2025.

Keywords: Mixed Reality, Embodiment, Myoelectric Prostheses, Markerless Tracking, Serious Games.

Traditional rehabilitation training for individuals with upper-limb amputation who use prostheses usually begins about 12 months after the amputation, which contributes to high dropout rates and highlights the need for more effective approaches. Mixed reality systems have shown promise in this context, provided they are capable of promoting the sense of prosthesis embodiment. This thesis investigated the sense of embodiment in training environments for upper-limb amputees, based on the development of a mixed reality architecture composed of five integrated features: markerless fiducial tracking, integration of virtual objects with the amputated limb, real-time motion, structured training activities, and serious games. The resulting system was named MRProsthesis, through which the Box and Blocks test was adapted into a serious game in a mixed reality environment. The experiment involved two groups of volunteers, with and without amputation, who participated in three sessions with a minimum interval of two weeks. Usability, sense of embodiment, and functional performance were assessed. The results showed consistent improvements in both groups, with a clear advantage for the group with amputation, which presented 27 superior indicators, 8 ties, and 4 inferior ones in the first evaluation. In the third session, the group progressed to 32 superior indicators, 6 ties, and 1 inferior, in addition to a lower standard deviation in 88% of cases. The findings suggest that MRProsthesis was effective in enhancing the sense of embodiment and improving myoelectric control.

Publicações

São publicações resultantes deste trabalho:

1. Lima, D.A.C; Lamounier Jr E.A; Cardoso, A; Soares, A.B; Mattioli L.R; Silva, A.C; Cavalcante, R.S; Cyrino, G.F. An Augmented Reality application for training upper limb amputees. In: **24th Symposium on Virtual and Augmented Reality (SVR)**, 2022, Natal-RN. Anais do 24th Symposium on Virtual and Augmented Reality, 2022.
<https://doi.org/10.1145/3604479.3604528>
2. Lima, D.A.C; Lamounier Jr E.A; Resende, B.R; Soares, A.B; Silva, A.C; Cardoso, A. A Markerless Augmented Reality Application for Training Upper Limb Amputees. In: **24th Symposium on Virtual and Augmented Reality (SVR)**, 2022, Natal-RN. Anais do 24th Symposium on Virtual and Augmented Reality, 2022.
<https://doi.org/10.5753/svr.estendido.2022.227935>
3. LIMA, D. A. C.; SOARES, A. B.; CYRINO, GABRIEL; SILVA, A. C.; CARDOSO, A.; LAMOUNIER, E. A. ARProsthesis: Uma ferramenta de treinamento para a reabilitação de amputados de membros superiores utilizando realidade aumentada. **RISTI (PORTO)**, v. 56, p. 82-97, 2024.
<https://doi.org/10.17013/risti.56.82-97>

Sumário

Lista de Figuras	13
Lista de Tabelas	16
Lista de Abreviaturas	17
Introdução.....	1
1.1 Contextualização e Motivação	1
1.2 Hipótese e Objetivos	5
1.3 Organização da Tese	6
Fundamentação Teórica	7
2.1 Introdução	7
2.2 Amputações	7
2.2.1 Acompanhamento pós-operatório do Coto.....	9
2.3 Próteses	11
2.3.1 Seleção da Prótese	11
2.3.2 Aquisição de Prótese	13
2.3.3 Tipos de Prótese	13
2.3.3.1 Próteses Passivas.....	13
2.3.3.2 Próteses Funcionais.....	14
2.4 Reabilitação e Treinamento	19
2.5 Sensação de Incorporação	21
2.6 Tecnologias de Interface Avançadas	23
2.6.1 Realidade Virtual	24
2.6.2 Realidade Aumentada.....	26
2.6.3 Realidade Mista.....	29
2.6.4 Técnicas de Rastreamento em RM	31
2.6.4.1 Rastreamento baseado em Marcadores	32
2.6.4.2 Rastreamento sem marcadores	35

2.7	Jogos Sérios	37
2.8	Considerações Finais.....	41
Trabalhos Correlatos	42	
3.1	Introdução	42
3.2	Metodologia da Revisão	42
3.2.1	AR_Prosthesis_Simulator	46
3.2.2	HoloPHAM	47
3.2.3	AR_Rehabilitation.....	49
3.2.4	ARlimb.....	50
3.2.5	ARPHAN	52
3.3	Estudo comparativo dos trabalhos relacionados	53
3.4	Considerações finais	56
Arquitetura do Sistema	57	
4.1	Introdução	57
4.2	Descrição do Projeto	57
4.3	Descrição do Teste Funcional <i>Box and Blocks</i>	58
4.4	Arquitetura do sistema MRProsthesis	59
4.4.1	Dispositivos de Entrada.....	62
4.4.1.1	Kit Teclado e Mouse.....	62
4.4.1.2	Myo Gesture Control Armband.....	63
4.4.1.3	HTC Vive Tracker 2.0 (2018).....	64
4.4.1.4	VIVE Wireless Dongle	65
4.4.1.5	SteamVR Base Station 2.0.....	65
4.4.1.6	Stereolabs ZED Mini	67
4.4.2	Módulo EMG	68
4.4.3	Módulo de Rastreamento de Movimento.....	70
4.4.4	Módulo de Integração de Imagem e Movimento	71
4.4.5	Painel de Configuração	72
4.4.5.1	Configuração dos Parâmetros Iniciais da Câmera	73
4.4.6	Jogo Sério	74
4.4.7	Dispositivos de Saída.....	75

4.4.7.1	Hardware Sugerido	75
4.4.7.2	HTC Vive Pro	76
4.5	Especificação de Requisitos do Sistema.....	77
4.5.1	Requisitos Funcionais	77
4.5.2	Requisitos não funcionais	79
4.6	Modelagem UML	79
4.6.1	Casos de Uso.....	80
4.6.2	Detalhes do Caso de Uso	81
4.7	Softwares Utilizados	82
4.8	Análise de Custos e Cenário de Uso.....	82
4.9	Considerações Finais.....	83
Implementação e Funcionamento do Sistema MRProsthesis	84	
5.1	Introdução	84
5.2	Prótese Virtual.....	84
5.2.1	Concepção do modelo 3D da Prótese Virtual	84
5.2.2	Movimentação Articular da Mão Virtual.....	86
5.2.3	Abertura e Fechamento da Prótese Virtual	87
5.3	Área de Treinamento.....	89
5.4	Execução do Treinamento com o Sistema MRProsthesis.....	89
5.5	Caracterização do MRProsthesis como Jogo Sério	92
5.6	Considerações Finais.....	93
Metodologia e Protocolo Experimental	95	
6.1	Introdução	95
6.2	Métricas Aplicadas na Pesquisa.....	95
6.2.1	Métricas Objetivas.....	96
6.2.2	Métricas Subjetivas	98
6.2.2.1	Questionário de Usabilidade do Sistema Pós-Estudo (PSSUQ)	98
6.2.2.2	Escala de Incorporação de Próteses para Amputados de Membros Superiores (PEmbS-ULA).....	99
6.3	Amostra.....	101
6.3.1	Critérios de Seleção da Amostra.....	101

6.3.2	Constituição da Amostra	102
6.4	Protocolo Experimental	104
6.5	Considerações Finais.....	105
Resultados e Discussão	106	
7.1	Introdução	106
7.2	Usabilidade do Sistema.....	106
7.2.1	Análise de usabilidade do grupo de indivíduos sem amputação	107
7.2.2	Análise de usabilidade do grupo de indivíduos com amputação	110
7.2.2.1	Análise escores individuais de usabilidade do grupo com amputação	113
7.3	Sensação de Incorporação (Embodiment)	120
7.3.1	Grupo de indivíduos sem amputação.....	120
7.3.2	Grupo de indivíduos com amputação.....	123
7.3.2.1	Análise escores individuais de sensação de incorporação do grupo com amputação	127
7.4	Avaliação do Rendimento dos Usuários no MRProsthesis	134
7.4.1	Análise dos desempenhos individuais do grupo com amputação no jogo sério MRProsthesis.....	139
Conclusões e Trabalhos Futuros.....	150	
8.1	Introdução	150
8.2	Conclusões	150
8.3	Trabalhos futuros	152
8.4	Consideração final.....	153
Referências Bibliográficas	154	
Apêndice I	174	
Lista de Strings	174	
Anexo I	175	
Questionário de Avaliação de Usabilidade – PSSUQ	175	

Anexo II177

Escala de Incorporação de Próteses para Amputados de Membros Superiores
(PEmbS-ULA)177

Lista de Figuras

Figura 1 - Níveis de Amputações Membros Superiores	8
Figura 2 - Prótese estética para desarticulado de ombro.....	14
Figura 3 - Prótese funcional para amputação transradial com acionamento mecânico	15
Figura 4 - Prótese funcional para desarticulação de punho com acionamento mecânico de ombro	16
Figura 5 - Prótese funcional com acionamento mioelétrico	17
Figura 6 - Pessoa utilizando uma Prótese Mioelétrica	17
Figura 7 - Diagrama do braço protético mioelétrico	18
Figura 8 - Amputado de membros superior realizando o NHPT	20
Figura 9 - Ambiente virtual de treinamento	25
Figura 10 - RA adicionando elementos virtuais ao mundo real	27
Figura 11 - RA com a integração de textos, imagens e objetos	27
Figura 12 - Arquitetura de um Sistema de Realidade Aumentada	28
Figura 13 - Contínuo Real-Virtual, MILGRAM et al., 1994 adaptado do original por HUNSELL, TORI & KIRNER 2020.....	29
Figura 14 - RA vs RM vs RV	30
Figura 15 - Representação de uma aplicação utilizando Realidade Mista	30
Figura 16 - Categorização das técnicas de rastreamento em RA e RM.....	32
Figura 17 - Exemplos de Marcadores Fiduciais	33
Figura 18 - Representação de um sistema de RA por meio de smartphone	34
Figura 19 - Detecção de pontos de interesse em ambientes de RM.....	35
Figura 20 - Rastreamento baseado em GPS	36
Figura 21 - Jogo Sério CareMe® para treinamento de profissionais de saúde.	38
Figura 22 - Jogo Sério para reabilitação de AVC	39
Figura 23 - Estrutura de avaliação de design de jogos sérios	40
Figura 24 - Sistema AR_Prosthesis_Simulator	47
Figura 25 - Sistema HoloPHAM	48
Figura 26 - Sistema AR_Rehabilitation	49

Figura 27 - Sistema ARlimb.....	51
Figura 28 - Sistema AR-PHAN desenvolvido na Universidade Johns Hopkins	52
Figura 29 - Arquitetura do Sistema MRProsthesis	61
Figura 30 - Myo Gesture Control Armband	63
Figura 31 - Pessoa sem amputação usando Myo	64
Figura 32 - VIVE Tracker 2.0.....	64
Figura 33 - Conexão do dongle ao computador	65
Figura 34 - SteamVR Base Station 2.0	66
Figura 35 - Ângulo de cada estação base.....	66
Figura 36 - Stereolabs Zed Mini	67
Figura 37 - Disposição das SteamVR Base Station 2.0	70
Figura 38 - Trecho do código de Compensação de Latência	72
Figura 39 - HMD HTC Vive Pro com <i>Stereolabs Zed Mini</i> acoplada	76
Figura 40 - Diagrama de Caso de Uso do Sistema MRProsthesis.....	80
Figura 41 - Prótese Virtual.....	85
Figura 42 - Articulações da mão humana e da prótese virtual	86
Figura 43 - Leitura de oito canais de sinal EMG pelo Myo	88
Figura 44 - Calibração do sinal EMG para abertura e fechamento da prótese virtual	88
Figura 45 - Área de cobertura da SteamVR Base Station 2.0.....	89
Figura 46 - Prótese Virtual respondendo aos sinais mioelétricos enviados	90
Figura 47 - Interface em RM do Sistema MRProsthesis	91
Figura 48 - Tela de configuração do sistema MRProthesis	92
Figura 49 - Resultados das Dimensões de Usabilidade do Grupo de Individuo sem Amputação	109
Figura 50 - Resultados das Dimensões de Usabilidade do Grupo de Individuo com Amputação	112
Figura 51 - Resultados das Dimensões de Usabilidade do indivíduo ID 12	114
Figura 52 - Resultados das Dimensões de Usabilidade do indivíduo ID 13	117
Figura 53 - Resultados das Dimensões de Usabilidade do indivíduo ID 14	119
Figura 54 - Sensação de incorporação (PEmbS-ULA) no grupo sem amputação: comparação entre a primeira e a terceira sessão.	123

Figura 55 - Sensação de incorporação (PEmbS-ULA) no grupo com amputação: comparação entre a primeira e a terceira sessão	126
Figura 56 - Desempenho do Indivíduo ID 12 na Percepção de Incorporação em Relação aos Grupos com e sem Amputação	129
Figura 57 - Desempenho do Indivíduo ID 13 na Percepção de Incorporação em Relação aos Grupos com e sem Amputação	132
Figura 58 - Desempenho do Indivíduo ID 14 na Percepção de Incorporação em Relação aos Grupos com e sem Amputação	134
Figura 59 - Quantidade Total de Tarefas Concluídas em cada Sessão	136
Figura 60 - Número Total de Erros por sessão	137
Figura 61 - Número de Tentativas Incompletas.....	137
Figura 62 - Tempo Total Despendido em Tarefas com Acertos	138
Figura 63 - Taxa de Conclusão	139
Figura 64 - Desempenho do Indivíduo ID 12 no Jogo Sério MRProsthesis	142
Figura 65 - Desempenho do Indivíduo ID 13 no Jogo Sério MRProsthesis	144
Figura 66 - Desempenho do Indivíduo ID 14 no Jogo Sério MRProsthesis	146

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Quantidade de Trabalhos Encontrados	45
Tabela 2 - Trabalhos Analisados.....	46
Tabela 3 - Comparação entre os trabalhos relacionados	55
Tabela 4 - Análise de Custo da implantação da aplicação	83
Tabela 5 - Escala Likert de -3 a 3.....	99
Tabela 6 - Dados dos Voluntários Sem Amputação	103
Tabela 7 - Dados dos Voluntários Com Amputação.....	103
Tabela 8 - Tabela Descritiva Comparativa com Dados Indivíduos Sem Amputação	108
Tabela 9 - Tabela Descritiva Comparativa com Dados Indivíduos Com Amputação	110
Tabela 10 - Tabela Descritiva com Dados do Indivíduos ID 12.....	114
Tabela 11 - Tabela Descritiva com Dados do Indivíduos ID 13.....	116
Tabela 12 - Resultados das Dimensões de Usabilidade do indivíduo ID 14	119
Tabela 13 - Dados da Percepção de Incorporação do Grupo de indivíduos sem amputação.....	121
Tabela 14 - Dados da Percepção de Incorporação do Grupo de indivíduos com amputação.....	124
Tabela 15 - Dados da Percepção de Incorporação do Indivíduo ID 12	127
Tabela 16 - Dados da Percepção de Incorporação do Indivíduo ID 13	130
Tabela 17 - Dados da Percepção de Incorporação do Indivíduo ID 14	132
Tabela 18 - Tabela Comparativa Desempenho Jogo Sério.....	135
Tabela 19 - Dados de Desempenho do Voluntário ID 12	140
Tabela 20 - Dados de Desempenho do Voluntário ID 13	142
Tabela 21 - Dados de Desempenho do Voluntário ID 14	145

Lista de Abreviaturas

2D	Bidimensional
3D	Tridimensional
ACM	Archive of Original Research
API	Interface de Programação de Aplicativos
AR	Augmented Reality
DAQ	Aquisição de dados
EMG	Sinal eletromiográfico
GPS	Sistema de Posicionamento Global
HMD	Head Mounted Display
IEEE	Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
MR	Mixed Reality
RA	Realidade Aumentada
RM	Realidade Mista
RV	Realidade Virtual
SDK	Software Development Kit
3D	Tridimensional
SUS	Sistema Único de Saúde
UML	Unified Modeling Language
VR	Virtual Reality

Capítulo 1

Introdução

1.1 Contextualização e Motivação

A amputação de membros superiores é uma realidade que afeta inúmeros indivíduos em todo o mundo (RESNIK et al., 2022). O impacto da amputação é traumático e, embora existam recursos como próteses mecânicas, mioelétricas e robóticas, programas de reabilitação física, acompanhamento fisioterapêutico e apoio psicológico, esses recursos ainda não são ideais ou plenamente acessíveis à maioria dos amputados (WHEATON, 2017). O processo de adaptação impõe desafios significativos, demandando que as pessoas aprendam a lidar com as limitações decorrentes da perda do membro (PASTRE et al., 2005; BOTH et al., 2011; COSTA, 2017).

Nesse contexto, a reabilitação desempenha um papel essencial ao proporcionar adaptação à nova condição corporal e oferecer suporte para a aquisição de habilidades práticas, incluindo o uso de próteses (BRASIL, 2013 apud CAVALCANTE, 2018). Por meio de reabilitação, os indivíduos podem não apenas superar as dificuldades físicas, mas também desenvolver estratégias eficazes para reintegrar-se às atividades cotidianas, promovendo uma maior autonomia e qualidade de vida (CRUNKHORN et al., 2022).

O programa de reabilitação deve implementar um conjunto de treinamentos que possibilite acelerar o retorno do amputado às atividades diárias (SHEEHAN, 2021). Este programa deve ter como objetivo fortalecer os músculos do membro amputado, aprimorar a coordenação motora e capacitar o indivíduo a utilizar eficientemente seu membro residual para manipular uma prótese (RESNIK et al., 2022).

Na abordagem convencional de reabilitação, o treinamento para o uso da prótese, em geral, só se inicia após a entrega do dispositivo (DORNELAS, 2010;

SHEEHAN, 2021). Além disso, a média de tempo necessária para o treinamento, visando a manipulação eficaz da prótese, é de cerca de um ano (CAVALCANTE, 2018). Assim, o percurso completo até a plena utilização da prótese, na maioria das vezes, em média, dois anos para o amputado (HENSON, 2021).

Até iniciar o treinamento com a prótese, o usuário mantém a esperança de recuperar funcionalidades semelhantes ao período pré-amputação (HUNT et al., 2023). No entanto, o processo de reabilitação é extenso, desafiador e desmotivador, levando a taxas de desistência superiores a 50% (BRASIL, 2013; CHADWELL et al., 2016; RESNIK et al., 2022). Adicionalmente, devido aos desafios e à extensão temporal inerentes ao processo de reabilitação tradicional, é comum que muitos amputados se ajustem a viver sem a parte do membro amputada (NATIONAL, 2017; HENSON, 2021).

Entretanto, Hunt et al. (2023) indicam que o início precoce do treinamento com prótese após a cirurgia pode reduzir o tempo total de reabilitação e aumentar a eficácia do processo reabilitativo. Contudo, a hipersensibilidade do membro residual durante esse período impossibilita a implementação do treinamento físico com próteses (RESNIK et al., 2022).

Diante dos desafios do processo tradicional de reabilitação para amputados de membros superiores, pesquisas recentes têm explorado tecnologias de interface avançadas para aprimorar o treinamento com prótese (KNIGHT, CAREY & DUBEY, 2017; IBRAHIM et al., 2019; HUNT et al., 2023). Entre as diversas nomenclaturas de tecnologias 3D, a Realidade Virtual (RV), a Realidade Aumentada (RA) e a Realidade Mista (RM) são mais conhecidas (TORI & HOUNSELL, 2020). Essas tecnologias têm potencial para reduzir custos, ampliar o acesso ao tratamento e aprimorar a qualidade do atendimento, especialmente em regiões remotas (NAVARRO et al., 2016; YANG et al., 2017; DENCHE-ZAMORANO et al., 2023).

Esse trio de tecnologias têm o potencial de transformar a experiência do usuário, melhorando o envolvimento emocional, a aquisição de conhecimentos e habilidades em ambientes seguros (HOWARD, 2017; TORI & HOUNSELL, 2020). A RV permite o controle de avatares digitais para executar tarefas personalizadas, criando um paradigma de aprendizagem motora individualizado, mais apropriado e envolvente em comparação aos métodos tradicionais (NAVARRO et al., 2016; YANG et al., 2017).

Embora a RV seja eficaz em várias situações de treinamento, a ausência de familiaridade do usuário com o ambiente afeta a percepção de presença e envolvimento, e o desconforto associado ao uso de headsets (HMD) pode ser uma limitação (YANG, 2017; MELLA et al., 2019).

Por outro lado, a RA e a RM, ao incorporar elementos virtuais no espaço real do usuário, mantêm referências ao ambiente físico, oferecendo uma experiência imersiva com potencial para aprimorar ambientes de treinamento (KIRNER & SISCOUTTO, 2007; TORI & HUNSELL, 2020).

Contudo, a proximidade entre os conceitos de RA e RM frequentemente resulta em confusões (CHEN et al., 2019). Diferentemente da RA, no contexto da RM, o foco reside na coexistência harmoniosa dos ambientes real e virtual, complementando-se de maneira sinérgica (TORI & HUNSELL, 2020). Assim, a integração equilibrada entre elementos tangíveis e virtuais se fundem de maneira fluida, ampliando as possibilidades de interação e proporcionando uma sensação aprimorada de envolvimento (SPEICHER, HALL & NEBELING, 2019).

Nesse sentido, a criação de um ambiente de RM envolvente e estimulante pode desempenhar um papel de aprimoramento da eficácia do treinamento. (LAMOUNIER et al., 2012; BOSCHMANN et al., 2016). No entanto, no contexto do treinamento de amputados, elevar o nível de envolvimento do indivíduo está diretamente relacionado ao aumento da sensação de incorporação (DEUS, 2023). “A sensação de incorporação da prótese depende da congruência (orientação anatômica plausível), sincronia temporal e espacial (entre feedback visual e proprioceptivo ou tátil) e semelhança corporal” (Page et al., 2018 apud HUNT et al., 2023, p. 11).

Um sistema de RM projetado para induzir a sensação de incorporação da prótese não apenas proporcionará uma experiência imersiva, mas também terá um impacto positivo na percepção do dispositivo, fazendo com que seja reconhecido como uma extensão natural do corpo (DEUS, 2023).

Entretanto, desenvolver um ambiente de treinamento com RM voltado para amputados de membros superiores, visando alcançar uma sensação de incorporação, não é uma tarefa trivial. Isso se deve à necessidade fundamental de que o sistema reproduza com precisão as ações propostas pelo usuário (BARRESI et al., 2021).

Assim, técnicas tradicionais de rastreamento, como os marcadores, revelam-se inadequadas, uma vez que sua utilização está restrita ao campo de visão câmera

(LOPES et al., 2018). Sempre que o marcador se desloca para fora do campo de visão da câmera, o elemento virtual perde a renderização. Ao retornar ao campo de visão do usuário, o processo de renderização inevitavelmente enfrenta atrasos (LIMA, 2019).

Em um cenário onde a obtenção, disponibilidade e precisão no rastreamento, aliadas a uma resposta quase instantânea, constituem elementos essenciais para estabelecer uma harmonia perfeita entre o mundo virtual e o mundo físico, a adoção de técnicas de rastreamento sem marcadores torna-se indispensável (TORI & HUNSELL, 2020).

Além disso, a implementação de estratégias de jogos sérios e feedbacks sensoriais podem potencializar significativamente a experiência do usuário em ambiente de RM (LOPES et al., 2018).

Contudo, a literatura apresenta uma escassez de estudos abordando RM e a experiência de incorporação em futuros usuários de próteses. De fato, enquanto alguns estudos exploraram o uso de Realidade Mista no treinamento protético e outros investigaram jogos sérios e Realidade Virtual para a reabilitação de membros superiores, há uma lacuna na literatura que demanda uma investigação mais aprofundada para compreender a eficácia e os benefícios de ambientes aprimorados de treinamento para amputados de membros superiores, visando proporcionar a sensação de incorporação ao usuário, por meio de técnicas de Realidade Mista.

Diante desse contexto, e considerando as reconhecidas limitações dos métodos tradicionais de reabilitação voltados a amputados de membros superiores usuários de próteses mioelétricas, esta tese propõe uma abordagem que avança em relação ao estado da arte ao explorar, de forma integrada, ambientes de Realidade Mista, técnicas de rastreamento sem marcadores e jogos sérios com feedback sensorial. Enquanto o estado da arte concentra-se predominantemente no treinamento mediado pela prótese física ou em ambientes virtuais isolados, a proposta deste trabalho fundamenta-se na concepção de uma arquitetura que amplia as possibilidades de treinamento para a reabilitação, ao permitir a interação com próteses mioelétricas virtuais. Assim, a contribuição central desta tese reside na definição e implementação dessa arquitetura, que visa a favorecer a sensação de incorporação e a melhoria da usabilidade e da eficácia do processo de aprendizagem do controle de próteses em indivíduos com amputações de membros superiores.

1.2 Hipótese e Objetivos

Este estudo propõe que a utilização de ambientes de realidade mista, integrados a técnicas de rastreamento sem marcadores e a jogos sérios com feedback sensorial, pode favorecer a sensação de incorporação em indivíduos amputados de membros superiores, mesmo na ausência da prótese física, bem como promover ganhos de usabilidade e potencializar a eficácia do aprendizado do controle de próteses durante o treinamento.

Dentro desse contexto, o objetivo geral desta tese desenvolver, aplicar e avaliar uma arquitetura de treinamento para a reabilitação de indivíduos com amputação de membros superiores, baseada em ambientes de Realidade Mista, rastreamento sem marcadores e jogos sérios com feedback sensorial, visando ampliar as possibilidades de treinamento, bem como medir a sensação de incorporação, a usabilidade e o aprendizado do controle de próteses mioelétricas, mesmo na ausência da prótese física.

Para viabilizar o alcance do objetivo geral, foram traçados os seguintes objetivos específicos:

- Compreender as premissas essenciais para alcançar a sensação de incorporação da prótese em indivíduos amputados de membros superiores;
- Propor uma arquitetura de sistema baseada em Realidade Mista, com rastreamento preciso sem o uso de marcadores fiduciais e potencializada por jogos sérios, que viabilize o treinamento de controle de próteses mioelétricas por amputados de membros superiores, sem a necessidade da prótese física.
- Investigar se a arquitetura proposta destinada ao treinamento de controle de prótese mioelétrica pode proporcionar a sensação de incorporação da prótese em amputados de membros superiores;
- Avaliar a satisfação global dos usuários em relação ao sistema, bem como identificar os elementos que contribuem para uma experiência aprimorada.
- Analisar métricas de desempenho, como tempo de treinamento, taxa de erro e progresso em habilidades motoras (coordenação fina e manipulação de objetos), em relação à sensação de incorporação da prótese.

1.3 Organização da Tese

Na estrutura organizacional desta tese, além deste capítulo introdutório, a exposição evolui da seguinte maneira:

No Capítulo 2: Fundamentação Teórica, apresenta-se uma aprofundada compreensão dos conceitos teóricos fundamentais que sustentam a pesquisa.

No Capítulo 3: Trabalhos Relacionados, é realizada uma revisão abrangente da literatura relacionada ao tema da pesquisa.

No Capítulo 4: Arquitetura do Sistema, são mostrados os detalhes referentes a estrutura e ao design de um sistema com interface em Realidade Mista (RM) destinado ao treinamento e controle de próteses mioelétricas. Este capítulo fornecerá uma visão das especificações técnicas e dos componentes que compõem o sistema.

No Capítulo 5: Detalhes da Implementação é apresentada uma visão detalhada das etapas, desafios e decisões tomadas durante o processo de desenvolvimento e implementação do sistema proposto.

No Capítulo 6: Instrumentos e Métricas da Pesquisa são apresentados os instrumentos e as métricas utilizados para avaliar a eficácia do sistema, descrevendo as abordagens metodológicas, os instrumentos, o protocolo experimental e as escalas adotadas.

No Capítulo 7: Resultados e Discussão são apresentados os resultados da aplicação do sistema, com análise da usabilidade, da sensação de incorporação da prótese e do rendimento dos usuários, detalhando a organização e a análise dos dados para os grupos com e sem amputação.

No Capítulo 8: Conclusões e Trabalhos Futuros serão apresentadas as conclusões desta tese e as próximas etapas para o desenvolvimento após a defesa da tese.

Capítulo 2

Fundamentação Teórica

2.1 Introdução

Neste capítulo, são apresentados os fundamentos que direcionaram o desenvolvimento desta pesquisa. Inicialmente, são questões relacionadas a amputações de membros superiores, oferecendo uma análise detalhada dos diversos níveis de amputação. Em seguida, são exploradas as formas de obtenção de uma prótese e os tipos de próteses disponíveis no mercado, focando principalmente nas próteses mioelétricas. Posteriormente, são discutidos aspectos relacionados à Reabilitação e Treinamento e Sensação de Incorporação. Seguindo adiante, são apresentados os conceitos fundamentais das tecnologias de interface avançada, como Realidade Virtual, Realidade Aumentada e Realidade Mista, destacando a importância do feedback para uma experiência imersiva. Por fim, são apresentados a definição de Jogos Sérios, contextualizando sua relevância no contexto deste estudo.

2.2 Amputações

A amputação é uma realidade que afeta inúmeras pessoas em todo o mundo (COSTA, 2017; CARVALHO, 2021; HIGGS, 2023). No entanto, é fundamental enfatizar que esse procedimento médico é destinado aliviar sintomas e melhorar qualidade de vida do paciente (CHUI et al., 2020).

O procedimento cirúrgico de amputação de membro superior envolve a remoção total ou parcial de membros corporais acima da cintura, seja em decorrência de lesões traumáticas, doenças vasculares, câncer, infecções graves ou condições congênitas (CARVALHO, 2021). Caso a amputação de membro superior seja parcial resulta na formação de um membro residual conhecido como “coto”, este será utilizado na manipulação e controle de uma futura prótese (CHUI et al., 2020).

Para uma compreensão mais abrangente das amputações de membros superiores, essas são frequentemente categorizadas em níveis distintos, as quais são determinadas com base nas medidas de comprimento do coto (ORR, 2020). A Figura 1 apresenta uma representação visual da classificação dos níveis de amputação de membros superiores:

Figura 1 - Níveis de Amputações Membros Superiores.



Fonte: Da Silva 2015, adaptado por Lima et al., 2019

1. **Desarticulação do ombro:** Envolve a remoção completa do braço, incluindo o úmero, rádio, ulna e os ossos da mão (COSTA, 2017).
2. **Transumeral:** Ocorre acima do cotovelo, entre a articulação do cotovelo e a articulação do ombro (CARVALHO, 2021).
3. **Desarticulação do cotovelo:** Consiste na remoção de toda a parte abaixo da articulação do cotovelo, mantendo o úmero intacto (COSTA, 2017).
4. **Transradial:** Refere-se à amputação abaixo do cotovelo, entre a articulação do punho e a articulação do cotovelo (CARVALHO, 2021).
5. **Desarticulação do Punho:** Nesse tipo de amputação, os ossos do rádio e ulna são preservados integralmente (COSTA, 2017).
6. **Transcarpiana:** Envolve a amputação dos dedos (CARVALHO, 2021).

Por fim, o coto resultante de uma amputação de membros superiores se torna uma presença constante na vida do indivíduo, evocando memórias dolorosas de um

momento triste, uma vez que frequentemente resulta de um processo inesperado e altamente angustiante do ponto de vista psicológico (HUNT et al., 2023).

2.2.1 Acompanhamento pós-operatório do Coto

O acompanhamento pós-operatório do paciente é essencial, uma vez que se faz necessário o apoio psicológico e a observação cuidadosa do membro residual para avaliação da cicatrização da ferida (AMPUTEE COALITION, 2021).

Após a amputação, é comum que os pacientes vivenciem uma gama de emoções, abrangendo desde a frustração até a raiva, tristeza e, em muitos casos, a depressão (HUNT et al., 2023). Nesse contexto, profissionais especializados em apoio psicológico desempenham um papel fundamental ao auxiliar os pacientes na normalização de suas emoções e experiências relacionadas à amputação, bem como no desenvolvimento de mecanismos de enfrentamento adaptativos (ORR, 2020; RESNIK et al, 2022).

É importante ressaltar que o início precoce do tratamento protético pode ser psicologicamente fortalecedor para o recém-amputado, uma vez que lhe permite vislumbrar como dispositivos protéticos podem contribuir significativamente para a restauração de sua independência (NATIONAL ACADEMIES OF SCIENCES, ENGINEERING, AND MEDICINE, 2017). Por outro lado, atrasar o início da reabilitação pode manter os pacientes concentrados nas limitações em detrimento das possibilidades que podem ser exploradas (AMPUTEE COALITION, 2021).

Contudo, para começar uma reabilitação tradicional com prótese é necessário que coto esteja cicatrizado (CARVALHO, 2021). O período específico de cicatrização de um coto amputado de membro superior depende da situação individual do paciente e do nível de amputação (AMPUTEE COALITION, 2021).

É fundamental seguir as orientações da equipe médica a fim de garantir um acompanhamento pós-cirúrgico eficaz do coto, evitando assim possíveis complicações pós-operatórias e promovendo a melhoria do estado de saúde, da função, da independência e, consequentemente, da qualidade de vida do paciente (CHOO, KIM & CHANG, 2022).

As complicações pós-operatórias mais comuns são: mobilidade reduzida, dor, hematomas, infecção e necrose tecidual, contratura articular, fraqueza muscular e a

ocorrência de sensações fantasma (CHUI et al., 2020; AMPUTEE COALITION, 2021).

O tratamento do coto inclui curativos, faixas de compressão e exercícios para diminuição da dor (ORR, 2020; HIGGS, 2023). Caso o processo de cicatrização seja falho e o paciente desenvolva infecções a risco de necessidade de uma nova cirurgia (CARVALHO, 2021).

Na fase de cicatrização do coto, ocorre simultaneamente os processos de redução, modelagem e dessensibilização, ambos são de fundamental importância no programa de reabilitação. Os dois primeiros contribuem para: otimizar a circulação sanguínea, acelerar a cicatrização de feridas e preparar adequadamente a forma do coto para a futura adaptação da prótese (CHOO, KIM & CHANG, 2022). Já o terceiro, visa eliminar ou reduzir alta sensibilidade do membro residual (CHOO, KIM & CHANG, 2022).

A alta sensibilidade do coto durante a fase de cicatrização inviabiliza a implementação dos regimes tradicionais de treinamento físico de próteses (HUNT et al., 2023). Para reduzi-la recomenda-se realização de massagens suaves, vibração, aplicação de pressão constante e utilização de diversos tipos de tecidos na área sensível (CHUI et al., 2020).

Além dos cuidados clínicos e do acompanhamento pós-operatório do coto, o processo de reabilitação de amputados deve incluir, de forma estruturada, o acompanhamento psicológico como parte permanente da equipe multidisciplinar (PANDIAN et al., 2018; MALOUTA et al., 2025). A literatura indica que a amputação está associada a elevados níveis de ansiedade, depressão, estresse pós-traumático, isolamento social e dificuldades de adaptação psicossocial, fatores que podem comprometer a adesão à reabilitação e ao treinamento protético (CIORBA et al., 2021; SILVA et al., 2022). Nesse contexto, a atuação do psicólogo contribui para a identificação precoce de sintomas psiquiátricos, para a elaboração emocional da perda do membro e para o desenvolvimento de estratégias de enfrentamento adaptativas, favorecendo a resiliência, a autoestima e o engajamento do paciente no processo de reabilitação (WARRENDER & LIM, 2025).

Por fim, somente após a adoção de todos os cuidados necessários para a redução da sensibilidade e para a completa cicatrização do coto tem início o processo protético, cujo propósito fundamental é a adaptação do usuário ao membro protético

(HIGGS, 2023). Esse percurso deve ser acompanhado por suporte psicológico contínuo, a fim de favorecer a adaptação emocional, o engajamento no treinamento e a adesão ao processo de reabilitação (CIORBA et al., 2021).

2.3 Próteses

As próteses de membros superiores são dispositivos projetados para substituir ou compensar parcialmente a perda de mãos, braços ou parte deles (MELERO et al., 2019; CHUI et al., 2020). Elas têm como objetivo restaurar parcialmente as funções da parte do corpo perdidas devido a amputações, proporcionando aos indivíduos amputados uma maior autonomia em suas atividades cotidianas (BRASIL, 2013; FERRÃO, 2020). A prescrição de uma prótese ocorre somente quando um profissional de saúde determina que seu uso pode efetivamente contribuir para a melhoria da qualidade de vida do paciente (MACHADO, 2018). As próteses de membros superiores são recomendadas para pacientes que apresentam um coto com tamanho adequado, boa vascularização e uma musculatura circundante bem desenvolvida (BARRETO, MENDES & SOUSA, 2013).

A seguir, serão detalhados o processo de seleção de próteses, os meios de aquisição de prótese e os principais tipos de próteses disponíveis no mercado.

2.3.1 Seleção da Prótese

A seleção da prótese para um membro superior amputado é um processo complexo que não deve ser subestimado, pois é influenciado por uma série de fatores (BATES, FERGASON & PIERRIE, 2020). Entre fatores, destacam-se o nível e a localização da amputação, os objetivos funcionais desejados e o nível de atividade planejado pelo indivíduo (MAAT et al., 2018; ORR, 2020).

Embora as próteses mais avançadas da atualidade ofereçam uma ampla gama de movimentos, é importante ressaltar que nem sempre são a solução mais adequada para todos os perfis de pacientes amputados (STOKOSA, 2022; HUNT et al., 2023).

A escolha da prótese acontece por meio da colaboração de uma equipe multidisciplinar que envolve profissionais de saúde, como protesistas, ortopedistas, terapeutas ocupacionais e fisioterapeutas (KWAH, et al, 2019). Esses especialistas

devem realizar uma avaliação minuciosa do coto, considerando não apenas as características físicas, mas também as habilidades funcionais e cognitivas do paciente (NATIONAL ACADEMIES OF SCIENCES, ENGINEERING, AND MEDICINE, 2017). Essa análise visa permitir a personalização da escolha da prótese de forma a atender às necessidades individuais (SOYER, et al, 2016; SHEEHAN, 2021).

O terapeuta ocupacional deve buscar compreender as expectativas e proporcionar um suporte integral na jornada de adaptação à prótese (KERVER, et al., 2020). O objetivo final da seleção da prótese é proporcionar ao indivíduo o mais alto nível de independência e funcionalidade em sua vida cotidiana (KWAH, et al, 2019).

Após a escolha do tipo e modelo da prótese, o protesista inicia o processo criativo, elaborando um molde do coto através do uso de gesso ou imagens 3D. Este molde passa por refinamentos para assegurar um ajuste perfeito ao membro residual (BATES, FERGASON & PIERRE, 2020).

Paralelamente, é desenvolvido um encaixe confortável para a adaptação à região do coto, esse encaixe deve proporcionar conforto e segurança ao amputado (KERVER, et al., 2020). Em seguida, uma prótese temporária é então fixada ao coto, desempenhando um papel fundamental na estabilização do volume e da forma do membro residual (KWAH et al. 2019). Quando o volume e a forma do coto estão estabilizados, o paciente está pronto para receber a prótese definitiva (CRUNKHORN et al. 2023).

Após o recebimento da prótese definitiva inicia-se o processo de reabilitação convencional (AMPUTEE COALITION, 2021; CHOO, KIM & CHANG, 2022). Assim, vale ressaltar, que o progresso bem-sucedido da adaptação do coto após a amputação está diretamente ligado a adequação e capacidade do amputado em manusear sua prótese funcional para realizar tarefas específicas. (COSTA, 2017; HIGGS, 2023).

Por fim, o tempo necessário desde a amputação até o recebimento de uma prótese pode variar, mas geralmente abrange vários meses (KWAH, et al, 2019). É um processo que exige paciência, colaboração entre o paciente e os profissionais de saúde, e é projetado para garantir que a prótese seja adaptada às necessidades individuais do paciente e proporcione uma melhor qualidade de vida (CRUNKHORN et al., 2023).

2.3.2 Aquisição de Prótese

Com os avanços tecnológicos, novas perspectivas surgem para indivíduos que enfrentam amputações (RESNIK et al., 2022). Embora o mercado ofereça uma ampla variedade de modelos de próteses corporais, infelizmente, os custos elevados desses equipamentos e a necessidade de treinamento afastam muitos potenciais usuários (PAIVA & GOELLNER, 2008; FERRÃO, 2020).

Em várias nações, programas governamentais estão em vigor, fornecendo apoio financeiro para a aquisição de próteses de membros superiores (AMPUTEE COALITION, 2021). No contexto brasileiro, os amputados dispõem de poucas opções de programas de acessibilidade e inclusão que possibilitam a obtenção de próteses de forma gratuita. As opções incluem o Sistema Único de Saúde (SUS), o Instituto Nacional do Seguro Social (INSS), as secretarias estaduais e municipais de saúde, bem como a possibilidade de buscar amparo por meio de ação judicial (MACHADO, 2018; REIS, 2018). Contudo, em todos esses casos, é comum enfrentar um processo moroso e burocrático até que a prótese desejada seja obtida.

2.3.3 Tipos de Prótese

Na literatura atual, diferentes termos são usados na classificação de próteses de membros superiores (MATT et al., 2018). Nesta tese, as próteses foram categorizadas em dois grupos principais: passivas e funcionais (BRASIL, 2016). Os dois grupos serão detalhadamente abordados a seguir.

2.3.3.1 Próteses Passivas

As próteses passivas de membros superiores são caracterizadas pela ausência de componentes ativos, ou seja, não contam com motores ou outros dispositivos que permitam ao usuário controlar o movimento da prótese (NATIONAL ACADEMIES OF SCIENCES, ENGINEERING, AND MEDICINE, 2017). Normalmente, seu design é focado na melhoria estética do membro amputado, proporcionando simultaneamente suporte, estabilidade e simetria ao corporal ao amputado (MAAT et al., 2018).

Elaboradas principalmente com silicone ou outros materiais macios que imitam a pele humana (LEOW et al., 2022), as próteses passivas e estéticas, conseguem integrar-se de maneira harmoniosa com o tom de pele, pelos corporais, sardas e outras características naturais do indivíduo amputado (MAAT et al., 2018). Além disso, essas próteses contribuem indiretamente para o equilíbrio postural do paciente através da complementação do membro amputado (Brasil, 2016). A Figura 2 ilustra um exemplo de prótese estética.

Figura 2 - Prótese estética para desarticulado de ombro.



Fonte: Brasil 2016

Por fim, o uso de próteses passivas oferece outras vantagens, como peso reduzido, facilidade de utilização e aprimoramento da estética do usuário (CARVALHO, 2021). Porém, sua principal desvantagem reside na funcionalidade inexistente para manipulação de objetos.

2.3.3.2 Próteses Funcionais

As próteses funcionais para membros superiores são membros artificiais projetados para restaurar a função e o movimento perdidos pelo membro residual (CAREY, LURA & HIGHSITH, 2015). Esses dispositivos são projetados para replicar de maneira eficiente os movimentos e funções naturais da mão, braço ou antebraço (HUNT et al., 2023).

Basicamente, existem duas categorias predominantes de próteses funcionais para membros superiores: aquelas que utilizam acionamento mecânico por meio de tirante e aquelas que utilizam acionamento mioelétrico (DUTRA et al., 2018). No entanto, é importante ressaltar que a escolha da prótese mais apropriada para um

indivíduo dependerá de suas necessidades e objetivos específicos (CAREY, LURA & HIGHSMITH, 2015)

As próteses funcionais com acionamento mecânico operam através de um tirante, permitindo a abertura e fechamento da mão (BRASIL, 2016). Os movimentos do braço, ombro e tórax são capturados pelo tirante e transferidos para o cabo de controle, que serve para abrir e fechar o gancho ou a mão (HUSSAIN, SHAMS & KHAN, 2019), conforme ilustra a Figura 3. Assim, essas próteses utilizam os movimentos corporais do usuário para efetuar suas próprias movimentações (DUTRA et. al, 2018).

Figura 3 - Prótese funcional para amputação transradial com acionamento mecânico



Fonte: Hussain, Shams & Khan, 2019

O sistema de tirante desempenha um papel na fixação da prótese ao membro amputado, funcionando como um conjunto de "arreios". Assim, o tirante não apenas auxilia na execução dos movimentos, mas também fornece o suporte necessário (CAREY, LURA & HIGHSMITH, 2015). A Figura 4 ilustra uma pessoa utilizando uma prótese funcional com acionamento mecânico.

Figura 4 - Prótese funcional para desarticulação de punho com acionamento mecânico de ombro



Fonte: São José Ortopédicos, 2022

As próteses funcionais com acionamento mecânico apresentam custos de aquisição e manutenção acessíveis em comparação com outros tipos de próteses (CAREY, LURA & HIGHSITH, 2015). Além disso, têm a capacidade de proporcionar independência ao usuário (HUSSAIN, SHAMS & KHAN, 2019). No entanto, essas próteses também possuem desvantagens, tais como limitações de movimento e a necessidade de dependência da força muscular (LIMA, 2019).

Por outro lado, as próteses funcionais com acionamento mioelétrico (próteses mioelétricas) são membros artificiais movidos por motores elétricos com uma fonte de alimentação externa (ATZORI & MÜLLER, 2015). O controle da prótese ocorre através da detecção de sinais eletromiográficos (EMG) gerados pela contração da musculatura residual do coto (CHADWELL et al., 2016). Esses sinais são captados por eletrodos de superfície localizados dentro do encaixe protético, sendo posteriormente amplificados e processados por um controlador (COSTA, 2017). Esse controlador aciona motores alimentados por bateria que movem a mão, o pulso ou o cotovelo (BRACK & AMALU, 2021). Assim, em outras palavras, os sinais EMG são traduzidos em comandos para controlar a prótese (AMPUTEE COALITION NATIONAL, 2021). A Figura 5, ilustra uma prótese mioelétrica de mão.

Figura 5 - Prótese funcional com acionamento mioelétrico



Fonte: Myobock (2011).

As próteses mioelétricas proporcionam uma maior autonomia aos usuários, permitindo a execução de movimentos relativamente naturais (SHARMA et al., 2018). No entanto, apesar desse potencial, usuários relatam dificuldades no controle desses dispositivos, principalmente em atividades cotidianas (CHADWELL et al., 2016), conforme a ilustra na Figura 6.

Figura 6 - Pessoa utilizando uma Prótese Mioelétrica



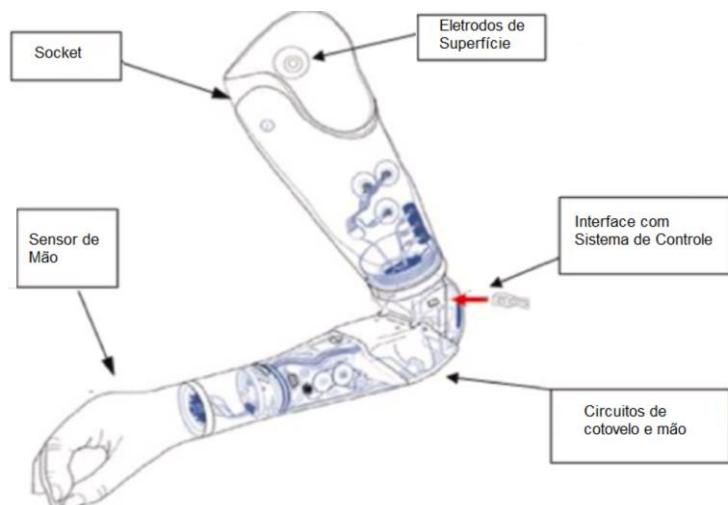
Fonte: Henson, 2023

Em Chadwell et al., (2016, p.01) cita-se: “Apesar dos avanços tecnológicos, o controle das próteses mioelétricas ainda continua desafiador, levando à rejeição do dispositivo e a lesões associadas por uso excessivo do membro intacto”. Contudo, o único caminho para superar essas dificuldades é um treinamento adequado durante processo de reabilitação (ORR, 2020).

Além da dificuldade de manipulação, as próteses mioelétricas também enfrentam desafios relacionados aos custos elevados de aquisição e manutenção, assim como à dificuldade na adaptação devido ao seu peso (BRACK E AMALU, 2021).

As próteses mioelétricas tendem a ser mais pesadas do que outros tipos de próteses devido aos componentes adicionais necessários para seu funcionamento (ATZORI & MÜLLER, 2015). Esses dispositivos necessitam de bateria, motor e sistema de controle, elementos que contribuem para o aumento de peso na prótese (COSTA, 2017). Além disso, o encaixe protético deve ser projetado para acomodar os eletrodos mioelétricos, acrescentando, assim, mais peso ao conjunto (CHADWELL et al., 2016; ORR, 2020). A Figura 7 ilustra um diagrama com os componentes de braço protético mioelétrico.

Figura 7 - Diagrama do braço protético mioelétrico



Fonte: Brack & Amalu, 2021

Entretanto, o peso das próteses mioelétricas não representa uma preocupação expressiva, uma vez que os ganhos provenientes desses dispositivos superam a carga adicional (ORR, 2020). Com o avanço tecnológico, novos modelos cada vez mais leves estão sendo lançados. Além disso, a adaptação do usuário, pode ser efetivamente alcançada durante o processo de reabilitação (BRACK E AMALU, 2021).

Por fim, a seleção do dispositivo protético deve considerar as necessidades específicas de cada usuário. Dispositivos protéticos mais avançados são mais indicados para um grupo seletivo de pacientes altamente funcionais, ao passo que outros pacientes podem obter benefícios significativos com sistemas mais simples. No caso específico dos dispositivos protéticos mioelétricos, destaca-se a importância do treinamento para garantir o êxito em sua manipulação (ORR, 2020).

2.4 Reabilitação e Treinamento

Conforme informado na seção 2.3.1, o treinamento para o uso da prótese inicia-se após o recebimento do dispositivo (DORNELAS, 2010; SHEEHAN, 2021). O tempo necessário para o recebimento depende diretamente de dois fatores: a recuperação física após a cirurgia (SANDERS et al., 2011 apud HUNT et al., 2023) e a moldagem da prótese para adaptação ao membro residual (COSTA, 2017; AMPUTEE COALITION, 2021).

No entanto, indiretamente, outros fatores como: nível de perda de membro, número de membros afetados, tipo de prótese, uso prévio de prótese, terapia anterior, nível de experiência do protesista, falta de motivação do usuário, cognição do usuário, nível de experiência do terapeuta, disponibilidade do usuário e protesista podem afetar o tempo reabilitação contribuindo, para o insucesso no processo (JOHNSON & MANSFIELD, 2014; RESNIK et al. 2022).

Por outro lado, há fatores conhecidos que desempenham um papel essencial no sucesso da reabilitação após a amputação de membros superiores. Estes incluem a causa da amputação, o nível da amputação, a ausência de dor pós-amputação e o intervalo de tempo entre a perda do membro e o início da reabilitação (KUBIAK et al., 2019).

Portanto, é essencial iniciar a reabilitação protética o mais rapidamente possível após a amputação cirúrgica (RESNIK et al., 2012), pois vários estudos têm demonstrado uma relação positiva entre a adaptação precoce e a satisfação e utilização do dispositivo (CAREY, LURA, & HIGHSMITH, 2015). Vale ressaltar, que amputados experientes devem iniciar o processo de reabilitação protética visando aprimorar o uso de seu dispositivo atual ou até mesmo ao considerar a troca do mesmo (BRENNER & BRENNER, 2008).

Contudo, antes de iniciar um programa de reabilitação, é fundamental proporcionar uma orientação realista ao paciente sobre as capacidades e limitações da prótese (ORR, 2020). Expectativas irrealistas podem resultar em insatisfação com o funcionamento final da prótese e levar à sua rejeição (SHEEHAN, 2021). Por outro lado, expectativas bem estabelecidas e realista no início do treinamento, melhoram a aceitação e o desempenho individual (AMPUTEE COALITION, 2021).

A reabilitação após amputação traumática de membro pode ser dividida em 4 fases: pós-cirúrgica (detalhada na seção 2.2.1), treinamento pré-protético, treinamento protético básico e reabilitação avançada de longo prazo (RESNIK et al., 2012; KUBIAK et al, 2019)

O treinamento pré-protético tem como foco preparar o paciente para o uso efetivo de uma prótese. Os terapeutas realizam testes para determinar a adequação dos músculos para o controle mioelétrico. Além disso, são realizados treinamentos específicos para familiarizar o paciente com a futura prótese, incluindo instruções sobre os componentes protéticos, técnicas de colocação e retirada de prótese (AMPUTEE COALITION, 2021).

Já o treinamento protético básico visa a adaptação do uso da prótese. Os terapeutas focam em aspectos como técnicas de amplitude de movimento e instruções sobre o uso adequado da prótese. Esta etapa se concentra no desenvolvimento de habilidades necessárias para melhorar a função. Os exercícios realizados nessa etapa de treinamento são focados em atividades de vida diária (RESNIK et al., 2012). Nesta etapa, são realizados os exercícios e teste de reabilitação tais como: Box and Block Test, Nine-Hole Peg Test (NHPT) e Purdue Pegboard Test (SIEGEL, 2023). A Figura 8 ilustra o treinamento de uma pessoa amputada realizando o exercício NHPT.

Figura 8 - Amputado de membros superior realizando o NHPT



Fonte: Sutthison et al., 2023

A reabilitação avançada de longo prazo, tem duração variável, visa continuar aprimorando as habilidades adquiridas, abordando desafios específicos de

manipulação mais avançadas e promovendo a independência do paciente (RESNIK et al., 2012).

O êxito da reabilitação não se limita a seguir rigidamente as etapas predefinidas do processo. A participação ativa e o comprometimento contínuo do paciente são essenciais para alcançar resultados positivos. Portanto, o equilíbrio emocional e psicológico do paciente é vital para uma reabilitação bem-sucedida (ORR, 2020). Nesse contexto, implementar ferramentas que inspirem motivação e promovam o envolvimento emocional e psicológico se torna necessário (AMPUTEE COALITION, 2021).

Apesar das complexidades inerentes, a terapia de reabilitação para membros superiores concentra-se no aprimoramento das habilidades fundamentais, visando atingir o mais alto patamar possível de funcionalidade. O objetivo é proporcionar autonomia ao amputado para desempenhar suas atividades cotidianas. No entanto, para uma reabilitação bem-sucedida, é fundamental que o paciente mantenha motivação, concentração na utilização da prótese e equilíbrio emocional e psicológico.

Por fim, nesse contexto, estudos recentes destacam a relevância do sentimento de incorporação no processo de reabilitação de amputados, uma vez que está diretamente ligado à capacidade de adaptação do paciente diante da perda de um membro e à integração bem-sucedida da prótese em sua imagem corporal e autoestima (GRACZYK et al., 2019; MEEHAN & GATES, 2020; BEKRATER-BODMANN, 2021a).

2.5 Sensação de Incorporação

As próteses são projetadas como ferramentas que estabelecem uma conexão técnica entre o corpo humano e o meio ambiente. No entanto, sua particularidade reside no fato de se assemelharem a partes do corpo, desempenhando a função específica de substituir um membro perdido, em vez de simplesmente ampliar uma estrutura já existente (GOUZIEN, et al., 2017).

Portanto, a integração entre paciente e prótese é fundamental para restaurar a autonomia do indivíduo (BEKRATER-BODMANN, 2021a). Essa integração é geralmente abordada de forma pragmática, focando nos três níveis de compensação da deficiência: estética, funcional e psicológica (GOUZIEN, et al., 2017). No entanto,

ambas estão interconectadas. Assim, reconhecer os fatores psicológicos, especialmente as percepções dos amputados sobre seus corpos em relação às próteses é de extrema importância (BEKRATER-BODMANN, 2021a).

Dentro deste contexto, um conceito que tem obtido destaque é a sensação de incorporação da prótese, que se refere à habilidade dos usuários perceberem dispositivos externos como uma extensão natural de seus próprios corpos (ENGDAHL, MEEHAN & GATES, 2020). Isso pode ocorrer em diferentes níveis, incluindo o sensorial, motor e afetivo (VIGNEMONT, 2011; MAKIN et al., 2017).

A sensação de incorporação da prótese é percepção subjetiva e emocional do usuário ao integrar a prótese ao seu esquema corporal (HEILIGENBERG et al., 2018). Esse fenômeno envolve a sensação de que a prótese não é apenas um objeto externo, mas sim uma extensão natural do próprio corpo, tornando-se parte integrante da identidade e do eu do indivíduo (GOUZIEN, et al., 2017).

A experiência corporal do indivíduo é formada pela integração de informações provenientes dos sentidos relacionadas à posição e movimento do corpo no espaço (GIUMMARRA, et al., 2008). Os sentidos de propriedade (“este braço me pertence”), agência (estou controlando este braço) e a representação corporal (“este braço faz parte de mim”) compõem a experiência integrada de incorporação de uma prótese (SEGIL, ROLDAN & GRACZYK, 2022).

A posse do corpo é aprimorada através de mecanismos de captura visual que combinam informações proprioceptivas e visuais sobre a posição dos membros (GIUMMARRA, et al., 2008). Além disso, informações preditivas sobre a posição dos membros no espaço estão associadas a uma percepção mais precisa das posições relativas das partes do corpo (SEGIL, ROLDAN & GRACZYK, 2022).

Estudos indicam que a sensação de incorporação está associada a diversos resultados positivos na reabilitação (HEILIGENBERG et al., 2018; MIDDLETON E ORTIZ-CATALAN, 2020). Em próteses de membros superiores, por exemplo, foram relacionadas a uma postura corporal mais estável e aprimoramento no planejamento motor (BEKRATER-BODMANN et al., 2021b). Além disso, observou-se uma correlação entre o sentimento de incorporação da prótese e níveis reduzidos de dor pós-amputação. Adicionalmente, outros benefícios também são conhecidos como na adaptação física, psicológica e cognitiva (HEILIGENBERG et al., 2018; MIDDLETON E ORTIZ-CATALAN, 2020).

Por fim, ao considerar os mecanismos inerentes à incorporação de membros artificiais na experiência corporal, uma abordagem promissora para a reabilitação de amputados de membros superiores é a integração de interfaces avançadas de Realidade Mista (RM). Isso representa uma oportunidade de criar ambientes voltados para promover a sensação de incorporação de próteses. Ao sincronizar informações visuais e proprioceptivas de maneira coesa, essas interfaces têm o potencial de desencadear experiências mais alinhadas com os princípios fundamentais da percepção corporal.

2.6 Tecnologias de Interface Avançadas

As tecnologias de interface avançada tridimensionais (3D) empregam métodos e ferramentas que otimizam a interação entre seres humanos e sistemas computacionais de maneiras mais naturais e intuitivas do que as interfaces tradicionais bidimensional (2D) (LAVIOLA JR et al., 2017). Esta seção se concentrará especificamente nas interfaces gráficas avançadas de Realidade Virtual (RV), Realidade Aumentada (RA) e Realidade Mista (RM).

Essas tecnologias de interface estão sendo implementada de forma progressiva em aplicações na área da saúde e demonstram potencial para atuar em ambientes não clínicos (MELERO et al., 2019; NEGRILLO et al., 2020; KIM et al., 2020). Os avanços são impulsionados por pesquisas científicas, pelo progresso das aplicações e novos equipamentos disponíveis (LABOVITZ & HUBBARD, 2020).

Ao longo da última década, houve um aumento significativo na atenção à pesquisa dessas tecnologias, especialmente, no contexto do desenvolvimento de soluções tecnológicas para a área da telemedicina e reabilitação (AHMAD et al., 2019). Essas tecnologias de interface têm evoluído consideravelmente, proporcionando novas possibilidades e aplicações inovadoras que podem transformar a prestação de cuidados de saúde (TORI & HUNSELL, 2020).

Por fim, esse trio tecnológico têm o potencial de contribuir para a contenção de despesas, o aumento da acessibilidade aos cuidados médicos e o aprimoramento da qualidade de atendimento em áreas distantes (NAVARRO et al., 2016; YANG et al., 2017; DENCHE-ZAMORANO et al., 2023).

2.6.1 Realidade Virtual

Diversos autores exploraram distintas interpretações para o conceito de Realidade Virtual, abrangendo muitas perspectivas. Entre as definições mais amplamente aceitas destaca-se aquela que concebem à RV como “uma interface avançada para aplicações computacionais, que permite ao usuário a movimentação (navegação) e interação em tempo real, em um ambiente 3D, podendo fazer uso de dispositivos multissensoriais, para atuação ou feedback” (BURDEA & COIFFET, 1994 apud KIRNER & SISCOUTTO, 2007; LEAL, COSTA & FRESCHI, 2021).

Outra definição amplamente aceita destaca a “Realidade Virtual como a fusão de três conceitos fundamentais: imersão, interação e envolvimento (MORIE, 1994; PINHO & KIRNER, 1997; VASCONCELOS et al., 2023).

- **Imersão:** Representa a característica principal da RV, pois um ambiente de RV procura replicar, em contextos específicos, a realidade da vida real, conferindo ao usuário uma sensação de presença (CARDOSO & LAMOUNIER, 2004; HUNSELL, TORI & KIRNER, 2020).
- **Interação:** manifesta-se através da capacidade do ambiente de Realidade Virtual de permitir ao usuário adentrar o espaço virtual das aplicações, visualizar, manipular e explorar os dados em tempo real, utilizando seus sentidos, especialmente os movimentos naturais tridimensionais do corpo (PINHO & KIRNER, 1997; VASCONCELOS et al., 2023).
- **Envolvimento:** Refere-se ao nível de motivação que impulsiona o envolvimento de uma pessoa em uma atividade específica. Esse envolvimento pode assumir uma natureza passiva, como na leitura de um livro, ou ser ativo, envolvendo a participação ativa em um jogo (BOTEGA & CRUVINEL, 2009; HUNSELL, TORI & KIRNER, 2020).

Uma aplicação baseada nos princípios de RV permite ao usuário agir intuitivamente, manipular objetos virtuais, desencadear eventos e animações para visualização e análise (KIRNER & SISCOUTTO, 2007; CARDOSO et al. 2018). Essa interação por meio de dispositivos especializados, como capacetes, luvas, leitores gestuais, comandos de voz ou até mesmo dispositivos convencionais, como teclado, mouse e monitor comum, sendo fundamental que o usuário possa manipular o

ambiente e realizar atividades em tempo real (SILVA, 2014; HOUNSELL, TORI & KIRNER, 2020).

Assim, um sistema de RV deve possibilitar ao usuário experiências dentro de ambientes artificiais de forma igual ou diferente do permitido no mundo real (GRADY, 2002; NUNES et al., 2018), conforme mostra a Figura 9.

Figura 9 - Ambiente virtual de treinamento



Fonte: Nunes et al. 2018

Deste modo, as aplicações de RV têm o potencial de revolucionar a saúde, apresentando soluções inovadoras em diversas áreas, como treinamento e simulação médica, reabilitação de pacientes, controle de dor, terapia de exposição, tratamento de transtornos, educação e comunicação do paciente (BANIASADI et al., 2020).

Igualmente, nos últimos anos, a Realidade Virtual tem evoluído como uma ferramenta de apoio à reabilitação motora convencional, demonstrando potencial para se tornar uma forma de intervenção inovadora com vantagens em comparação às abordagens tradicionais de reabilitação (NAVARRO et al., 2016; YANG et al., 2017; HOWARD et al., 2017). Adicionalmente, pesquisas recentes indicam que usuários amputados que utilizam sistemas de treinamento em RV têm chance até de experimentar a sensação de incorporação de próteses virtuais (SNOW et al., 2017; RODRIGUES et al., 2022).

Entretanto, a constituição de aplicações de RV imersivas continuam desafiadoras, devido: à complexidade de replicar sensações do mundo real (MELLA et al., 2019), e a dificuldade de adaptar ao mundo virtual as necessidades do seu utilizador (HOWARD et al., 2017). Adicionalmente, a utilização de aplicações de RV ainda enfrenta desafios e problemas como: potenciais efeitos colaterais como

desconforto visual, dores de cabeça, náuseas e desorientação aos seus utilizadores (YANG et al., 2017), desconforto físico e psicológico associado ao uso da *Headset HMD* (MANIKA et al., 2023).

Por fim, muitos dos desafios mencionados podem ser mitigados ao adotar critérios de padrão de qualidade de interface, incorporando pausas periódicas durante a utilização dos sistemas de RV. Contudo, é fundamental ter em mente que este tipo de interface deve levar o usuário a se desvincular do mundo exterior, fazendo-o acreditar na sua integração ao ambiente virtual (HOUNSELL, TORI & KIRNER, 2020).

2.6.2 Realidade Aumentada

Assim como acontece com a RV, vários autores têm analisado diferentes pontos de vista para explicar o conceito de RA, abrangendo uma variedade de características. Entre essas definições, há aspectos marcantes que ajudam a apresentá-la como uma tecnologia capaz de enriquecer significativamente a experiência humana (BILLINGHURST, CLARK & LEE, 2015; SPEICHER, HALL & NEBELING, 2019). Assim, por meio da RA, os usuários podem visualizar diretamente na tela de um dispositivo de interface elementos virtuais tridimensionais que se integram ao mundo real (KIM et al., 2019).

No entanto, é importante destacar que ao contrário da RV, que transporta o usuário para um mundo virtual, desconectando-o completamente do ambiente físico, a RA mantém referências ao entorno real, adicionando elementos virtuais no espaço do usuário e ainda mantendo a consciência situacional do indivíduo (KIRNER & SISCOUTTO, 2007; TORI & HOUNSELL, 2020). Assim, enquanto na RV o usuário encontra-se completamente imerso em um ambiente gerado por computador, na RA o usuário visualiza, simultaneamente, o mundo real e objetos virtuais sobrepostos a ele (VIGLIALORO et al., 2019), conforme ilustrado na Figura 10. Desta forma, RA apresenta benefícios superiores à RV em contextos nos quais a percepção do mundo real desempenha um papel relevante no contexto (AL-ISSA, REGENBRECHT & HALE 2012 apud WOODWARD & RUIZ, 2022).

Figura 10 - RA adicionando elementos virtuais ao mundo real



Fonte: Tori, Kirner, & Siscoutto, 2006.

Vista como uma aprimoração do mundo real, a RA vai além da simples inclusão de objetos virtuais, incorporando também a integração de textos, imagens e vídeos, todos gerados por computador, com o propósito de enriquecer e otimizar percepção do ambiente real (INSLEY, 2003; KIRNER & TORI, 2006), conforme ilustra a Figura 11.

Figura 11 - RA com a integração de textos, imagens e objetos.



Fonte: Lu et al., 2021.

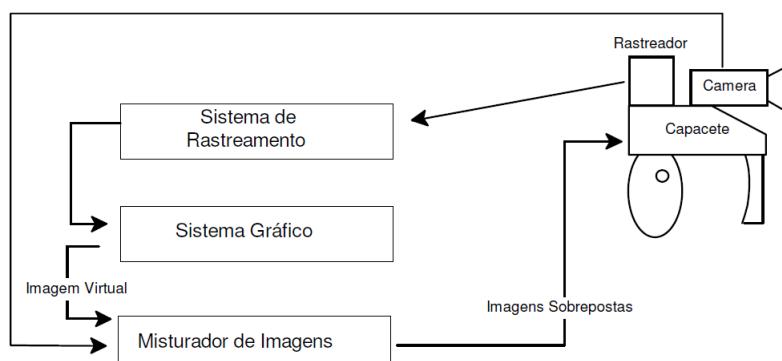
A sobreposição interativa de informações digitais no mundo físico viabilizada pela RA, expande a percepção humana do ambiente real com a integração de objetos virtuais em tempo real por meio de dispositivos tecnológicos (BILLINGHURST, 2021). Contudo, para realizar a integração interativa de objetos reais e virtuais no ambiente real, em tempo real, é fundamental garantir um alinhamento preciso entre eles (AZUMA et al., 2001 apud HOUNSELL, TORI & KIRNER, 2020).

Para expandir a percepção humana, a RA pode envolver os sentidos de visão, audição, tato, força e olfato (AZUMA et al., 2001 apud HOUNSELL, TORI & KIRNER, 2020). Assim, a RA possibilita a exploração de sistemas que interagem com objetos

reais, conferindo ao ambiente uma natureza mais natural e intuitiva (WANG et al., 2016).

Um sistema de RA, no mínimo, necessita de um dispositivo de interface, como monitor, óculos, capacete, tablet ou smartphone, integrado a um sistema de rastreamento de posição (KIRNER & PINHO, 1997; LIMA et al., 2019). Esse componente é essencial para a visualização precisa de objetos virtuais no ambiente real, posicionando-os com exatidão no local desejado (CARDOSO et al., 2007; TORI & HOUNSELL, 2020). O procedimento inclui o uso de câmeras para rastrear a posição do objeto virtual e capturar imagens em tempo real (AZUMA, 2001; SISCOUTTO & COSTA, 2008). Posteriormente, o dispositivo ou computador realiza a renderização do objeto na posição identificada e um misturador combina ambas as imagens para apresentar o resultado ao usuário (MEDEIROS, 2018). A Figura 12 ilustra graficamente a arquitetura de um Sistema de RA.

Figura 12 - Arquitetura de um Sistema de Realidade Aumentada.



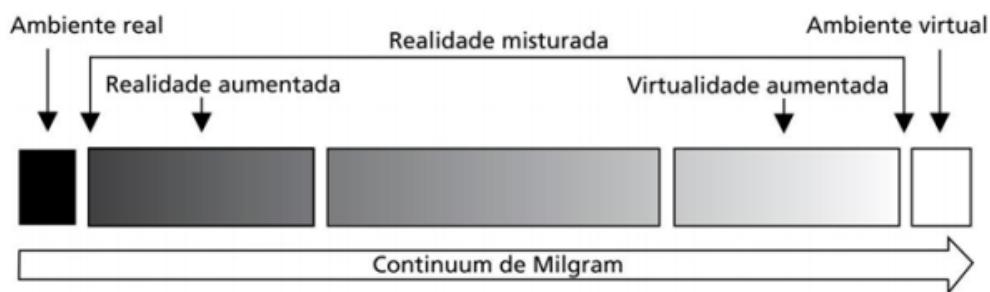
Fonte: Kirner & Pinho, 1997.

Por fim, embora a RA esteja em uma fase exploratória, ou seja, indicando seu contínuo desenvolvimento e ainda não ter atingido seu potencial máximo (VIGLIALORO et al., 2021), sua aplicabilidade abrange diversas áreas do conhecimento, muitas vezes proporcionando vantagens adicionais ao integrar-se de forma simétrica com os ambientes reais (IGUAL et al., 2019). Qualquer atividade humana que demande acesso à informação para aprimorar sua execução pode se beneficiar da RA. Quando essa informação é tridimensional e diretamente relacionada ao ambiente em que se está, a RA revela o potencial de ser a solução mais eficiente (HOUNSELL, TORI & KIRNER, 2020).

2.6.3 Realidade Mista

Embora a definição de uma fronteira entre Realidade Aumentada e Realidade Mista seja bastante confusa (CHEN et al., 2019). Por um longo período, a explicação dos conceitos de RV, RA e RM foi facilmente explicada através do Contínuo Real-Virtual proposto por Milgram em 1994, conforme ilustra a Figura 13.

Figura 13 - Contínuo Real-Virtual, MILGRAM et al., 1994 adaptado do original por HOUNSELL, TORI & KIRNER 2020.



Fonte: Tori & Hounsell 2020

No entanto, devido à evolução tecnológica, à introdução de novos dispositivos e à participação de grandes empresas mundiais no campo das interfaces avançadas, a compreensão exclusivamente baseada no Contínuo de Milgram tornou-se desafiadora (SPEICHER, HALL & NEBELING, 2019). Além disso, ao longo do tempo, o termo RA tem sido frequentemente incorporado indiscriminadamente em um contexto mais amplo, que engloba a RM (HOUNSELL, TORI & KIRNER, 2020).

Na realidade, observa-se uma considerável divergência na compreensão do conceito de RM entre especialistas (BÜTH et al, 2018). Muitas vezes a RM é tradada como sinônimo de RA, sendo RM simplesmente uma nomenclatura alternativa para RA (HOUNSELL, TORI & KIRNER, 2020).

Esta tese, adota RM como uma RA com contexto, onde a compreensão ambiental avançada e interações aprimoradas, tanto do usuário com objetos virtuais quanto dos objetos virtuais com o ambiente, conforme ilustra a Figura 14. Isso implica potencialmente que a RM está associada a hardware ou dispositivos específicos capazes de oferecer a funcionalidade necessária (SPEICHER, HALL & NEBELING, 2019).

Figura 14 - RA vs RM vs RV



Fonte: Tremosa, 2023

Dessa forma, entende-se que a RM ao integrar elementos virtuais ao ambiente físico, entrelaça de maneira adequada esses elementos virtuais, complementando e aprimorando os elementos reais (GERUP, SOERENSEN & DIECKMANN, 2019). Assim, é essencial que todos os elementos virtuais inseridos no ambiente físico estejam diretamente relacionados ao contexto desse ambiente, sendo estritamente vedada a presença de objetos não pertinentes ou desalinhados (SPEICHER, HALL & NEBELING, 2019).

Na Figura 15 observa-se um entrelaçamento entre o motor físico e a peça virtual. Em outras palavras, o motor físico não se encontra em sua totalidade sem a integração da peça virtual, o que é fundamental para atender aos objetivos propostos pelo ambiente de treinamento ou simulação.

Figura 15 - Representação de uma aplicação utilizando Realidade Mista



Fonte: PTC., 2018

Por fim, é relevante ressaltar que a RM constitui uma modalidade de RA que leva em consideração o contexto do ambiente circundante e sua complexidade. Assim, a RM é um ambiente geral com o qual os usuários inseridos podem interagir e manipular itens físicos e virtuais (CHEN et al., 2019). Essa abordagem é fortemente dependente de dispositivos tecnológicos, como óculos e sensores, que possibilitam maior interatividade, imersão e feedbacks. Além disso, devido à sua natureza flexível, a Realidade Mista pode ser integrada de maneira colaborativa com outras abordagens, como é o caso dos jogos sérios.

2.6.4 Técnicas de Rastreamento em RM

O registro e o rastreamento representam tarefas fundamentais no contexto dos ambientes de RM (HUNSEL, TORI & KIRNER, 2020). Ambos asseguram a harmonia na integração dos elementos virtuais com o cenário real (SON et al., 2022).

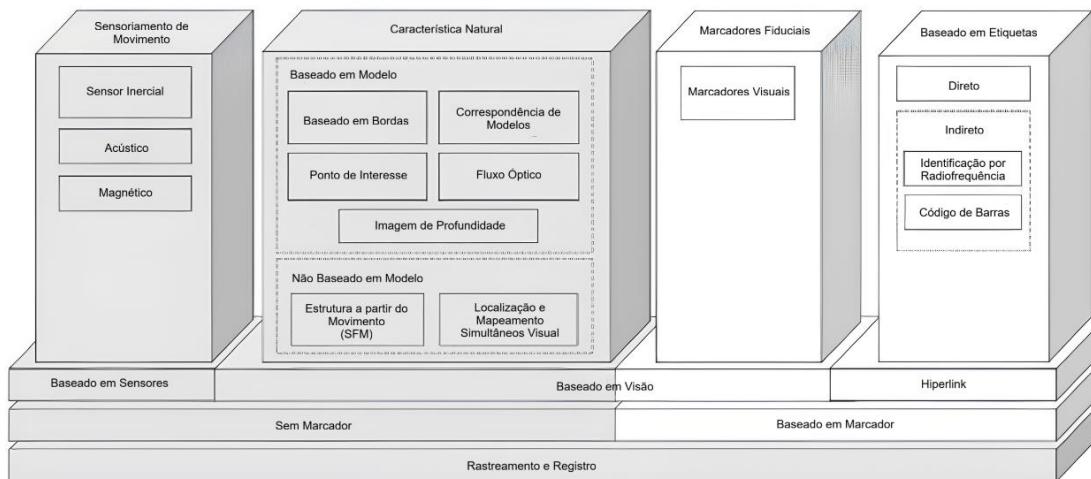
O registro, refere-se à capacidade do sistema em determinar quais elementos virtuais devem ser sobrepostos à cena e em que posição e orientação relativa, considerando os objetos reais, bem como a perspectiva do observador (DA SILVA, JUCÁ & DA SILVA, 2023).

Em uma aplicação de RM, cada elemento virtual é individualmente identificado na imagem da cena e a precisão da sua posição é essencial (HUNSEL, TORI & KIRNER, 2020).

Já o rastreamento, refere-se à habilidade do sistema em compreender o movimento e a direção de um usuário ou elemento virtual em relação ao ambiente circundante (cena) (SON et al., 2022).

O rastreamento em ambientes de RM pode ser categorizado em dois tipos: rastreamento baseado em Marcadores e o rastreamento sem o uso de Marcadores, no inglês *Markerless Mixed Reality* (HUNSEL, TORI & KIRNER, 2020), conforme exemplificado na Figura 16. No entanto, embora não seja uma tarefa trivial, as técnicas de rastreamento presentes em ambas as categorias podem ser combinadas conforme necessidade da aplicação.

Figura 16 - Categorização das técnicas de rastreamento em RA e RM



Fonte: Adaptado e traduzido de Sadeghi-Niaraki & Choi, 2020

Os próximos dois tópicos abordarão detalhadamente as duas categorias de rastreamento: aquelas baseadas em Marcadores e as que dispensam o uso de Marcadores. No entanto, serão abordadas exclusivamente as técnicas mais amplamente utilizadas na literatura que desempenham um papel relevante para o escopo desta tese.

2.6.4.1 Rastreamento baseado em Marcadores

O processo de rastreamento em ambientes de RM é frequentemente realizado por técnicas de visão computacional, sendo a utilização repetitiva de algoritmos de registro a estratégia mais amplamente adotada (HOUNSEL, TORI & KIRNER, 2020).

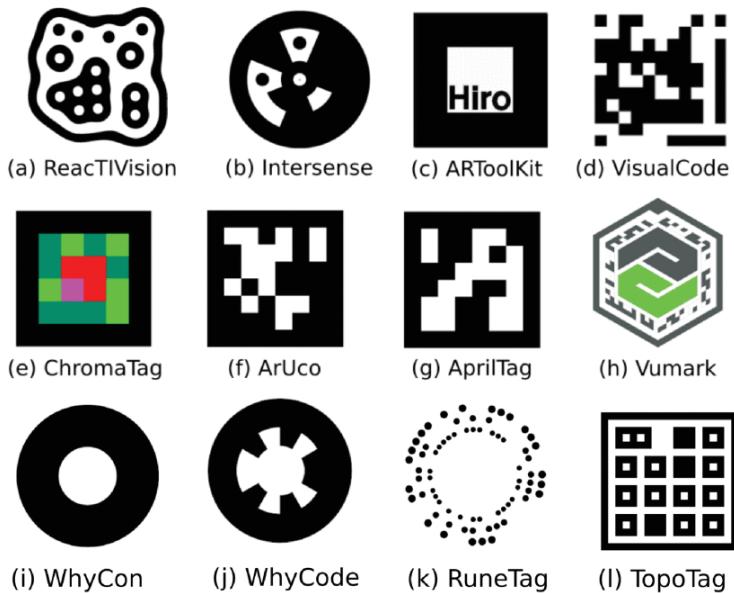
Vários frameworks amplamente reconhecidos, como ARToolKit, FLARToolKit, Vuforia, Wikitude, EasyAR, MaxST e Kudan simplificam a implementação de sistemas de rastreamento em ambientes de RM, eliminando a necessidade de programadores desenvolverem algoritmos manualmente (VAKALIU & POCHTOVIUK, 2021).

A simplificação acontece devido à incorporação de algoritmos de visão computacional nas APIs dos frameworks mencionados (SYED et al., 2023). Esses frameworks apresentam uma interface intuitiva que permite ao desenvolvedor posicionar elementos virtuais de forma precisa sobre marcadores com apenas alguns cliques e deslocamentos do cursor do mouse (ZHYLENKO et al. 2021). Adicionalmente, os frameworks citados têm a capacidade de oferecer suporte para a otimização do rastreamento de marcadores, utilizando sensores adicionais

frequentemente presentes em dispositivos como tablets e Headset HMD (VAKALIUK & POCHTOVIUK, 2021).

Vale ressaltar, que os marcadores fiduciais são amplamente utilizados em aplicações de RM (VAKALIUK & POCHTOVIUK, 2021). Esses marcadores consistem em cartões contendo uma estrutura com um símbolo incorporado (JURADO-RODRÍGUEZ et al., 2021), conforme ilustra a Figura 17. Frequentemente projetados com formas em preto e branco para proporcionar um excelente contraste e independência em relação à manipulação de cores pela câmera (SCHMALSTIEG & HOLLERER, 2016). Esses marcadores desempenham uma função semelhante aos códigos de barras 2D, possibilitando a aplicação de técnicas de visão computacional (normalmente algoritmos de registro) para o seu reconhecimento (HUNSEL, TORI & KIRNER, 2020).

Figura 17 - Exemplos de Marcadores Fiduciais



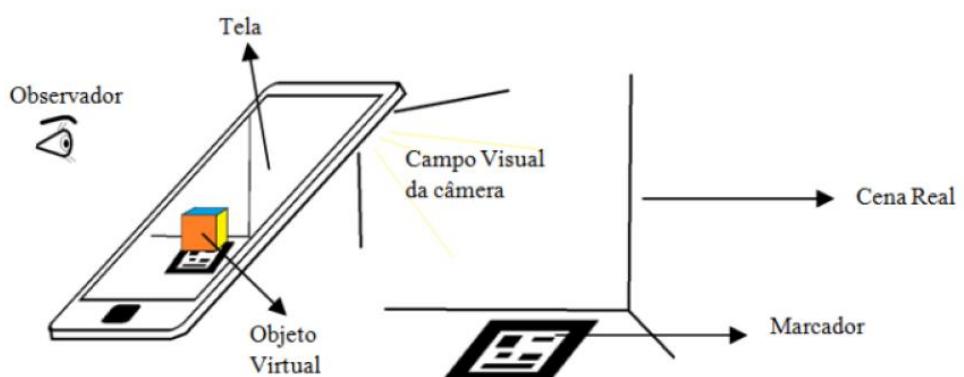
Fonte: Jurado-Rodríguez et al., 2021

O uso de marcadores fiduciais proporciona a capacidade de calcular com precisão a posição e a orientação da câmera real em relação aos marcadores presentes na cena (ASHWINI, PATIL & SAVITHA, 2020). Dessa forma, o sistema é habilitado a sobrepor elementos virtuais de maneira extremamente eficiente e precisa sobre os marcadores fiduciais (HUNSEL, TORI & KIRNER, 2020). Vale destacar, que o rastreamento de marcadores fiduciais não apenas é uma técnica de fácil implementação, mas também apresenta um custo financeiro acessível, uma vez que esses marcadores podem ser facilmente fabricados com o uso de uma impressora

comum (SCHMALSTIEG & HOLLERER, 2016). No entanto, deve-se evitar imprimir em papel brilhante, pois isso produz reflexos em ângulos de visão rasantes. (SYED et al., 2023).

Em contextos específicos, nos quais o marcador fiducial mantém uma posição estática na aplicação, enquanto apenas o observador se movimenta, seu uso é altamente recomendável (JURADO-RODRÍGUEZ et al., 2021). A Figura 18, apresentada a seguir, oferece uma representação visual de um sistema de RM implementado por um smartphone.

Figura 18 - Representação de um sistema de RA por meio de smartphone



Fonte: Kirner & Tori, 2006 apud Da Silva, Jucá & Da Silva, 2023

Entretanto, embora o rastreamento baseado em marcadores fiduciais seja robusto, demonstrando eficiência e precisão ao estabelecer os pontos de ancoragem para elementos virtuais no ambiente aumentado, sua eficácia pode ser comprometida em aplicações dinâmicas que envolvam movimentação rápida de objetos reais ou partes corporais do utilizador (LIMA et al., 2019). Isso também é observado em ambientes nos quais o marcador se desloca e eventualmente sai do campo de visão da câmera (ASHWINI, PATIL & SAVITHA, 2020).

Portanto, torna-se necessário explorar alternativas de rastreamento que possam ser aplicadas eficientemente em contextos que não demandem a presença contínua de marcador (ZHANG et al., 2021). Do mesmo modo, vale salientar que um ambiente de RM não deve permitir uma lacuna de experiência ao usuário, uma vez que, por sua própria natureza, a RM deve proporcionar uma sensação contínua e integrada de interação entre os mundos real e virtual (SPEICHER, HALL & NEBELING, 2019). Por fim, espera-se que o rastreamento em ambiente de RM ofereça uma experiência mais fluida e contínua em comparação com ambientes de RA.

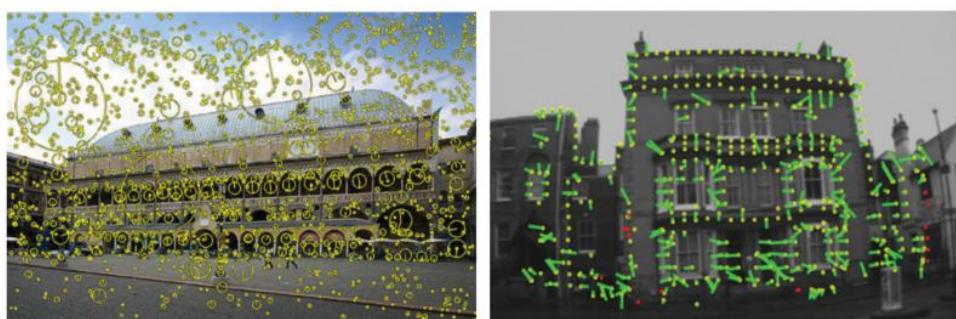
2.6.4.2 Rastreamento sem marcadores

Aplicações de RA ou RM que não se utilizam de marcadores são denominadas, respectivamente, RA *Markerless* e RM *Markerless* (HOUNSEL, TORI & KIRNER, 2020). As aplicações *Markerless* têm ganhado destaque devido à sua capacidade de proporcionar experiências mais flexíveis e naturais, nas quais objetos virtuais podem interagir de forma dinâmica com o ambiente real, sem depender de marcadores predefinidos (SADEGHI-NIARAKI & CHOI, 2020). Esse tipo de abordagem é especialmente relevante em situações em que a liberdade de movimento e a adaptação contínua a ambientes em constante mudança são essenciais (SYED et al., 2023).

O rastreamento *Markerless* pode ser obtido por três abordagens: por meio de técnicas de visão computacional, por meio de sensores, ou por uma combinação híbrida que integra esses dois métodos (SCHMALSTIEG & HOLLERER, 2016).

Em ambientes de interface *Markerless*, diversas técnicas de visão computacional podem ser utilizadas. Entretanto, a técnica de visão computacional destinada à identificação de pontos de interesse no rastreamento de ambientes em RA e RM utiliza as características intrínsecas do ambiente real para posicionar objetos virtuais, eliminando a necessidade de marcadores (SADEGHI-NIARAKI & CHOI, 2020). Esses pontos de interesse podem se manifestar como cantos, pontos isolados, extremidades de linhas ou pontos em curvas, conforme ilustra a Figura 19 (SYED et al., 2023).

Figura 19 - Detecção de pontos de interesse em ambientes de RM



Fonte: Schmalstieg & Hollerer, 2016

A detecção de pontos de interesse apresenta vantagens, como a capacidade de fornecer informações sobre escala e rotação, robustez em relação a ruídos e

ocluções, além de eficiência computacional métodos (SCHMALSTIEG & HOLLERER, 2016). Entretanto, algumas desvantagens incluem a dificuldade na seleção dos pontos mais informativos para uma aplicação específica, a sensibilidade a transformações na imagem e o equilíbrio entre a quantidade de pontos de interesse e a qualidade desses pontos (HUNSEL, TORI & KIRNER, 2020).

Já o rastreamento baseado em sensores oferece diversas tecnologias para determinar a posição e orientação dos elementos virtuais no ambiente real (SCHMALSTIEG & HOLLERER, 2016). Dentro desse método de rastreamento, é possível utilizar sensores magnéticos, ópticos, acústicos, iniciais, mecânicos e de localização (KAUR & MANTRI, 2015). A Figura 20 ilustra uma aplicação que utiliza rastreamento baseado em Sistema de Posicionamento Global (GPS).

Figura 20 - Rastreamento baseado em GPS



Fonte: Di, Li & Xu, 2021

Dentre as vantagens do rastreamento baseado em sensores, destaca-se a precisão oferecida por abordagens como o rastreamento óptico e o uso de sensores iniciais (SYED et al., 2023). Essas técnicas não apenas proporcionam medições precisas, mas também possibilitam o rastreamento em tempo real, enriquecendo as experiências com dinamismo e responsividade (SCHMALSTIEG & HOLLERER, 2016). Além disso, a versatilidade é uma característica marcante desses métodos de rastreamento, pois permite a aplicação dessas tecnologias em ambientes internos ou externos, o que os torna flexíveis e aplicáveis em uma variedade de cenários (SADEGHI-NIARAKI & CHOI, 2020).

No entanto, é fundamental reconhecer alguns desafios inerentes a esse tipo de rastreamento. A latência e o desvio ao longo do tempo são preocupações importantes por poderem impactar a precisão da medição de posição do elemento virtual (SCHMALSTIEG & HOLLERER, 2016). Além disso, limitações ambientais, como

aquelas associadas a sensores magnéticos, podem resultar em eficácia reduzida em ambientes contendo elementos metálicos ou campos magnéticos (SADEGHI-NIARAKI & CHOI, 2020).

O rastreamento híbrido em ambientes de RM envolve a combinação de duas ou mais técnicas de rastreamento (SCHMALSTIEG & HOLLERER, 2016). Ele deve ser utilizado para otimizar a eficiência dos sistemas de rastreamento, permitindo a exploração de sinergias entre diferentes tecnologias para obter robustez, velocidade e precisão, enquanto reduz eventuais atrasos e ruídos (SINGH & MANTRI, 2015 apud PINZ, 2001).

A integração de diversos dispositivos de rastreamento em um sistema híbrido não apenas viabiliza uma personalização flexível para diversas aplicações, mas também supera de maneira eficaz as limitações inerentes ao rastreamento individual (MA et al., 2022). Nesse contexto, o rastreamento híbrido oferece oportunidades para a implementação de aplicações que suportam rastreamento *Markerless* vestível, independente de marcadores, ao integrar sensores e雇用rastreadores externos respaldados por técnicas de visão computacional (SYED et al., 2023). Isso permite que tais rastreadores externos não fiquem restritos ao campo visual direto do usuário, apresentando-se como uma solução abrangente e robusta para cenários caracterizados por movimentação intensa e rápida.

Por fim, a implementação do rastreamento híbrido surge como um componente essencial para o desenvolvimento de sistemas em ambientes de RM, especialmente em contextos de simulação e treinamento, devido à sua capacidade de proporcionar uma experiência mais imersiva e eficiente. Entretanto, vale destacar a carência de dispositivos vestíveis portáteis de baixo custo que possam fornecer dados precisos de orientação e posição do usuário no espaço tridimensional.

2.7 Jogos Sérios

Um jogo representa uma competição, seja física ou mental, pautada por regras específicas, visando proporcionar diversão ou recompensa aos participantes (ZYDA, 2005 apud LIMA et al, 2019). Todavia, existem jogos que se concentram em propostas mais específicas, sendo denominados “Jogos Sérios” do inglês “*Serious Games*” (DERRYBERRY, 2008 apud CAVALCANTE et al., 2018).

Os jogos sérios são desenvolvidos com a finalidade de educar ou aprimorar habilidades, aplicando os princípios motivacionais dos jogos para propósitos mais "sérios" (MERT et al., 2018). Assim, por priorizar um propósito educacional ou reabilitador explícito, os jogos sérios se distinguem de jogos cujo único objetivo é proporcionar entretenimento (CYRINO et al., 2019, p. 10).

A integração de elementos instrucionais com técnicas de videogame nos jogos sérios resulta em experiências envolventes e interativas, direcionadas a alcançar objetivos de aprendizado ou promover comportamentos positivos (LAMERAS et al., 2017; DOS SANTOS et al., 2017). Desse modo, os jogos sérios se apresentam como estratégias de ensino dinâmicas, não apenas gerando motivação e envolvimento, mas também facilitando um aprendizado significativo nos jogadores por meio da exploração ativa (DE MEDEIROS et al., 2023).

De fato, pesquisas que utilizam estratégias de jogos sérios são muito promissoras, pois podem adaptar procedimentos para treinamento, simulação e educação, podendo serem executados em computadores, videogames ou dispositivos portáteis (TAN, LAU & LIAW, 2017; SOUZA, CLASSE & CASTRO, 2023).

Na área da saúde, os jogos sérios têm sido utilizados para diversos fins, como, treinamento médico, telemedicina, terapia e reabilitação (AKSOY, 2019). Além disso, eles podem desempenhar um papel essencial como ferramenta de apoio ao tratamento de pacientes, contribuindo de maneira benéfica para sua recuperação física e mental (DADACZYNSKI et al., 2023). A Figura 21 ilustra um exemplo de jogo sério para treinamento de profissionais de saúde para ambientes hospitalares.

Figura 21 - Jogo Sério CareMe® para treinamento de profissionais de saúde.

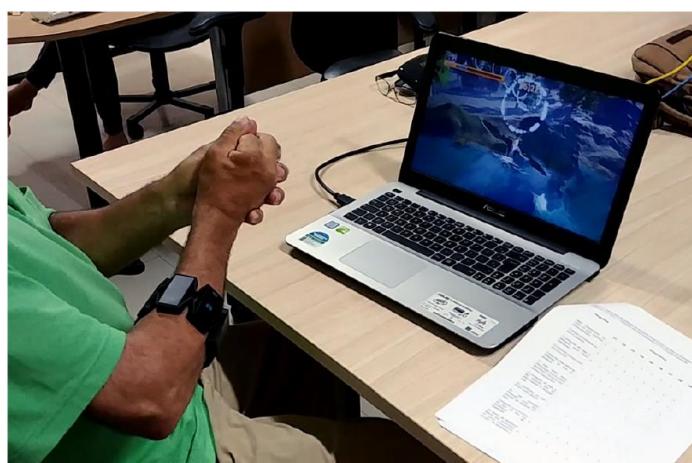


Fonte: Koivisto et al. 2017

No contexto do treinamento, os jogos sérios têm relevância significativa, sendo particularmente valiosos para capacitar indivíduos em tarefas consideradas complexas ou em simulações de situações práticas que não podem ser facilmente reproduzidas (SCHILD et al., 2018).

Jogos sérios de qualidade têm a capacidade de oferecer feedback claro, consistente e significativo em resposta às ações do usuário (VIGLIALORO et al., 2023). Esses feedbacks podem manifestar-se de maneira visual, auditiva, vibratória e em tempo real (BURKE et al., 2010 apud LIMA et al., 2019). Aumentando assim a motivação do usuário, que é essencial para impulsionar o processo de aprendizagem (MERT et al., 2018). Na Figura 22, é apresentado um jogo sério que oferece feedback visual e auditivo, destinado a indivíduos que passam por reabilitação após sofrerem um Acidente Vascular Cerebral (AVC).

Figura 22 - Jogo Sério para reabilitação de AVC



Fonte: Cyrino et al. (2019, p. 65).

Segundo MITGUTSCH & ALVARADO (2012), um conjunto de características devem ser harmoniosamente integradas, a fim de contribuir com a eficácia de aprendizado dos jogos sérios. A Figura 23 ilustra uma estrutura de design de jogos sérios. Em seguida, são apresentadas cada característica relevante.

Figura 23 - Estrutura de avaliação de design de jogos sérios



Fonte: Adaptado e traduzido Mitgutsch & Alvarado, 2012

- **Propósito Definido:** O jogo deve ter um propósito claro e específico associado aos objetivos.
- **Conteúdo e Informação Relevante:** Deve fornecer conteúdo e informações que estejam alinhados com o propósito do jogo, geralmente transmitindo mensagens educacionais, éticas ou sociais.
- **Mecânicas de Jogo Convincentes:** As mecânicas do jogo devem ser envolventes e desafiadoras, proporcionando uma experiência de aprendizado significativa enquanto mantêm a atenção do jogador.
- **Ficção e Narrativa Coerentes:** A história e a narrativa do jogo devem ser coesas e alinhadas com os objetivos educacionais ou informativos, contribuindo para a compreensão do jogador.
- **Estética e Gráficos Bem Projetados:** Os elementos visuais do jogo devem ser cuidadosamente projetados para transmitir a mensagem de forma eficaz, seja por meio de gráficos realistas ou estilos artísticos específicos.
- **Enquadramento Adequado:** O jogo deve ser projetado levando em consideração o público-alvo, sua literacia de jogo e o contexto mais amplo do tópico abordado.

Todos os elementos do jogo devem trabalhar de maneira coesa para criar uma experiência holística e garantir que o propósito do jogo seja refletido em todos os aspectos do design.

Nos últimos anos, houve um crescente interesse em pesquisas que busquem integrar estratégias de jogos sérios com tecnologias de interface (VIGLIALORO et al., 2023). No caso específico da associação de jogos sérios com RM, evidenciam-se benefícios significativos, pois os jogos sérios têm a capacidade de ampliar a motivação e o engajamento dos indivíduos durante a utilização da aplicação (LAMPROPOULOS et al., 2023).

Por fim, integrar estratégias de jogos sérios com RM e aplicá-las na reabilitação de indivíduos com amputação de membros superiores pode resultar em consideráveis benefícios. No entanto, as estratégias para se criar jogos sérios associados a RM são extremamente dependentes de dispositivos tecnológicos avançados.

2.8 Considerações Finais

Este capítulo apresentou os conceitos teóricos acerca do tema desta tese. Inicialmente, foram apresentadas questões relacionadas a amputações de membros superiores, oferecendo uma análise detalhada dos diversos níveis de amputação. Em seguida, foram exploradas as formas de obtenção de uma prótese e os tipos de próteses disponíveis no mercado, focando principalmente nas próteses mioelétricas. Posteriormente, foram discutidos aspectos relacionados à Reabilitação e Treinamento e Sensação de Incorporação. Seguindo adiante, foram apresentados os conceitos fundamentais das tecnologias de interface avançada, como Realidade Virtual, Realidade Aumentada e Realidade Mista. Por fim, foram apresentados a definição de Jogos Sérios, contextualizando sua relevância no contexto deste estudo.

O próximo capítulo apresenta um estudo comparativo de trabalhos relacionados com o tema desta tese, com destaque para tecnológicos apresentados neste capítulo de fundamentação teórica.

Capítulo 3

Trabalhos Correlatos

3.1 Introdução

Neste capítulo, são abordados trabalhos relacionados ao tema proposto, focando em investigar artigos que utilizam interfaces em Realidade Mista no treinamento para controle de prótese por pessoas com amputação de membros superiores e que farão uso de próteses mioelétricas. Além disso, a análise destes estudos visa fornecer uma compreensão abrangente do estado atual de pesquisas de sensação de incorporação de prótese mioelétricas no contexto citado. Ao final, é apresentada a proposta de contribuição desta tese, considerando os demais trabalhos publicados na área.

3.2 Metodologia da Revisão

Para analisar os trabalhos, a metodologia incluiu a realização de uma busca nas seguintes bibliotecas digitais específicas disponível na Plataforma Periódicos Capes, a saber, *ACM Digital Library*, *IEEE Xplorer Digital Library*, *PubMed Central: PMC*, *Medline/PubMed*, *Scopus Preview* e *Web of Science*. Nesta revisão, os critérios de busca foram definidos por meio de palavras-chave relacionadas com o tema da pesquisa em todo o corpo do texto. Para simplificar o processo de coleta, organização e citação de fontes dos trabalhos relacionados foi utilizada a ferramenta Start (FABBRI, et al., 2018).

Para garantir uma padronização na abordagem de busca, foram utilizadas strings personalizadas, incorporando palavras-chave específicas e um formato definido: (“*augmented reality*” OR “*augmented-reality*” OR “*mixed reality*” OR “*mixed-reality*”) AND (“*upper limb*”) AND (*Prosthesis* OR *prosthetic*) AND (*rehabilitation* OR

training OR embodiment). Após as buscas em todas as bibliotecas, chegou-se ao número de 1332 registros encontrados. As strings estão disponíveis no Apêndice I.

Na biblioteca ACM Digital Library, realizou-se uma busca ampliada por meio da opção “ACM Guide to Computing Literature”. Como resultado, observou-se um aumento no número de registros nesta biblioteca, passando de 60 para 105.

Com o propósito de otimizar a revisão da literatura, foram aplicados filtros iniciais para aprimorar a seleção. Os seguintes critérios foram adotados:

- **Filtro 01 - Temporal:** Limitou-se a análise ao período de 2017 a 2023, buscando incorporar estudos contemporâneos e pertinentes ao escopo da pesquisa.
- **Filtro 02 - RA e RM:** Os filtros específicos para RA e RM foram aplicados exclusivamente na plataforma Scopus. Ressalta-se que essa plataforma não conseguiu recuperar com precisão, através da string de pesquisa, somente artigos relacionados a RA e RM.
- **Filtro 03 - Duplicados:** Realizou-se a remoção de registros duplicados, assegurando que cada artigo fosse considerado apenas uma vez no conjunto de resultados.
- **Filtro 04 - Análise de Título:** Este filtro visa garantir que todos os registros identificados fossem exclusivamente artigos, excluindo possíveis metadados ou outros tipos de documentos.
- **Filtro 05 – Análise do Resumo:** Realizou-se com a finalidade de assegurar que os trabalhos examinados estejam estritamente relacionados ao tema da tese. Assim neste filtro, foram aplicados os seguintes critérios de inclusão e exclusão:
 - **Inclusão:**
 - Trabalhos que abordassem ambientes de treinamento em RM ou RA para treinamento (manipulação de próteses) de indivíduos com amputação de membros superiores que farão o uso de próteses mioelétricas.
 - **Exclusão:**
 - Trabalhos que não abordarem ambientes de treinamento em RM ou RA para treinamento (manipulação de próteses) de indivíduos com amputação de membros superiores que farão o uso de próteses mioelétricas.

- Trabalhos que utilizem métodos de manipulação híbridos para próteses mioelétricas;
 - Trabalhos que apresentem análise comparativas entre ambientes de RA e RV;
- **Filtro 06** - Realizou-se a análise do texto com finalidade de assegurar que trabalhos examinados integralmente sejam artigos completos. Assim neste filtro, foram aplicados os seguintes critérios de inclusão e exclusão:
 - **Inclusão:**
 - Trabalhos publicados e disponíveis integralmente em bases de dados científicas ou em versões impressas;
 - Trabalhos que apresentem resultados quantitativos ou qualitativos;
 - **Exclusão:**
 - Trabalhos que não tinham acesso ao texto completo;
 - Trabalhos curtos, Resumos estendidos e Posters.
- **Filtro 07** – Realizou-se uma análise centrada na identificação de estudos que incorporam objetos virtuais tridimensionais em ambiente misto, priorizando aqueles que apresentam interfaces em primeira pessoa. Este critério específico visa destacar a importância não apenas da dimensão tridimensional, mas também da perspectiva de interação em primeira pessoa com esses objetos virtuais e a assimilação da incorporação da prótese na cena. Assim neste filtro, foram aplicados os seguintes critérios de inclusão e exclusão:
 - **Inclusão:**
 - Trabalhos que integram objetos virtuais tridimensionais como componente essencial de sua investigação.
 - Trabalhos que apresentem interação entre os objetos tridimensionais virtuais.
 - Trabalhos que apresentam interfaces em primeira pessoa durante a interação com objetos tridimensionais virtuais.
 - **Exclusão:**
 - Trabalhos que se restringem ao uso de elementos virtuais apenas em formato textual, sem a incorporação de objetos tridimensionais.

- Trabalhos que não apresentam interação significativa entre os objetos tridimensionais virtuais. Exemplo: prótese virtual com outros objetos virtuais.
- Trabalhos que não adotam uma perspectiva em primeira pessoa na interação com os objetos virtuais tridimensionais.

Após a aplicação do Filtro 01, foram identificados 1130 registros. Em seguida, ao aplicar o Filtro 02 na biblioteca Scopus, o número foi reduzido para 501. Desses, o Filtro 03 eliminou 62 registros duplicados, resultando em um total de 439. A aplicação subsequente do Filtro 04 removeu mais 67 registros, deixando 372 artigos para análise.

O Filtro 05 - Análise do Resumo teve o maior impacto, excluindo 358 artigos, deixando apenas 14 para avaliação. O Filtro 06 excluiu apenas 2 artigos, que foram considerações artigos curtos, resultando em 12 registros. Por fim, o Filtro 07 eliminou 7 artigos, deixando um total de 5 artigos para uma análise mais detalhada.

A Tabela 1 apresenta a quantidade de registros encontrados em cada base, destacando o fluxo de exclusões.

Tabela 1 - Quantidade de Trabalhos Encontrados

Base de Dados	Quantidade de Registros	Filtros						
		01	02	03	04	05	06	07
ACM Digital Library	105	96	96	78	55	0	0	0
IEEE Xplorer Digital Library	161	134	134	119	83	3	2	2
Medline/PubMed	5	2	2	1	1	1	1	0
PubMed Digital Library	161	139	139	135	127	0	0	0
Scopus Preview	887	749	120	101	101	8	7	2
Web of Science	13	10	10	5	5	2	2	1
Total de Artigos	1332	1130	501	439	372	14	12	5

Fonte: Autoria Própria.

Após a aplicação de todos os filtros, restaram para análise os trabalhos dispostos na Tabela 2.

Tabela 2 - Trabalhos Analisados

Autor	Título do Artigo
Nishino et al., 2017	Development of a Myoelectric Prosthesis Simulator using Augmented Reality
Sharma et al., 2018	A Mixed-Reality Training Environment for Upper Limb Prosthesis Control;
Palermo et al., 2019	An Augmented Reality Environment to Provide Visual Feedback to Amputees During sEMG Data Acquisitions;
Boschmann et al., 2021	Immersive Augmented Reality System for the Training of Pattern Classification control with a Myoelectric Prosthesis;
Hunt et al., 2023	Limb Loading Enhances Skill Transfer Between Augmented and Physical Reality Tasks During Limb Loss Rehabilitation;

Fonte: Autoria Própria.

A seguir, serão apresentados os trabalhos analisados, organizados por data de publicação e identificados pelo nome da aplicação correspondente.

3.2.1 AR_Prosthesis_Simulator

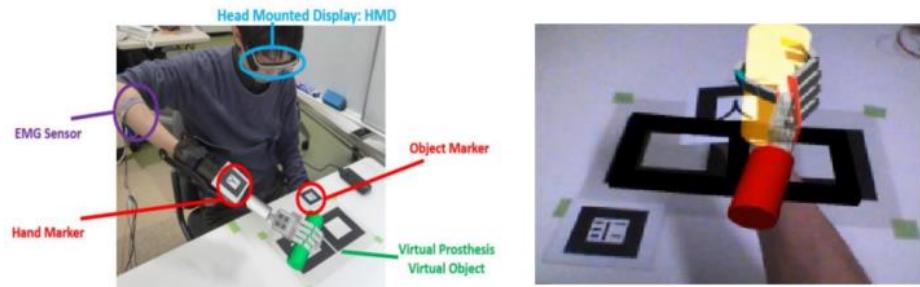
Nishino et al. (2017), apresenta um simulador de prótese mioelétrica baseado em Realidade Mista, destinado ao treinamento e reabilitação de indivíduos com membros superiores amputados. O objetivo do sistema é auxiliar amputados de membros superiores no controle de prótese, permitindo-lhes treinar movimentos da prótese virtual em um ambiente seguro e controlado.

O sistema utiliza um marcador fiducial para rastrear a posição e a rotação do membro amputado, bem como para posicionar outros elementos virtuais na cena de treinamento. A prótese virtual é renderizada em tempo real, sobrepondo-se à imagem do membro real do usuário, contudo, não há uma integração completa entre os elementos virtuais e reais. A prótese virtual responde em tempo real, possibilitando que o usuário pratique movimentos de forma natural. No entanto, a amplitude de movimento está restrita ao campo de visão do usuário, pois o método de rastreamento se baseia exclusivamente nos marcadores fiduciais. Cada vez que o marcador sai do campo de visão da câmera ou do usuário, o elemento virtual perde sua renderização. Ao reaparecer no campo de visão, o objeto é novamente renderizado. No entanto, há

um intervalo em que o marcador permanece sem elementos virtuais sobrepostos. No contexto da prótese virtual, isso poderia afetar a sensação de incorporação por parte do usuário.

A abertura e fechamento da prótese virtual é controlada por sinais de eletromiografia (EMG), coletados da superfície da pele do usuário. A Figura 24 ilustra um usuário utilizando o sistema desenvolvido por Nishino et al. (2017).

Figura 24 - Sistema AR_Prosthesis_Simulator



Fonte: Nishino et al., 2017

O sistema proporciona uma atividade de treinamento que consiste em pegar um objeto em um ponto e transportá-lo até outro ponto. Embora o sistema incorpore elementos lúdicos para propósitos de treinamento e reabilitação, não se classifica como um jogo sério. A pesquisa incluiu a participação de cinco indivíduos sem amputações, os quais executaram a tarefa de manipular e posicionar objetos virtuais utilizando a prótese virtual.

Os resultados indicaram que o simulador é capaz de rastrear a posição e a rotação do membro amputado com precisão limitada e renderizar a prótese virtual em tempo real de maneira eficiente. Os participantes foram capazes de controlar a prótese virtual com seus sinais de EMG e realizar a tarefa de pegar e colocar objetos com sucesso.

Por fim, é importante salientar que o trabalho não aborda a sensação de incorporação da prótese virtual.

3.2.2 HoloPHAM

Sharma et al. (2018), apresentou um ambiente de treinamento de RM para controle de próteses mioelétricas de membro superior. O objetivo do estudo foi avaliar

a viabilidade e a eficácia do sistema para auxiliar na reabilitação e no aprendizado do controle de próteses.

O sistema de RM desenvolvido utiliza o Microsoft HoloLens™ como dispositivo de saída, projetando elementos holográficos no ambiente real. O sistema possui dois elementos holográficos tridimensionais: a prótese virtual e cilindros virtuais. Ambos os objetos são projetados à frente do usuário e visualizados em primeira pessoa.

O rastreamento do membro amputado é realizado por meio de dois sensores iniciais MPU9250, colocados no bíceps e ombro. Os objetos virtuais são integrados ao ambiente real, permitindo uma interação natural e fluida por parte do usuário.

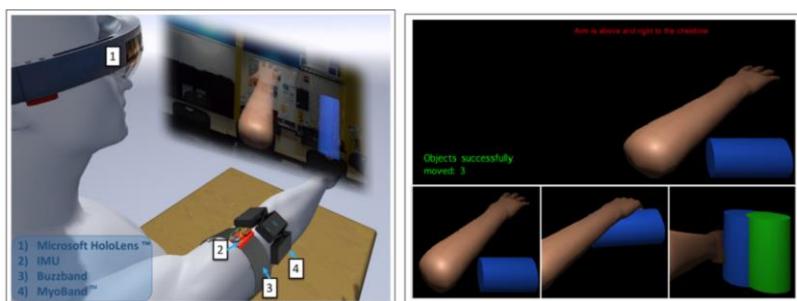
A abertura e fechamento da prótese virtual é controlada por sinais de eletromiografia (EMG), coletados por meio da braçadeira Myo. A prótese virtual responde em tempo real aos movimentos do membro amputado.

No entanto, é importante observar que não há uma integração direta da prótese virtual com o coto do amputado, uma vez que ela é projetada à frente do usuário, aparentando flutuar. Essa característica limita a sensação de incorporação por parte do usuário. Apesar disso, o usuário consegue realizar os movimentos necessários para interagir de maneira eficiente com os objetos virtuais, evidenciando a eficácia do sistema.

O sistema oferece a atividade de treinamento, como pegar e mover objetos, que visam aprimorar a destreza e o controle da prótese. A vibração é utilizada como feedback sensorial para simular o toque da prótese nos objetos virtuais. As atividades podem ser configuradas com diferentes níveis de dificuldade, adaptando-se às necessidades de cada usuário.

O sistema pode ser considerado um jogo sério, pois utiliza elementos de jogos para tornar o treinamento mais motivador e engajador. Além disso, possui um sistema de feedback e pontuação. A Figura 25 ilustra a interface do sistema desenvolvido.

Figura 25 - Sistema HoloPHAM



Fonte: Sharma et al., 2018

O estudo envolveu dois voluntários não amputados que testaram o sistema em duas sessões. Na primeira sessão, os participantes realizaram as atividades de treinamento sem feedback sensorial. Na segunda sessão, o feedback sensorial foi ativado.

Os resultados demonstraram que o sistema é viável e eficaz para o treinamento de amputados de membros superiores. O feedback sensorial contribuiu para a melhora do desempenho nas atividades de treinamento, mostrando-se um grande potencial para auxiliar na reabilitação e no aprendizado do controle de próteses em amputados de membros superiores.

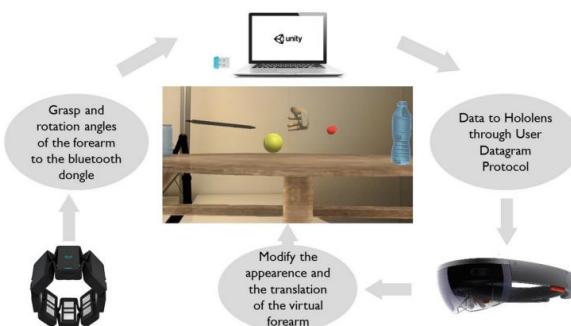
Entretanto, é importante salientar que o trabalho não aborda a sensação de incorporação da prótese virtual.

3.2.3 AR_Rehabilitation

Palermo et al. (2019), apresentou um sistema de RA que fornece feedback visual em tempo real para amputados de membros superiores durante o treinamento de controle de prótese mioelétricas. O sistema integra o headset Microsoft HoloLens e a braçadeira Myo para permitir que os usuários visualizem uma mão virtual e objetos virtuais.

No Microsoft HoloLens é possível visualizar todos os elementos holográficos tridimensionais presentes no sistema. O principal objeto holográfico é a prótese. Entretanto, o sistema possui outros elementos holográficos tais como: garrafas, bolas e canetas. A Figura 26 ilustra a interface do AR_Rehabilitation.

Figura 26 - Sistema AR_Rehabilitation



Fonte: Palermo et al., 2019

O método de rastreamento do membro amputado envolve o uso de uma braçadeira Myo, que utiliza sensores iniciais para detectar a orientação do coto.

Contudo, não há uma integração entre o coto do amputado e mão virtual, pois a mão fica flutuado. Essa característica limita a sensação de incorporação por parte do usuário. A prótese virtual responde em tempo real aos movimentos do membro amputado.

A abertura e fechamento da prótese virtual é controlada por sinais de eletromiografia (EMG), coletados por meio da braçadeira Myo. O sistema permite que os usuários pratiquem os seguintes movimentos: extensão do dedo indicador, tripé, grande diâmetro e repouso.

As atividades de treinamento consistem em realizar movimentos com a mão virtual a fim de agarrar os demais objetos virtuais. Embora o sistema incorpore elementos lúdicos para propósitos de treinamento e reabilitação, não se classifica como um jogo sério.

O protocolo de teste envolveu cinco participantes não amputados, divididos em dois grupos: experientes e não experientes. Os resultados indicaram uma melhoria significativa na eficiência ao longo das repetições, sugerindo que o ambiente de RA é viável e que o controle da mão virtual melhora com o treinamento.

Entretanto, é importante salientar que o trabalho não aborda a sensação de incorporação da prótese virtual.

3.2.4 ARlimb

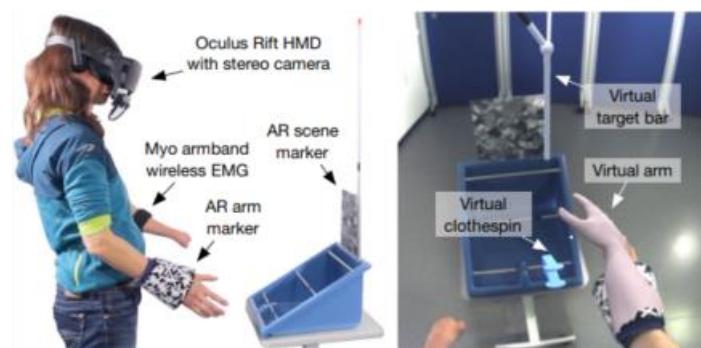
Boschmann et al. (2021) desenvolveu um estudo com o intuito de aprimorar a destreza e o desempenho de indivíduos amputados de membros superiores na manipulação de próteses mioelétricas. Foi desenvolvido um sistema de treinamento em RA com ênfase na manipulação de objetos virtuais. Essa abordagem visa facilitar uma transição mais suave para o uso efetivo da prótese real.

O sistema adotou uma abordagem de rastreamento utilizando um par de câmeras estéreos e marcadores fiduciais para monitorar em tempo real a posição e orientação do membro onde o marcador está localizado. A braçadeira Myo foi colocada no braço esquerdo (coto), e um marcador fiducial no braço direito (não amputado). A abertura e fechamento da prótese virtual são controlados em tempo real pelos sinais EMG's coletados do membro residual por meio da braçadeira Myo.

Os objetos virtuais 3D foram integrados ao ambiente real por meio de marcadores fiduciais, permitindo a interação do usuário com a prótese virtual. No entanto, vale destacar que a interação do usuário é limitada, pois há a necessidade de manter os marcadores fiduciais dentro do campo de visão da câmera para evitar a perda de renderização dos objetos.

Sempre que o marcador se situa fora do campo de visão da câmera ou do usuário, ocorre a interrupção na renderização do elemento virtual. Ao reintegrar o campo de visão, o objeto é novamente submetido ao processo de renderização. No entanto, há um período em que o marcador permanece desprovido de elementos virtuais sobrepostos. Esta circunstância, quando aplicada à prótese virtual, pode influenciar significativamente a percepção de incorporação por parte do usuário. A Figura 27 ilustra um usuário utilizando o sistema ARlimb.

Figura 27 - Sistema ARlimb



Fonte: Boschmann et al., 2021

Para proporcionar um ambiente de treinamento envolvente, o sistema foi implementado como um jogo sério, incorporando elementos de gamificação para aumentar a motivação e o engajamento do usuário. A principal atividade de treinamento ofertada é a tarefa de prendedor de roupa virtual. Contudo, a aplicação é modularizada e outras tarefas de treinamento podem ser implementadas no sistema ARlimb.

O sistema foi testado por treze pessoas sem amputações e uma pessoa com deficiência de membro superior. Os resultados indicaram melhorias no desempenho, com a prótese virtual, demonstrando a transferência de habilidades adquiridas. A experiência do usuário, foi avaliada por questionários, destacando a utilidade do feedback visual. O estudo sugere que o sistema de RA desenvolvido é uma ferramenta promissora para o treinamento de controle de próteses mioelétricas.

Porém, é importante notar que o trabalho não aborda a sensação de incorporação da prótese virtual.

3.2.5 ARPHAN

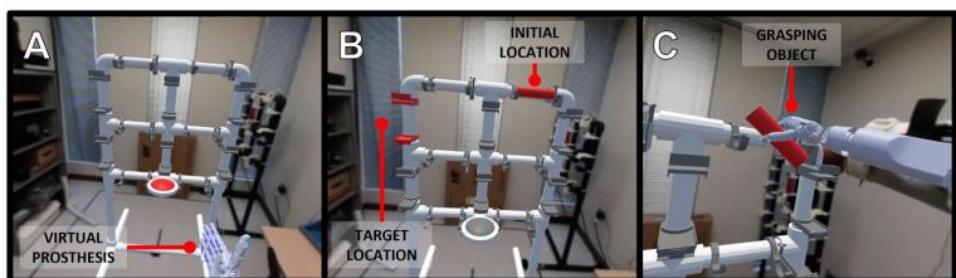
Hunt et al. (2023) apresentou um estudo que investiga a aplicação da RA no treinamento do controle de próteses mioelétricas em amputados de membros superiores, visando determinar a eficácia da RA na transferência de habilidades do ambiente aumentado para o mundo real.

O método de rastreamento adotado para o membro amputado foi uma abordagem híbrida desenvolvida pela HTC Vive, utilizando a tecnologia chamada Lighthouse. Esse método faz uso dos dispositivos HTC Vive Tracker 2.0 e HTC Vive Base Station. Apesar de eficiente em ambientes de RV, o sistema enfrenta desafios em ambientes de RM devido a atrasos na sincronização de movimentos e a efeitos de desfoque no plano de fundo da imagem.

A leitura de sinais de EMG foi realizada por meio da braçadeira Myo, posicionada no braço do usuário. Esses sinais EMG foram utilizados em tempo real para controlar a abertura e fechamento da prótese virtual.

O sistema foi implementado como um jogo sério, incorporando elementos de gamificação para aumentar a motivação do usuário. A atividade de treinamento consistiu na manipulação de objetos cilíndricos, dividida em quatro fases: Alcançar, Agarrar, Transportar e Soltar. A Figura 28 ilustra um usuário utilizando o sistema ARPHAN.

Figura 28 - Sistema AR-PHAN desenvolvido na Universidade Johns Hopkins



Fonte: Hunt et al., 2023

O sistema foi avaliado por doze participantes sem amputações. Os resultados indicaram uma melhoria no desempenho das tarefas no ambiente real após o treinamento em RA. Consequentemente, o estudo concluiu que o aumento da

fidelidade sensorial, proporcionado pelo carregamento do membro, contribuiu significativamente para uma transferência mais eficaz de habilidades da prótese virtual para a realidade física.

Por fim, é importante destacar que, embora o estudo levante a hipótese da relação entre a falta de movimentos compensatórios e a possível incorporação da prótese, não foram conduzidos estudos específicos sobre esse tema.

3.3 Estudo comparativo dos trabalhos relacionados

Os trabalhos de Nishino et al. (2017), Sharma et al. (2018), Palermo et al. (2019), Boschmann et al. (2021) e Hunt et al. (2023) destacam evolução do usuário na manipulação de prótese, após a utilização de ambientes de RM. Entretanto, embora todos os estudos tenham como foco a aprendizagem e controle de próteses, é relevante observar que apenas o estudo conduzido por Boschmann et al. (2021) incluiu testes com amputados, sendo que a amostra consistiu em apenas um indivíduo amputado.

Hunt et al. (2023) sugerem que a melhoria na evolução do paciente pode estar associada à sensação de incorporação da prótese, mas não foi conduzida uma investigação aprofundada sobre o tema.

A compreensão da sensação de incorporação da prótese está intrinsecamente ligada a diversos aspectos, incluindo os sentidos de propriedade, agência, representação corporal e localização espacial (OTONO et al., 2023). Essas premissas fundamentais podem ser aprimoradas por meio da implementação de ambientes de RM. No entanto, até o momento, observa-se uma lacuna na exploração adequada de sistemas baseados em RM com o intuito específico de potencializar essa experiência.

Vale destacar que a incorporação bem-sucedida da prótese pode ser um fator determinante para usuários, uma vez que estudos anteriores observaram que aqueles que experimentam níveis mais elevados de incorporação tendem a demonstrar maior confiança e desempenho durante a interação com suas próteses (Engdahl et al, 2020). Portanto, a investigação aprofundada da aplicação prática de ambientes treinamento de RM para aprimorar a sensação de incorporação podem representar um avanço significativo no campo, promovendo benefícios substanciais para os usuários de próteses e, por conseguinte, melhorando sua qualidade de vida.

A Tabela 3, apresenta-se um estudo comparativo dos trabalhos relacionados com esta pesquisa. Para efeito de comparação entre os trabalhos pesquisados, foram adotadas seis características: Método de Rastreamento do Membro Amputado, Integração dos Objetos Virtuais com Membros Amputados, Movimentação da Prótese em Tempo Real, Atividades de Reabilitação, Jogos Sérios e Sensação de Incorporação. A seguir é justificado a escolha de cada um destes atributos:

- **Método de Rastreamento do Membro Amputado:** O método de rastreamento é fundamental para garantir uma interação eficaz entre a prótese mioelétrica e o ambiente de RM. Um rastreamento preciso do membro amputado traduz os movimentos desejados do usuário para o ambiente misto. Isto impacta diretamente na sensação de localização espacial e agência provida ao usuário amputado.
- **Integração dos Objetos Virtuais com Membros Amputados:** A integração perfeita entre os objetos virtuais e os membros amputados é essencial para criar uma sensação de realismo e presença. A capacidade de alinhar virtualmente a prótese mioelétrica com o membro amputado do paciente poderá ajudar na promoção de uma experiência mais autêntica, aumentando a aceitação da prótese pelo usuário e consecutivamente, impactando na sua representação corporal.
- **Movimentação da Prótese em Tempo Real:** A movimentação em tempo real (tempo de execução) proporciona uma experiência fluida e responsiva. Atrasos ou latências na movimentação podem comprometer a sensação de naturalidade e afetar a eficácia do treinamento. Um feedback em tempo real contribui para a sincronicidade entre os movimentos percebidos e as ações realizadas e consecutivamente, na sensação de agência.
- **Atividades de Treinamento:** Incorporar atividades de treinamento no ambiente de realidade mista oferece uma oportunidade para os usuários praticarem movimentos específicos de forma controlada e personalizada. Isso pode acelerar o processo de reabilitação ao fornecer exercícios direcionados e adaptáveis, contribuindo para o desenvolvimento de habilidades motoras e a adaptação à prótese. Além disso, a realização das atividades de treinamento pode influenciar no sentimento de propriedade sobre a prótese, visto que feedback sensorial e pistas visuais podem ajudar a reforçar este sentimento.

- **Jogos Sérios:** Como mencionado, Jogos sérios maximizam o comprometimento na reabilitação. Eles tornam as sessões de treinamento mais envolventes, motivadoras e, muitas vezes, divertidas. Assim os jogos sérios podem aumentar a atração do usuário para atividades de reabilitação, promovendo maior controle da prótese durante o treinamento.
- **Sensação de Incorporação em ambientes de Realidade Mista:** A Sensação de Incorporação em ambientes de RM é o cerne dessa pesquisa, pois está diretamente relacionada à aceitação e ao sucesso do controle da prótese, devido a intuitividade promovida. Assim, investigar como os demais fatores citados influenciam a sensação de incorporação permitirá entender melhor como os usuários percebem e aceitam a prótese mioelétrica em ambientes de RM, fornecendo informações valiosas para otimizar a tecnologia e a intervenção clínica.

Tabela 3 - Comparaçao entre os trabalhos relacionados

Autor	Método de Rastreamento do membro amputado	Integração dos objetos virtuais com membros amputados	Movimentação da prótese em tempo real	Atividades de Treinamento	Jogos Sérios	Sensação de Incorporação
Nishino et al., 2017	Marcadores Fiducias	Limitado	✓	✓	✗	✗
Sharma et al., 2018	Sensores Inerciais	✗	✓	✓	✓	✗
Palermo et al., 2019	Sensores Inerciais	✗	✓	✓	✗	✗
Boschmann et al., 2021	Marcadores Fiducias	Limitado	✓	✓	✓	✗
Hunt et al., 2023	Lighthouse	✗	✓	✓	✓	✗
Lima et al., 2025	Rastreamento Híbrido de Precisão	✓	✓	✓	✓	✓

Fonte: Autoria Própria.

Ao analisar a Tabela 3, fica evidente que existe uma demanda ainda não plenamente atendida pelo estado da arte no que se refere à sensação de incorporação em ambientes de treinamento em Realidade Mista voltados à reabilitação de

amputados de membros superiores. Observa-se que, embora os trabalhos relacionados explorem aspectos como rastreamento de movimentos, atividades de treinamento e o uso de jogos sérios, nenhum deles contempla de forma integrada todos esses elementos associados à incorporação. Nesse contexto, o trabalho de Lima et al. (2025), correspondente à tese aqui apresentada, diferencia-se das demais abordagens ao integrar rastreamento híbrido de precisão, ambientes de Realidade Mista, atividades de treinamento e jogos sérios, além de abordar explicitamente a sensação de incorporação, caracterizando um avanço em relação ao estado da arte.

Por fim, ao favorecer a sensação de incorporação em ambientes de treinamento em Realidade Mista, a proposta apresenta potencial para contribuir não apenas para o desenvolvimento de habilidades motoras, mas também para o fortalecimento da relação entre o usuário e a prótese, de maneira mais natural, ampliando as possibilidades e a efetividade do processo de treinamento de indivíduos com amputação de membros superiores.

3.4 Considerações finais

Neste capítulo, apresentou-se uma revisão sistemática por trabalhos de ambientes de Realidade Mista para treinamento de amputados de membros superiores que farão uso de próteses mioelétricas. Nestes sistemas de treinamento não foram detectados trabalhos que investiguem a sensação de incorporação da prótese durante o uso dos sistemas de treinamento. Assim, sua investigação se tornou relevante, visto que a sensação de incorporação melhora a evolução do paciente na manipulação de prótese.

No próximo capítulo, será apresentada a arquitetura do sistema desenvolvido, detalhando os elementos que compõem sua estrutura.

Capítulo 4

Arquitetura do Sistema

4.1 Introdução

Este capítulo apresenta a arquitetura do sistema que foi denominado MRProsthesis. O nome MRProsthesis foi escolhido para evidenciar, a partir da junção dos dois eixos centrais do sistema proposto. O prefixo “MR” deriva de *Mixed Reality* (realidade mista). Já o termo “*Prosthesis*” remete diretamente à palavra prótese, indicando que o foco da aplicação é o apoio ao treinamento para uso de próteses de membros superiores.

Neste capítulo é definido os elementos que constituem sua arquitetura. Inicialmente, será contextualizada a arquitetura por meio da descrição do projeto MRProsthesis. Num próximo passo, como estudo de caso, será apresentado o Teste Funcional *Box and Blocks* em detalhes. Em seguida, a arquitetura é então apresentada por meio de diagrama. A partir do fluxo do diagrama, são apresentados dispositivos de entrada, o Módulo EMG, Módulo de Rastreamento de Movimento e Módulo de Integração de Imagem e Movimento, o Painel de Configuração o Jogo Sério e os Dispositivos de Saída. Posteriormente, é apresentada a Especificação de Requisitos do Sistema. Em seguida, por meio da Modelagem UML é apresentada a representação visual da arquitetura, com foco em Casos de Uso. Por fim, são apresentados o conjunto de softwares, bibliotecas e linguagens de programação utilizados no projeto.

4.2 Descrição do Projeto

O sistema MRProsthesis foi projetado para apoiar o treinamento de indivíduos com amputação de membros superiores Transradial e Desarticulação do punho. Por

meio de reuniões quinzenais entre uma equipe multidisciplinar composta por especialistas, ficou decidido que o sistema deveria ser capaz de reproduzir, por meio de uma interface de RM, o exercício/teste funcional de reabilitação de membros superiores conhecido como *Box and Blocks* (HAVERKATE, SMIT & PLETENBURG, 2016).

A aplicação foi projetada para incorporar estratégias de jogos sérios, utilizando um sistema de pontuação para avaliar acertos, medidas de tempo e registrar as informações de desempenho de cada usuário. Isso permite uma análise evolutiva do progresso de cada indivíduo no sistema ao longo do tempo.

Além da interface de treinamento em RM, o sistema integra uma interface de gerenciamento. Nessa interface, os usuários são cadastrados, as Sessões de treinamento são configuradas e relatórios com dados históricos das Sessões realizadas, podem ser acessados.

Através da fidelidade proporcionada pelos requisitos estabelecidos para criação do ambiente misto, o sistema deverá proporcionar ao seu usuário a sensação de incorporação de próteses mioelétricas.

Por fim, o sistema MRProsthesis baseia-se na adoção do teste funcional *Box and Blocks* como narrativa para o treinamento. Essa decisão é motivada por três características: a capacidade de integração com tecnologia assistiva, a flexibilidade na adaptação às necessidades individuais e a mensuração tangível do progresso do usuário. A seguir, será apresentado o funcionamento deste teste.

4.3 Descrição do Teste Funcional *Box and Blocks*

O *Box and Blocks* é um exercício/teste terapêutico que é frequentemente utilizado na reabilitação de indivíduos com amputação de membros superiores. Seu propósito central é aprimorar a destreza manual e a coordenação motora fina do usuário. Esse exercício consecutivamente aumenta a amplitude de movimento e melhora da qualidade de vida do utilizador. Para realizar adequadamente o exercício, o participante deve utilizar sua prótese real, garantindo que esteja pronta para uso e devidamente ajustada ao seu coto.

O procedimento envolve o uso de uma caixa dividida ao meio contendo blocos. Inicialmente, os blocos são posicionados em um dos lados da caixa. Durante o treinamento, o participante utiliza a prótese real para transferir os blocos para o outro lado da caixa. O movimento de abertura e fechamento da prótese é controlado por meio da leitura de sinais eletromiográficos (EMG), com o leitor EMG localizado no encaixe do soquete do dispositivo protético.

O exercício segue as seguintes etapas:

1. O paciente deve sentar-se em uma cadeira confortável, com uma mesa de superfície plana à sua frente. Sobre a mesa, encontra-se a caixa dividida ao meio que contém blocos.
2. Utilizando a mão da prótese real e o coto, o paciente movimenta os blocos de um lado para o outro da caixa.
3. O paciente pode optar por mover os blocos individualmente, em grupos ou seguindo uma sequência específica, conforme orientação do terapeuta.

O Box and Blocks também é utilizado como um teste para avaliar o progresso do paciente durante o processo de reabilitação. As avaliações são conduzidas de duas maneiras distintas:

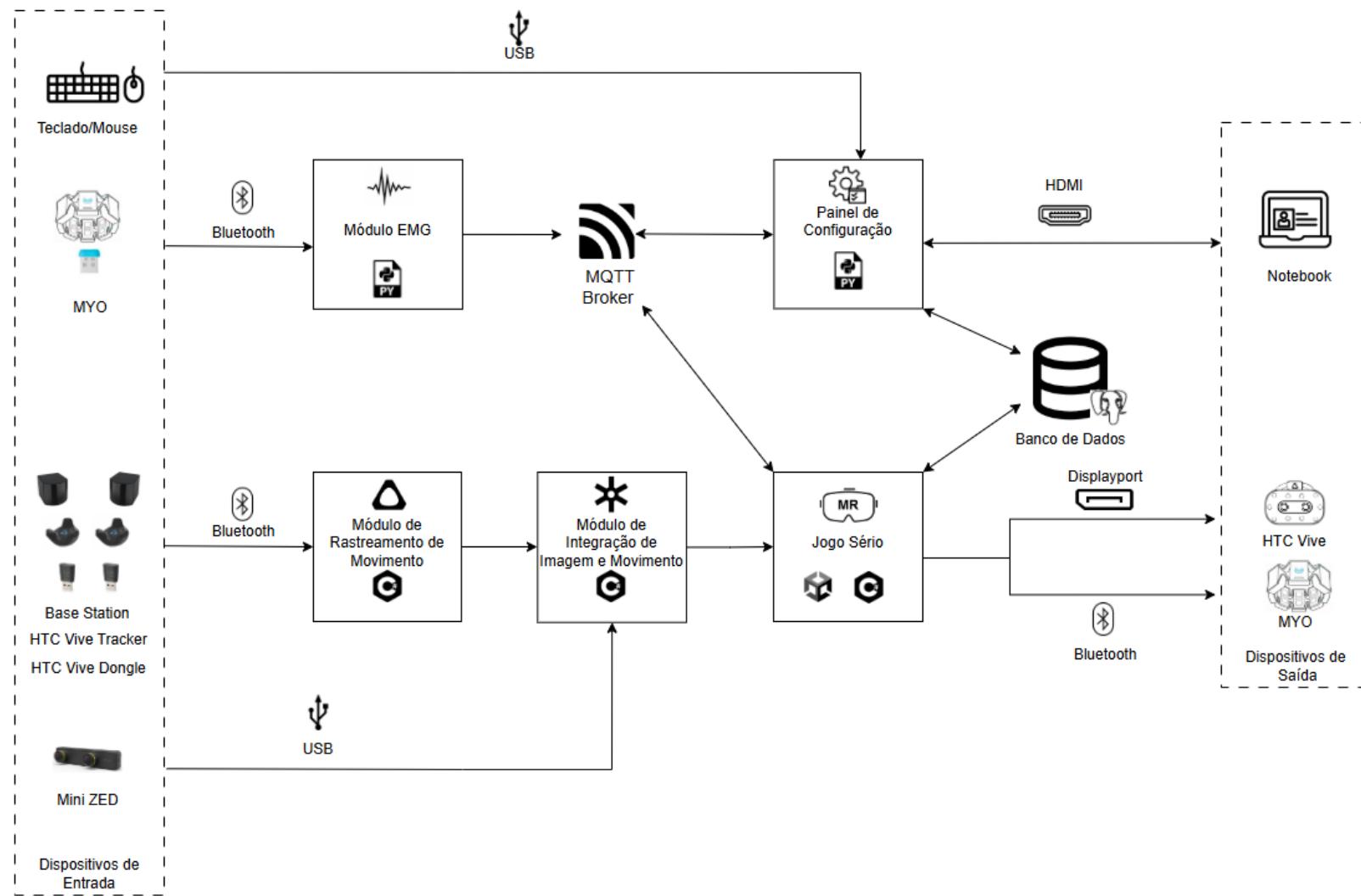
1. Registra-se o tempo que o paciente leva para transferir todos os blocos de um lado para o outro da caixa, utilizando um cronômetro
2. Registra-se a quantidade de blocos que o paciente consegue deslocar durante um intervalo de tempo específico.

4.4 Arquitetura do sistema MRProsthesis

O Sistema MRProsthesis apresenta uma arquitetura composta por seis componentes intercomunicantes: o Painel de Configuração, o Jogo Sério, o Banco de Dados, o Módulo EMG, o Módulo de Rastreamento de Movimento e o Módulo de Integração de Imagem e Movimento. O painel de configuração e o Jogo Sério são elementos de interface. Os módulos de Rastreamento de Movimento, o Módulo EMG e o Módulo de Integração de Imagem e Movimento são módulos externos de apoio ao sistema. Todos os dados são armazenados no sistema de banco de dados.

A Figura 29 apresenta uma visão geral do sistema MRProsthesis, destacando os equipamentos utilizados, os meios de comunicação entre os módulos, bem como as bibliotecas auxiliares e as linguagens de programação adotadas. A arquitetura é composta pelos módulos de Aquisição de Sinais EMG, Rastreamento de Movimento, Integração de Imagem e Movimento, Painel de Configuração e Jogo Sério em Realidade Mista. Os módulos desenvolvidos em C#, como o módulo de Integração de Imagem e Movimento e o Jogo Sério, realizam a comunicação de forma direta, dispensando o uso de protocolos intermediários. Em contrapartida, os módulos implementados em Python, como o módulo EMG e o Painel de Configuração, utilizam um broker MQTT como mecanismo de comunicação, tanto entre si quanto para a integração com os módulos desenvolvidos em C#, possibilitando a interoperabilidade entre os diferentes componentes da arquitetura.

Figura 29 - Arquitetura do Sistema MRProsthesis



Fonte: Autoria Própria

A seguir será detalhado todo diagrama do sistema MRProsthesis.

4.4.1 Dispositivos de Entrada

Para garantir o funcionamento adequado do sistema MRProsthesis, é necessário que informações provenientes da interação do usuário e do ambiente sejam continuamente capturadas e processadas. Essas informações são fundamentais para possibilitar a execução das tarefas de treinamento, o controle dos elementos virtuais e a adequada resposta do sistema às ações realizadas pelo usuário.

Nesse contexto, o sistema utiliza um conjunto de dispositivos de entrada composto por kit de teclado e mouse, responsável pela interação com o painel de configuração, Myo Gesture Control Armband, destinado à aquisição de sinais eletromiográficos e gestuais, HTC Vive Tracker 2.0 (2018) e VIVE Wireless Dongle, empregados no rastreamento espacial dos movimentos, SteamVR Base Station 2.0, responsável pelo suporte ao sistema de rastreamento, e a câmera estereoscópica Stereolabs ZED Mini, utilizada para a captura de informações visuais do ambiente e integração com os elementos virtuais em Realidade Mista.

4.4.1.1 Kit Teclado e Mouse

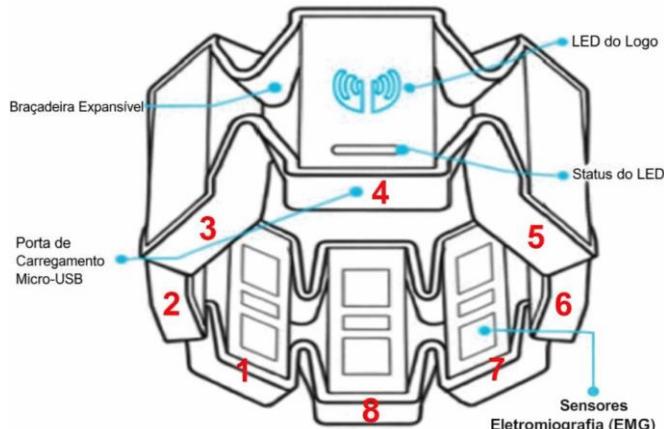
O sistema MRProsthesis requer a utilização de um kit composto por mouse e teclado para a interação do usuário com a interface do painel de configuração, permitindo a navegação pelos menus, a definição de parâmetros e o acompanhamento das informações apresentadas pelo sistema.

No que se refere a esse conjunto de dispositivos de entrada, não há necessidade de especificações técnicas particulares ou de hardware dedicado, sendo recomendável apenas que possuam suporte para conexão via USB, o que garante compatibilidade com a maioria dos computadores utilizados no ambiente de treinamento e configuração do sistema.

4.4.1.2 Myo Gesture Control Armband

O Myo Gesture Control Armband é um dispositivo vestível e ajustável por meio de um expensor removível. Com oito sensores de EMG em aço inoxidável, a braçadeira Myo processa sinais para reconhecimento de gestos e movimentos da mão. Diferentemente da maior parte dos sensores de EMG convencionais, este dispositivo não requer a remoção dos pelos na área de contato. Ele foi projetado para operar corretamente mesmo na presença de pelos na pele, tornando o processo de instrumentação mais rápido e confortável para o usuário. A braçadeira coleta sinais EMG com taxa de amostragem de 200 Hz, o que facilita os procedimentos de configuração em ambientes experimentais. A Figura 30 ilustra um Myo Gesture Control Armband com os seus componentes e canais de leitura identificados.

Figura 30 - Myo Gesture Control Armband



Fonte: GERYES et al, 2017 adaptado pelo Próprio Autor

O envio de dados ocorre por Bluetooth para um Dongle USB conectado ao computador, requerendo emparelhamento. Esse emparelhamento exige a instalação do SDK MyoToolkit e do plugin Myo EMG Armband by Thalmic Labs para leitura de sinal EMG.

Em usuários sem amputação conforme mostrado na Figura 31, o Myo é posicionado no antebraço, permitindo que os sensores de EMG estejam em contato direto com a pele sobre os músculos do braço. Isso possibilita a detecção das variações nos níveis de tensão elétrica durante a contração e o relaxamento dos músculos.

Figura 31 - Pessoa sem amputação usando Myo



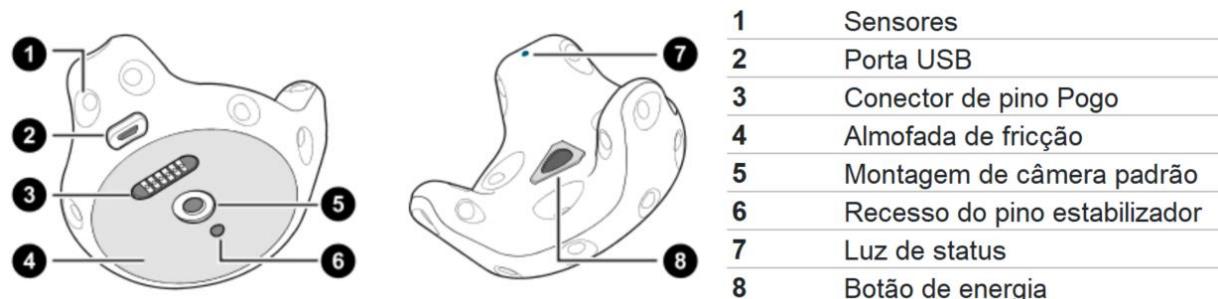
Fonte: Autoria Própria

Porém, quando se trata de pessoas com amputações de membros superiores, o posicionamento dos sensores e a seleção dos músculos adequados requerem atenção devido às alterações na anatomia e na atividade muscular do coto.

4.4.1.3 HTC Vive Tracker 2.0 (2018)

O HTC Vive Tracker ilustrado na Figura 32 é um dispositivo de rastreamento de movimento para objetos físicos externos, com dimensões compactas de 9,65 mm de diâmetro e peso leve de 89g. Possui autonomia de até 5 horas e conectividade Bluetooth Low Energy (BLE). O emparelhamento para comunicação com computador é manual via HTC Vive Wireless Dongle.

Figura 32 - VIVE Tracker 2.0



Fonte: HTC Corporation, 2018

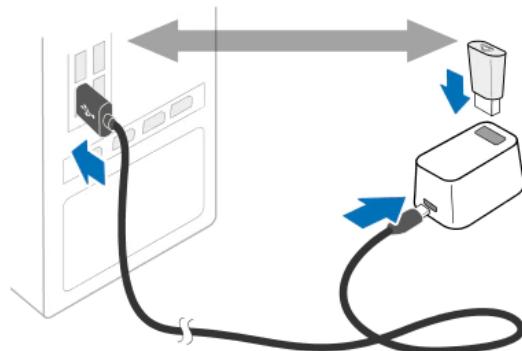
As coordenadas de posicionamento são determinadas com precisão pela tecnologia Lighthouse, corrigindo imprecisões com sensores integrados, como

acelerômetros e giroscópios. O Vive Tracker possibilita monitorar a posição tridimensional, orientação e movimento de objetos aos quais está fixado.

4.4.1.4 VIVE Wireless Dongle

O VIVE Wireless Dongle é um componente do ecossistema HTC Vive, que atua como adaptador para facilitar a comunicação entre o Vive Tracker e o computador. Ele é projetado para proporcionar uma conexão estável e eficiente, operando em rede sem fio através da tecnologia Bluetooth Low Energy (BLE).

Figura 33 - Conexão do dongle ao computador



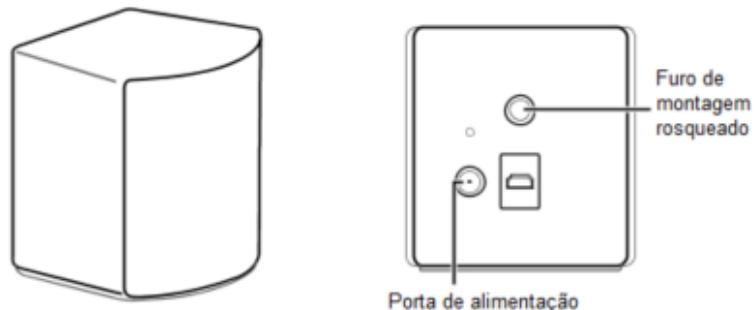
Fonte: HTC VIVE, 2018

Conforme ilustra a Figura 33, para usar o HTC VIVE Tracker 2.0, é necessário conectar o dongle, acoplando-o ao cabo USB e conectando-o à base correspondente. A outra extremidade do cabo USB deve ser ligada ao computador, mantendo o dongle a uma distância mínima de 45 cm para garantir estabilidade durante o uso.

4.4.1.5 SteamVR Base Station 2.0

As SteamVR Base Station 2.0, também chamadas de estações base, são dispositivos de rastreamento que utilizam a tecnologia Lighthouse. Essa tecnologia utiliza lasers infravermelhos para criar uma área de rastreamento na qual dispositivos como headsets e controladores podem determinar com alta precisão sua posição e orientação. A Figura 34 ilustra um SteamVR Base Station.

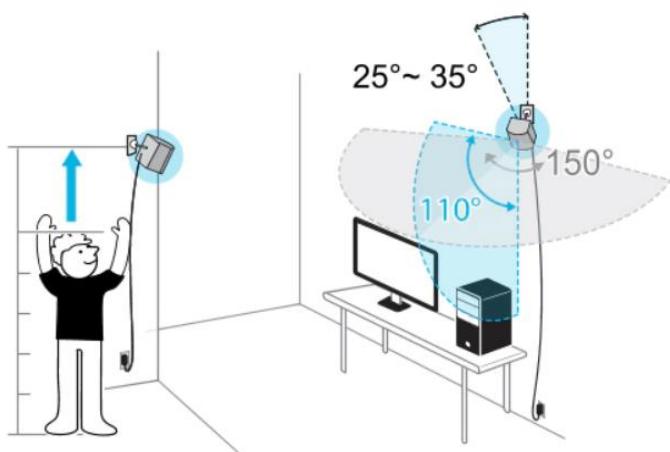
Figura 34 - SteamVR Base Station 2.0



Fonte: HTC VIVE, 2018

Cada Vive Tracker é equipado com quatro diodos infravermelhos que emitem sinais em direção às SteamVR Base Station 2.0. Os sensores nos Vive Tracker captam os sinais infravermelhos refletidos pelos lasers. Com base no tempo que leva para esses sinais retornarem, o sistema realiza cálculos precisos para determinar a posição e orientação exatas dos dispositivos em relação às estações base. Dessa forma, essa triangulação viabiliza o rastreamento preciso dos Vive Trackers no ambiente tridimensional. Contudo, para a triangulação acontecer, a distância recomendada entre duas SteamVR Base Station 2.0 é de no mínimo 2 metros e no máximo 5 metros. Além disso, cada estação base possui um campo de visão horizontal de 150 graus e um campo de visão vertical de 110 graus. Para maximizar a área de rastreamento, deve ser instalada acima da altura da cabeça, de preferência a mais de 2 m de altura, com o ângulo de cada estação base ajustado entre 25 e 35 graus, conforme ilustra a Figura 35.

Figura 35 - Ângulo de cada estação base



Fonte: HTC VIVE, 2018

Por fim, é importante observar que o sistema de rastreamento é híbrido, combinando sensores infravermelhos com visão computacional e sensores como acelerômetro e giroscópio para compensar distorções no rastreamento dos objetos.

4.4.1.6 Stereolabs ZED Mini

A Câmera Stereo Stereolabs Zed Mini é um dispositivo estereoscópico que utiliza dois sensores de imagem para captura de imagens em 3D. Integrando dados de giroscópios e acelerômetros, aprimora a percepção tridimensional do ambiente, focando principalmente na criação de mapas de profundidade para oferecer uma visão tridimensional avançada. Equipada com um sensor de IMU 6DoF, fundamental para ambientes de RM, a ZED Mini foi escolhida devido à sua versatilidade para transformar headsets HMD de RV em RM.

As principais vantagens da ZED Mini incluem suporte para acoplamento em headsets HMD HTC Vive Pro, latência de 60 ms, resolução de até 2K, campo de visão de 110 graus operando a 60 fps, e capacidade de capturar profundidades de até 20 metros, suporte ao rastreamento preciso do HTC Vive Tracker. A Figura 36 ilustra uma Câmera Stereolabs Zed Mini.

Figura 36 - Stereolabs Zed Mini



Fonte: STEREOLABS, 2020

A alimentação e transmissão de dados ocorrem via cabo USB Type-C, com uma taxa de transmissão de até 3 Gb/s, sendo que cabos com capacidade superior a 3 Gb/s não são adequados.

Para acessar e manipular as informações provenientes a camera Zed Mini, é necessário instalar o Software Development Kit (SDK) fornecido pelo fabricante, Stereolabs. Foi escolhida a versão 3.8 devido a quatros elementos: a idade da versão,

estabilidade comprovada, compatibilidade com as tecnologias utilizadas e documentação abrangente.

A utilização do SDK Stereolabs demanda a instalação da plataforma de computação paralela CUDA (Compute Unified Device Architecture), sendo a versão 11.7 a recomendação (STEREOLABS, 2024). Por fim, é necessário importar o plug-in ZED no Motor de Jogo Unity para uma integração efetiva.

4.4.2 Módulo EMG

O módulo de eletromiografia (EMG) do sistema MRProsthesis é responsável pela calibração, processamento e transmissão dos dados relacionados aos comandos de abertura e fechamento da mão da prótese virtual para a interface do Jogo Sério associado. A captação do sinal eletromiográfico é realizada por meio do dispositivo *Myo Gesture Control Armband*, fixado no coto do indivíduo amputado.

Os sinais EMG adquiridos pela braçadeira Myo são interpretados, suavizados e classificados por meio da Média do Valor Absoluto (*Mean Absolute Value – MAV*), técnica amplamente utilizada no processamento de sinais EMG por sua simplicidade computacional e robustez frente às oscilações do sinal. O cálculo da MAV é apresentado na Equação (1).

$$MAV = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n |X_i| \quad (1)$$

A partir do valor da MAV, é definido um limiar de ativação utilizado para a classificação dos estados da prótese virtual. Esse limiar é calculado conforme apresentado na Equação (2).

$$Limiar = MAV * 0.5 \quad (2)$$

Na Equação (1), N representa o número total de amostras do sinal eletromiográfico coletadas no intervalo de análise (por exemplo, 1000 amostras em 15 segundos, considerando uma frequência de amostragem de 200 Hz). O termo n corresponde ao limite superior do somatório, determinando a quantidade de amostras X_i consideradas no cálculo; neste trabalho, adota-se $n = N$, ou seja, todas as amostras disponíveis na janela de análise são utilizadas. O termo X_i representa a amplitude do sinal EMG correspondente à i -ésima amostra, expressa em microvolts

(μ V) ou em unidades normalizadas fornecidas pelo sensor, enquanto $|X_i|$ corresponde ao valor absoluto dessa amplitude, assegurando que apenas valores positivos contribuam para o cálculo da média, o que é apropriado para sinais EMG que oscilam em torno de zero.

O processo de calibração do módulo EMG é realizado por meio de uma interface de painel de configuração. Inicialmente, o indivíduo é instruído a contrair a musculatura residual, simulando o movimento de fechamento da mão. Durante um intervalo de 15 segundos, os sinais EMG são captados continuamente e processados por meio da função MAV. O maior valor obtido a partir da MAV nesse período é então multiplicado por 0,5, estabelecendo o valor de limiar utilizado pelo sistema.

Esse limiar é empregado para a classificação binária dos estados da prótese virtual. Valores de sinal correspondentes a até 50% do limiar resultam no envio da *tag* “Aberta” para a interface do Jogo Sério, enquanto valores superiores a 50% do limiar indicam o envio da *tag* “Fechada”. A comunicação entre o módulo EMG e a interface do Jogo Sério é realizada por meio do protocolo MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*).

A identificação dos estados “Aberta” e “Fechada” é utilizada para classificar os sinais EMG gerados pelo indivíduo amputado ao longo de todo o exercício realizado no Jogo Sério. Na interface do jogo, esses estados controlam diretamente a abertura e o fechamento da prótese virtual durante o treinamento.

Ao receber a *tag* “Fechada”, o sistema inicia o processo de fechamento da mão da prótese virtual. Quando a mão atinge o fechamento completo, esse estado é representado por 0%, enquanto a abertura total corresponde a 100%. Caso a prótese esteja inicialmente fechada (0%) e passe a receber sucessivas *tags* “Aberta”, o sistema inicia o ciclo de abertura, incrementando a abertura em 0,5% a cada frame até atingir 100% ou até que uma nova *tag* “Fechada” seja recebida.

De forma análoga, quando a prótese está inicialmente aberta e passa a receber *tags* “Fechada”, ocorre um decremento progressivo de 0,5% a cada frame, até que o fechamento completo (0%) seja alcançado ou até que uma nova *tag* “Aberta” seja recebida.

Por fim, esse método dinâmico de controle baseado em sinais EMG permite uma transição suave entre os estados de abertura e fechamento da prótese virtual,

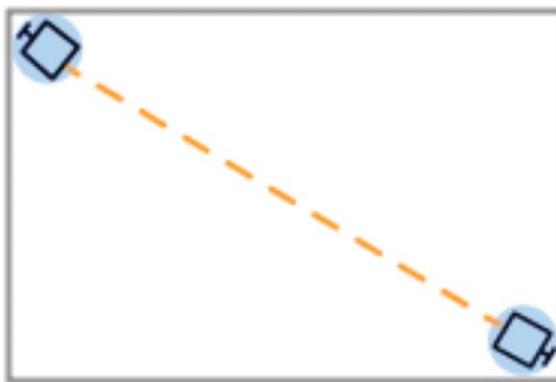
promovendo uma experiência de uso mais natural, contínua e adaptável para os usuários durante o treinamento de controle protético.

4.4.3 Módulo de Rastreamento de Movimento

O rastreamento em ambientes de RM é fundamental para a harmonização entre mundo real e elementos virtuais. Por meio da detecção e interpretação do posicionamento e movimento de objetos reais, o rastreamento contribui para uma transição suave entre o ambiente físico e os elementos digitais, aprimorando a experiência do usuário.

A arquitetura do sistema MRProsthesis, exemplificado na Figura 29, incorpora um módulo de Rastreamento de Movimento que utiliza como dispositivos de entrada de dados dois *Vive Trackers* 2.0, dois *Vive Wireless Dongles* e duas *SteamVR Base Station* 2.0. As duas *SteamVR Base Station* 2.0 devem ser posicionadas conforme ilustra a Figura 37, para facilitar o rastreio dos dois *Vive Trackers*.

Figura 37 - Disposição das SteamVR Base Station 2.0



Fonte: HTC VIVE, 2018

O envio de informações de rastreamento dos dois *Vive Trackers* para o Módulo de Rastreamento de Movimento ocorre por meio de dois *VIVE Wireless Dongles*, estabelecendo uma comunicação via *Bluetooth*. O Módulo de Rastreamento de Movimento, por sua vez, calcula as coordenadas de posição, rotação e orientação dos *Vive Trackers* e encaminha para o Módulo de Integração de Imagem e Movimento.

Vale ressaltar que, a escolha de uma estratégia sem marcadores fiduciais para rastreamento, foi motivada pela necessidade de monitorar objetos reais, mesmo quando estão fora do campo de visão do usuário. Essa abordagem contribui para

evitar problemas de renderização de objetos virtuais, mantendo a continuidade e naturalidade do rastreamento, independentemente da localização no ambiente. Em sistemas baseados em marcadores fiduciais, cada vez que um marcador sai e retorna ao campo de visão do usuário/câmera, o elemento virtual perde e recupera a renderização, resultando em breves períodos nos quais o usuário perde a imersão no sistema.

Por fim, embora o sistema de rastreamento da HTC seja amplamente utilizado em ambientes de RV em conjunto com o *headset HTC Vive Pro*, sua aplicação em ambientes de Realidade Mista é menos comum, evidenciando a inovação do sistema MRProsthesis.

4.4.4 Módulo de Integração de Imagem e Movimento

A integração entre dispositivos de rastreamento *Vive Trackers* e a câmera estereoscópica *ZED Mini* permite criar ambientes de RM imersivos e precisos. A colaboração dos sensores do dispositivo de rastreamento e da câmera estereoscópica harmoniza a sobreposição de elementos virtuais com as informações capturadas do mundo real.

Para isso é necessário estabelecer uma sincronização entre o sistema de rastreamento e a câmera *ZED Mini*. No MRProsthesis os dados de rastreamento são originados no Módulo de Rastreamento de Movimento. Ao receber as coordenadas desse módulo precursor, o Módulo de Integração de Imagem e Movimento realiza um alinhamento com o sistema de coordenadas da câmera. Dessa forma, assegura-se a correspondência exata entre os dados de rastreamento e as informações visuais capturadas pela câmera *ZED Mini*. Contudo, isso envolve uma série de etapas para garantir uma sincronização precisa.

Primeiramente, o processo de integração inicia-se quando o sistema de rastreamento da *ZED Mini* utiliza a posição atual e a rotação do dispositivo *HTC Vive Pro*, em conjunto com as coordenadas específicas de calibração fornecidas pela própria *ZED Mini*. Após carregar os dados de calibração *HMD-ZED*, as informações contidas nele são utilizadas para ajustar as configurações da câmera *ZED Mini*. Assim,

o rastreamento interno da ZED Mini é ajustado com base nas informações provenientes do HMD.

Apesar de todo cuidado com a sincronização, eventuais erros latência são possíveis. A latência é o tempo que leva para uma ação ser iniciada e o resultado dessa ação ser visível. Para calcular a latência, precisa-se de duas informações principais: o momento em que a ação foi iniciada e o momento em que o resultado foi exibido. A diferença entre esses dois tempos é a latência. Assim, é registrada a posição e a rotação dos dispositivos de rastreamento em cada quadro. Esses registros são então usados para recuperar a posição e a rotação de um quadro anterior introduzindo um atraso igual à latência da câmera ZED. A Figura 38 ilustra o trecho do código responsável por compensar a latência.

Figura 38 - Trecho do código de Compensação de Latência

```
//Obter a posição e rotação do dispositivo rastreado.  
var pose = new SteamVR_Utils.RigidTransform(newpose.mDeviceToAbsoluteTracking);  
//Salvando esses valores.  
RegisterPosition(1, pose.pos, pose.rot);  
  
//Atrasa os valores salvos dentro de GetValuePosition() por um fator de latencyCompensation em milissegundos.  
sl.Pose p = GetValuePosition(1, (float)(latencyCompensation / 1000.0f));  
transform.localPosition = p.translation; //Atribuir nova posição atrasada  
transform.localRotation = p.rotation; // Atribuir nova rotação atrasada.
```

Fonte: Autoria Própria

Portanto, é possível garantir a posição e a rotação dos dispositivos de rastreamento estejam corretamente sincronizadas com as imagens capturadas pela câmera ZED, apesar da latência inerente à transferência de dados.

Por fim, a integração entre dispositivos de rastreamento e câmeras estereoscópicas representa um avanço significativo na criação de experiências de Realidade Mista mais autênticas.

4.4.5 Painel de Configuração

A interface de Painel de Configuração do sistema MRProsthesis proporciona uma variedade de funcionalidades de personalização. Ela permite a configuração personalizada dos exercícios de treinamento realizados na interface do Jogo Sério. Assim os terapeutas podem ajustar e adaptar os parâmetros dos exercícios de acordo

com as necessidades específicas de cada indivíduo amputado, proporcionando uma experiência de treinamento mais personalizada.

Além disso, o Painel de Configuração abrange a gestão dos equipamentos integrados à arquitetura do sistema. Os terapeutas podem acessar e personalizar as configurações dos dispositivos Câmera *ZED Mini* e *Vive Tracker*.

Por meio do Painel de Configuração são realizados os registros de informações relevantes relacionadas aos usuários e às configurações de treinamento. Isso inclui o armazenamento de perfis individuais, históricos de treinamento e outros dados importantes que contribuem para uma análise abrangente do desempenho ao longo do tempo.

Por fim, os dados históricos de sessões de treinamento podem ser acessados e analisados pelo terapeuta, fornecendo insights valiosos sobre o progresso e permitindo ajustes contínuos para otimizar o plano de treinamento.

4.4.5.1 Configuração dos Parâmetros Iniciais da Câmera

A configuração dos parâmetros iniciais da câmera é realizada por meio do painel de configuração. Essas configurações ajustam o nível de precisão, alcance e desempenho da câmera e consequentemente do sistema MRProsthesis.

Para capturar movimentos rápidos em ambientes de RM, deve-se usar resolução em HD720p à 60 FPS, isso resultará em um ambiente com qualidade visual alta e uma taxa de atualização fluída. Com essa resolução as imagens e elementos gráficos apresentam detalhes nítidos, tornando a experiência mais agradável. Já com uma taxa de atualização de 60 FPS, a interface apresenta transições e animações suaves, proporcionando uma experiência visual mais fluida e responsiva.

Outro parâmetro passível de alteração são os modos de profundidade, que são três pré-existentes:

- *ULTRA*: oferece a maior faixa de profundidade mantendo uma precisão consistente da Z ao longo de toda a faixa de detecção. No entanto, exige maior poder de processamento e ambientes otimizados.

- **QUALITY:** Caracteriza-se por um sólido estágio de filtragem que resulta em superfícies suaves, proporcionando uma qualidade visual, pode perder alguns detalhes em ambiente dinâmicos;
- **PERFORMANCE:** projetado para ser suave, pode perder detalhes.

Apesar do custo de desempenho maior, optou-se por padrão utilizar modo de profundidade Ultra, pois apresenta oclusão e iluminação mais precisas se comparadas com os outros modos pré-existentes. Assim, os principais parâmetros iniciais por padrão foram estabelecidos:

- Interface de Saída: USB
- Resolução: HD720
- Quadros por segundo: 60 FPS
- Modo de profundidade: ULTRA

Por fim, na configuração padrão da aplicação, optou-se por definir parâmetros avançados da câmera que demandam maior poder de processamento. Contudo, a interface painel de configuração oferece a flexibilidade de adequar a câmera em equipamentos com menos desempenho. Assim os terapeutas têm a capacidade de ajustar a aplicação para atender às especificações dos seus dispositivos.

4.4.6 Jogo Sério

O módulo Jogo Sério recebe informações provenientes do Módulo EMG e do Módulo de Integração de Imagem e Movimento. A configuração desta interface é realizada de por meio do Painel de Configuração, proporcionando um ambiente personalizado e adaptável para o paciente.

Através da Interface Jogo Sério, o paciente tem a capacidade de realizar a calibração da prótese virtual, ajustando-a de acordo com suas necessidades individuais. Além disso, a atividade “*Box and Blocks*” é personalizada e configurada utilizando as informações fornecidas pelo Painel de Configuração.

A Interface Mista Jogo Sério utiliza o *HTC Vive Pro* como sua principal interface de saída, proporcionando uma visualização imersiva e envolvente. Para o *feedback* vibratório, a interface utiliza o dispositivo *Myo Gesture Control Armband*.

Durante as sessões de treinamento na interface, todos os dados são registrados e armazenados de forma segura no banco de dados (PostgreSQL). Isso permite uma análise detalhada do desempenho ao longo do tempo, fornecendo informações valiosas para ajustes no programa de treinamento.

Para garantir uma comunicação eficiente com os dispositivos utilizados, a Interface Jogo Sério utiliza uma conexão *Mini DisplayPort* para se comunicar com o *HTC Vive Pro*, enquanto utiliza a tecnologia *Bluetooth* para se conectar ao *Myo Gesture Control Armband*.

Por fim, vale ressaltar que o *Myo* fornece *feedback vibratório* para indicar ao usuário que seu gesto foi reconhecido corretamente, o que ajuda na aprendizagem dos movimentos corretos para controlar a prótese virtual. Esse aprendizado pode facilitar a transição para o uso de uma prótese real.

4.4.7 Dispositivos de Saída

As saídas de dados para o usuário são transmitidas por meio do *HTC Vive Pro*, da tela de um monitor e da Braçadeira *Myo*, esta última previamente discutida na seção 4.4.1.2. e citado como dispositivo de saída na 4.4.6. Em relação ao monitor, não há recomendações específicas. Na sequência, serão apresentados o Hardware sugerido para o computador executar a aplicação e os detalhes do *HTC Vive Pro*.

4.4.7.1 Hardware Sugerido

O sistema MRProsthesis oferece flexibilidade na configuração, permitindo tanto a configuração no mesmo computador que executa a interface do jogo sério quanto em um computador separado. Embora o diagrama na Figura 29 apresente a conexão HDMI para o monitor, é importante observar que outras opções, como VGA, DVI ou *DisplayPort*, também são viáveis.

Ao optar pela conexão *DisplayPort*, é necessário que o computador escolhido possua duas saídas *DisplayPort*, sendo que uma das saídas *DisplayPort* deve estar contida na placa de vídeo dedicada, pois o *HTC Vive Pro* utiliza essa interface de

comunicação. Adicionalmente, o computador selecionado deve dispor de no mínimo quatro entradas USB 3.0. Isso se deve ao fato de que a câmera *ZED Mini* utilizará uma entrada, os dois *VIVE Wireless Dongles* exigirão duas entradas, e um kit de mouse e teclado requererá no mínimo uma entrada.

Para a execução do sistema MRProsthesis, é recomendado o uso de um computador com as seguintes especificações ou superiores: Processador Intel Core i7, 30 GB de espaço ou mais no disco rígido, 16 GB de RAM e uma placa de vídeo NVIDIA GeForce GTX 2060. Essas especificações garantem o desempenho necessário para uma experiência fluida e otimizada durante a utilização do MRProsthesis.

4.4.7.2 HTC Vive Pro

O HTC Vive Pro, é um *Headset HMD* de RV e VA da *HTC Corporation*. Sendo uma versão melhorada do HTC Vive original. Ele oferece melhorias na resolução visual e nas funcionalidades. Seu design foi aprimorado para proporcionar maior conforto em sessões prolongadas. A Figura 39, ilustra um HMD HTC Vive Pro com *Stereolabs Zed Mini* acoplada.

Figura 39 - HMD HTC Vive Pro com *Stereolabs Zed Mini* acoplada



Fonte: Autoria Própria

O HTC Vive Pro é totalmente compatível com o sistema de rastreamento da HTC, o Vive Pro pode ser utilizado em conjunto com estações base (*Lighthouse*), HTC Vive Tracker e Vive Controller. No entanto, a configuração inicial do HTC Vive pode

ser desafiadora para usuários menos experientes, pois envolve a instalação de estações base, rastreamento de sensores e calibração, exigindo paciência e atenção aos detalhes.

Apesar dos avanços em suas especificações e do SDK *SRWorks* para RA, o headset não oferece funcionalidades suficientes para ambientes mistos devido à baixa resolução (480p) e latência de 200ms de suas câmeras. Por fim, para superar essas limitações em ambientes de RM, é necessário incorporar a câmera ZED Mini da *Stereolabs*.

4.5 Especificação de Requisitos do Sistema

A especificação de requisitos é essencial no desenvolvimento do software. Envolve a identificação e documentação detalhada dos requisitos funcionais e não funcionais de um sistema. (CARLETON et al., 2021).

A má definição de requisitos é um dos principais motivos do fracasso dos projetos, e compreender a diferença entre requisitos funcionais e não funcionais ajuda a evitar tais fracassos (SOMMERVILLE, 2011).

Neste contexto, para o desenvolvimento do sistema MRProsthesis, foram identificados os requisitos funcionais e não funcionais, a partir dos quais foram elaborados os respectivos diagramas de caso de uso. A seguir são especificados os requisitos do sistema.

4.5.1 Requisitos Funcionais

Os Requisitos Funcionais descrevem o que o sistema deve fazer e seus recursos e funções, incluem a especificação detalhada das operações que o sistema deve executar, as interações esperadas com o usuário e as saídas geradas em resposta a diferentes entradas (SOMMERVILLE, 2011).

Os principais requisitos funcionais identificados para o Sistema MRProsthesis são:

- RF1 - O sistema deve conter uma interface em Realidade Mista;
- RF2 - O sistema deve utilizar um sistema de rastreamento sem marcadores fiduciais.
- RF3 - A prótese virtual deve se movimentar com precisão dentro do ambiente aumentado, respondendo às intenções do usuário.
- NF4 - Os movimentos exigidos durante o jogo devem ser semelhantes aos realizados durante a fisioterapia convencional.
- RF5 - A prótese virtual deve realizar comandos de abrir ou fechar a partir da leitura de sinais EMG captados do braço do usuário.
- RF6 - A movimentação de blocos deve ser simulada em uma caixa virtual preenchida com blocos virtuais, mantendo a divisão ao meio.
- RF7 - O sistema deve permitir que o usuário utilize a prótese virtual para transferir os blocos de um lado da caixa para o outro.
- RF8 - Os blocos devem ser posicionados em um dos lados da caixa.
- RF9 - Gerar feedback vibratório e acústico todas quando a prótese virtual tocar algum outro elemento virtual.
- RF10 - A aplicação deve fornecer orientações ao paciente durante os exercícios, indicando se deve mover os blocos individualmente, em grupos ou em uma sequência específica.
- RF11 - Gravar dados do usuário referente a Sessão de treinamento.
- RF12 - O sistema deve registrar, modificar e recuperar dados pessoais e clínicos dos participantes.
- RF13 – O sistema deve permitir a geração de relatório com histórico de treinamento.
- RF14 - O sistema deve permitir a personalização do treinamento para atender às necessidades específicas de cada usuário.
- RF15 - O sistema deve armazenar as informações de treinamento de cada seção para avaliar o progresso do paciente no treinamento.

4.5.2 Requisitos não funcionais

Os Requisitos não Funcionais descrevem como o sistema deve se comportar e estabelecem restrições à sua funcionalidade, englobam aspectos como desempenho, segurança, usabilidade, confiabilidade e manutenibilidade (WAZLAWICK, 2019).

Os principais requisitos não funcionais identificados para o Sistema MRProsthesis são:

- RNF1 - O sistema deve ser compatível com o dispositivo HTC Vive Tracker 2.0, o Headset HMD HTC Vive Pro e o Myo Gesture Control Armband;
- RNF2 - A leitura dos Sinais EMG deve acontecer em tempo real;
- RNF3 - O sistema deve fornecer feedback visual e/ou auditivo claro para as orientações e progresso do paciente durante o treinamento;
- RNF4 - O sistema deve permitir facilmente customização para atender a diferentes necessidades de terapeutas e pacientes.
- RNF5 - O ambiente virtual deve ser estável, minimizando a ocorrência de falhas ou interrupções durante a execução dos exercícios.
- RNF6 - A interface do usuário deve ser intuitiva, facilitando o uso por pacientes e terapeutas.
- NFR7 – O sistema deve garantir tempos de resposta rápidos durante a navegação e execução de funções.
- NFR8 - Minimizar a ocorrência de falhas ou interrupções no sistema.
- NFR9 - Fornecer uma interface de usuário intuitiva e de fácil navegação.

4.6 Modelagem UML

A Unified Modeling Language (UML), ou Linguagem de Modelagem Unificada, é uma linguagem visual padronizada para a especificação, visualização, construção e documentação de artefatos em sistemas de software (GOGOLLA, 2009). Por meio de diagramas UML, é possível retratar de forma gráfica os limites, estrutura e comportamento tanto do sistema quanto dos objetos que o compõem, proporcionando uma visão abrangente e comprehensível (KOÇ et al., 2021).

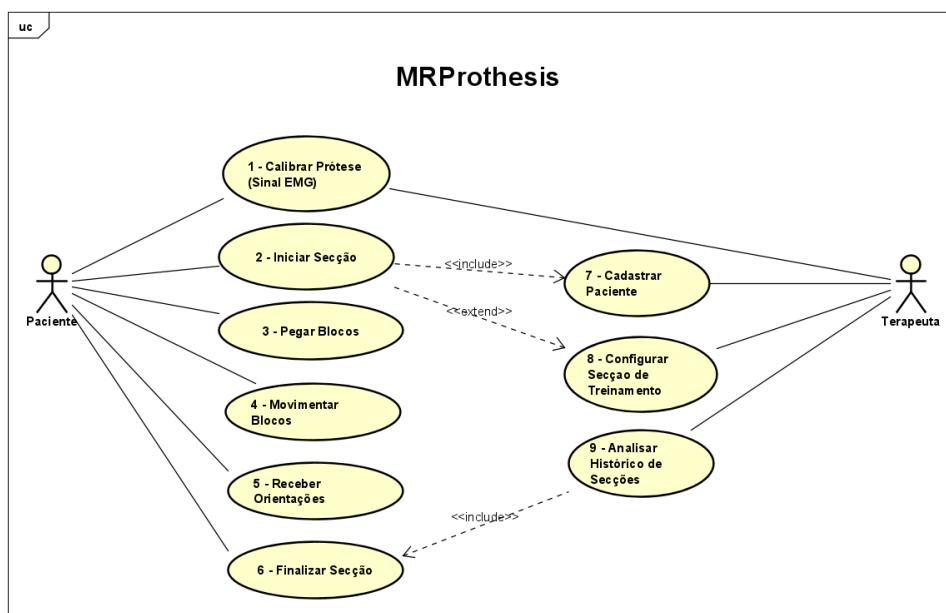
4.6.1 Casos de Uso

Os diagramas de casos de uso são uma linguagem visual, expressa por meio de representações gráficas que resume os detalhes de um sistema, assim como as interações com os usuários externos envolvidos (SOMMERVILLE, 2011). Eles usam uma notação padrão para modelagem de sistemas que consistem em três componentes principais: atores, casos de uso e os relacionamentos (BEZERRA, 2014).

Os atores representam os usuários ou sistemas externos que interagem com o sistema. Os casos de uso descrevem as diversas funcionalidades ou serviços fornecidos pelo sistema. Os relacionamentos ilustram as associações e dependências entre os atores e os casos de uso (WAZLAWICK, 2019).

A Figura 40 apresenta os principais casos de usos relacionados ao Sistema MRProsthesis.

Figura 40 - Diagrama de Caso de Uso do Sistema MRProsthesis



Fonte: Autoria Própria

Os atores envolvidos e suas responsabilidades são detalhados a seguir.

- Terapeuta: tem a responsabilidade de cadastrar o paciente, configurar a Sessão de treinamento e de analisar o histórico de Sessões (relatórios gerados pelo sistema).

- Paciente: é responsável por concluir todo o jogo, bem como aderir às tarefas propostas pelo terapeuta de acordo com o protocolo estabelecido por eles.

Por fim, os diagramas de casos de uso são usados para capturar, organizar e visualizar requisitos de sistema, tornando-os uma ferramenta poderosa para compreender e comunicar os aspectos funcionais de um sistema de software (BEZERRA, 2014).

4.6.2 Detalhes do Caso de Uso

O detalhamento do Caso de Uso proporcionando uma visão aprofundada e estruturada das interações entre os atores e o sistema. A seguir são apresentados os detalhamentos dos Casos de Uso do diagrama da Figura 40:

- Cadastrar Paciente: O terapeuta cadastra os dados pessoais de cada paciente;
 - Requisitos Contemplados: RF11;
- Configurar Sessão de Treinamento: O terapeuta Configurar Sessão de Treinamento de acordo com protocolo estabelecido;
 - Requisitos Contemplados: RF14;
- Iniciar Sessão: O Paciente deve iniciar a Sessão de treinamento;
 - Requisitos Contemplados: não se aplica;
- Calibrar Prótese (Sinal EMG): O Paciente deve calibrar a abertura e fechamento da mão prótese através do Sinal EMG do coto. O sistema irá solicitar que o paciente faça um movimento muscular com intuito de fechar a mão durante 15 segundos. Após este período a prótese estará calibrada para uso;
 - Requisitos Contemplados: RF5;
- Pegar Blocos: O paciente é orientado a movimentar a prótese virtual utilizando seu coto, aproximando-se da caixa contendo blocos. Posteriormente, deve posicionar a mão próxima a algum bloco dentro da caixa e contrair a musculatura do coto, simulando o movimento de fechamento de maneira semelhante à etapa de calibração.
 - Requisitos Contemplados: RF5;

- Movimentar Blocos: O paciente é responsável por transportar o bloco que foi agarrado para o lado oposto da caixa e, posteriormente, liberá-lo na posição determinada.
 - Requisitos Contemplados: RF3, RF4, RF6 e RF7;
- Receber Orientações: O paciente recebe orientação e feedback ao longo de toda a sessão de treinamento.
 - Requisitos Contemplados: RF10;
- Finalizar Sessão: O paciente finaliza a Sessão de treinamento.
 - Requisitos Contemplados: não se aplica;
- Analisar Histórico de Sessões: O terapeuta tem acesso aos dados da Sessão de treinamento de cada usuário. Os dados são em forma de relatório.
 - Requisitos Contemplados: RF13 e RF15.

4.7 Softwares Utilizados

No desenvolvimento do sistema MRProsthesis, foram utilizados os seguintes softwares e bibliotecas:

- Sistema Operacional: Windows 10;
- Engine de Desenvolvimento: Unity 2019.4.40f1;
- Ambiente de Desenvolvimento: Microsoft Visual Studio 2022 e Visual Studio Code;
- Softwares de Modelagem: Autodesk Fusion 360 e 3D Studio Max;
- Linguagens de programação: C# e Python;
- Bibliotecas e Plugin adicionais: ZED SDK 3.8, SteamVR, Vive Input Plugin, Myo Bundle Plugin e Eclipse Mosquitto™.
- Softwares adicionais: VIVE Pro Guide e VIVEPORT;

4.8 Análise de Custos e Cenário de Uso

Conforme demonstrado anteriormente neste capítulo, a implementação do sistema MRProsthesis requer equipamentos especializados e infraestrutura computacional robusta, resultando em investimentos iniciais significativos. Essas

características financeiras tornam a solução especialmente viável para ambientes de centros especializados em reabilitação, onde a infraestrutura pode ser utilizada de forma compartilhada por múltiplos pacientes em diferentes sessões terapêuticas. A Tabela 4 discrimina os valores de investimento em equipamentos requeridos para a implementação do sistema MRProsthesis.

Tabela 4 - Análise de Custo da implantação da aplicação

Equipamento	Quantidade	Preço
<i>Headset HTC VIVE Pro 2 Eye</i>	01	R\$14.000,00
<i>Stereo Zed Mini Camera with Stereo-IMU 3D</i>	01	R\$ 5.000,00
<i>Notebook Alienware M16: processador Intel Core i9, 32GB RAM, SSD 1TB, GPU NVIDIA GeForce RTX 4070 (8GB GDDR6), Mini DisplayPort 1.4.</i>	01	R\$16.000,00
<i>Controlador HTC Tracker para HTC Vive 2.</i>	01	R\$1.000,00
<i>Myo Gesture Control Armband</i>	01	R\$1.500,00
Mobiliário Adequado	01	R\$ 800,00
Total		R\$38.500,00

Fonte: Autoria Própria.

4.9 Considerações Finais

Este capítulo apresentou a arquitetura de sistema para um ambiente de treinamento de amputados que elimina a dependência de marcadores fiduciais, otimizando o rastreamento e conferindo maior amplitude de movimento ao seu utilizador.

Esta proposta de arquitetura, supera a principal limitação na realização do exercício *Box and Blocks* que é a necessidade da prótese real. No MRProsthesis, o real e o virtual são mistos, permitindo que o paciente tenha uma prótese virtual junto ao seu coto durante a Sessão de treinamento para controle de prótese mioelétrica.

No próximo capítulo, serão abordados os detalhes do Sistema de treinamento MRProsthesis.

Capítulo 5

Implementação e Funcionamento do Sistema MRProsthesis

5.1 Introdução

Este capítulo aborda os detalhes do Sistema MRProsthesis. Inicialmente, apresenta-se a concepção do modelo 3D, otimizado para melhor desempenho em tempo real. Em seguida, a movimentação articular da mão virtual é explorada. Posteriormente, é explicado o processo de abertura e fechamento da prótese. Em seguida, a área de treinamento é discutida, abordando o uso de Vive Trackers e a execução dos exercícios. Por fim, é apresentada a interface do sistema MRProsthesis e seus detalhes.

5.2 Prótese Virtual

O componente central do sistema MRProsthesis é a prótese virtual. A seguir são detalhados a concepção, a movimentação articular e a calibração do sinal EMG para o de processo de abertura e fechamento.

5.2.1 Concepção do modelo 3D da Prótese Virtual

O modelo tridimensional da prótese foi desenvolvido pela equipe do Laboratório de Engenharia Biomédica (Biolab) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU). A base para a concepção deste modelo foi uma prótese real. O software Autodesk

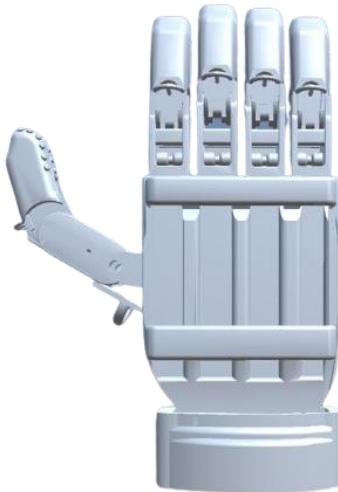
Fusion 360 foi utilizado para permitir uma modelagem paramétrica precisa dos componentes da prótese.

No entanto, o grande nível de detalhamento inicial, apresentou-se como um desafio durante o processo de desenvolvimento. A prótese possuía aproximadamente 3.126.000 polígonos, o que impactava negativamente a velocidade de renderização em tempo real.

Para superar esse obstáculo, recorreu-se à ferramenta de modelagem 3D Studio Max Autodesk. Com essa ferramenta, foi possível otimizar o objeto, reduzindo a quantidade de polígonos para aproximadamente 360.000. Essa otimização foi realizada de forma cuidadosa para não comprometer a qualidade visual do modelo.

A otimização resultou em um processo de renderização mais ágil em comparação ao método anterior. Além disso, houve uma redução no esforço computacional necessário, o que resultou em uma melhoria na performance da aplicação. A Figura 41, ilustra a prótese virtual utilizada no sistema MRProsthesis.

Figura 41 - Prótese Virtual



Fonte: Autoria Própria

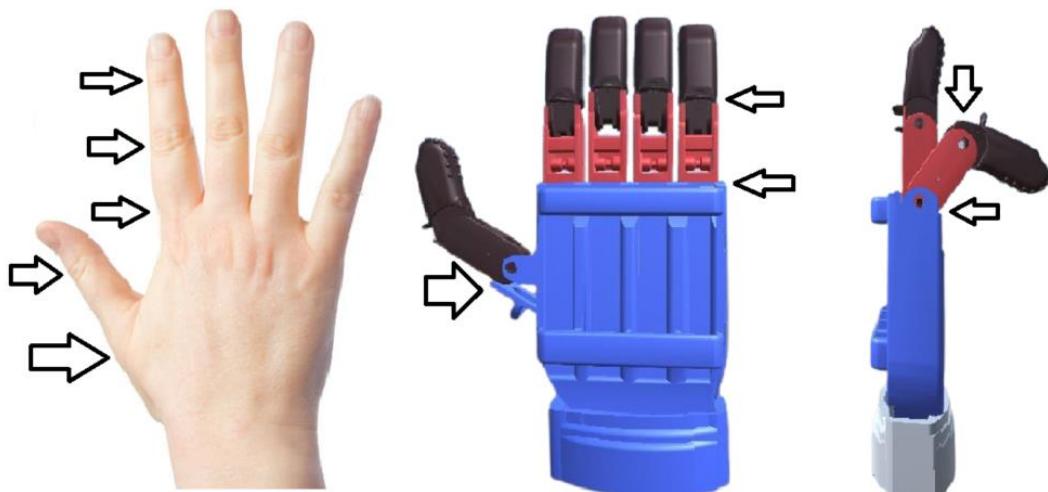
Por fim, a decisão pela modelagem paramétrica da prótese surgiu da necessidade de contemplar a dinâmica de encaixe e movimentação dos seus componentes. Além disso, visando reproduzir com alta fidelidade os objetos reais empregados em práticas convencionais de reabilitação, todos os elementos virtuais (Prótese, Caixa Dividida e Blocos) foram modelados mediante tratamento apropriado de texturas, iluminação e sombras. Os detalhes foram incorporados a fim de assegurar

uma integração convincente desses elementos ao ambiente físico, objetivando alcançar elevado grau de realismo. As texturas foram obtidas mediante fotografias de objetos reais, assegurando correspondência visual com seus equivalentes físicos. Implementou-se feedback sonoro para interações de contato entre elementos, e a prótese virtual exibe movimentação sincronizada com os sinais mioelétricos, reproduzindo o comportamento esperado de uma prótese real.

5.2.2 Movimentação Articular da Mão Virtual

A prótese virtual deve combinar o design detalhado com a funcionalidade prática de abertura de fechamento. Para maior realismo foi decidido que a prótese virtual não iria se movimentar por meio de animação e sim por movimentos articulares. Assim cada dedo tem uma movimentação individual imitando a funcionalidade de uma mão humana real. Contudo, a quantidade de possíveis movimentos foi limitada ao modelo da prótese utilizada, visto que o modelo não possui o mesmo conjunto de articulação de mão humana. Cada dedo da mão humana possui três articulações, exceto o polegar, que possui duas. Já na prótese virtual, cada dedo possui duas articulações, exceto o polegar, que possui uma. A Figura 42 ilustra as articulações da mão humana e da prótese virtual.

Figura 42 - Articulações da mão humana e da prótese virtual



Fonte: Autoria Própria

O polegar é controlado por uma única articulação, permitindo movimentos para cima e para baixo. A angulação máxima é de 90 graus, enquanto o Indicador, Médio, Anelar e Mínimo é controlado por duas articulações, permitindo um movimento mais complexo. Cada articulação pode mover-se entre 0 e 80 graus.

Para abrir completamente a mão, a rotação de cada osso é definida para a posição totalmente estendida (rotação 0). Para fechar completamente a mão, a rotação de cada osso é definida para a posição totalmente dobrada (rotação 100).

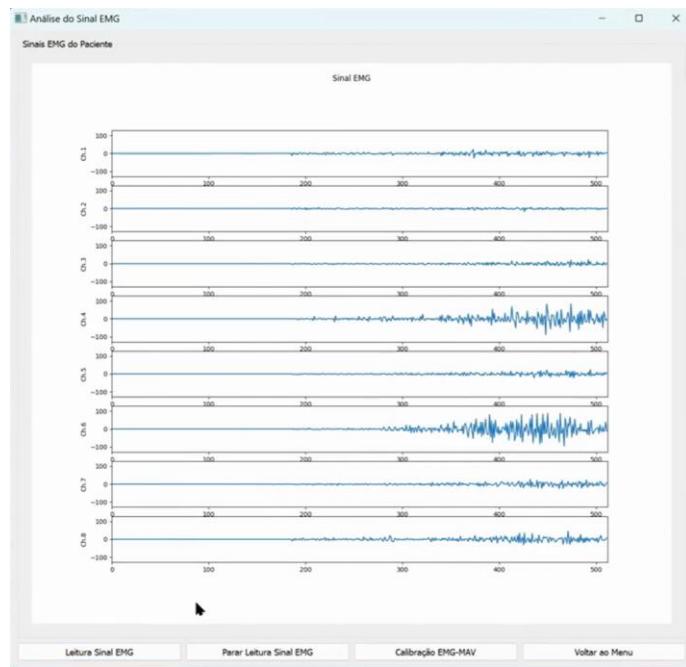
Por fim, apesar da prótese virtual possuir a capacidade de realizar o movimento individualmente de cada dedo, o sistema MRProsthesis recebe apenas um sinal EMG de um único canal. Assim, só pode realizar abertura e fechamento de toda mão.

5.2.3 Abertura e Fechamento da Prótese Virtual

Conforme já citado na Seção 4.4.2, no sistema MRProsthesis, o controle da abertura e fechamento da prótese virtual baseia-se na leitura e classificação do sinal EMG, como mostrado a seguir:

Na interface do Painel de Configuração, é apresentado um gráfico contendo a leitura dos oito canais de sinal EMG captados a partir do coto do usuário. Esse recurso permite ao terapeuta analisar comparativamente os canais disponíveis e selecionar aquele mais adequado para o controle da prótese virtual. A escolha é realizada com base no canal que apresenta maior variância do sinal mioelétrico durante as contrações musculares, por indicar maior ativação muscular e melhor relação sinal-ruído. Dessa forma, o canal selecionado é utilizado para comandar os movimentos de abertura e fechamento da mão virtual, conforme ilustrado na Figura 43.

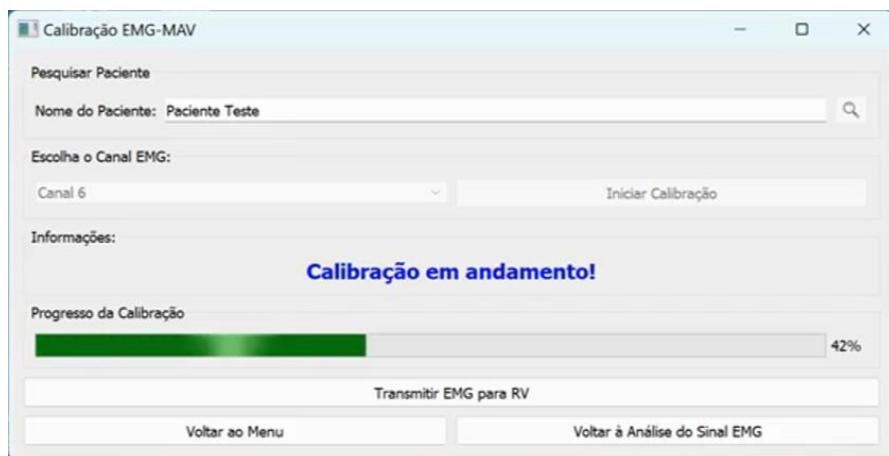
Figura 43 - Leitura de oito canais de sinal EMG pelo Myo



Fonte: Autoria Própria.

Após a escolha do melhor canal de sinal, o terapeuta inicia o processo de calibragem que tem duração de quinze segundos. Durante esse intervalo, o usuário realiza contrações musculares simulando a abertura e fechamento da prótese. Após quinze segundos o sistema emite um alerta avisando que a prótese está calibrada para uso. Após a calibração da prótese virtual o usuário pode iniciar o exercício de treinamento para controle de prótese. Por fim, a Figura 44 ilustra a calibração do sinal EMG para abertura e fechamento da prótese virtual.

Figura 44 - Calibração do sinal EMG para abertura e fechamento da prótese virtual

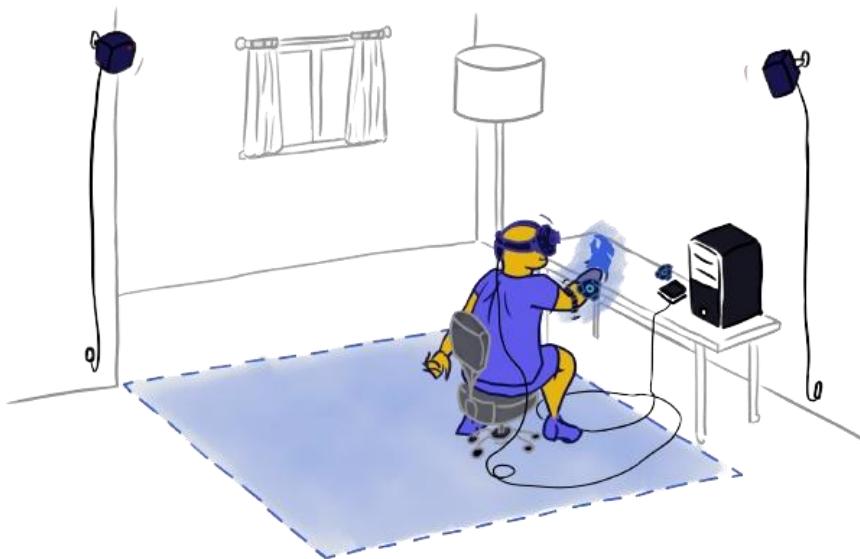


Fonte: Autoria Própria.

5.3 Área de Treinamento

Os exercícios de treinamento são realizados dentro da área de rastreamento. A localização e o tamanho da área de rastreamento são baseados no posicionamento das estações base. Durante o processo de treinamento, dois Vive Trackers são localizados dentro da área de treinamento. Um desses trackers é fixado no coto do amputado, permitindo o movimento da prótese virtual, enquanto o segundo é colocado sobre a mesa, servindo para fixar a caixa contendo os blocos utilizados nos exercícios. A disposição desses dispositivos e a área de rastreamento são visualmente apresentadas na Figura 45.

Figura 45 - Área de cobertura da SteamVR Base Station 2.0



Fonte: HTC Corporation adaptada pelo Próprio Autor.

5.4 Execução do Treinamento com o Sistema MRProsthesys

Após a etapa de calibração, o usuário encontra-se apto a iniciar o treinamento na área de exercícios do sistema. A partir desse momento, a prótese virtual passa a responder de forma contínua e em tempo real aos sinais mioelétricos captados pelo dispositivo EMG acoplado ao coto ou, no contexto experimental apresentado, ao braço de um usuário não amputado. Esse processamento possibilita a correspondência

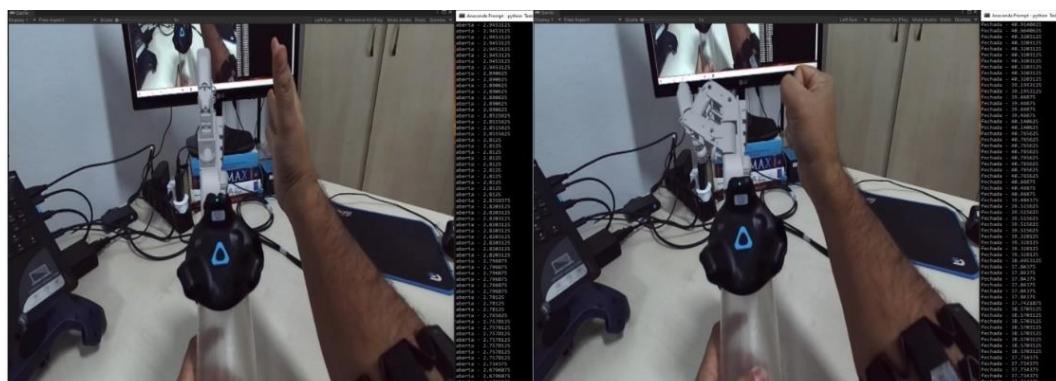
entre a intenção motora do usuário e o movimento executado pela prótese virtual, assegurando uma interação fluida e funcional.

A Figura 46 apresenta a prótese virtual em funcionamento durante a execução de um exercício de abertura e fechamento da mão. Observa-se que o soquete e o tracker HTC Vive são componentes físicos reais, responsáveis pela simulação do encaixe protético e pelo rastreamento espacial do membro superior, respectivamente. A prótese visualizada na imagem, por sua vez, é inteiramente virtual e encontra-se rigidamente acoplada ao soquete físico por meio do sistema de rastreamento, mantendo alinhamento espacial e orientação consistentes ao longo do movimento.

A figura ilustra dois instantes distintos do gesto manual. Na primeira imagem, a mão real do usuário encontra-se aberta e a prótese virtual reproduz esse mesmo estado, permanecendo igualmente aberta. Na segunda imagem, ao realizar o fechamento da mão real, os sinais mioelétricos correspondentes são captados, processados e convertidos em comandos de controle, resultando no fechamento sincronizado da prótese virtual. Essa resposta evidencia a correta interpretação dos sinais EMG e a eficácia da calibração previamente realizada.

Esse comportamento demonstra a integração funcional entre os componentes físicos e virtuais do sistema, permitindo que a prótese virtual responda de maneira coerente aos movimentos voluntários do usuário. Tal integração aproxima a experiência de uso das condições reais enfrentadas por amputados de membro superior, contribuindo para o treinamento motor, para o desenvolvimento do controle protético e para o fortalecimento da sensação de agência durante a interação com a prótese virtual.

Figura 46 - Prótese Virtual respondendo aos sinais mioelétricos enviados



Fonte: Autoria Própria

Dentro de uma caixa virtual dividida ao meio, com blocos virtuais posicionados em uma das partes, o desafio proposto ao usuário consiste em transferir os blocos de um lado para o outro, utilizando a prótese virtual. Para isso, a prótese virtual se movimenta com precisão dentro do ambiente misto, respondendo às intenções do usuário. A Figura 47 ilustra a Interface em RM do Sistema MRProsthesis com todos os elementos virtuais dispostos no campo de visão.

Figura 47 - Interface em RM do Sistema MRProsthesis



Fonte: Autoria Própria

Como no treinamento em ambientes físicos, a execução do exercício pode ser personalizada para atender às necessidades específicas de cada indivíduo. Assim, as seções de exercícios podem iniciar com um número reduzido de blocos, aumentando gradualmente à medida que o paciente demonstra melhora. A Figura 48 ilustra a tela de configuração de sessão do sistema MRProsthesis.

Figura 48 - Tela de configuração do sistema MRProthesis



Fonte: Autoria Própria

O sistema de pontuação do “*Box and Blocks*” foi projetado para ser simples e direto, refletindo a facilidade de aplicação do teste e permitindo uma avaliação rápida da destreza manual. Cada vez que o usuário consegue transferir com sucesso um bloco de uma caixa para o outro, um ponto é atribuído a ele. O tempo de exercício é atribuído pelo Terapeuta.

Por fim, o exercício “*Box and Blocks*” realizado no MRProthesis reproduz de maneira análoga a versão tradicional realizada com objetos físicos. Para maximizar o realismo da interface, focou-se em um sistema de rastreamento preciso, renderização de elementos gráficos de alta qualidade e realísticos, integração com o ambiente real e interatividade dinâmica em tempo real.

5.5 Caracterização do MRProthesis como Jogo Sério

Os Jogos sérios são aplicações interativas completas desenvolvidas com propósitos específicos além do entretenimento, como educação, treinamento ou saúde, mantendo todas as características estruturais de um jogo digital (GORBANEV et al., 2018). Diferentemente de abordagens que apenas inserem elementos como pontos ou rankings em exercícios convencionais com gamificação, o MRProthesis foi desenvolvido desde sua concepção como um jogo completo. O sistema não utiliza o

teste *Box and Blocks* tradicional com caixa física, blocos reais e prótese física. Ao invés disso, toda a experiência terapêutica foi reconstruída em um ambiente de realidade mista onde prótese virtual, caixa virtual e blocos virtuais são controlados e manipulados através de sinais EMG reais, rastreamento de movimento preciso e interação imersiva em tempo real.

O sistema incorpora os elementos fundamentais que definem jogos sérios. Apresenta narrativa funcional baseada em tarefas de manipulação de objetos. Possui mecânicas completas de jogo incluindo sistema de pontuação e controle da prótese virtual baseado na aquisição de habilidades de modulação de sinais EMG. O controle temporal é configurável pelo terapeuta e o sistema oferece feedback multimodal através de estímulos visuais, auditivos e táteis. A progressão é estruturada e adaptativa em múltiplas dimensões: quantitativa, temporal, motora e personalizada via Painel de Configuração, ou seja, o ambiente virtual é completo e imersivo em realidade mista com rastreamento preciso. Os objetivos de treinamento são claramente definidos e mensuráveis (DETERDING et al., 2011; LAAMARTI et al., 2021).

Diferentemente da gamificação, que adiciona elementos isolados a atividades pré-existentes mantendo sua estrutura original (KRATH et al., 2021), o MRProsthesis foi concebido desde o início como uma experiência de jogo integral. Por fim, cada componente foi projetado especificamente para criar uma experiência coesa onde jogo e terapia são indissociáveis.

Por fim, este capítulo evidenciou que o sistema MRProsthesis configura-se como um jogo sério destinado ao treinamento do uso de próteses por pessoas amputadas de membros superiores.

5.6 Considerações Finais

Este capítulo apresentou a Prótese virtual e o Sistema MRProsthesis em detalhes. Inicialmente, destacou a concepção do modelo 3D, enfocando na otimização para melhor desempenho em tempo real. Em seguida, explorou a movimentação articular, explicando detalhes angulares e articulações. Posteriormente, abordou o processo de abertura e fechamento da prótese, explicando a captação de Sinal EMG e a calibração da prótese virtual por meio da interface do painel de configuração. Em

seguida, discutiu a área de treinamento, abordando a utilização do Vive Trackers e a execução dos exercícios. Adicionalmente, caracterizou o MRProsthesis como um jogo sério para treinamento, diferenciando-o de abordagens de gamificação e evidenciando que o sistema foi concebido desde o início como uma experiência de jogo integral com objetivos terapêuticos específicos e mensuráveis, onde jogo e terapia são indissociáveis. Por fim, apresentou a interface do sistema MRProsthesis e seus detalhes.

No próximo capítulo, serão apresentados os critérios para a análise de resultados, contemplando a análise objetiva e a análise subjetiva.

Capítulo 6

Metodologia e Protocolo Experimental

6.1 Introdução

Este capítulo apresenta os instrumentos e as métricas utilizados na pesquisa para avaliar a eficácia do sistema MRProsthesis no contexto de treinamento para controle de próteses mioelétricas. Serão descritas as abordagens metodológicas adotadas para a coleta e análise dos dados, com ênfase na fundamentação e organização das avaliações realizadas. A estrutura contempla tanto as métricas objetivas, relacionadas ao desempenho nas tarefas realizadas pelos participantes, quanto as métricas subjetivas, derivadas da percepção dos usuários em relação à usabilidade do sistema e à sensação de incorporação da prótese virtual.

Além disso, este capítulo detalha os instrumentos utilizados, os critérios de seleção da amostra, o protocolo experimental aplicado e as escalas adotadas, estabelecendo as bases para a apresentação e discussão dos resultados no capítulo seguinte.

6.2 Métricas Aplicadas na Pesquisa

Esta pesquisa está relacionada ao projeto “Correlatos neurais associados a adaptação e aprendizagem motora” que está registrado na Plataforma Brasil do Ministério da Saúde, sob o CAAE: 60910916.0.0000.5152, tendo como Pesquisador Responsável o Professor Dr. Alcimar Barbosa Soares.

A avaliação realizada nesta pesquisa combina métricas objetivas e subjetivas. As métricas objetivas referem-se a dados quantificáveis de desempenho, enquanto as subjetivas contemplam percepções individuais dos participantes em relação ao sistema.

Considerando essa combinação de métricas, esta tese analisa os dados provenientes das métricas subjetivas, obtidos por meio dos questionários PSSUQ e PEembS-ULA, bem como das métricas objetivas de desempenho funcional do jogo sério MRProsthesis, por meio de análise descritiva, adotando-se a média como principal medida de tendência central e o desvio-padrão para a caracterização da dispersão das respostas. Em função do número reduzido de participantes no grupo composto por voluntários sem amputação, utilizou-se adicionalmente a mediana como medida complementar, por considerar a posição das respostas ordenadas, sem pressupor intervalos equivalentes entre as categorias da escala Likert, conferindo maior segurança à interpretação dos resultados.

6.2.1 Métricas Objetivas

Para mensurar e avaliar quantitativamente o desempenho dos participantes na execução das tarefas no sistema MRProsthesis, foram aplicadas métricas objetivas que avaliam:

- (i) a quantidade total de tarefas concluídas por sessão de treinamento;
- (ii) a quantidade total de erros por sessão de treinamento;
- (iii) o tempo despendido em cada tarefa;
- (iv) a taxa de conclusão da tarefa em cada sessão de treinamento;
- (v) a quantidade de tentativas incompletas em cada sessão de treinamento.

A quantidade total de tarefas concluídas por sessão de treinamento (QTtarefas) é obtida por meio da soma do número de blocos transferidos de um lado para o outro da caixa em cada sessão de treinamento, conforme apresentado na Equação (3).

$$QTtarefas = \sum_{i=1}^n \text{Número de blocos transferidos na sessão } i \quad (3)$$

O número total de erros em cada sessão de treinamento (TEsessão) é determinado a partir da soma da quantidade de blocos deixados cair durante a execução das tarefas em cada sessão de treinamento, conforme descrito na Equação (4).

$$TEsessao = \sum_{i=1}^n \text{Número de blocos deixados cair na sessão } i \quad (4)$$

O tempo despendido em cada tarefa ($TDtarefa$) é calculado a partir da diferença entre o instante de conclusão da tarefa ($TCtarefa$) e o instante de início da tarefa ($TItarefa$), ambos registrados automaticamente pelo sistema durante a execução das atividades, conforme apresentado na Equação (5).

$$TDtarefa = TCtarefa - TItarefa \quad (5)$$

A taxa de conclusão da tarefa ($TxCtarefa$) é definida como a razão entre o número de tarefas executadas com sucesso ($QTtarefas$) e o número total de tentativas realizadas ($NTtotal$), conforme apresentado na Equação (6). O número total de tentativas corresponde à soma das tarefas executadas com sucesso, das tentativas incompletas e dos erros registrados na sessão de treinamento, conforme a Equação (7).

$$TxCtarefa = \frac{QTtarefas}{NTtotal} \quad (6)$$

$$NTtotal = QTtarefas + QTentativaIncompleta + TEsessão \quad (7)$$

O número total de tentativas incompletas em cada sessão é obtido a partir da soma das situações em que o bloco foi movimentado, porém a tarefa não foi concluída com sucesso, retornando ao mesmo lado da caixa de onde foi originalmente retirado. A caracterização dessa condição é realizada com base na altura de referência no eixo Y no momento de instanciação do bloco, sendo contabilizada cada nova ação do participante, mesmo quando relacionada ao mesmo bloco. Formalmente, essa métrica é definida pela Equação (8).

$$QTentativaIncompleta = \sum_{i=1}^n \text{Número de tentativas incompletas na sessão } i \quad (8)$$

Por fim, a aplicação conjunta dessas métricas possibilita uma análise quantitativa abrangente da evolução individual de cada participante amputado ao longo das sessões de treinamento para o controle de próteses mioelétricas, permitindo avaliar o desempenho, a eficiência e a progressão do aprendizado motor ao longo do uso do sistema MRProsthesis.

6.2.2 Métricas Subjetivas

Para a avaliação das medidas subjetivas, foram utilizados dois questionários: o *Post-Study System Usability Questionnaire* (Anexo I) e o *Prosthesis Embodiment Scale for Arm Amputees* (Anexo II). A seguir, apresenta-se uma descrição mais abrangente sobre esses questionários.

6.2.2.1 Questionário de Usabilidade do Sistema Pós-Estudo (PSSUQ)

Diversos instrumentos foram desenvolvidos para avaliar aspectos como usabilidade, validade e confiabilidade de sistemas computacionais (PERLMAN, 1995; SAURO e LEWIS, 2016). Neste contexto, a presente tese adotou o Questionário de Usabilidade do Sistema Pós-Estudo (PSSUQ).

O PSSUQ tem como objetivo mensurar a satisfação percebida dos usuários em relação à interação com sistemas computacionais (LEWIS, 2012). Em sua terceira versão, o instrumento compreende 16 questões que compõem quatro indicadores: uma medida geral de satisfação e três subescalas específicas (SAURO e LEWIS, 2016). As regras para calculá-las são:

- Satisfação geral do sistema: média das respostas dos itens 1 a 16;
- Utilidade do sistema: Média de itens de 1 a 6;
- Qualidade da informação: Média de itens de 7 a 12;
- Qualidade de interface: Média de itens de 13 a 16;

O questionário PSSUQ foi aplicado utilizando uma escala Likert simétrica de 7 pontos, variando de -3 a +3, conforme demonstrado na Tabela 5. Essa configuração foi escolhida para manter a consistência entre os instrumentos empregados na pesquisa, já que a Escala de Incorporação de Próteses para Amputados de Membros Superiores (PEmbS-ULA) também adota essa padronização.

A uniformização da escala buscou reduzir a carga cognitiva dos participantes e minimizar possíveis confusões durante o preenchimento, uma vez que ambos os questionários foram aplicados de forma sequencial nas mesmas sessões experimentais. Do ponto de vista estatístico, a escala de -3 a +3 é matematicamente equivalente à tradicional escala de 1 a 7, mantendo a mesma amplitude, quantidade

de pontos e natureza de intervalo. Assim, os cálculos de médias, desvio-padrão e testes estatísticos mantêm sua validade, sem prejuízo para a análise quantitativa dos dados.

Tabela 5 - Escala Likert de -3 a 3

Valor	Descrição típica
-3	Discordo totalmente
-2	Discordo muito
-1	Discordo
0	Neutro / Nem concordo nem discordo
1	Concordo
2	Concordo muito
3	Concordo totalmente

Fonte: Autoria Própria.

A adoção dessa escala simétrica se mostra particularmente vantajosa na avaliação do grau de concordância, pois permite identificar claramente respostas negativas, neutras e positivas, favorecendo interpretações mais precisas dos dados coletados (LEWIS, 2016).

Por fim, o questionário PSSUQ possui sua versão original na língua inglesa, esta tese adotou a versão traduzida e validada no trabalho de Rosa et al. (2015).

6.2.2.2 Escala de Incorporação de Próteses para Amputados de Membros Superiores (PEmbS-ULA)

A avaliação da sensação de incorporação de dispositivos protéticos tem sido conduzida, predominantemente, por meio da aplicação de questionários subjetivos (ZBINDEN, LENDARO & ORTIZ-CATALÃO, 2022). Neste estudo, adotou-se a Escala de Incorporação de Próteses para Amputados de Membros Superiores (PEmbS-ULA), originalmente desenvolvida por (FRITSCH, LENGGENHAGER e BEKRATER-BODMANN, 2021) para indivíduos com amputações de membros inferiores e posteriormente adaptada para membros superiores pelos autores.

O instrumento avalia como indivíduos com amputações percebem a prótese como parte de seu corpo. Essa sensação de incorporação é um indicador relevante na compreensão da relação entre o indivíduo e o dispositivo, especialmente no que se refere à integração da prótese à imagem corporal e ao controle funcional. Vale

ressaltar que estudos apontam que a percepção de incorporação pode estar diretamente associada à satisfação do usuário com o sistema protético e à eficácia de seu uso no cotidiano (SEGIL, ROLDAN E GRACZYK, 2022).

A versão utilizada nesta pesquisa é composta por 10 itens, cujas respostas refletem os sentimentos e percepções dos participantes em relação à sua prótese. Cada item é pontuado de acordo com o grau de concordância do indivíduo com afirmações relacionadas à sua experiência com o dispositivo. O questionário contempla três dimensões distintas, descritas a seguir:

- Propriedade (*Ownership*) / Integridade: Refere-se à sensação de que a prótese virtual pertence ao corpo e está integrada à imagem corporal do indivíduo.
- Agência (*Agency*): Relaciona-se à percepção de controle voluntário sobre os movimentos da prótese virtual.
- Plausibilidade Anatômica (*Anatomical Plausibility*) / Localização (location): Refere-se à percepção de que a prótese virtual está localizada e posicionada de forma compatível com um membro real.

Além de suas três dimensões conceituais centrais, o instrumento PEmbS-ULA também permite a mensuração de um índice geral de satisfação com a prótese, refletindo a sensação global de incorporação. Todas as medidas foram obtidas conforme os critérios de mensuração descritos a seguir:

- Sensação Geral de Incorporação: corresponde à média das respostas aos 10 itens do questionário;
- Propriedade / Integridade: média dos itens 1, 2, 3, 4, 5 e 7;
- Agência: média dos itens 9 e 10;
- Plausibilidade Anatômica / Localização: média dos itens 6 e 8;

Além da média, foi também calculado o desvio-padrão, com o objetivo de avaliar a dispersão das respostas entre os participantes. Essa abordagem possibilita uma análise mais completa da percepção dos usuários, oferecendo informações tanto sobre a tendência central quanto sobre a variabilidade das respostas.

Cabe destacar que, até o momento, não há uma versão oficialmente validada do PEmbS-ULA para a língua portuguesa. Dessa forma, a versão utilizada nesta tese foi construída com base em um paralelo entre os formulários em alemão e inglês apresentados no estudo original da adaptação da escala produzido por (FRITSCH,

LENGGENHAGER e BEKRATER-BODMANN, 2021), respeitando a estrutura conceitual propostas pelos autores.

Por fim, conforme apresentado na Seção 6.2.2.1, a avaliação do PEmbS-ULA foi realizada utilizando uma escala Likert simétrica de 7 pontos, variando de “Discordo totalmente” (-3) a “Concordo totalmente” (+3), conforme especificado na Tabela 5.

6.3 Amostra

6.3.1 Critérios de Seleção da Amostra

A definição da população em um estudo requer a identificação de um grupo de indivíduos que compartilhem características pertinentes ao objeto de investigação, conforme critérios estabelecidos na fase de planejamento metodológico. Dada a inviabilidade prática de incluir todos os potenciais participantes, utiliza-se uma amostra, ou seja, um subconjunto representativo da população de interesse, que permita a execução do estudo de forma viável e controlada, sem comprometer a validade dos resultados (OLIVEIRA, 2017).

A amostragem pode ser classificada em duas categorias principais: probabilística e não probabilística (OLIVEIRA, 2017). A amostragem probabilística assegura que todos os elementos da população tenham uma chance conhecida e distinta de zero de serem selecionados, favorecendo a representatividade estatística (SZWARCWALD, 2023). Já a amostragem não probabilística baseia-se em critérios subjetivos ou na acessibilidade dos participantes, sendo amplamente utilizada em estudos exploratórios, especialmente quando há restrições operacionais ou éticas (SILVA, 2023; FREIRE, 2021).

Este estudo adotou a amostragem não probabilística por conveniência, em virtude da natureza experimental da pesquisa, da complexidade logística envolvida nas sessões de coleta e da limitação do público-alvo. Esse método permitiu a seleção de participantes com base em sua disponibilidade de agenda, interesse em contribuir com a pesquisa e adequação às exigências do estudo, como a capacidade de compreender instruções, interagir com sistemas interativos e realizar tarefas motoras simples.

Para garantir a compatibilidade dos participantes com os objetivos e demandas da pesquisa, foram definidos os seguintes critérios de inclusão:

- (i) ter idade igual ou superior a 18 anos;
- (ii) ausência de déficits cognitivos ou visuais significativos que pudessem comprometer a interação com os recursos tecnológicos utilizados;
- (iii) disponibilidade para participação em múltiplas sessões experimentais;
- (iv) não possuir experiência prévia com ambientes de Realidade Mista ou Realidade Aumentada;
- (v) concordância expressa com os termos da pesquisa, formalizada por meio da assinatura do Termo de Consentimento Livre e Esclarecido (TCLE);
- (vi) Preferencialmente com amputações de membros superiores.

Essa abordagem permitiu a composição de dois grupos experimentais: um formado por indivíduos com amputação de membros superiores e outro por indivíduos sem amputação, conforme será detalhado na seção 6.3.2. Apesar do número reduzido de participantes, a amostra atende aos propósitos da presente pesquisa, viabilizando a aplicação das métricas subjetivas e objetivas apresentadas na seção 6.2.

6.3.2 Constituição da Amostra

A amostra foi composta por 14 participantes selecionados conforme os critérios previamente descritos. Para fins de análise, os voluntários foram organizados em dois grupos.

O primeiro grupo foi formado por 11 indivíduos sem amputação de membros superiores, sendo 8 do sexo masculino e 3 do sexo feminino. As idades nesse grupo variaram de 22 a 51 anos. Quanto à lateralidade manual, 9 participantes declararam ter a mão direita como dominante e 2 indicaram preferência pela mão esquerda. Esses dados estão detalhados na Tabela 6.

Tabela 6 - Dados dos Voluntários Sem Amputação

ID do Voluntário	Mão dominante	Idade	Gênero
1	Direita	51	Masculino
2	Direita	26	Masculino
3	Direita	26	Masculino
4	Direita	25	Masculino
5	Direita	34	Feminino
6	Direita	29	Feminino
7	Direita	26	Feminino
8	Esquerdo	25	Masculino
9	Direita	23	Masculino
10	Direita	22	Masculino
11	Esquerda	22	Masculino

Fonte: Autoria Própria.

O segundo grupo foi composto por 3 indivíduos com amputação de membros superiores, todos do sexo masculino. As idades observadas nesse grupo foram de 22, 55 e 59 anos. Os três participantes relataram mão dominante direita. Os níveis e lados das amputações foram variados: um participante apresentava amputação unilateral com desarticulação do punho direito, outro possuía uma amputação bilateral, com níveis transradial à direita e transumeral à esquerda, e o terceiro apresentava uma malformação congênita no membro superior esquerdo, funcionalmente equiparada a uma amputação unilateral transradial. As informações completas sobre esse grupo encontram-se na Tabela 7.

Tabela 7 - Dados dos Voluntários Com Amputação

ID do Voluntário	Nível de amputação	Lado da amputação	Mão dominante	Idade	Gênero
12	Transradial	Direito	Direita	59	Masculino
13	Desarticulação do Punho	Direito	Direita	55	Masculino
14	Transradial (malformação congênita)	Esquerdo	Direita	22	Masculino

Fonte: Autoria Própria.

6.4 Protocolo Experimental

Os testes foram conduzidos na sala de coleta do BioLab da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), onde todos os participantes assinaram previamente o Termo de Consentimento Livre e Esclarecido (TCLE), conforme as diretrizes éticas vigentes para pesquisas envolvendo seres humanos.

Cada participante foi submetido a três sessões experimentais, com um intervalo mínimo de duas semanas entre elas. Durante cada sessão, os participantes realizaram o exercício reabilitador *Block and Block*, amplamente reconhecido como padrão-ouro para avaliação da destreza manual, por meio do jogo sério MRProsthesis. A tarefa consistia na transferência de blocos de um lado para o outro de uma caixa virtual, utilizando uma prótese virtual controlada pelo indivíduo.

Cada sessão foi composta por quatro execuções do exercício, totalizando doze execuções ao longo das três sessões. De acordo com o protocolo, os participantes deveriam aguardar um intervalo de 1 minuto.

A dinâmica do exercício seguiu os seguintes passos:

- Cada execução disponibilizava 12 blocos.
- Os blocos virtuais sempre eram dispostos na caixa virtual do mesmo lado da mão dominante;
- O indivíduo dispunha de 1 minuto para transferir o maior número possível de blocos.
- Para cada bloco corretamente transferido para o lado oposto da caixa, um ponto de acerto era registrado.
- Se o bloco caísse no mesmo lado em que foi pego, era registrado como uma tentativa incompleta, cuja pontuação não era visível ao indivíduo durante a tarefa.
- Caso o bloco fosse derrubado fora da caixa, era contabilizado como erro. No entanto, o indivíduo tinha a possibilidade de recuperar o bloco e completar a transferência, obtendo assim o ponto de acerto correspondente.
- A execução era encerrada automaticamente caso todos os blocos fossem transferidos antes do término do tempo.

Ao final da primeira e da última sessão, os indivíduos responderam aos questionários PEmbS-ULA e PSSUQ. Além disso, foi feita uma pergunta aberta: “*Qual a sensação que o feedback vibratório proporcionou durante o uso da prótese virtual?*”.

Por fim, esse protocolo padronizado permitiu a coleta precisa de indicadores de desempenho, definidos nas sessões de 6.2.2.1 e 6.2.2.2.

6.5 Considerações Finais

Neste capítulo, foram apresentados de forma estruturada os instrumentos e as métricas utilizados na pesquisa, abrangendo tanto as avaliações objetivas de desempenho quanto as avaliações subjetivas relacionadas à usabilidade do sistema e à sensação de incorporação da prótese virtual. Também foram descritos o protocolo experimental, os critérios de inclusão e os fundamentos metodológicos que orientaram a coleta e análise dos dados.

Essas informações fornecem a base necessária para a interpretação dos resultados e para a discussão dos principais achados, que serão abordados no próximo capítulo, à luz dos objetivos da pesquisa.

Capítulo 7

Resultados e Discussão

7.1 Introdução

Este capítulo apresenta os resultados obtidos na aplicação do sistema MRProsthesis, com base nas métricas subjetivas e objetivas descritas no capítulo 6. A análise contempla três vertentes principais: usabilidade do sistema, sensação de incorporação da prótese virtual e rendimento dos usuários nas tarefas propostas.

A apresentação dos dados foi organizada de modo a refletir a estrutura da amostra, composta por dois grupos distintos: indivíduos sem amputação de membros superiores e indivíduos com amputação de membros superiores, com diferentes níveis e características clínicas.

Os resultados de cada uma das vertentes avaliadas foram analisados somente de forma agregada no grupo sem amputação. No grupo com amputação, optou-se por uma análise de duas formas: Primeiramente de forma coletiva, considerando o desempenho geral dos participantes. Em seguida de forma individual, por meio de uma abordagem de estudo de múltiplos casos. Essa estratégia buscou valorizar as particularidades de cada voluntário, respeitando a heterogeneidade observada do grupo.

7.2 Usabilidade do Sistema

Conforme descrito na Seção 6.2.2.1, a avaliação da usabilidade do sistema MRProsthesis foi conduzida por meio do Questionário de Usabilidade Pós-Estudo (PSSUQ). Este instrumento permite aferir a experiência dos usuários em quatro dimensões específicas: Utilidade do Sistema, Qualidade da Informação, Qualidade da Interface e Satisfação Geral.

Para a análise quantitativa dos dados obtidos, foram utilizadas três estatísticas descritivas fundamentais: a média aritmética simples e mediana, como medidas de tendência central, e o desvio-padrão (DP), como medida de dispersão. A média aritmética expressa o valor médio das respostas atribuídas a cada dimensão do questionário, refletindo a percepção geral do grupo em relação à usabilidade do sistema. Já a mediana permite identificar o valor central da distribuição, minimizando a influência de valores extremos. Valores mais elevados indicam avaliações mais positivas, conforme a escala Likert adotada (de -3 a +3).

Quando a média e a mediana apresentam valores iguais ou muito próximos, isso indicará que não há concentração de respostas em valores extremos. Essa proximidade sugere que as percepções dos participantes foram consistentes, com baixa influência de respostas atípicas sobre a análise dos resultados.

O desvio-padrão, por sua vez, fornece informações sobre a consistência das respostas dentro de cada grupo. Um desvio-padrão reduzido sugere alto grau de uniformidade nas percepções dos participantes, enquanto valores mais elevados indicam maior variabilidade nas avaliações.

A análise conjunta dessas medidas possibilita uma compreensão mais abrangente da experiência dos usuários, considerando tanto a tendência geral das respostas quanto o grau de concordância entre os avaliadores. A seguir, os resultados são apresentados de forma comparativa entre os dois grupos participantes da pesquisa: o grupo de indivíduos sem amputação e o grupo de indivíduos com amputação, com o objetivo de identificar possíveis diferenças na percepção de usabilidade do sistema MRProsthesis. Também são comparados aos dois grupos os escores individuais de cada voluntário do grupo de indivíduos com amputação.

7.2.1 Análise de usabilidade do grupo de indivíduos sem amputação

Os resultados obtidos a partir da aplicação do questionário PSSUQ na primeira e na terceira sessão sugerem uma evolução positiva na percepção de usabilidade do sistema ao longo do tempo no grupo de indivíduos sem amputação. Já na primeira sessão, as médias iniciais apresentaram valores relativamente elevados, sugerindo uma boa aceitação do sistema desde o primeiro contato. Na terceira sessão, observa-

se um aumento adicional dessas médias em todas as dimensões avaliadas, acompanhado de redução na dispersão dos dados, evidenciada pela diminuição do desvio-padrão. Além disso, a maior proximidade entre médias e medianas na terceira sessão reforça a consistência das respostas e indica menor incidência de valores extremos. Os dados detalhados encontram-se na Tabela 8.

Tabela 8 - Tabela Descritiva Comparativa com Dados Indivíduos Sem Amputação

Métrica	Momento	Média	Mediana	Desvio-padrão
Utilidade do Sistema	1ª Sessão	2,42	3,00	0,82
	3ª Sessão	2,59	3,00	0,61
Qualidade da Informação	1ª Sessão	1,48	2,00	1,63
	3ª Sessão	1,94	3,00	1,25
Qualidade da Interface	1ª Sessão	2,34	3,00	1,01
	3ª Sessão	2,45	3,00	0,85
Satisfação Geral do Sistema	1ª Sessão	2,05	3,00	1,30
	3ª Sessão	2,32	3,00	0,99

Fonte: Autoria Própria.

Analizando individualmente cada dimensão, verifica-se que, na dimensão de Utilidade do Sistema, observou-se evolução positiva entre a primeira e terceira sessão. A média aumentou de 2,42 para 2,59, a mediana permaneceu em 3,00, correspondente ao valor máximo da escala, e o desvio-padrão apresentou redução expressiva de 0,82 para 0,61. Essa combinação de aumento da média, manutenção da mediana no teto da escala e redução da dispersão sugere aumento na percepção de efetividade funcional do sistema com convergência de opiniões entre os participantes.

Na dimensão Qualidade da Informação, observou-se evolução positiva entre a primeira e terceira sessão, embora com valores mais baixos em relação às demais dimensões avaliadas. A média aumentou de 1,48 para 1,94, a mediana progrediu de 2,00 para 3,00, correspondente ao valor máximo da escala, e o desvio-padrão apresentou redução de 1,63 para 1,25. Essa combinação de aumento da média, elevação da mediana ao teto da escala e redução da dispersão sugere melhora na percepção sobre das informações oferecidas pelo sistema, com convergência de opiniões entre os participantes.

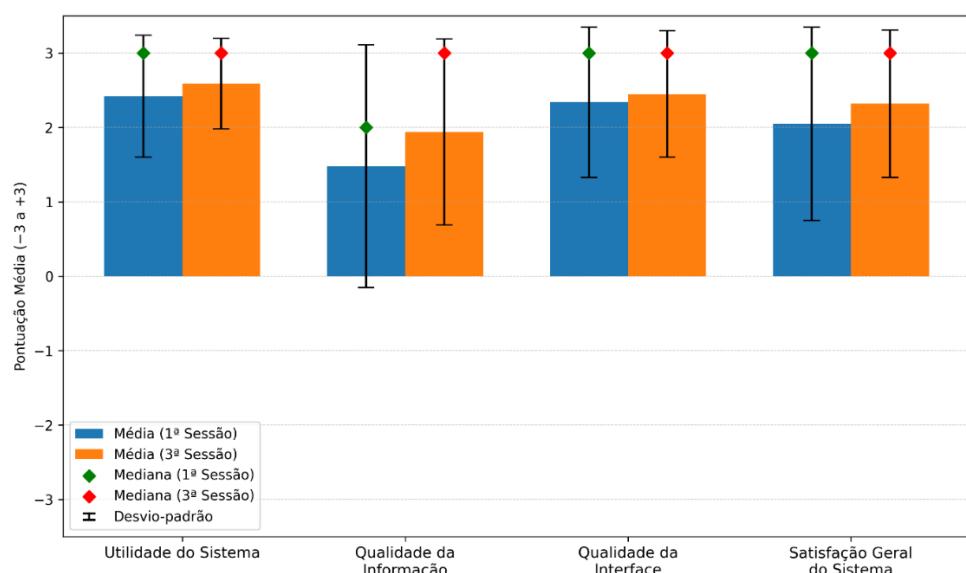
Os valores inferiores nesta dimensão estão relacionados a características específicas da implementação do sistema. No item que avalia mensagens de erro (item 7 do questionário), o sistema fornece feedback exclusivamente por meio da

pontuação, sem mensagens explícitas que orientem a resolução de problemas. No item sobre recuperação de erros (item 8 do questionário), observou-se que a maioria dos participantes optou por prosseguir com novas tarefas em vez de tentar corrigir erros cometidos, limitando a experiência de recuperação durante as sessões. No item que trata de informações de suporte (item 9 do questionário), a ausência de ajuda online ou mensagens na tela, com retorno concentrado na pontuação, resultou em avaliações mais baixas quanto à clareza das informações disponíveis.

Na dimensão de Qualidade da Interface, constatou-se crescimento entre a primeira e terceira sessão. A média aumentou de 2,34 para 2,45, a mediana permaneceu em 3,00, correspondente ao valor máximo da escala, e o desvio-padrão apresentou redução de 1,01 para 0,85. Essa convergência de valores sugere que, com o uso contínuo, a interface foi percebida de maneira mais consistente e positiva, consolidando uma experiência de interação mais uniforme.

Na dimensão Satisfação Geral do Sistema, também se observou progresso entre a primeira e terceira sessão. A média aumentou de 2,05 para 2,32, a mediana permaneceu em 3,00, correspondente ao valor máximo da escala, e o desvio-padrão apresentou redução de 1,30 para 0,99. Essa convergência de valores sugere que as percepções dos participantes se tornaram mais alinhadas, consolidando uma experiência de interação positiva e estável ao longo do treinamento. A Figura 49 apresenta visualmente a evolução das medidas das quatro dimensões na primeira e terceira sessão.

Figura 49 - Resultados das Dimensões de Usabilidade do Grupo de Individuo sem Amputação



Fonte: Autoria Própria.

Por fim, as quatro dimensões avaliadas pelo PSSUQ apresentaram evolução positiva entre a primeira e a terceira sessão. Ainda que os aumentos nas médias tenham sido, em alguns casos, discretos, a redução consistente do desvio-padrão e a manutenção das medianas próximas ou iguais ao valor máximo indicam maior uniformidade nas respostas e menor influência de valores extremos. Esses resultados sugerem que, à medida que os participantes se familiarizaram com o sistema, a experiência de uso tornou-se mais estável, previsível e satisfatória. Essa evolução reforça a eficácia do sistema em promover uma interação consistente e positiva ao longo do tempo.

7.2.2 Análise de usabilidade do grupo de indivíduos com amputação

No grupo de indivíduos com amputação, assim como observado entre os participantes sem amputação, os resultados obtidos a partir da aplicação do questionário PSSUQ na primeira e na terceira sessão sugerem uma evolução positiva na percepção de usabilidade do sistema ao longo do tempo. Já na primeira sessão, as médias apresentaram valores relativamente elevados, sugerindo uma boa aceitação desde o primeiro contato. Na terceira sessão, nota-se um aumento adicional nas pontuações em todas as dimensões avaliadas, acompanhado de redução na dispersão dos dados. Além disso, a maior proximidade entre médias e medianas na terceira sessão reforça a consistência das respostas e sugere menor influência de valores extremos. Os dados detalhados encontram-se na Tabela 9.

Tabela 9 - Tabela Descritiva Comparativa com Dados Indivíduos Com Amputação

Métrica	Momento	Média	Mediana	Desvio-padrão
Utilidade do Sistema	1ª Sessão	2,44	3,00	0,70
	3ª Sessão	2,72	3,00	0,46
Qualidade da Informação	1ª Sessão	2,33	2,50	0,84
	3ª Sessão	2,44	3,00	0,78
Qualidade da Interface	1ª Sessão	2,25	3,00	1,29
	3ª Sessão	2,50	2,50	0,52
Satisfação Geral do Sistema	1ª Sessão	2,35	3,00	0,91
	3ª Sessão	2,56	3,00	0,62

Fonte: Autoria Própria.

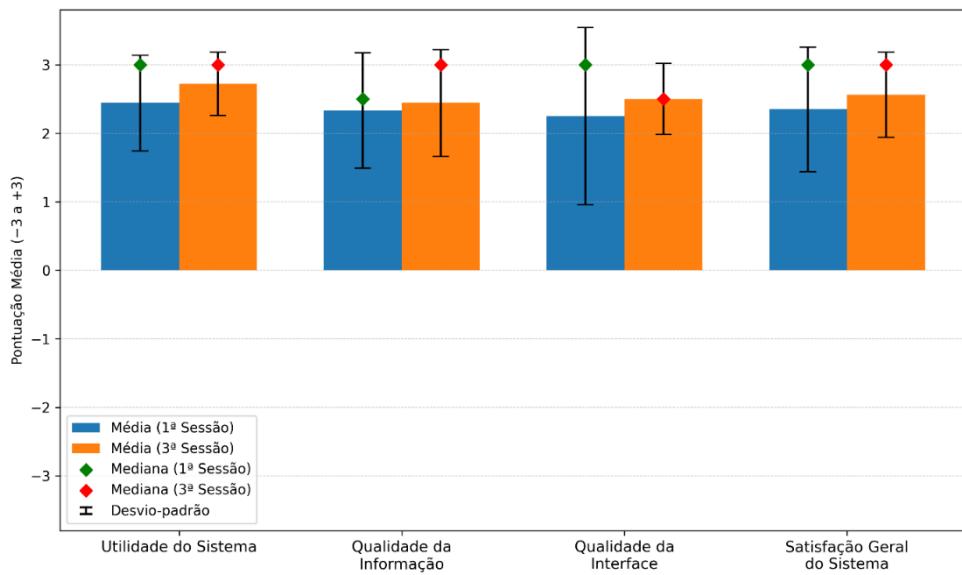
Analisando individualmente cada dimensão, verifica-se que, na dimensão de Utilidade do Sistema, registrou-se melhora entre a primeira e terceira sessão. A média aumentou de 2,44 para 2,72, a mediana permaneceu em 3,00, correspondente ao valor máximo da escala, e o desvio-padrão apresentou redução de 0,70 para 0,46. Comparativamente ao grupo sem amputação, que evoluiu de 2,42 para 2,59, o grupo com amputação apresentou valores superiores em ambas as sessões, além de menor variabilidade nas respostas, sugerindo maior consistência e alinhamento entre os participantes amputados.

Na dimensão de Qualidade da Informação, observou-se avanço entre a primeira e terceira sessão. A média aumentou de 2,33 para 2,44, a mediana progrediu de 2,50 para 3,00, correspondente ao valor máximo da escala, e o desvio-padrão apresentou redução de 0,84 para 0,78. Comparativamente ao grupo sem amputação, que evoluiu de 1,48 para 1,94 na média e de 2,00 para 3,00 na mediana, o grupo com amputação apresentou valores superiores em ambas as sessões, além de menor variabilidade nas respostas. A maior consistência nas avaliações do grupo com amputação sugere que este grupo não foi tão impactado pelos itens que tratam de mensagens de erro, recuperação após erros e clareza das informações auxiliares (itens 7, 8 e 9 do questionário), aspectos que contribuíram para reduzir as avaliações do grupo sem amputação.

Na dimensão de Qualidade da Interface, constatou-se crescimento entre a primeira e terceira sessão. A média aumentou de 2,25 para 2,50, a mediana permaneceu em 3,00, correspondente ao valor máximo da escala, e o desvio-padrão apresentou redução expressiva de 1,29 para 0,52. Essa combinação de valores reflete maior alinhamento nas percepções dos participantes quanto à facilidade de uso e à organização da interface. Comparativamente ao grupo sem amputação, que apresentou médias de 2,34 na primeira sessão e 2,45 na terceira, com medianas de 3,00 em ambos os momentos, o grupo com amputação demonstrou valores ligeiramente inferiores. Esse resultado pode estar associado a expectativas iniciais mais elevadas quanto às funcionalidades da prótese virtual, uma vez que alguns participantes esperavam movimentação individualizada dos dedos. A diferença entre expectativa e entrega percebida impactou negativamente a avaliação dessa dimensão, sobretudo na primeira sessão.

Na dimensão Satisfação Geral com o sistema, também se observou progresso entre a primeira e terceira sessão. A média aumentou de 2,35 para 2,56, a mediana permaneceu em 3,00, correspondente ao valor máximo da escala, e o desvio-padrão apresentou redução de 0,91 para 0,62. Essa combinação de valores indica que a percepção global se tornou mais homogênea entre os participantes ao longo do período. Comparativamente ao grupo sem amputação, que apresentou médias de 2,05 na primeira sessão e 2,32 na terceira, com medianas de 3,00 em ambos os momentos, o grupo com amputação demonstrou valores superiores. Essa diferença sugere que, apesar de expectativas iniciais elevadas quanto a recursos mais avançados na prótese virtual, como movimentação individualizada dos dedos, a experiência acumulada ao longo das sessões contribuiu para adaptação positiva e satisfatória ao sistema MRProsthesis. A Figura 50 ilustra graficamente os valores das medidas obtidas nas quatro dimensões analisadas.

Figura 50 - Resultados das Dimensões de Usabilidade do Grupo de Individuo com Amputação



Fonte: Autoria Própria.

A análise do grupo com amputação demonstra que o sistema apresentou boa aceitação desde o primeiro contato, com progressos em todas as dimensões avaliadas ao longo do período. As médias mantiveram-se elevadas, as medianas permaneceram em 3,00, correspondente ao valor máximo da escala, e observou-se redução do desvio-padrão na maioria das dimensões, reforçando maior homogeneidade nas percepções entre os participantes. Comparativamente ao grupo sem amputação, que também apresentou tendência de melhora, o grupo com

amputação demonstrou avaliações ligeiramente superiores em termos de tendência central, aliadas a menor dispersão nas respostas. Por fim, esses resultados sugerem que, mesmo diante de expectativas iniciais elevadas, o sistema atendeu de forma satisfatória às necessidades dos usuários, proporcionando experiência de uso estável com adaptação progressiva ao longo do treinamento. A Figura 48 ilustra graficamente os valores médios obtidos nas quatro dimensões analisadas.

7.2.2.1 Análise escores individuais de usabilidade do grupo com amputação

O grupo de participantes com amputação de membros superiores foi composto por três voluntários, conforme apresentado na Seção 6.3.2. O perfil detalhado de cada indivíduo, incluindo informações como nível de amputação, mão dominante, idade e demais características, encontra-se descrito na Tabela 7 da referida Seção, sendo identificados pelos códigos ID 12, ID 13 e ID 14, que serão utilizados nas análises a seguir.

- Voluntário ID 12:**

Na primeira sessão, o voluntário ID 12 apresentou resultados variados entre as métricas avaliadas. Em Utilidade do Sistema, registrou média de 2,00, mediana de 2,00 e desvio-padrão de 0,63, valores inferiores às médias dos grupos com amputação (2,44) e sem amputação (2,42). Quanto à Qualidade da Informação, obteve média de 2,50, mediana de 2,50 e desvio-padrão de 0,55, superando ambos os grupos de referência, cujas médias foram de 2,33 entre participantes com amputação e 1,48 entre aqueles sem amputação. A Qualidade da Interface apresentou o desempenho mais baixo, com média de 1,50, mediana de 2,00 e desvio-padrão de 1,91, ficando bem abaixo das médias observadas nos grupos de referência. A Satisfação Geral registrou média de 2,06, mediana de 2,00 e desvio-padrão de 1,06, resultado próximo, mas ainda inferior às médias dos grupos comparativos.

Na terceira sessão, houve evolução em praticamente todas as métricas. A Utilidade do Sistema aumentou para média de 2,17, mantendo mediana de 2,00 e reduzindo o desvio-padrão para 0,41, permanecendo abaixo da média dos participantes com amputação (2,72) mas próxima àquela dos participantes sem amputação (2,59). A Qualidade da Informação apresentou leve redução, com média

de 2,17, mediana de 2,00 e desvio-padrão de 0,41, mantendo-se inferior à média do grupo com amputação (2,44) e ligeiramente acima daquela do grupo sem amputação (1,94). A Qualidade da Interface registrou melhora significativa, alcançando média de 2,00, mediana de 2,00 e desvio-padrão de 0,00, aproximando-se das médias dos dois grupos de referência e revelando total consenso nas respostas. A Satisfação Geral evoluiu para média de 2,13, mediana de 2,00 e desvio-padrão de 0,34, ainda inferior às médias dos grupos com amputação (2,56) e sem amputação (2,32), mas indicando progressão positiva.

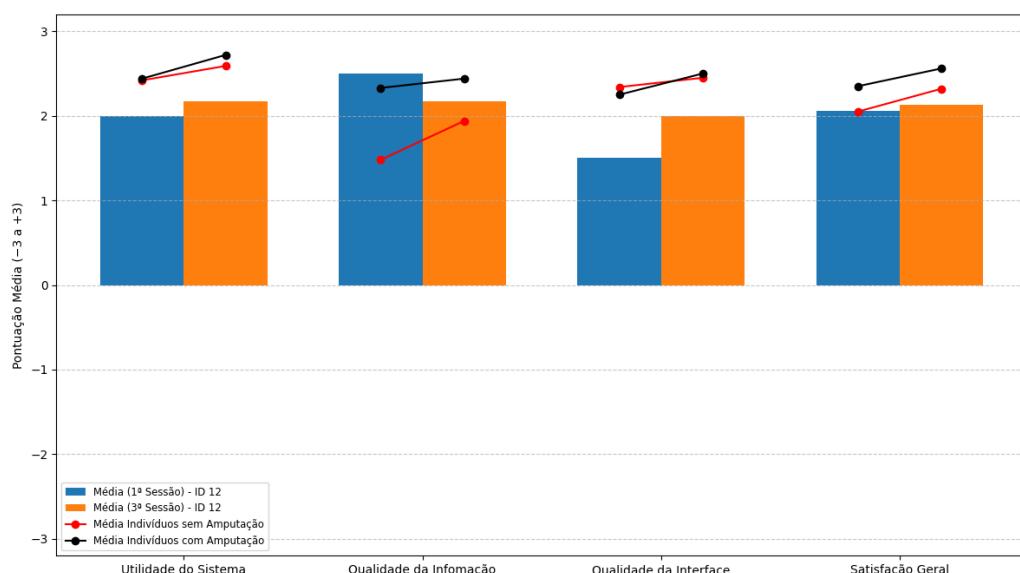
Os resultados consolidados estão apresentados na Tabela 10, com os valores de média, mediana e desvio-padrão para cada dimensão nas duas sessões avaliadas. Já Figura 51 ilustra visualmente a variação das notas atribuídas pelo participante ID 12 ao longo do tempo, permitindo uma comparação direta com os demais grupos.

Tabela 10 - Tabela Descritiva com Dados do Indivíduos ID 12

Métrica	Momento	Média	Mediana	Desvio-padrão
Utilidade do Sistema	1ª Sessão	2,00	2,00	0,63
	3ª Sessão	2,17	2,00	0,41
Qualidade da Informação	1ª Sessão	2,50	2,50	0,55
	3ª Sessão	2,17	2,00	0,41
Qualidade da Interface	1ª Sessão	1,50	2,00	1,91
	3ª Sessão	2,00	2,00	0,00
Satisfação Geral do Sistema	1ª Sessão	2,06	2,00	1,06
	3ª Sessão	2,13	2,00	0,34

Fonte: Autoria Própria.

Figura 51 - Resultados das Dimensões de Usabilidade do indivíduo ID 12



Fonte: Autoria Própria.

Por fim, o voluntário ID 12, apresentou evolução positiva na avaliação da aplicação entre a primeira e a terceira sessão. Embora tenha relatado certa dificuldade inicial na utilização, manteve-se engajado e demonstrou entusiasmo contínuo. Entre as dimensões avaliadas, a Qualidade da Interface foi um dos pontos inicialmente mais baixos, em parte porque o participante expressou o desejo de que a prótese pudesse realizar movimentos individualizados de cada dedo. Ainda assim, à medida que avançou no uso, sua percepção da interface tornou-se mais favorável. As métricas de Utilidade do Sistema e Satisfação Geral também indicaram avaliações mais positivas ao longo do tempo, sugerindo que o uso repetido aumentou sua familiaridade e conforto com a aplicação. Seu entusiasmo foi reforçado por sugestões criativas, como a ideia de desenvolver uma versão voltada para simulação de piano, evidenciando interesse e envolvimento para além do escopo original do estudo.

- **Voluntário ID 13:**

Na primeira sessão, o voluntário ID 13 apresentou avaliações elevadas em todas as métricas analisadas. A Utilidade do Sistema recebeu média de 2,83, mediana de 3,00 e desvio-padrão de 0,41, situando-se acima da média do grupo com amputação, que registrou 2,44 com mediana de 3,00 e desvio-padrão de 0,70, e também superior à média do grupo sem amputação, de 2,39 com mediana de 3,00 e desvio-padrão de 0,82. A Qualidade da Informação alcançou média de 2,83, mediana de 3,00 e desvio-padrão de 0,41, superando as médias observadas para participantes com amputação, de 2,33 com mediana de 2,50 e desvio-padrão de 0,84, e para participantes sem amputação, de 1,88 com mediana de 2,00 e desvio-padrão de 1,63. A Qualidade da Interface foi avaliada com a pontuação máxima de 3,00, mediana de 3,00 e desvio-padrão de 0,00, situando-se acima das médias tanto do grupo com amputação, de 2,25 com mediana de 3,00 e desvio-padrão de 1,29, quanto do grupo sem amputação, de 2,34 com mediana de 3,00 e desvio-padrão de 1,01. A Satisfação Geral registrou média de 2,88, mediana de 3,00 e desvio-padrão de 0,34, também superior às médias dos participantes com amputação, de 2,35 com mediana de 3,00 e desvio-padrão de 0,91, e dos participantes sem amputação, de 2,19 com mediana de 3,00 e desvio-padrão de 1,30.

Na terceira sessão, o participante manteve desempenho elevado em todas as métricas, alcançando a pontuação máxima permitida na escala. A Utilidade do Sistema foi avaliada com média de 3,00, mediana de 3,00 e desvio-padrão de 0,00,

permanecendo acima da média do grupo com amputação, de 2,83 com mediana de 3,00 e desvio-padrão de 0,29, e da média do grupo sem amputação, de 2,59 com mediana de 3,00 e desvio-padrão de 0,61. A Qualidade da Informação manteve-se em 3,00, com mediana de 3,00 e desvio-padrão de 0,00, estável e superior às médias dos participantes com amputação, de 2,61 com mediana de 3,00 e desvio-padrão de 0,35, e sem amputação, de 2,35 com mediana de 3,00 e desvio-padrão de 1,25. A Qualidade da Interface continuou em 3,00, com mediana de 3,00 e desvio-padrão de 0,00, consistente com a primeira sessão e acima das médias dos grupos com amputação, de 2,67 com mediana de 2,50 e desvio-padrão de 0,38, e sem amputação, de 2,59 com mediana de 3,00 e desvio-padrão de 0,42. A Satisfação Geral também registrou 3,00, com mediana de 3,00 e desvio-padrão de 0,00, mantendo-se estável e acima das médias dos participantes com amputação, de 2,71 com mediana de 3,00 e desvio-padrão de 0,31, e sem amputação, de 2,50 com mediana de 3,00 e desvio-padrão de 0,31.

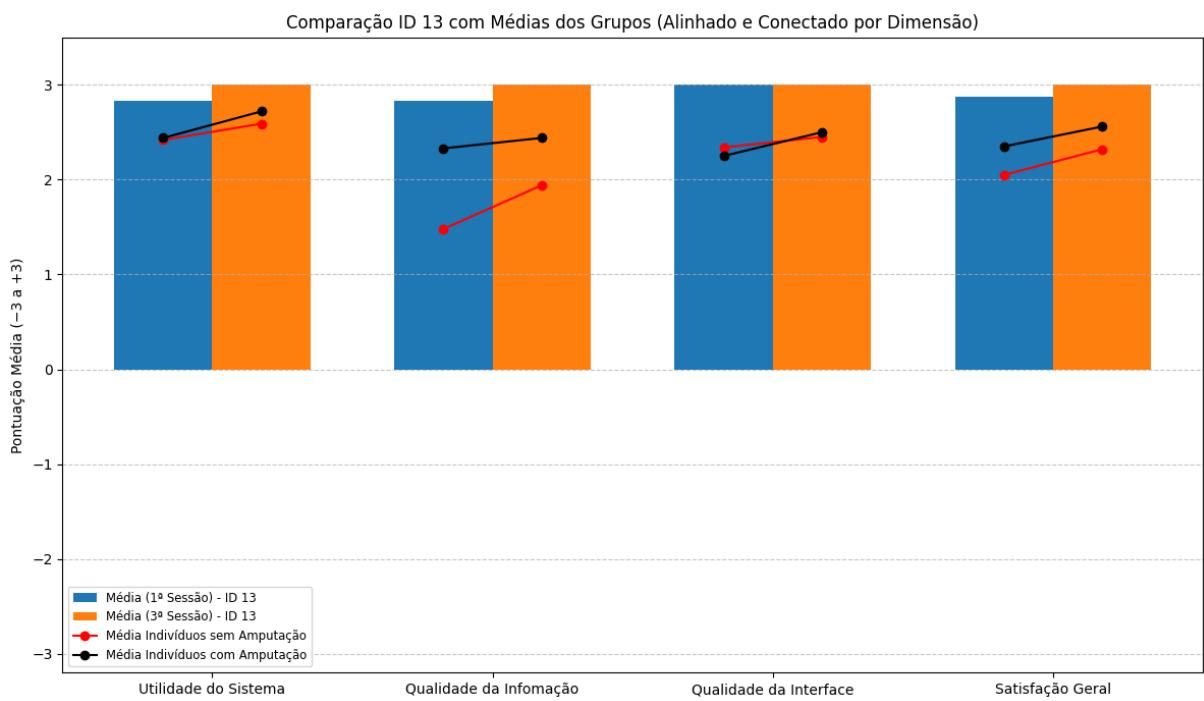
A Tabela 11 apresenta as médias, medianas e desvio-padrão atribuídos pelo participante na primeira e terceira sessão, enquanto a Figura 52 sintetiza graficamente o comportamento de suas avaliações ao longo do tempo em comparação com as médias dos grupos de amputados e não amputados. Ambas confirmam que, já na primeira sessão, as percepções do participante se mantiveram próximas ao valor máximo da escala e estáveis até a terceira sessão, reforçando a solidez da experiência positiva do indivíduo ID 12 com o sistema MRProsthesis.

Tabela 11 - Tabela Descritiva com Dados do Indivíduos ID 13

Métrica	Momento	Média	Mediana	Desvio-padrão
Utilidade do Sistema	1ª Sessão	2,83	3,00	0,41
	3ª Sessão	3,00	3,00	0,00
Qualidade da Informação	1ª Sessão	2,83	3,00	0,41
	3ª Sessão	3,00	3,00	0,00
Qualidade da Interface	1ª Sessão	3,00	3,00	0,00
	3ª Sessão	3,00	3,00	0,00
Satisfação Geral do Sistema	1ª Sessão	2,88	3,00	0,34
	3ª Sessão	3,00	3,00	0,00

Fonte: Autoria Própria.

Figura 52 - Resultados das Dimensões de Usabilidade do indivíduo ID 13



Fonte: Autoria Própria.

Por fim, este voluntário apresentou várias avaliações máximas em praticamente todas as dimensões, desde a primeira sessão, mantendo-se até a terceira sessão. Esse padrão de indícios que a percepção positiva da aplicação foi consolidada já no primeiro contato, com pouco espaço para evolução. Durante todo o experimento, o indivíduo ID 13 mostrou-se altamente engajado, não apresentou dificuldades no manuseio da prótese virtual e relatou experiência prévia com jogos digitais, afirmando jogar regular. Esse perfil de familiaridade com ambientes virtuais, aliado à motivação, pode ter influenciado diretamente sua avaliação elevada e estável da aplicação.

- **Voluntário ID 14:**

Na primeira sessão, o voluntário ID 14 apresentou resultados variados entre as métricas avaliadas. A Utilidade do Sistema foi avaliada com média de 2,50, mediana de 3,00 e desvio-padrão de 0,84, valor acima da média do grupo com amputação, de 2,44 com mediana de 3,00 e desvio-padrão de 0,70, e também superior à média do grupo sem amputação, de 2,39 com mediana de 3,00 e desvio-padrão de 0,82. A Qualidade da Informação recebeu média de 1,67, mediana de 2,00 e desvio-padrão de 1,03, posicionando-se abaixo das médias de participantes com amputação, de 2,33 com mediana de 2,50 e desvio-padrão de 0,84, e sem amputação, de 1,88 com

mediana de 2,00 e desvio-padrão de 1,63. A Qualidade da Interface recebeu média de 2,25, mediana de 2,50 e desvio-padrão de 0,96, valor ligeiramente abaixo da média do grupo com amputação, de 2,25 com mediana de 3,00 e desvio-padrão de 1,29, e do grupo sem amputação, de 2,34 com mediana de 3,00 e desvio-padrão de 1,01. A Satisfação Geral apresentou média de 2,13, mediana de 2,00 e desvio-padrão de 0,96, resultado abaixo da média dos participantes com amputação, de 2,35 com mediana de 3,00 e desvio-padrão de 0,91, e muito próximo ao valor do grupo sem amputação, de 2,19 com mediana de 3,00 e desvio-padrão de 1,30.

Na terceira sessão, houve evolução em praticamente todas as métricas. A Utilidade do Sistema alcançou média de 3,00, mediana de 3,00 e desvio-padrão de 0,00, superando as médias dos grupos com amputação, de 2,83 com mediana de 3,00 e desvio-padrão de 0,29, e sem amputação, de 2,59 com mediana de 3,00 e desvio-padrão de 0,61. A Qualidade da Informação subiu para média de 2,17, mediana de 2,50 e desvio-padrão de 1,17, ainda inferior às médias dos participantes com amputação, de 2,61 com mediana de 3,00 e desvio-padrão de 0,35, e sem amputação, de 2,35 com mediana de 3,00 e desvio-padrão de 1,25. A Qualidade da Interface registrou média de 2,50, mediana de 2,50 e desvio-padrão de 0,58, valor abaixo da média dos grupos com amputação, de 2,67 com mediana de 2,50 e desvio-padrão de 0,38, e sem amputação, de 2,59 com mediana de 3,00 e desvio-padrão de 0,42. A Satisfação Geral chegou a média de 2,56, mediana de 3,00 e desvio-padrão de 0,81, superando a média do grupo sem amputação, de 2,50 com mediana de 3,00 e desvio-padrão de 0,31, e ligeiramente abaixo da média do grupo com amputação, de 2,71 com mediana de 3,00 e desvio-padrão de 0,31.

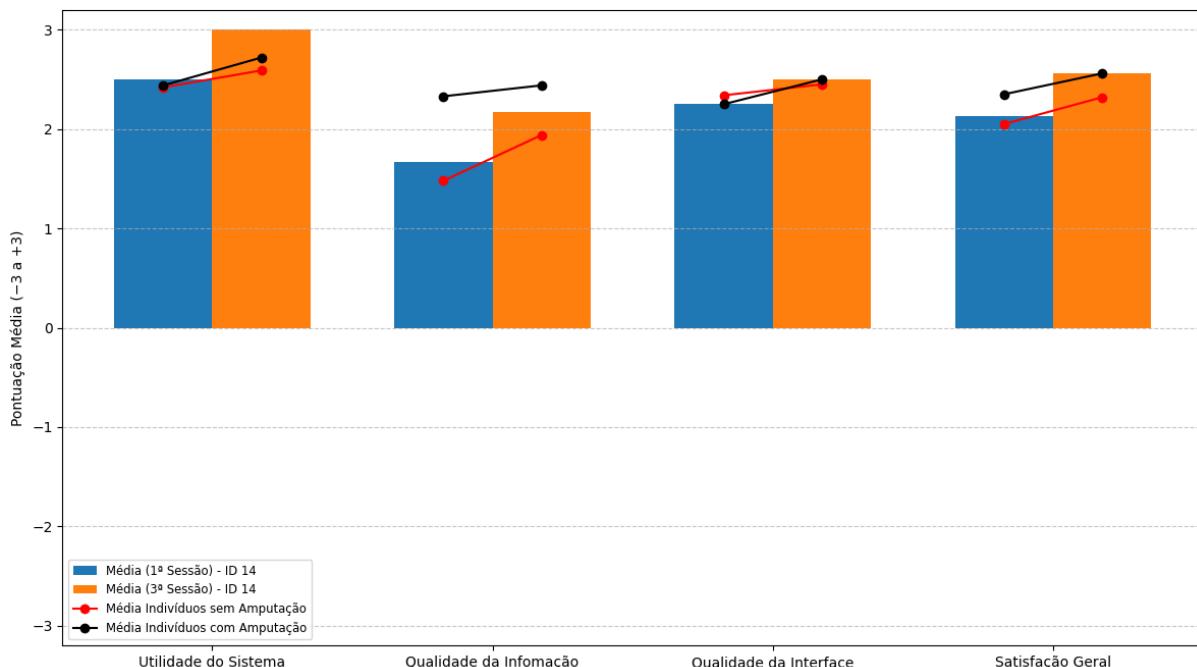
A Tabela 12 apresenta detalhadamente as métricas de média, mediana e desvio-padrão do ID 14 nas sessões 1 e 3. A Figura 53 sintetiza graficamente a evolução das suas avaliações em relação às médias dos grupos de amputados e não amputados, evidenciando que, apesar das oscilações, houve progresso geral nas percepções ao longo do tempo.

Tabela 12 - Resultados das Dimensões de Usabilidade do indivíduo ID 14

Métrica	Momento	Média	Mediana	Desvio-padrão
Utilidade do Sistema	1ª Sessão	2,50	3,00	0,84
	3ª Sessão	3,00	3,00	0,00
Qualidade da Informação	1ª Sessão	1,67	2,00	1,03
	3ª Sessão	2,17	2,50	1,17
Qualidade da Interface	1ª Sessão	2,25	2,50	0,96
	3ª Sessão	2,50	2,50	0,58
Satisfação Geral do Sistema	1ª Sessão	2,13	2,00	0,96
	3ª Sessão	2,56	3,00	0,81

Fonte: Autoria Própria.

Figura 53 - Resultados das Dimensões de Usabilidade do indivíduo ID 14



Fonte: Autoria Própria.

Por fim, o voluntário ID 14 apresentou evolução consistente na avaliação da aplicação entre a primeira e a terceira sessão. Apesar de iniciar com valores próximos, mas em alguns casos abaixo das médias dos grupos, especialmente na Qualidade da Informação e na Satisfação Geral, demonstrou melhoria em todas as dimensões na terceira sessão. Sua avaliação final posicionou-se acima da média tanto do grupo de amputados quanto do grupo de não amputados em praticamente todos os quesitos, com destaque para a Utilidade do Sistema, que atingiu o valor máximo da escala. O desempenho foi acompanhado de boa adaptação ao longo das sessões, sugerindo que seu perfil e engajamento favoreceram a evolução positiva. O participante executou as atividades propostas com empenho e segurança, reforçando o potencial

da aplicação para manter o interesse e promover ganhos de usabilidade ao longo do tempo.

7.3 Sensação de Incorporação (Embodiment)

Conforme detalhado na Seção 6.2.2.2, a sensação de incorporação foi mensurada a partir das respostas ao questionário PEmbs-ULA. O instrumento contempla -se em um Índice Geral de Incorporação e em três dimensões específicas: Propriedade (Ownership), Plausibilidade Anatômica / Localização (Location) e Agência (Agency). Em conjunto, essas medidas capturam, respectivamente, a integração da prótese à imagem corporal, a compatibilidade anatômica e posicional do membro virtual e o senso de controle do voluntário sobre a prótese.

Assim como na Seção 7.1 para a análise quantitativa dos dados de sensação de incorporação, foram adotadas três estatísticas descritivas: média aritmética e mediana, como medidas de tendência central, e desvio-padrão (DP), como medida de dispersão. A média expressa o valor médio atribuído pelos participantes a cada dimensão e ao índice geral, refletindo o nível global de incorporação percebida. A mediana permite identificar o valor central da distribuição e reduzir a influência de respostas extremas. Já a escala Likert de -3 a +3, indica escores mais elevados refletem maior sensação de incorporação.

A análise combinada dessas estatísticas oferece um retrato mais completo da sensação de incorporação, ao captar simultaneamente a tendência central dos escores e a consistência das respostas entre participantes. Em seguida, os resultados são apresentados comparando-se os dois grupos do estudo, sem amputação e com amputação, a fim de identificar diferenças na incorporação da prótese virtual mensurada pelo PEmbs-ULA. Por fim, são descritos os escores individuais dos voluntários com amputação, comparado seus resultados com o padrão encontrado em cada um dos grupos.

7.3.1 Grupo de indivíduos sem amputação

A análise dos dados obtidos através das respostas do questionário PEmbs-ULA, aplicado na primeira e terceira sessão do treinamento, demonstrou que os

participantes desenvolveram uma maior sensação de incorporação da prótese virtual ao final do processo.

Os resultados revelam duas tendências importantes: primeiro, houve um aumento significativo nos valores médios das pontuações entre os dois momentos de avaliação. Segundo, observou-se uma aproximação entre os valores da média e da mediana, indicando que as respostas se tornaram mais homogêneas e consistentes. Esta convergência sugere que o protocolo de treinamento foi eficaz em promover uma sensação uniforme do grupo à prótese virtual. Os dados consolidados encontram-se na Tabela 13.

Tabela 13 - Dados da Percepção de Incorporação do Grupo de indivíduos sem amputação

Métrica	Momento	Média	Mediana	Desvio-padrão
Propriedade / Integridade	1ª Sessão	0,89	1,00	1,51
	3ª Sessão	1,50	2,00	1,34
Agência	1ª Sessão	1,82	2,00	1,01
	3ª Sessão	2,27	2,00	0,63
Plausibilidade Anatômica	1ª Sessão	1,95	2,00	1,00
	3ª Sessão	2,05	2,00	1,00
Sensação Geral de Incorporação	1ª Sessão	1,29	2,00	1,41
	3ª Sessão	1,75	2,00	1,20

Fonte: Autoria Própria.

Analizando cada dimensão separadamente, é possível identificar a variação entre a primeira e terceira sessão e, assim, entender como a sensação de incorporação da prótese virtual evoluiu no grupo.

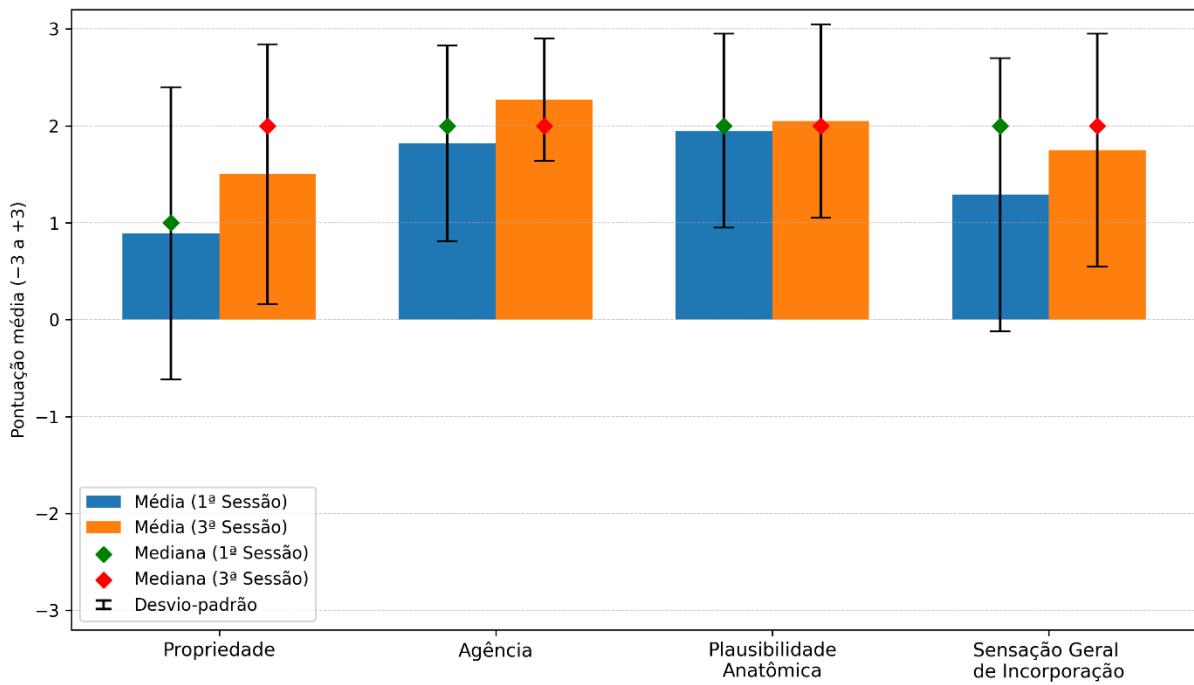
Na dimensão Propriedade, observou-se avanço significativo entre a primeira e a terceira sessão. A média aumentou de 0,89 para 1,50, enquanto a mediana evoluiu de 1,00 para 2,00, e o desvio-padrão apresentou uma pequena redução de 1,51 para 1,34. A combinação entre o aumento das medidas de tendência central e a diminuição da dispersão sugere avaliações mais positivas e um pouco mais regulares ao final do período, embora persista variabilidade entre participantes. Em termos funcionais, a aplicação realizou a aquisição e a tradução dos sinais mioelétricos de forma previsível, e o rastreamento de movimento preciso manteve a prótese virtual alinhada ao membro do usuário, com feedback vibratório e auditivo sincronizado aos comandos. Ainda que o feedback visual tenha sido parcialmente afetado pela sobreposição do membro virtual sobre a mão real, o alinhamento posicional permaneceu adequado,

contribuindo para o ganho observado no sentimento de pertencimento da prótese virtual ao corpo.

Na dimensão Agência, registrou-se o progresso mais consistente entre todas as dimensões. A média aumentou de 1,82 para 2,27, a mediana manteve-se em 2,00 e o desvio-padrão redução de 1,01 para 0,63. Estes valores correspondem à maior diminuição de variabilidade e à média mais elevada observada na terceira sessão. Tais resultados indicam convergência nas percepções dos participantes e consolidação efetiva do controle voluntário. Do ponto de vista técnico, a aplicação captou e traduziu os sinais mioelétricos de forma estável e com baixa latência, o rastreamento de movimento manteve a precisão posicional, e a resposta do sistema aos comandos permaneceu consistente. Além disso, o formato de jogo sério favoreceu a prática repetida e a previsibilidade da relação comando-resposta ao longo do treinamento.

Na dimensão Plausibilidade Anatômica, observou-se avaliação inicial elevada com evolução discreta ao longo do período. A média passou de 1,95 para 2,05, a mediana permaneceu em 2,00, e o desvio-padrão manteve-se estável em 1,00. Esse padrão indica que a postura, escala e posição da prótese virtual foram percebidas como adequadas desde o primeiro contato, mantendo-se consistentes entre as sessões. A prótese virtual, que simula uma prótese mioelétrica na aplicação, apresentou parâmetros anatômicos apropriados e alinhamento correto na articulação do punho, favorecendo a compatibilidade de posição. Entretanto, a visualização simultânea do membro real e do virtual em sobreposição introduziu ambiguidade perceptiva e competição de atenção, atenuando a impressão de que o avatar ocupava sozinho o lugar esperado no espaço corporal e, consequentemente, limitando ganhos adicionais nessa dimensão. A Figura 54 ilustra a comparação da sensação de incorporação entre a primeira e terceira sessões no grupo sem amputação

Figura 54 - Sensação de incorporação (PEmbS-ULA) no grupo sem amputação: comparação entre a primeira e a terceira sessão.



Fonte: Autoria Própria.

Por fim, na Sensação Geral de Incorporação, observou-se evolução progressiva do primeiro para a terceira sessão, acompanhando o padrão das subescalas. A média aumentou de 1,29 para 1,75, a mediana permaneceu em 2,00, e o desvio-padrão reduziu de 1,41 para 1,20. Apesar do avanço, a dispersão remanescente e a mediana inalterada indicam diferenças individuais persistentes na experiência de incorporação. Esse resultado reflete principalmente a influência da dimensão Propriedade, que possui maior peso no índice por contemplar número superior de itens. Ao mesmo tempo, a dimensão Agência apresentou o melhor desempenho relativo, com menor variabilidade final e evidências de consolidação do controle voluntário. Já Plausibilidade Anatômica demonstrou evolução modesta e variabilidade estável, compatíveis com o efeito de sobreposição visual descrito anteriormente.

7.3.2 Grupo de indivíduos com amputação

No grupo de indivíduos com amputação, as respostas ao PEmbS-ULA indicam evolução positiva da sensação de incorporação da prótese virtual do primeiro para a terceira sessão. Em ambas as sessões, os escores foram superiores aos observados

no grupo sem amputação. Na primeira sessão, as médias já se situavam na faixa positiva da escala, evidenciando nível inicial elevado de sensação de incorporação. Na terceira sessão, observou-se aumento adicional em todas as médias. Além disso, as medianas convergiram para 3,00 e o desvio-padrão reduziu em todas as dimensões, indicando percepções mais consistentes e alinhadas entre os participantes. Os dados detalhados encontram-se na Tabela 14.

Tabela 14 - Dados da Percepção de Incorporação do Grupo de indivíduos com amputação

Métrica	Momento	Média	Mediana	Desvio-padrão
Propriedade / Integridade	1ª Sessão	1,50	2,00	1,50
	3ª Sessão	2,61	3,00	0,50
Agência	1ª Sessão	2,17	2,00	0,41
	3ª Sessão	2,83	3,00	0,41
Plausibilidade Anatômica	1ª Sessão	1,96	2,00	0,89
	3ª Sessão	2,68	3,00	0,52
Sensação Geral de Incorporação	1ª Sessão	1,73	2,00	1,26
	3ª Sessão	2,67	3,00	0,48

Fonte: Autoria Própria.

Analizando cada dimensão separadamente, é possível identificar as variações entre a primeira e terceira sessão e compreender a evolução do processo de incorporação no grupo.

Na dimensão Propriedade, observou-se melhoria relevante do primeiro para a terceira sessão. A média aumentou de 1,50 para 2,61, a mediana passou de 2,00 para 3,00, e o desvio-padrão apresentou redução expressiva de 1,50 para 0,50. Essa combinação de aumento nas medidas centrais e diminuição acentuada da variabilidade indica que o sentimento de pertencimento da prótese virtual e sua integração ao esquema corporal se fortaleceram consistentemente. Em comparação com o grupo sem amputação, que apresentou progresso mais moderado (média de 1,50 e mediana de 2,00 na terceira sessão), os participantes com amputação demonstraram ganhos mais pronunciados e respostas finais mais homogêneas. Do ponto de vista técnico, a aplicação garantiu sincronização precisa entre as intenções musculares e os comandos da prótese virtual, com transições suaves entre estados. O realismo visual alcançado pelo jogo sério em Realidade Mista, combinado com feedbacks vibratório, auditivo e visual coordenados, fortaleceu a percepção de continuidade corporal entre a prótese virtual e o coto amputado.

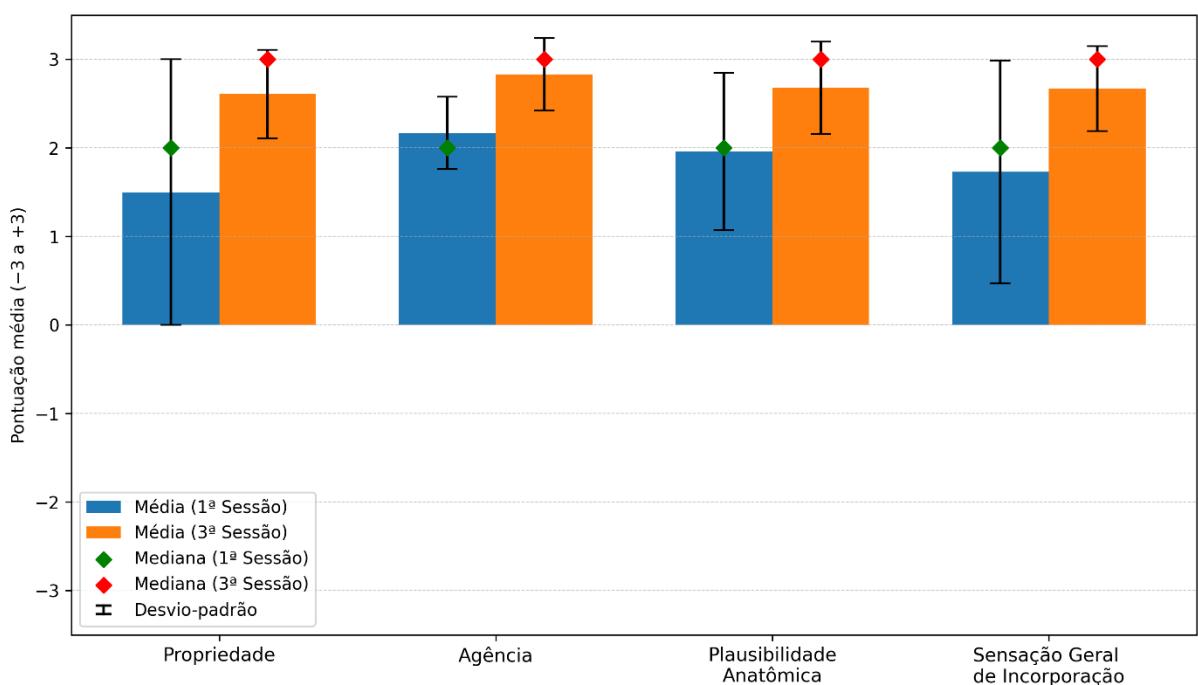
Na dimensão Agência, registrou-se evolução sobre um patamar inicial já elevado. A média aumentou de 2,17 para 2,83, a mediana evoluiu de 2,00 para 3,00, e o desvio-padrão manteve-se baixo e estável em 0,41. Esse padrão indica percepção consistente de controle voluntário sobre a prótese virtual, com progressão para níveis próximos ao teto na terceira sessão. Comparativamente, embora o grupo sem amputação também tenha apresentado melhoria (média de 2,27), os participantes com amputação alcançaram valores superiores com menor variabilidade, sugerindo experiência mais uniforme de controle sobre a prótese virtual. Do ponto de vista técnico, o sistema manteve qualidade na captura dos sinais mioelétricos e tradução adequada em comandos, com baixa latência entre intenção e resposta. O formato de jogo sério proporcionou controle voluntário direto, estabelecendo relação comando-resposta estável e previsível ao longo do treinamento.

Na dimensão Plausibilidade Anatômica, observou-se ganho relevante do primeiro para a terceira sessão. A média evoluiu de 1,96 para 2,68, a mediana passou de 2,00 para 3,00, e o desvio-padrão reduziu de 0,89 para 0,52. Esses resultados indicam que a postura, escala e posição da prótese virtual foram progressivamente percebidas como mais naturais e anatomicamente coerentes até o final do período. Diferentemente do grupo sem amputação, que apresentou evolução discreta (média de 2,05) e variabilidade estável, os participantes com amputação demonstraram ganhos superiores e maior convergência nas respostas. A diferença sugere estar associada à ausência de sobreposição visual no grupo com amputação, onde apenas a prótese virtual é visualizada, sem competição visual com o membro real. Do ponto de vista técnico, o rastreamento de movimento manteve posicionamento preciso e alinhamento correto em relação ao coto, enquanto a renderização realista da prótese, com movimentos naturais de abertura e fechamento, facilitou sua aceitação como extensão anatômica do corpo.

Na Sensação Geral de Incorporação, observou-se evolução significativa do primeiro para a terceira sessão. A média aumentou de 1,73 para 2,67, a mediana passou de 2,00 para 3,00, e o desvio-padrão apresentou redução de 1,26 para 0,48. Esses resultados sugerem ganhos simultâneos nas três dimensões, com avaliações mais uniformes na terceira sessão. Em comparação com o grupo sem amputação, que alcançou média de 1,75 com maior dispersão 1,20, o grupo com amputação demonstrou sensação de incorporação mais robusta e consistente. Tais achados

demonstram a efetividade da arquitetura integrada do sistema. O rastreamento sem marcadores garantiu precisão posicional, enquanto a integração em tempo real entre prótese virtual e coto manteve responsividade adequada. A combinação de jogos sérios com feedbacks multissensoriais sincronizados criou experiência imersiva que favoreceu a Sensação de Incorporação (embodiment), consolidando a percepção da prótese virtual como extensão natural do corpo. A Figura 55 apresenta a síntese visual das diferenças entre a primeira e terceira sessão.

Figura 55 - Sensação de incorporação (PEmbS-ULA) no grupo com amputação: comparação entre a primeira e a terceira sessão



Fonte: Autoria Própria.

Por fim, ressalta-se que tais comparações devem ser interpretadas com cautela devido ao tamanho amostral reduzido do grupo com amputação. Ainda assim, comparando os resultados da Tabela 12 e da Tabela 13 sugerem efeitos mais intensos e consistentes no grupo sem amputação.

7.3.2.1 Análise escores individuais de sensação de incorporação do grupo com amputação

- Voluntário ID 12:**

A análise individual do participante ID 12 revela evolução consistente na sensação de incorporação da prótese virtual entre a primeira e terceira sessão de treinamento. Os dados demonstram progressão positiva em todas as dimensões avaliadas. Os resultados detalhados encontram-se na Tabela 15.

Tabela 15 - Dados da Percepção de Incorporação do Indivíduo ID 12

Métrica	Momento	Média	Mediana	Desvio-padrão
Propriedade / Integridade	1ª Sessão	1,33	1,00	0,52
	3ª Sessão	2,50	2,50	0,55
Agência	1ª Sessão	2,00	2,00	0,00
	3ª Sessão	3,00	3,00	0,00
Plausibilidade Anatômica	1ª Sessão	1,00	1,00	0,00
	3ª Sessão	2,00	2,00	0,00
Sensação Geral de Incorporação	1ª Sessão	1,40	1,00	0,52
	3ª Sessão	2,50	2,50	0,53

Fonte: Autoria Própria.

Na dimensão Propriedade, registrou-se avanço do primeiro para a terceira sessão. A média cresceu de 1,33 para 2,50, a mediana progrediu de 1,00 para 2,50, e o desvio-padrão apresentou ligeiro incremento de 0,52 para 0,55. As pontuações mais baixas nessa dimensão são frutos de uma frustração inicial do voluntário que desejava que a prótese realizasse movimentos individualizados dos dedos, prejudicando o realismo visual no primeiro contato e afetando sua percepção de que o membro virtual constituía parte de seu corpo. Comparativamente ao grupo com amputação (que evoluiu de 1,50 para 2,61), este participante iniciou com escores ligeiramente menores, mas atingiu nível similar na terceira sessão. Relativamente ao grupo sem amputação, que chegou à média de 1,50 na terceira sessão, este voluntário obteve resultados superiores, comprovando a consolidação do sentimento de propriedade da prótese virtual. Em comparação com o grupo com amputação (que evoluiu de 1,50 para 2,61), este participante iniciou com escores ligeiramente menores, mas alcançou patamar próximo na terceira sessão. Quando comparado ao grupo sem amputação, que atingiu média de 1,50 na terceira sessão, este voluntário

demonstrou resultados superiores, evidenciando a consolidação do sentimento de propriedade da prótese virtual.

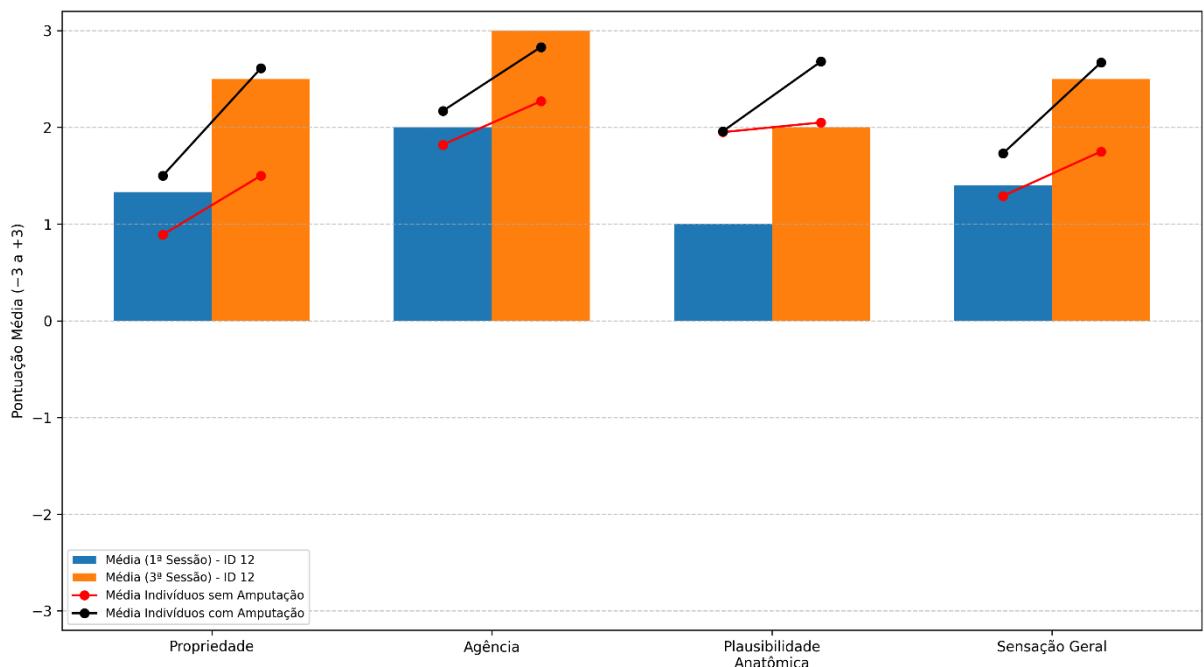
Na dimensão Agência, verificou-se avanço do primeiro para a terceira sessão. A média elevou-se de 2,00 para 3,00, a mediana desenvolveu-se de 2,00 para 3,00, e o desvio-padrão permaneceu em 0,00 em ambas as medições. Estes escores atingem o limite máximo da escala na terceira sessão, revelando percepção plena de comando voluntário sobre os movimentos da prótese virtual. Acredita-se que a agência também foi impactada pelo desejo de que a prótese realizasse movimentos individualizados dos dedos, mas isso foi superado pelo uso contínuo do sistema. Durante as sessões, suas avaliações do controle tornaram-se mais favoráveis, indicando que a prática repetida ampliou sua familiaridade e adaptação com a aplicação, fortalecendo a percepção de que era ele quem executava as ações com a prótese virtual. Em comparação, a média do grupo com amputação (2,83) ficou discretamente inferior, enquanto o grupo sem amputação atingiu apenas 2,27, evidenciando que este usuário alcançou performance superior em ambas as comparações.

Na dimensão Plausibilidade Anatômica, constatou-se crescimento do primeiro para a terceira sessão. A média desenvolveu-se de 1,00 para 2,00, a mediana avançou de 1,00 para 2,00, e o desvio-padrão manteve-se constante em 0,00. Esses resultados indicam que a postura, escala e posição da prótese virtual foram progressivamente percebidas como mais naturais e anatomicamente coerentes até o final do período. Este participante algumas vezes solicitou ajustes na calibração da rotação da prótese inicialmente, pois sentia que seu coto estivesse mais rotacionado, demonstrando a busca por maior congruência anatômica. Comparando com a média do grupo com amputação (2,68 na terceira sessão), este participante apresentou escores menores para a percepção de que a prótese virtual era anatomicamente plausível como segmento corporal, porém ainda assim superiores ao grupo sem amputação (2,05). A ausência de variabilidade em ambas as avaliações indica respostas estáveis.

Na Sensação Geral de Incorporação, identificou-se desenvolvimento do primeiro para a terceira sessão. A média aumentou de 1,40 para 2,50, a mediana transitou de 1,00 para 2,50, e o desvio-padrão mostrou leve elevação de 0,52 para 0,53. Esta evolução demonstra como a percepção global de incorporação do

voluntário tornou-se mais positiva ao longo do treinamento, estabelecendo uma experiência mais sólida conforme cresceram sua familiaridade e envolvimento criativo com o sistema. O interesse do voluntário foi intensificado por sugestões criativas, como criar uma versão destinada à simulação de piano, demonstrando engajamento. Comparado à média do grupo com amputação (2,67), este voluntário chegou próximo aos valores, revelando incorporação consistente. Quando contrastado com o grupo sem amputação (1,75), este voluntário exibiu sensação de incorporação superior, confirmando a eficácia do treinamento na consolidação da percepção da prótese virtual como extensão natural do corpo. A Figura 56 apresenta uma síntese visual do desempenho do participante em relação aos grupos.

Figura 56 - Desempenho do Indivíduo ID 12 na Percepção de Incorporação em Relação aos Grupos com e sem Amputação



Fonte: Autoria Própria.

- **Voluntário ID 13:**

A análise individual do participante ID 13 revela evolução consistente na sensação de incorporação da prótese virtual entre a primeira e terceira sessão de treinamento. O voluntário apresentou ganhos iniciais elevados já na primeira sessão e atingiu valores de teto (média 3,00) em todas as dimensões na terceira sessão. Os dados detalhados encontram-se na Tabela 16.

Tabela 16 - Dados da Percepção de Incorporação do Indivíduo ID 13

Métrica	Momento	Média	Mediana	Desvio-padrão
Propriedade / Integridade	1ª Sessão	2,33	2,00	0,52
	3ª Sessão	3,00	3,00	0,00
Agência	1ª Sessão	2,00	2,00	0,00
	3ª Sessão	3,00	3,00	0,00
Plausibilidade Anatômica	1ª Sessão	2,50	2,50	0,71
	3ª Sessão	3,00	3,00	0,00
Sensação Geral de Incorporação	1ª Sessão	2,30	2,00	0,48
	3ª Sessão	3,00	3,00	0,00

Fonte: Autoria Própria.

Durante todo o experimento, o voluntário ID 13 mostrou-se altamente engajado, não apresentou dificuldades no manuseio da prótese virtual e relatou experiência prévia com jogos digitais, afirmando jogar regularmente. Esse perfil de familiaridade com ambientes virtuais, aliado à motivação, pode ter influenciado diretamente sua avaliação.

Na dimensão Propriedade, registrou-se avanço significativo da primeira para a terceira sessão. A média cresceu de 2,33 para 3,00, a mediana progrediu de 2,00 para 3,00, e o desvio-padrão reduziu de 0,52 para 0,00. Estes valores correspondem ao teto da escala na terceira sessão, revelando sentimento de que a prótese virtual pertencia ao seu corpo. A experiência prévia com jogos digitais pode ter facilitado a adaptação inicial ao realismo visual da representação protética do sistema MRProsthesis, integrando feedback vibratório, auditivo e visual com perspectiva em primeira pessoa. Em comparação com o grupo com amputação (que evoluiu de 1,50 para 2,61), este participante iniciou com escores superiores e alcançou o máximo possível na terceira sessão. Quando comparado ao grupo sem amputação, que atingiu média de 1,50 na terceira sessão, este voluntário demonstrou resultados muito superiores.

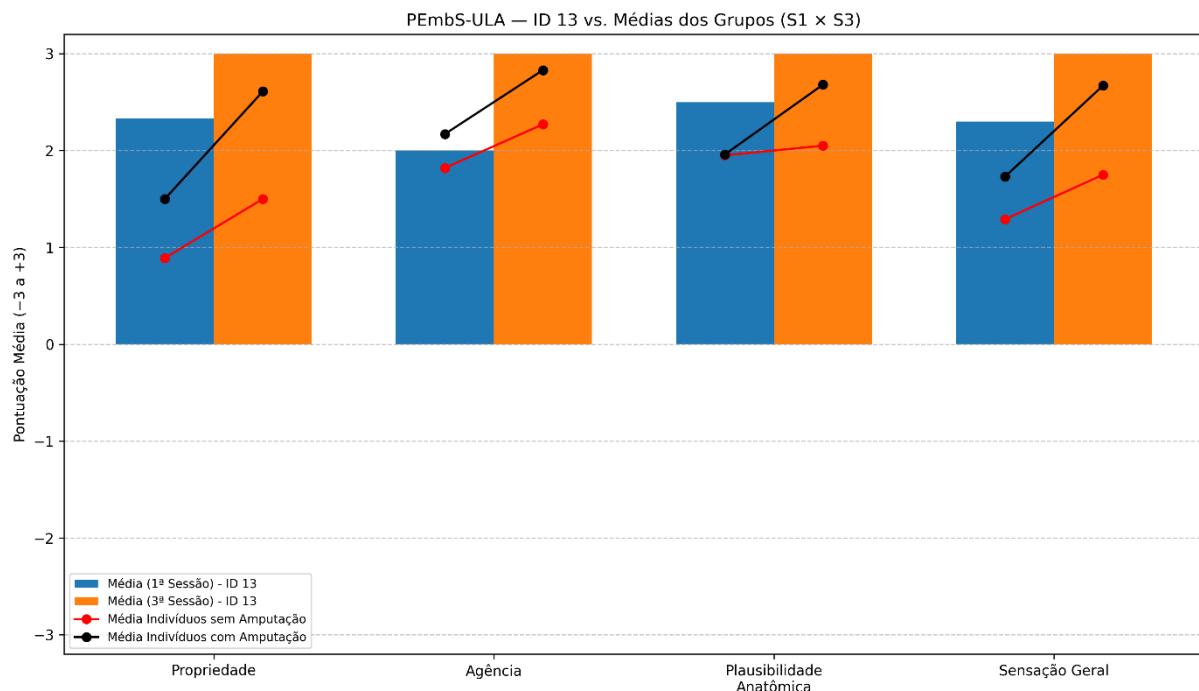
Na dimensão Agência, verificou-se evolução da primeira para a terceira sessão. A média elevou-se de 2,00 para 3,00, a mediana desenvolveu-se de 2,00 para 3,00, e o desvio-padrão permaneceu em 0,00. Estes escores atingem o limite máximo da escala na terceira sessão, revelando percepção comando voluntário sobre os movimentos da prótese virtual. Além das características técnicas apresentadas na seção 7.3.2 que influenciaram na agência da sensação do grupo amputado, a familiaridade com jogos digitais provavelmente contribuiu para a rápida compreensão

da interface de controle e dos mecanismos de resposta do sistema. Em comparação com o grupo com amputação (2,83), este participante superou a média do grupo, enquanto quando comparado com o grupo sem amputação (2,27), demonstrou performance superior.

Na dimensão Plausibilidade Anatômica, constatou-se crescimento da primeira para a terceira sessão. A média desenvolveu-se de 2,50 para 3,00, a mediana avançou de 2,50 para 3,00, e o desvio-padrão reduziu de 0,71 para 0,00. Esses resultados indicam que a postura, escala e posição da prótese virtual foram progressivamente percebidas como completamente naturais e anatomicamente coerentes até o final do período. O voluntário não relatou necessidade de ajustes de calibração, sugerindo boa adaptação inicial às características visuais da prótese. Nesta dimensão este voluntario apresentou medidas melhores que ambos os grupos.

Por fim, na Sensação Geral de Incorporação, identificou-se ótimo desenvolvimento da primeira para a terceira sessão. A média aumentou de 2,30 para 3,00, a mediana transitou de 2,00 para 3,00, e o desvio-padrão reduziu de 0,48 para 0,00. Esta evolução demonstra como a percepção global de incorporação do voluntário atingiu o nível máximo possível, estabelecendo uma experiência ideal conforme cresceram sua familiaridade e engajamento com o sistema. O alto nível de motivação e a ausência de dificuldades técnicas contribuíram para esta incorporação exemplar. Comparado à média do grupo com amputação (2,67) e ao grupo sem amputação (1,75), este voluntário superou os dois grupos. A Figura 57 apresenta a síntese visual do desempenho do participante em relação aos grupos de referência.

Figura 57 - Desempenho do Indivíduo ID 13 na Percepção de Incorporação em Relação aos Grupos com e sem Amputação



Fonte: Autoria Própria.

- Voluntário ID 14:**

A análise individual do participante ID 14 revela melhora na sensação de incorporação da prótese virtual entre a primeira e terceira sessões de treinamento. Observou-se evolução positiva em três das quatro dimensões avaliadas: Propriedade/Integridade, Plausibilidade Anatômica e Sensação Geral de Incorporação, enquanto a dimensão Agência manteve-se estável ao longo do período. Os resultados detalhados encontram-se na Tabela 17.

Tabela 17 - Dados da Percepção de Incorporação do Indivíduo ID 14

Métrica	Momento	Média	Mediana	Desvio-padrão
Propriedade / Integridade	1ª Sessão	0,83	1,50	2,40
	3ª Sessão	2,33	2,50	0,52
Agência	1ª Sessão	2,50	2,50	0,71
	3ª Sessão	2,50	2,50	0,71
Plausibilidade Anatômica	1ª Sessão	2,50	2,50	0,71
	3ª Sessão	3,00	3,00	0,00
Sensação Geral de Incorporação	1ª Sessão	1,50	2,00	2,01
	3ª Sessão	2,50	2,50	0,53

Fonte: Autoria Própria.

Na dimensão Propriedade, registrou-se avanço da primeira para a terceira sessão. A média cresceu de 0,83 para 2,33, a mediana progrediu de 1,50 para 2,50,

e o desvio-padrão reduziu de 2,40 para 0,52. A variabilidade inicial, indicada pelo desvio-padrão de 2,40, sugere maior dispersão nas respostas durante o primeiro contato, o que pode estar relacionado à adaptação inicial ao sistema MRProsthesis. A redução expressiva da dispersão na terceira sessão sugere estabilização das percepções e consolidação do sentimento de que a prótese virtual pertencia ao seu corpo. Em comparação com o grupo com amputação (que evoluiu de 1,50 para 2,61), este participante iniciou com escores menores, mas alcançou patamar próximo na terceira sessão. Quando comparado ao grupo sem amputação, que atingiu média de 1,50 na terceira sessão, este voluntário demonstrou resultados superiores.

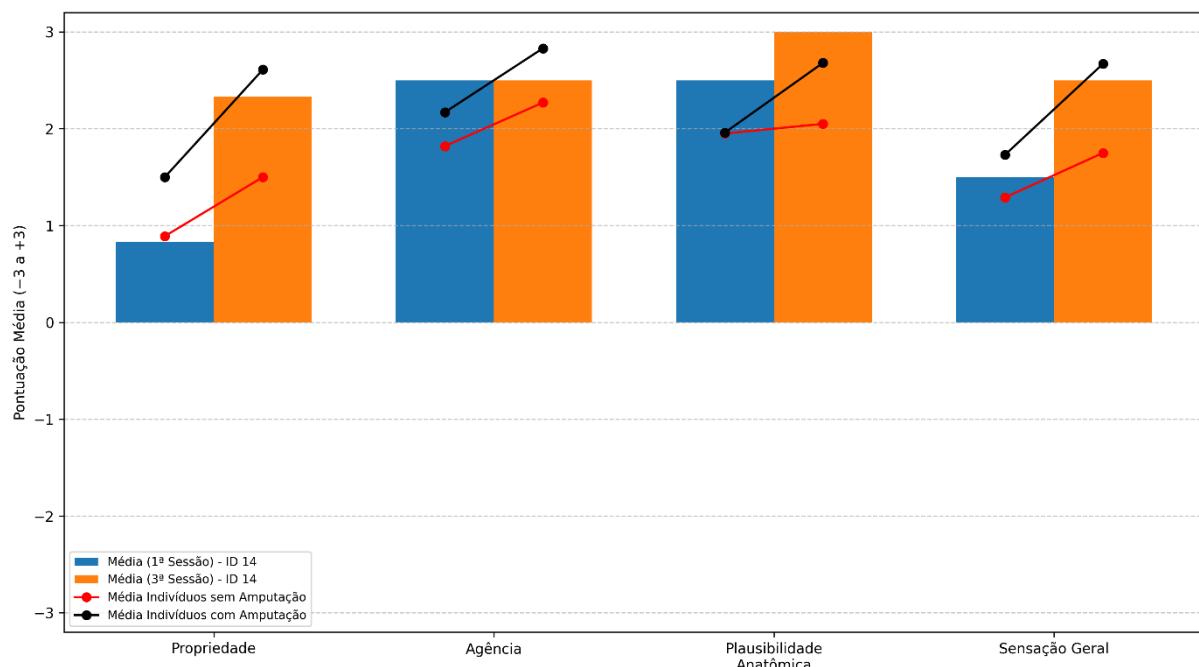
Na dimensão Agência, verificou-se estabilidade da primeira para a terceira sessão. A média manteve-se em 2,50, a mediana permaneceu em 2,50, e o desvio-padrão manteve-se constante em 0,71 em ambas as avaliações. Estes valores indicam percepção consistente de comando voluntário sobre os movimentos da prótese virtual, sem variação ao longo do período. Além das características técnicas apresentadas na seção 7.3.2 que influenciaram na agência da sensação do grupo amputado, a estabilidade observada sugere que o participante estabeleceu rapidamente uma relação adequada de controle com o sistema. Em comparação com o grupo com amputação (2,83), este participante apresentou valores ligeiramente inferiores, mas superiores ao grupo sem amputação (2,27).

Na dimensão Plausibilidade Anatômica, constatou-se crescimento da primeira para a terceira sessão. A média desenvolveu-se de 2,50 para 3,00, a mediana avançou de 2,50 para 3,00, e o desvio-padrão reduziu de 0,71 para 0,00. Esses resultados sugerem que na última sessão a postura, escala e posição da prótese virtual foram percebidas como anatomicamente coerentes. O voluntário não relatou necessidade de ajustes de calibração, sugerindo boa adaptação às características visuais da prótese. Este participante superou ambos os grupos na terceira sessão, alcançando média de 3,00, enquanto o grupo com amputação atingiu 2,68 e o grupo sem amputação, 2,05.

Na Sensação Geral de Incorporação, observou-se evolução da primeira para a terceira sessão. A média aumentou de 1,50 para 2,50, a mediana evoluiu de 2,00 para 2,50, e o desvio-padrão reduziu de 2,01 para 0,53. Esta evolução demonstra como a percepção global de incorporação do voluntário tornou-se mais positiva e estável ao longo do treinamento. Comparado à média do grupo com amputação (2,67) e ao grupo

sem amputação (1,75), este voluntário superou o grupo sem amputação e ficou próximo ao grupo com amputação, confirmando a consolidação da percepção da prótese virtual como extensão natural do corpo. A Figura 58 apresenta a síntese visual do desempenho do participante em relação aos grupos de referência.

Figura 58 - Desempenho do Indivíduo ID 14 na Percepção de Incorporação em Relação aos Grupos com e sem Amputação



Fonte: Autoria Própria.

7.4 Avaliação do Rendimento dos Usuários no MRProstheses

A análise comparativa entre os grupos com e sem amputação revela trajetórias diferenciadas de desempenho e adaptação ao jogo sério ao longo das três sessões de treinamento. As métricas de desempenho sugerem evolução positiva em ambos os grupos, com características particulares que merecem análise detalhada. Os dados completos das comparações entre grupos encontram-se na Tabela 18.

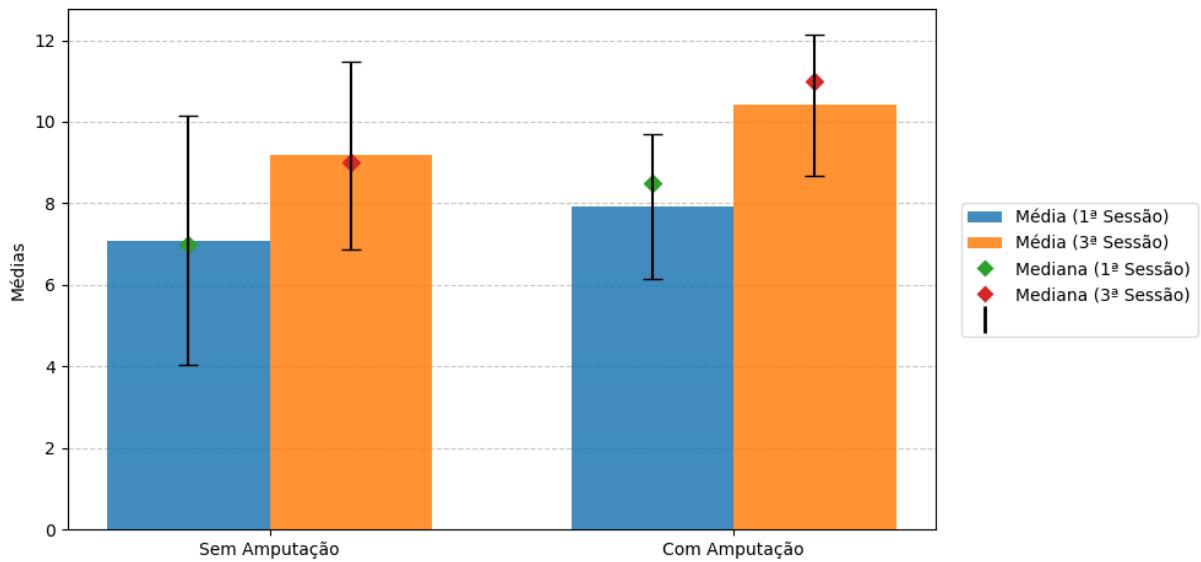
Tabela 18 - Tabela Comparativa Desempenho Jogo Sério

Comparações entre Grupos		1ª sessão			3ª sessão		
Métrica	Grupo	Média	Mediana	Desvio-Padrão	Média	Mediana	Desvio-Padrão
Quantidade Total de Tarefas Concluídas em cada sessão	Sem Amputação	7,09	7,00	3,06	9,18	9,00	2,30
	Com Amputação	7,92	8,50	1,78	10,42	11,00	1,73
Número total de erros em cada sessão	Sem Amputação	0,14	0,00	0,35	0,48	0,00	0,79
	Com Amputação	0,50	0,00	1,17	0,42	0,00	0,67
Número total de Tentativas Incompletas em cada sessão	Sem Amputação	0,77	0,50	0,96	1,00	1,00	1,24
	Com Amputação	0,33	0,00	0,65	0,75	1,00	0,45
Tempo Total despendido em tarefas realizadas com Acertos	Sem Amputação	0,64	3,40	4,21	0,50	3,40	5,03
	Com Amputação	0,35	2,10	1,74	0,26	2,40	1,55
Taxa de conclusão da tarefa	Sem Amputação	0,89	0,90	0,13	0,86	0,90	0,11
	Com Amputação	0,91	1,00	0,13	0,90	0,90	0,06

Fonte: Autoria Própria.

Na métrica de quantidade total de tarefas concluídas em cada sessão, observou-se evolução em ambos os grupos. No grupo sem amputação, a média aumentou de 7,09 para 9,18, a mediana evoluiu de 7,0 para 9,0, e o desvio-padrão reduziu de 3,06 para 2,30. Já o grupo com amputação apresentou desempenho superior, com média aumentando de 7,92 para 10,42, mediana progredindo de 8,50 para 11,00, e desvio-padrão mantendo-se relativamente baixo, variando de 1,78 para 1,73. Essa combinação de valores de média e mediana mais elevadas e menor variabilidade no grupo com amputação merece observação, uma vez que estes participantes obtiveram melhor desempenho que o grupo sem amputação mesmo apresentando limitações físicas decorrentes da amputação. Os resultados sugerem que o desempenho superior pode estar relacionado à combinação de maior Utilidade do Sistema percebida e de uma Sensação Geral de Incorporação mais elevada no grupo com amputação, o que possivelmente contribuiu para um controle mais intuitivo e consistente das tarefas. A Figura 59 apresenta a comparação do desempenho entre os grupos nesta métrica.

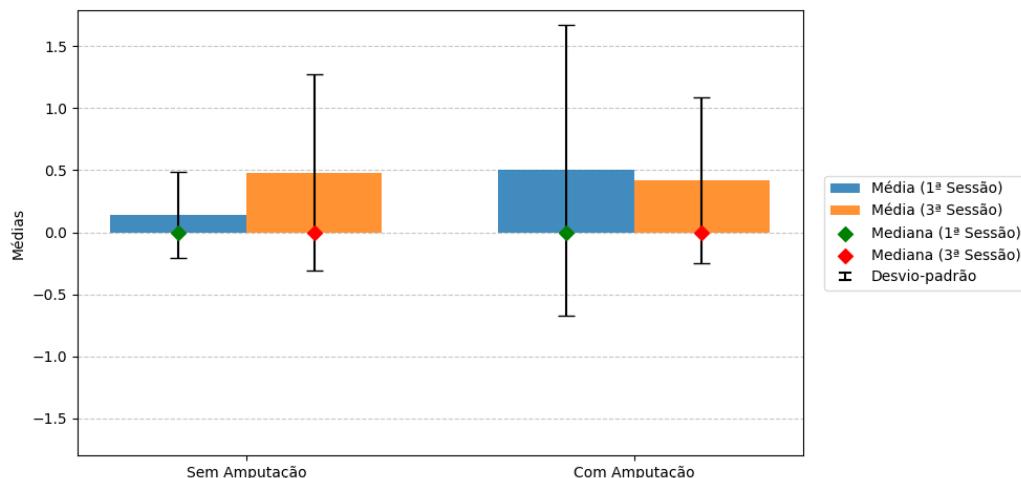
Figura 59 - Quantidade Total de Tarefas Concluídas em cada Sessão



Fonte: Autoria Própria.

Na métrica de número total de erros por sessão, ambos os grupos mantiveram taxas de erro baixas ao longo do estudo. O grupo sem amputação apresentou ligeiro aumento na média de erros, que evoluiu de 0,14 na primeira sessão para 0,48 na terceira, embora a mediana tenha permanecido em 0,0, indicando que a maioria dos participantes manteve desempenho sem erros. O grupo com amputação demonstrou estabilidade, com média reduzindo levemente de 0,50 para 0,42 e mediana constante em 0,0. O desvio-padrão reduziu de 1,17 para 0,67, sugerindo maior homogeneidade de desempenho na terceira sessão. Os reduzidos índices de erro registrados para ambos os grupos sugerem que o sistema de controle mioelétrico manteve desempenho estável na tradução dos sinais musculares em comandos de abertura e fechamento da prótese virtual. A Figura 60 exibe a distribuição dos erros registrados em ambos os grupos ao longo das sessões.

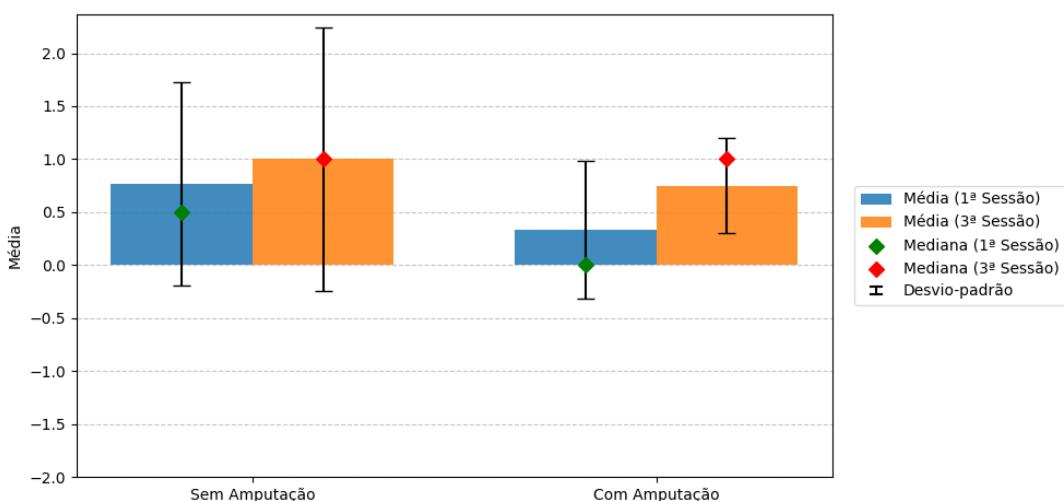
Figura 60 - Número Total de Erros por sessão



Fonte: Autoria Própria.

Na métrica de número de tentativas incompletas, ambos os grupos apresentaram elevação nas medidas centrais ao longo do estudo. O grupo sem amputação registrou aumento na média de 0,77 para 1,00 e na mediana de 0,50 para 1,00, acompanhado de maior variabilidade, com desvio-padrão elevando-se de 0,96 para 1,24. O grupo com amputação demonstrou desempenho similar nas medidas centrais, com média evoluindo de 0,33 para 0,75, mediana de 0,00 para 1,00, e desvio-padrão reduzindo de 0,65 para 0,45, indicando maior homogeneidade no desempenho entre participantes. Esse aumento observado nas médias de tentativas incompletas pode estar relacionado ao fato de os participantes buscarem executar as tarefas com maior agilidade, resultando em mais tentativas incompletas. A Figura 61 mostra a evolução das tentativas incompletas durante o período avaliado.

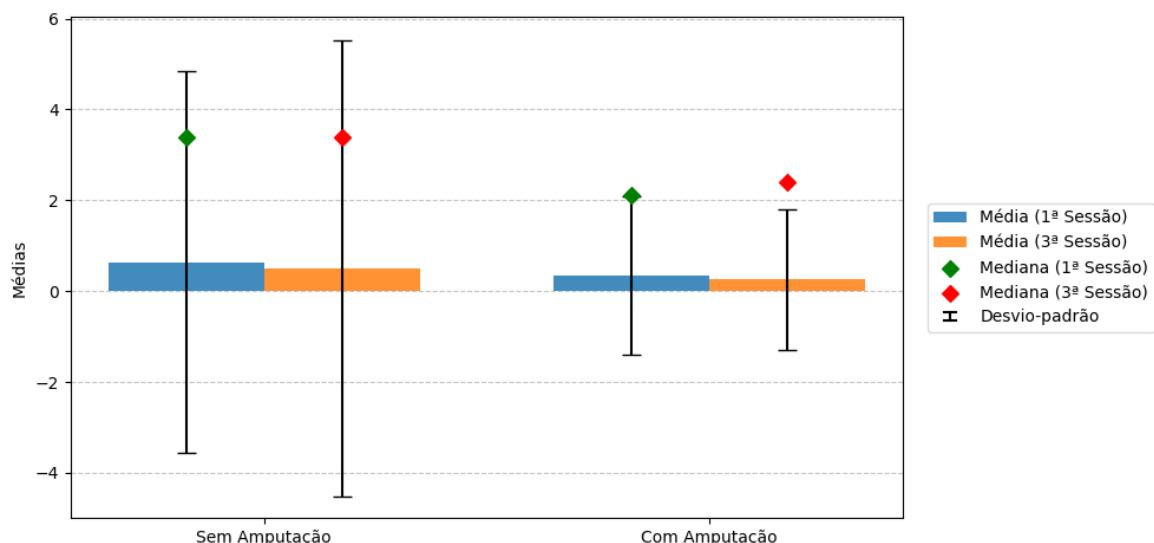
Figura 61 - Número de Tentativas Incompletas



Fonte: Autoria Própria.

Na métrica de tempo total despendido em tarefas com acertos, observou-se evolução entre a primeira e terceira sessões. O grupo sem amputação apresentou redução na média de 0,64 para 0,50 segundos, com mediana estável em 3,40 segundos. O desvio-padrão elevou-se de 4,21 para 5,03, indicando maior dispersão de tempo entre participantes. Já o grupo com amputação registrou desempenho mais favorável, com redução na média de 0,35 para 0,26 segundos, embora a mediana tenha apresentado ligeiro aumento de 2,10 para 2,40 segundos. A redução no desvio-padrão de 1,74 para 1,55 sugere maior regularidade nos tempos de execução das tarefas concluídas com acerto. A Figura 62 demonstra os tempos de execução observados para cada grupo nas duas sessões analisadas.

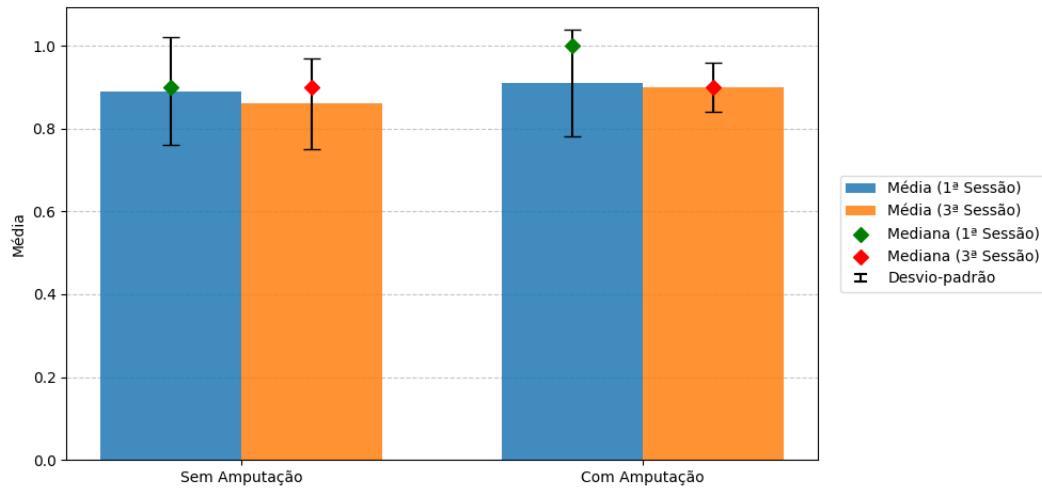
Figura 62 - Tempo Total Despendido em Tarefas com Acertos



Fonte: Autoria Própria.

Na métrica de taxa de conclusão, ambos os grupos mantiveram índices elevados ao longo do estudo. O grupo sem amputação apresentou ligeira redução na média de 0,89 para 0,86, com mediana estável em 0,90. O desvio-padrão reduziu de 0,13 para 0,11, indicando leve melhora na consistência entre participantes. O grupo com amputação também registrou pequena redução na média de 0,91 para 0,90, com mediana evoluindo de 1,00 na primeira sessão para 0,90 na terceira. Além disso, observou-se redução no desvio-padrão de 0,13 para 0,06, sugerindo desempenho mais homogêneo entre os participantes. Os altos índices mantidos, com médias superiores a 0,86, sugerem que o sistema proporcionou condições adequadas para completar as tarefas propostas. A Figura 63 sintetiza os índices de conclusão obtidos pelos grupos durante o estudo.

Figura 63 - Taxa de Conclusão



Fonte: Autoria Própria.

Por fim, os resultados sugerem que o sistema proporcionou condições adequadas para o desempenho efetivo de ambos os grupos, embora com trajetórias distintas ao longo do estudo. O grupo com amputação demonstrou desempenho superior, obtendo melhores resultados em quatro das cinco médias na primeira sessão, vantagem que se ampliou na terceira sessão, quando alcançou melhor desempenho em todas as cinco médias e todos os cinco desvios-padrão analisados. Essas diferenças podem estar relacionadas aos maiores índices de percepção de Utilidade do Sistema e aos valores superiores nas métricas de Sensação de Incorporação registrados pelo grupo com amputação. A conjunção desses fatores sugere que a experiência de embodiment mais acentuada, aliada à percepção de aplicabilidade funcional, pode ter favorecido maior engajamento e consistência no controle da prótese virtual mioelétrica, validando a eficácia do jogo sério MRProsthesis.

7.4.1 Análise dos desempenhos individuais do grupo com amputação no jogo sério MRProsthesis

- Voluntário ID 12:**

A análise individual do participante ID 12 revela evolução positiva no desempenho entre a primeira e terceira sessões de treinamento. O voluntário apresentou aumento expressivo na quantidade total de tarefas concluídas, manteve

baixo número de erros e taxa de conclusão elevada. Os dados detalhados encontram-se na Tabela 19.

Tabela 19 - Dados de Desempenho do Voluntário ID 12

Métrica	Paciente_ID 12		1ª sessão		3ª sessão	
	Média	Mediana	Desvio-Padrão	Média	Mediana	Desvio-Padrão
Quantidade Total de Tarefas Concluídas	7,75	7,50	0,96	10,75	11,0	1,26
Número total de erros em cada sessão	0,50	0,50	0,58	0,50	0,50	0,58
Número total de Tentativas Incompletas em cada sessão	0,00	0,00	0,00	0,75	1,00	0,50
Tempo Total despendido em tarefas realizadas com Acertos	0,17	1,30	0,53	0,39	4,00	1,67
Taxa de conclusão da tarefa	0,95	1,00	0,06	0,90	0,90	0,08

Fonte: Autoria Própria.

Na métrica de quantidade total de tarefas concluídas, o voluntário 12 registrou evolução positiva da primeira para a terceira sessão. A média cresceu de 7,75 para 10,75, a mediana progrediu de 7,50 para 11,00, e o desvio-padrão aumentou de 0,96 para 1,26. Estes valores sugerem ganho na produtividade do voluntário ao longo do treinamento. Comparando o voluntário ID 12 com o grupo com amputação, que evoluiu de 7,92 para 10,42, este participante iniciou com médias inferiores, mas alcançou desempenho superior na terceira sessão. Quando comparado ao grupo sem amputação, que atingiu média de 9,18 na terceira sessão, este voluntário demonstrou resultados superiores.

Na métrica de número total de erros por sessão, o voluntário 12 manteve estabilidade da primeira para a terceira sessão. A média permaneceu em 0,50, a mediana em 0,50, e o desvio-padrão em 0,58. Estes valores sugerem que, apesar do aumento na quantidade de tarefas concluídas, o participante manteve sua precisão, evitando aumento proporcional nos erros. Comparando com o grupo com amputação, que apresentou média de 0,50 na primeira sessão e 0,42 na terceira, o voluntário ID 12 manteve índice ligeiramente superior. Quando comparado ao grupo sem amputação, que aumentou de 0,14 para 0,48, este voluntário apresentou índice de erro próximo ao do grupo na terceira sessão.

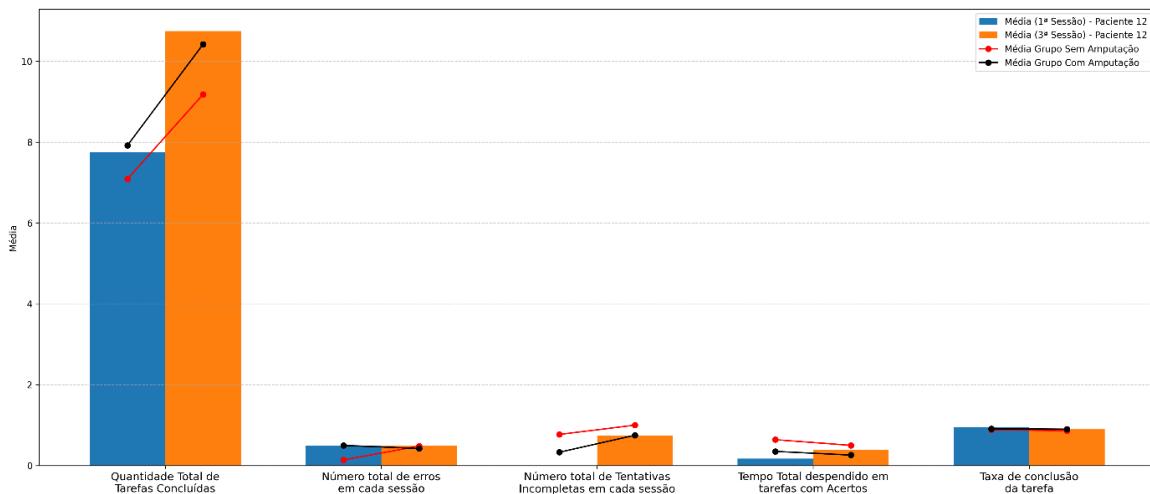
Na métrica de número total de tentativas incompletas por sessão, o voluntário 12 apresentou aumento no número de tentativas incompletas da primeira para a terceira sessão. A média elevou-se de 0,00 para 0,75, a mediana de 0,00 para 1,00, e o desvio-padrão de 0,00 para 0,50. Comparando com o grupo com amputação, que evoluiu de 0,33 para 0,75, este voluntário iniciou sem tentativas incompletas, mas

atingiu o mesmo patamar na terceira sessão. Quando comparado ao grupo sem amputação, que evoluiu de 0,77 para 1,00, este participante apresentou índice ligeiramente inferior na terceira sessão, indicando melhor desempenho nesta métrica. Vale destacar que esse aumento pode estar relacionado ao fato de o voluntário buscar executar as tarefas com maior agilidade à medida que sua confiança aumentou ao longo das sessões de treinamento.

Na métrica de tempo total despendido em tarefas com acertos, o voluntário 12 apresentou aumento de tempo da primeira para a terceira sessão. A média cresceu de 0,17 para 0,39, a mediana de 1,30 para 4,00, e o desvio-padrão de 0,53 para 1,67. Comparando com ambos os grupos, este participante demonstrou trajetória oposta, com aumento no tempo despendido, porém terminou com tempo médio superior ao grupo com amputação, que atingiu 0,26, e inferior ao grupo sem amputação, que alcançou 0,50. Vale destacar que, à medida que a confiança aumentou, o participante passou a tentar recuperar blocos que caíram fora da área designada, resultando em maior tempo por tarefa, porém com sucesso na conclusão.

Por fim, na métrica taxa de conclusão de tarefa, o voluntário 12 apresentou ligeira redução da primeira para a terceira sessão. A média reduziu de 0,95 para 0,90, a mediana de 1,00 para 0,90, e o desvio-padrão aumentou de 0,06 para 0,08. Apesar da redução, a taxa de conclusão permaneceu elevada, sugerindo que a grande maioria das tarefas foi concluída com sucesso. Comparando com o grupo com amputação, que apresentou média de 0,90 na terceira sessão, este voluntário atingiu o mesmo patamar. Quando comparado ao grupo sem amputação, que alcançou média de 0,86, este participante demonstrou desempenho ligeiramente melhor. A Figura 64 apresenta a síntese visual do desempenho do voluntário ID 12 em todas as métricas avaliadas.

Figura 64 - Desempenho do Indivíduo ID 12 no Jogo Sério MRProsthesis



Fonte: Autoria Própria.

- **Voluntário ID 13:**

A análise individual do participante ID 13 revela evolução positiva no desempenho entre a primeira e terceira sessões de treinamento. O voluntário apresentou aumento na quantidade total de tarefas concluídas, redução no número de erros e melhora na eficiência ao longo do tempo. Os dados detalhados encontram-se na Tabela 20.

Tabela 20 - Dados de Desempenho do Voluntário ID 13

Paciente ID 13	Métrica	1ª sessão			3ª sessão		
		Média	Mediana	Desvio-Padrão	Média	Mediana	Desvio-Padrão
Quantidade Total de Tarefas Concluídas		7,00	7,0	2,31	9,50	9,5	2,38
Número total de erros em cada sessão		1,00	0,0	2,00	0,25	0,0	0,50
Número total de Tentativas Incompletas em cada sessão		0,25	0,0	0,50	1,00	1,0	0,00
Tempo Total despendido em tarefas realizadas com Acertos		0,53	3,7	2,43	0,22	1,8	1,22
Taxa de conclusão da tarefa		0,87	1,0	0,21	0,88	0,9	0,06

Fonte: Autoria Própria.

Na métrica de quantidade total de tarefas concluídas, o voluntário 13 registrou evolução positiva da primeira para a terceira sessão. A média cresceu de 7,00 para 9,50, a mediana progrediu de 7,00 para 9,50, e o desvio-padrão apresentou ligeiro aumento de 2,31 para 2,38. Estes valores mostram um ganho na produtividade do voluntário ao longo do treinamento, mantendo variabilidade similar. Comparando o voluntário ID 13 com o grupo com amputação, que evoluiu de 7,92 para 10,42, este participante iniciou com médias inferiores e manteve-se abaixo na terceira sessão.

Quando comparado ao grupo sem amputação, que atingiu média de 9,18 na terceira sessão, este voluntário demonstrou resultados superiores.

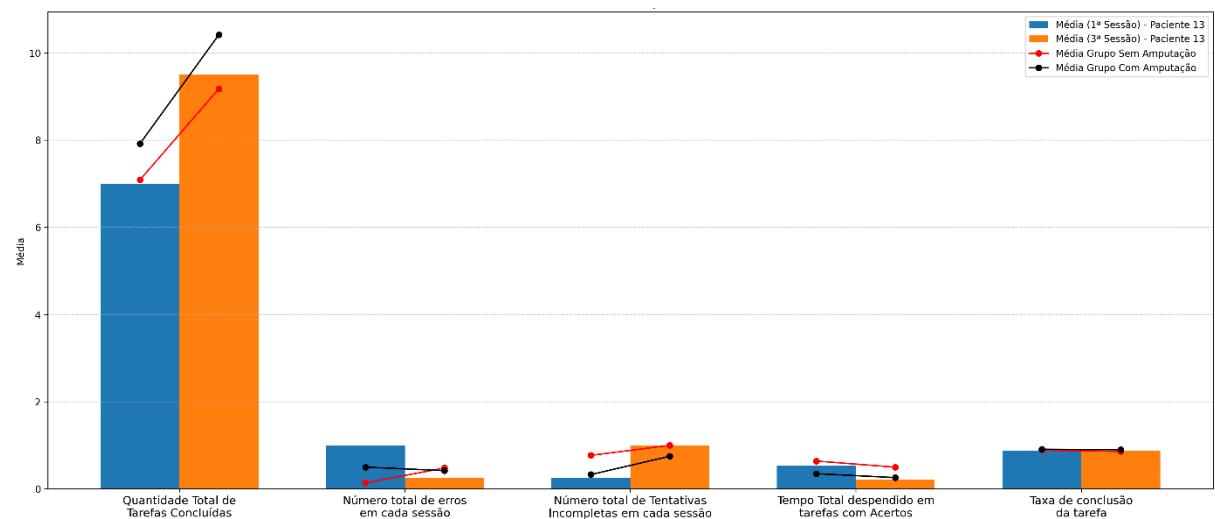
Na métrica de número total de erros por sessão, o voluntário 13 apresentou redução expressiva da primeira para a terceira sessão. A média diminuiu de 1,00 para 0,25, a mediana permaneceu em 0,00, e o desvio-padrão reduziu de 2,00 para 0,50. Estes valores sugerem aprendizado eficaz e maior precisão na execução das tarefas, com desempenho tornando-se mais consistente. Comparando com o grupo com amputação, que evoluiu de 0,50 para 0,42, este participante iniciou com índice superior, mas alcançou redução mais acentuada, superando o grupo na terceira sessão. Quando comparado ao grupo sem amputação, que apresentou aumento nos erros de 0,14 para 0,48, este voluntário demonstrou evolução oposta. Embora tenha iniciado com maior número de erros na primeira sessão, apresentou melhora ao longo do treinamento, finalizando com índice inferior ao do grupo na terceira sessão.

Na métrica de número total de tentativas incompletas por sessão, o voluntário 13 apresentou aumento da primeira para a terceira sessão. A média elevou-se de 0,25 para 1,00, a mediana de 0,00 para 1,00, e o desvio-padrão reduziu de 0,50 para 0,00. A redução do desvio-padrão para zero indica que, na terceira sessão, todas as sessões apresentaram exatamente uma tentativa incompleta. Comparando com o grupo com amputação, que evoluiu de 0,33 para 0,75, este voluntário iniciou com índice inferior, mas superou o grupo na terceira sessão. Quando comparado ao grupo sem amputação, que evoluiu de 0,77 para 1,00, este participante atingiu o mesmo patamar na terceira sessão. Vale destacar que esse aumento pode estar relacionado ao fato de o voluntário buscar executar as tarefas com maior agilidade à medida que sua confiança aumentou ao longo das sessões de treinamento

Na métrica de tempo total despendido em tarefas com acertos, o voluntário 13 apresentou redução de tempo da primeira para a terceira sessão. A média decresceu de 0,53 para 0,22, a mediana de 3,70 para 1,80, e o desvio-padrão de 2,43 para 1,22. Estes valores sugerem melhora na eficiência de execução das tarefas ao longo do treinamento. Comparando com ambos os grupos, este participante alcançou o melhor desempenho na terceira sessão, com tempo médio de 0,22, inferior tanto ao grupo com amputação, que atingiu 0,26, quanto ao grupo sem amputação, que alcançou 0,50.

Na métrica taxa de conclusão de tarefa, o voluntário 13 manteve estabilidade da primeira para a terceira sessão. A média apresentou ligeiro aumento de 0,87 para 0,88, a mediana reduziu de 1,00 para 0,90, e o desvio-padrão diminuiu de 0,21 para 0,06. A taxa de conclusão permaneceu elevada, sugerindo que a maioria das tarefas foi concluída com sucesso, com maior consistência entre as sessões. Comparando com o grupo com amputação, que apresentou média de 0,90 na terceira sessão, este voluntário ficou ligeiramente abaixo. Quando comparado ao grupo sem amputação, que alcançou média de 0,86, este participante demonstrou desempenho superior. A Figura 65 apresenta a síntese visual do desempenho do voluntário ID 13 em todas as métricas avaliadas.

Figura 65 - Desempenho do Indivíduo ID 13 no Jogo Sério MRProsthesys



Fonte: Autoria Própria.

- **Voluntário ID 14:**

A análise individual do participante ID 14 revela evolução positiva no desempenho entre a primeira e terceira sessões de treinamento. O voluntário apresentou aumento na quantidade total de tarefas concluídas, redução no tempo de execução e diminuição nas tentativas incompletas, mantendo taxa de conclusão elevada. Os dados detalhados encontram-se na Tabela 21.

Tabela 21 - Dados de Desempenho do Voluntário ID 14

Métrica	Paciente ID 14		1ª sessão		3ª sessão		Desvio-Padrão
	Média	Mediana	Desvio-Padrão	Média	Mediana		
Quantidade Total de Tarefas Concluídas	9,00	9,0	1,63	11,00	11,5	1,41	
Número total de erros em cada sessão	0,00	0,0	0,00	0,50	0,0	1,00	
Número total de Tentativas Incompletas em cada sessão	0,75	0,5	0,96	0,50	0,5	0,58	
Tempo Total despendido em tarefas realizadas com Acertos	0,36	3,4	0,83	0,18	2,1	0,59	
Taxa de conclusão da tarefa	0,93	1,0	0,09	0,92	0,9	0,06	

Fonte: Autoria Própria.

Na métrica de quantidade total de tarefas concluídas, o voluntário 14 registrou evolução positiva da primeira para a terceira sessão. A média cresceu de 9,00 para 11,00, a mediana progrediu de 9,00 para 11,50, e o desvio-padrão diminuiu de 1,63 para 1,41. Estes valores sugerem ganho na produtividade do voluntário ao longo do treinamento. Comparando o voluntário ID 14 com o grupo com amputação, que evoluiu de 7,92 para 10,42, este participante iniciou com médias superiores e manteve-se acima do grupo na terceira sessão. Quando comparado ao grupo sem amputação, que evoluiu de 7,09 para 9,18, este voluntário iniciou com médias superiores e manteve-se acima do grupo em ambas as sessões.

Na métrica de número total de erros por sessão, o voluntário 14 apresentou aumento da primeira para a terceira sessão. A média elevou-se de 0,00 para 0,50, a mediana permaneceu em 0,00, e o desvio-padrão aumentou de 0,00 para 1,00. Apesar do aumento partindo de zero erros, os valores finais permaneceram baixos. Comparando com o seu próprio grupo, que apresentou redução de 0,50 para 0,42, este participante seguiu trajetória inversa. Quando comparado ao grupo sem amputação, que evoluiu de 0,14 para 0,48, este voluntário apresentou índice similar ao do grupo na terceira sessão.

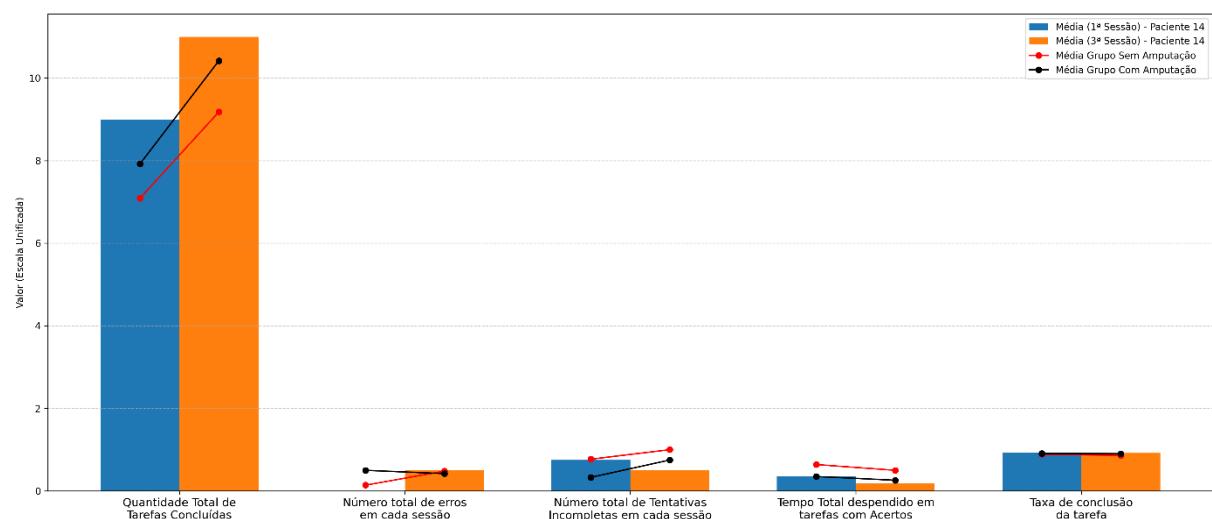
Na métrica de número total de tentativas incompletas por sessão, o voluntário 14 apresentou redução da primeira para a terceira sessão. A média decresceu de 0,75 para 0,50, a mediana permaneceu em 0,50, e o desvio-padrão reduziu de 0,96 para 0,58. Comparando com ambos os grupos, que apresentaram aumento nas tentativas incompletas na terceira sessão, este participante demonstrou trajetória oposta, com redução nesta métrica. O grupo com amputação evoluiu de 0,33 para 0,75, enquanto o grupo sem amputação passou de 0,77 para 1,00. Vale destacar que essa redução

pode indicar melhor domínio no controle da prótese virtual à medida que o voluntário ganhou experiência ao longo das sessões de treinamento.

Na métrica de tempo total despendido em tarefas com acertos, o voluntário 14 apresentou redução de tempo da primeira para a terceira sessão. A média decresceu de 0,36 para 0,18, a mediana de 3,40 para 2,10, e o desvio-padrão de 0,83 para 0,59. Estes valores sugerem melhora na eficiência de execução das tarefas. Comparando com o grupo com amputação, que reduziu de 0,35 para 0,26, este participante apresentou valores iniciais similares, mas alcançou maior redução no tempo. Quando comparado ao grupo sem amputação, que reduziu de 0,64 para 0,50, este voluntário demonstrou desempenho superior em ambas as sessões, finalizando como o mais eficiente de seu grupo.

Por fim, na métrica taxa de conclusão de tarefa, o voluntário 14 manteve estabilidade da primeira para a terceira sessão. A média apresentou ligeira redução de 0,93 para 0,92, a mediana diminuiu de 1,00 para 0,90, e o desvio-padrão reduziu de 0,09 para 0,06. A taxa de conclusão permaneceu elevada, sugerindo que a maioria das tarefas foi concluída com sucesso. Na terceira sessão, este participante superou ambos os grupos, com taxa de 0,92 contra 0,90 do grupo com amputação e 0,86 do grupo sem amputação. A Figura 66 apresenta a síntese visual do desempenho do voluntário ID 14 em todas as métricas avaliadas.

Figura 66 - Desempenho do Indivíduo ID 14 no Jogo Sério MRProsthesys



Fonte: Autoria Própria.

7.5 Relação entre as Métricas Avaliadas

A análise comparativa entre os grupos com e sem amputação demonstrou relação entre usabilidade, sensação de incorporação e desempenho no jogo sério. Ao comparar os 39 indicadores avaliados percebe-se que o grupo com amputação obteve melhor desempenho em 27 indicadores, 8 empates e desempenho inferior em 4 indicadores na primeira sessão, evoluindo para 32 indicadores com melhor desempenho, 6 empates e apenas 1 indicador com desempenho inferior na terceira sessão. Além disso, o grupo com amputação apresentou menor desvio-padrão em 88% dos casos, o que sugere que os participantes com amputação desenvolveram experiência mais integrada e consistente com o sistema ao longo do período.

O grupo com amputação percebeu o sistema como mais útil desde a primeira sessão. Nos 12 indicadores de usabilidade avaliados pelo PSSUQ, este grupo obteve melhor desempenho em 7 indicadores, 3 empates e desempenho inferior em 2 indicadores na primeira sessão, progredindo para 8 indicadores com melhor desempenho, 3 empates e apenas 1 indicador com desempenho inferior na terceira sessão. Esta percepção positiva está relacionada às características fundamentais da arquitetura MRProsthesis: o rastreamento preciso do membro amputado garantiu alinhamento espacial adequado, a movimentação em tempo real proporcionou resposta imediata aos comandos, e os jogos sérios promoveram engajamento e motivação durante as sessões de treinamento.

A percepção positiva de usabilidade acompanhou alta sensação de incorporação da prótese virtual. Nos 12 indicadores de incorporação avaliados pelo PEembS-ULA, o grupo com amputação obteve melhor desempenho em 9 indicadores e 3 empates na primeira sessão, sem registrar nenhum indicador com desempenho inferior ao grupo sem amputação. Na terceira sessão, alcançou melhor desempenho em todos os 12 indicadores, eliminando completamente os empates e mantendo ausência total de indicadores com desempenho inferior. Isso sugere que as características do sistema favoreceram a integração perceptiva da prótese ao esquema corporal dos participantes com amputação. A integração dos objetos virtuais com o membro amputado, sem sobreposição visual com membro real, facilitou o desenvolvimento do sentimento de propriedade. O rastreamento preciso contribuiu para a percepção de plausibilidade anatômica. A movimentação em tempo real

consolidou a dimensão Agência, permitindo que os participantes percebessem comando voluntário efetivo sobre a prótese virtual.

O desempenho superior nas tarefas do jogo sério pode ser entendido como consequência dessa combinação entre usabilidade positiva e incorporação alta. Nos 15 indicadores de desempenho avaliados, o grupo com amputação apresentou superioridade em 9 indicadores, 4 empates e 2 indicadores inferiores ao grupo sem amputação na primeira sessão. Na terceira sessão, alcançou 11 indicadores superiores, 4 empates e nenhum indicador inferior.

A diferença entre os grupos pode estar relacionada a fatores perceptivos específicos. No grupo com amputação, a ausência de sobreposição visual entre membro real e prótese virtual favoreceu a integração perceptiva, permitindo que as características do sistema operassem de forma mais efetiva. As atividades de treinamento, implementadas através dos jogos sérios, promoveram prática repetida que consolidou a percepção de usabilidade, a sensação de incorporação e as habilidades necessárias para executar as tarefas. No grupo sem amputação, a visualização simultânea do membro real e da prótese virtual pode ter introduzido ambiguidade perceptiva que limitou tanto a sensação de incorporação.

Por fim, a arquitetura proposta apresentou desempenho satisfatório ao promover elevada sensação de incorporação em indivíduos amputados de membros superiores, corroborando as premissas estabelecidas na hipótese deste estudo. A integração entre ambientes de Realidade Mista, técnicas de rastreamento sem marcadores e jogos sérios com feedback sensorial possibilitou a execução de movimentos em tempo real e a realização de atividades de treinamento. Os resultados obtidos indicam que a aplicação conjunta dessas tecnologias é capaz de viabilizar um ambiente de treinamento enriquecido, favorecendo a incorporação, a usabilidade e o aprendizado do controle de próteses mioelétricas, mesmo na ausência da prótese física.

7.6 Considerações Finais

Neste capítulo, foram apresentados os resultados obtidos na aplicação do sistema MRProsthesis, organizados em três vertentes principais: usabilidade do sistema, sensação de incorporação da prótese virtual e rendimento dos usuários nas

tarefas propostas. A apresentação dos dados contemplou análise comparativa entre os grupos com e sem amputação de membros superiores, com avaliações realizadas na primeira e na terceira sessão de treinamento.

Os resultados de usabilidade foram apresentados por meio do questionário PSSUQ, abrangendo as dimensões Utilidade do Sistema, Qualidade da Informação, Qualidade da Interface e Satisfação Geral. A sensação de incorporação foi avaliada através do questionário PEmbS-ULA, contemplando as dimensões Propriedade, Agência, Plausibilidade Anatômica e Sensação Geral de Incorporação. O desempenho no jogo sério foi mensurado por meio de métricas objetivas de quantidade de tarefas concluídas, número de erros, tentativas incompletas, tempo de execução e taxa de conclusão.

Além da análise dos grupos, foram apresentados os desempenhos individuais dos três participantes com amputação, valorizando as particularidades de cada voluntário. Por fim, foi apresentada análise de convergência entre as três vertentes avaliadas, relacionando os resultados de usabilidade, incorporação e desempenho com as características integradas da arquitetura MRProsthesis.

No próximo capítulo, são apresentadas as conclusões da pesquisa, sintetizando os principais achados, destacando as contribuições científicas, tecnológicas e metodológicas, discutindo as limitações do estudo e apontando direções para trabalhos futuros.

Capítulo 8

Conclusões e Trabalhos Futuros

8.1 Introdução

Este capítulo apresenta as conclusões da pesquisa, sintetizando a trajetória percorrida desde a fundamentação teórica até os resultados obtidos, e destacando as contribuições decorrentes deste trabalho. Inicialmente, é apresentada síntese que contempla a revisão de literatura, a proposta da arquitetura do sistema, a metodologia de avaliação e os principais achados relativos à usabilidade, incorporação e desempenho. Em seguida, são apresentadas as contribuições científicas. Posteriormente, são discutidas as limitações do estudo. Seguindo adiante, são apontadas direções para trabalhos futuros. Por fim, são apresentadas as considerações finais da tese.

8.2 Conclusões

A revisão de literatura apresentada nos Capítulos 2 e 3 estabeleceu os fundamentos teóricos da pesquisa, contemplando aspectos relacionados a amputações de membros superiores, tipos de próteses disponíveis com foco em próteses mioelétricas, reabilitação e treinamento, sensação de incorporação, tecnologias de interface avançada e jogos sérios. A análise de trabalhos correlatos revelou que, embora existam sistemas de realidade mista para treinamento de controle mioelétrico, não foram identificados trabalhos que investigassem especificamente a sensação de incorporação da prótese proporcionada por esses sistemas. Esta observação motivou a proposta de desenvolvimento de uma arquitetura que integrasse características específicas para favorecer a sensação de incorporação em ambiente de realidade mista.

A arquitetura proposta, apresentada nos Capítulos 4 e 5, resultou no sistema MRProsthesis, fundamentado em cinco características integradas com o propósito de proporcionar sensação de incorporação da prótese virtual: método de rastreamento do membro amputado sem marcadores fiduciais, integração dos objetos virtuais com o membro amputado, movimentação da prótese em tempo real, atividades de treinamento estruturadas e jogos sérios. O sistema eliminou a dependência de marcadores fiduciais para rastreamento, conferindo maior amplitude de movimento ao usuário. A implementação permitiu que indivíduos amputados realizassem treinamento de controle mioelétrico sem necessidade da prótese física, integrando prótese virtual ao coto do participante em ambiente de realidade mista. A adaptação do teste funcional *Box and Blocks* para formato de jogo sério proporcionou ambiente controlado e motivador para as sessões de treinamento.

A metodologia de avaliação, detalhada no Capítulo 6, estabeleceu protocolo experimental envolvendo dois grupos de voluntários, com e sem amputação de membros superiores, ao longo de três sessões com intervalo mínimo de duas semanas entre as sessões. O sistema foi avaliado na primeira e na terceira sessão por meio de três vertentes complementares: usabilidade do sistema através do questionário PSSUQ, sensação de incorporação mediante o questionário PEmbS-ULA, e desempenho funcional por meio de métricas objetivas extraídas do jogo sério. Esta abordagem permitiu avaliar não apenas a eficácia técnica do sistema, mas também a experiência dos usuários e sua capacidade de executar tarefas funcionais.

Os resultados obtidos, apresentados no Capítulo 7, demonstraram ganhos de usabilidade, incorporação e desempenho em ambos os grupos quando comparados a primeira e a terceira sessão. O grupo com amputação apresentou desempenho superior ao grupo sem amputação na maioria dos indicadores avaliados. Este grupo também apresentou menor desvio-padrão em 88% dos casos, indicando maior consistência nas respostas. Na vertente de usabilidade, ambos os grupos avaliaram positivamente o sistema, com o grupo com amputação obtendo medidas ligeiramente superiores. Na vertente de incorporação, o grupo com amputação demonstrou elevada sensação, alcançando valores próximos ao teto da escala na terceira sessão, com destaque para a dimensão Agência. No desempenho funcional, o grupo com amputação completou maior quantidade de tarefas, apresentou menor tempo de

execução e obteve maior taxa de conclusão em comparação ao grupo sem amputação.

A análise individualizada do grupo com amputação revelou que cada voluntário possuía características distintas quanto ao nível de amputação, idade, tempo decorrido desde a amputação e experiência prévia com tecnologias. Apesar dessas particularidades individuais, todos os participantes apresentaram evolução positiva e ganhos em usabilidade, incorporação e desempenho entre a primeira e a terceira sessão, sugerindo que a arquitetura proposta pode atender diferentes perfis clínicos de amputação.

Por fim, o tamanho amostral reduzido, com apenas três participantes com amputação de membros superiores, limita a generalização dos resultados obtidos nesta tese. Embora a abordagem adotada tenha permitido análise detalhada das particularidades de cada voluntário, estudos com amostras maiores são necessários para confirmar os padrões observados e ampliar a compreensão sobre a eficácia do sistema em diferentes perfis clínicos de amputação.

8.3 Trabalhos futuros

Os resultados obtidos nesta pesquisa abrem perspectivas para investigações futuras que possam ampliar a compreensão sobre o uso de sistemas de realidade mista no treinamento de controle de próteses mioelétricas. Como direções para trabalhos futuros, destacam-se:

- Realizar pesquisas com maior número de participantes com amputação para confirmar os padrões observados e permitir análises estatísticas mais robustas, incluindo voluntários com diferentes níveis de amputação, faixas etárias e tempos decorridos desde a amputação para avaliar a aplicabilidade do sistema para públicos diversos;
- Implementar controle individualizado de abertura e fechamento dos dedos da prótese virtual, possibilitando movimentos mais precisos e naturais, incorporando modalidades adicionais de feedback sensorial;

- Implementar outros testes funcionais e exercícios de reabilitação além do Box and Blocks, contemplando atividades de vida diária como pegar objetos de diferentes formas e tamanhos, realizar movimentos de pinça e preensão; Por fim, é necessário validar o sistema em ambientes clínicos e de reabilitação, em colaboração com profissionais da saúde, para viabilizar sua adoção como ferramenta complementar nos processos de reabilitação.

8.4 Consideração final

Esta tese investigou a sensação de incorporação proporcionada por sistemas de realidade mista no contexto de treinamento para controle de próteses mioelétricas. A arquitetura MRProsthesis, fundamentada em cinco características integradas, demonstrou viabilidade técnica e capacidade de proporcionar sensação de incorporação elevada em indivíduos amputados.

Apesar das limitações inerentes a um estudo com amostra reduzida, os achados fornecem evidências preliminares que fundamentam a continuidade do desenvolvimento e avaliação do sistema em contextos clínicos. A abordagem proposta representa alternativa viável para indivíduos que ainda não possuem prótese física ou estão em fase inicial de adaptação, potencialmente contribuindo para processos de reabilitação mais efetivos e acessíveis. Por fim, o avanço na compreensão de como características específicas de sistemas de realidade mista podem favorecer a incorporação da prótese virtual abre caminhos para o desenvolvimento de tecnologias assistivas.

Referências Bibliográficas

AGUILAR-LAZCANO, Carlos Alberto et al. Interaction modalities used on serious games for upper limb rehabilitation: a systematic review. **Games for Health Journal**, v. 8, n. 5, p. 313-325, 2019.

<https://doi.org/10.1089/g4h.2018.0129>

AHMAD, Mohd Azzuan et al. Virtual reality games as an adjunct in improving upper limb function and general health among stroke survivors. **International Journal of Environmental Research And Public Health**, v. 16, n. 24, p. 5144, 2019.

<https://doi.org/10.3390/ijerph16245144>

AKBULUT, Akhan et al. A wearable device for virtual cyber therapy of phantom limb pain. In: **2018 International Conference on Artificial Intelligence and Data Processing (IDAP)**. IEEE, 2018. p. 1-5.

<https://doi.org/10.1109/IDAP.2018.8620786>

AKSOY, Emin et al. Comparing the effects on learning outcomes of tablet-based and virtual reality-based serious gaming modules for basic life support training: randomized trial. **JMIR Serious Games**, v. 7, n. 2, p. e13442, 2019.

<https://doi.org/10.2196/13442>

AL-ISSA, Hussain; REGENBRECHT, Holger; HALE, Leigh. Augmented reality applications in rehabilitation to improve physical outcomes. **Physical Therapy Reviews**, v. 17, n. 1, p. 16-28, 2012.

<https://doi.org/10.1179/1743288X11Y.0000000051>

ASHWINI, K.B. et al. Tracking methods in augmented reality—explore the usage of marker-based tracking. In: **Proceedings of the 2nd International Conference on IoT, Social, Mobile, Analytics & Cloud in Computational Vision & Bioengineering (ISMAC-CVB 2020)**. 2020.

<https://doi.org/10.2139/ssrn.3734851>

ATZORI, Manfredo; MÜLLER, Henning. Control capabilities of myoelectric robotic prostheses by hand amputees: a scientific research and market overview. **Frontiers in Systems Neuroscience**, v. 9, p. 162, 2015.

<https://doi.org/10.3389/fnsys.2015.00162>

AZUMA, Ronald T. (1997). A survey of augmented reality. **Presence 6 (4)**, 355–385.
Azuma, R. (1997). A survey of augmented reality. **Presence 6 (4)**, 355–385.

<https://doi.org/10.1162/pres.1997.6.4.355>

BANIASADI, Tayebeh; AYYOUBZADEH, Seyed Mohammad; MOHAMMADZADEH, Niloofar. Challenges and practical considerations in applying virtual reality in medical education and treatment. **Oman Medical Journal**, v. 35, n. 3, p. e125, 2020.

<https://doi.org/10.5001/omj.2020.43>

BARRESI, Giacinto et al. Exploring the embodiment of a virtual hand in a spatially augmented respiratory biofeedback setting. **Frontiers in Neurorobotics**, v. 15, p. 683653, 2021.

<https://doi.org/10.3389/fnbot.2021.683653>

BATES, Taylor J.; FERGASON, John R.; PIERRIE, Sarah N. Technological advances in Prosthesis design and rehabilitation following upper extremity limb loss. **Current Reviews in Musculoskeletal Medicine**, v. 13, p. 485-493, 2020.

<https://doi.org/10.1007/s12178-020-09656-6>

BEKRATER-BODMANN, Robin et al. Relationship of Prosthesis ownership and phantom limb pain: results of a survey in 2383 limb amputees. **Pain**, v. 162, n. 2, p. 630-640, 2021.

<https://doi.org/10.1097/j.pain.0000000000002063>

BEKRATER-BODMANN, Robin. Factors associated with Prosthesis embodiment and its importance for prosthetic satisfaction in lower limb amputees. **Frontiers in Neurorobotics**, v. 14, p. 604376, 2021.

<https://doi.org/10.3389/fnbot.2020.604376>

BEZERRA, E. **Princípio de Análise e Projetos de Sistemas com UML**. Rio de Janeiro: CAMPUS, 2014. ISBN: 978-8535226263

BILLINGHURST, Mark, CLARK, Adrian, & LEE, Gun. A survey of augmented reality. **Foundations and Trends® in Human–Computer Interaction**, v. 8, n. 2-3, p. 73-272, 2015.

<https://doi.org/10.1561/1100000049>

BILLINGHURST, Mark. Grand challenges for augmented reality. **Frontiers in Virtual Reality**, v. 2, p. 12, 2021.

<https://doi.org/10.3389/frvir.2021.578080>

BOSCHMANN, Alexander et al. A novel immersive augmented reality system for Prosthesis training and assessment. In: **2016 IEEE-EMBS International Conference on Biomedical and Health Informatics (BHI)**. IEEE, 2016. p. 280-283.

<https://doi.org/1109/BHI.2016.7455889>

BOSCHMANN, Alexander et al. ZYNQ-BASED acceleration of robust high density myoelectric signal processing. **Journal of Parallel and Distributed Computing**, v. 123, p. 77-89, 2019.

<https://doi.org/10.1016/j.jpdc.2018.07.004>

BOTH, Juliane Elis et al. Acompanhamento de paciente com amputação de membro superior: um estudo de caso. **Revista Contexto & Saúde**, v. 11, n. 20, p. 611-616, 2011. Disponível em:

<<https://revistas.unijui.edu.br/index.php/contextoesaude/article/view/1598/1344>>

Acesso em: 08 junho. 2023

BRACK, Robbie; AMALU, Emeka H. A review of technology, materials and R&D challenges of upper limb Prosthesis for improved user suitability. **Journal of Orthopaedics**, v. 23, p. 88-96, 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.jor.2020.12.009>

BRASIL. Ministério da Saúde. Secretaria de Atenção à Saúde. Departamento de Ações Programáticas Estratégicas. **Diretrizes de atenção à pessoa amputada**. 1. ed. 1. reimpresso. – Brasília: Ministério da Saúde, 2013.

Disponível em:

<https://bvsms.saude.gov.br/bvs/publicacoes/diretrizes_atencao_pessoa_amputada.pdf> Acesso em: 05 junho de 2023

BRASIL. Técnico em órteses e próteses: livro-texto/ Ministério da Saúde. **Secretaria de Gestão do Trabalho e da Educação na Saúde**. Departamento de Gestão do Trabalho na Saúde – Brasília: Ministério da Saúde, 2014. 318p. ISBN 9788533423152

Disponível em:

<https://bvsms.saude.gov.br/bvs/publicacoes/tecnicoortesesproteses_livro_texto.pdf>

Acesso em: 08 ago. 2023

BRENNER, Carl D.; BRENNER, Joseph K. The use of preparatory/evaluation/training prostheses in developing evidenced-based practice in upper limb prosthetics. **JPO: Journal of Prosthetics and Orthotics**, v. 20, n. 3, p. 70-82, 2008.

<https://doi.org/10.1097/JPO.0b013e31817c59fb>

BRITO, Pedro Quelhas; STOYANOVA, Jasmina; COELHO, António. Augmented reality versus conventional interface: is there any difference in effectiveness?. **Multimedia Tools and Applications**, v. 77, p. 7487-7516, 2018.

<https://doi.org/10.1007/s11042-017-4658-1>

BURDEA Grigore, C.; COIFFET, Philippe. **Virtual reality technology**. 2nd ed. London: Wiley-Interscience, 1994. ISBN: 0-471-36089-9

BÜTH, L., JURASCHEK, M., POSSELT, G., & HERRMANN. C Supporting SMEs towards adopting mixed reality: A training concept to bring the reality-virtuality continuum into application. In: **2018 IEEE 16th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)**. IEEE, 2018. p. 544-549.

<https://doi.org/10.1109/INDIN.2018.8471990>

CANZONERI, Elisa et al. Amputation and Prosthesis implantation shape body and peripersonal space representations. **Scientific Reports**, v. 3, n. 1, p. 2844, 2013.

<https://doi.org/10.1038/srep02844>

CARDOSO, Alexandre et al. Tecnologias e ferramentas para o desenvolvimento de sistemas de realidade virtual e aumentada. **Editora Universitária UFPE**, p. 1-19, 2007. Disponível em:

<<https://www.grpt.ufpe.br/grvm/wp-content/uploads/Publication/Books&Chapters/2007/TecnologiasParaODesenvolvimentoDeSistemasdeRealidadeVirtualEAumentada.pdf>> Acesso em: 08 agosto de 2023

CARDOSO, Alexandre; LAMOUNIER, Edgard; LIMA, Gerson F. M. Engenharias. In: TORI, Romero; HOUNSELL, Marcelo da Silva. **Introdução a Realidade Virtual e Aumentada**. Porto Alegre: Editora SBC, 2018 – p. 450-494. ISBN 978-65-870003-54-2

CAREY, Stephanie L.; LURA, Derek J.; HIGHSMITH, M. Jason. Differences in myoelectric and body-powered upper-limb prostheses: Systematic literature review. **Journal of Rehabilitation Research & Development**, v. 52, n. 3, 2015. <https://doi.org/10.1682/JRRD.2014.08.0192>

CARLETON, Anita et al. **Software Engineering as a Strategic Advantage: A National Roadmap for the Future**. 2021. Disponível em: <<https://insights.sei.cmu.edu/blog/software-engineering-as-a-strategic-advantage-a-national-roadmap-for-the-future/>>. Acesso em: 10 de janeiro de 2024

CARVALHO, José André. Amputações de membros inferiores: em busca da plena reabilitação. In: **Amputações de membros inferiores: em busca da plena reabilitação**. 3.ed. Santana de Parnaíba: Malone, 2021. 480 p. ISBN 9786555761498.

CAVALCANTE, Reidner Santos et al. Desenvolvimento de um jogo sério para treinamento de amputados de membros superiores. **Dissertação de Mestrado**. Universidade Federal de Uberlândia, 2018. Disponível em: <<https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/21007>> Acesso em: 12 ago. 2023

CHADWELL, Alix et al. The reality of myoelectric prostheses: understanding what makes these devices difficult for some users to control. **Frontiers in Neurorobotics**, v. 10, p. 7, 2016. <https://doi.org/10.3389/fnbot.2016.00007>

CHEN, Long et al. Context-Aware Mixed Reality: A Learning-Based Framework for Semantic-Level Interaction. In: **Computer Graphics Forum**. 2020. p. 484-496. <https://doi.org/10.1111/cgf.13887>

CHOO, Yoo Jin; KIM, Du Hwan; CHANG, Min Cheol. Amputation stump management: A narrative review. **World Journal of Clinical Cases**, v. 10, n. 13, p. 3981, 2022. <https://doi.org/10.12998/wjcc.v10.i13.3981>

CHUI, Kevin C. et al. Orthotics and Prosthetics in Rehabilitation E-Book: **Elsevier Health Sciences**, 2020. <https://doi.org/10.1016/C2017-0-00955-2>

CIORBA, A. et al. Psychological consequences in patients with amputation of a limb: an interpretative–phenomenological analysis. **Frontiers in Psychology**, v. 12, 2021. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2021.537493>

CONDINO, Sara et al. Wearable augmented reality application for shoulder rehabilitation. **Electronics**, v. 8, n. 10, p. 1178, 2019. <https://doi.org/10.3390/electronics8101178>

COSTA, Regina Mamede. Adaptação do usuário de próteses mioelétricas: implicações na aprendizagem de movimentos de mão. 2017. **Tese de Doutorado**. Universidade Federal do Espírito. Disponível em:
<<https://repositorio.ufes.br/handle/10/7140>> Acesso em: 10 ago. 2023

CRUNKHORN, Andrea et al. Management of Upper Limb Amputation Rehabilitation: Synopsis of the 2022 US Department of Veterans Affairs and US Department of Defense Clinical Practice Guideline for Acquired Amputation. **American Journal of Physical Medicine & Rehabilitation**, v. 102, n. 3, p. 245-253, 2023.
<https://doi.org/10.1097/PHM.0000000000000216>

CYRINO, Gabriel Fernandes. HarpyGame: um jogo sério customizável com interface multimodal para reabilitação de indivíduos pós-AVE. 2019. **Dissertação de Mestrado**. Universidade Federal de Uberlândia, 2019. Disponível em:
<<https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/24795>> Acesso em: 20 de janeiro de 2024

DA SILVA, Jonathan Felipe; JUCÁ, Sandro César Silveira; DA SILVA, Solonildo Almeida. A Utilização Da Realidade Aumentada Como Ferramenta Tecnológica No Processo De Ensino Da Engenharia Mecânica. **Conexões - Ciência e Tecnologia**, v. 17, p. 022019, 2023.
<https://doi.org/10.21439/conexoes.v17i0.3473>

DADACZYNKI, Kevin et al. The untapped potential of Games for Health in times of crises. A critical reflection. **Frontiers in Public Health**, v. 11, p. 1140665, 2023.
<https://doi.org/10.3389/fpubh.2023.1140665>

DAMASCENO, Eduardo Filgueiras; JUNIOR, Edgard Afonso Lamounier; CARDOSO, Alexandre. Uma avaliação heurística sobre um Sistema de Captura de Movimentos em Realidade Aumentada. **Journal of Health Informatics**, v. 4, n. 3, 2012. Disponível em:
<<https://jhi.sbis.org.br/index.php/jhi-sbis/article/view/148/122>> Acesso em: 10 de janeiro de 2024

DE MEDEIROS, Lays Pinheiro et al. Instrumento para Construção do Conteúdo, Estratégias de Gamificação e Recursos Didáticos do Jogo Sério Aleitagame. **Revista Multidisciplinar em Saúde**, v. 4, n. 3, p. 920-925, 2023.
<https://doi.org/10.51161/conais2023/20950>

DE VIGNEMONT, Frédérique. Embodiment, ownership and disownership. **Consciousness and Cognition**, v. 20, n. 1, p. 82-93, 2011.
<https://doi.org/10.1016/j.concog.2010.09.004>

DENCHE-ZAMORANO, Angel et al. Rehabilitation is the main topic in virtual and augmented reality and physical activity research: A bibliometric analysis. **Sensors**, v. 23, n. 6, p. 2987, 2023.
<https://doi.org/10.3390/s23062987>

DETERDING, S. et al. From game design elements to gamefulness: defining "gamification". In: PROCEEDINGS OF THE 15TH INTERNATIONAL ACADEMIC MINDTREK CONFERENCE: **ENVISIONING FUTURE MEDIA ENVIRONMENTS**. ACM, 2011. p. 9-15.

<https://doi.org/10.1145/2181037.2181040>

DEUS, Lauren. Augmented Reality for Advanced Prosthetic Training in Non-Amputees. **Doctoral Thesis**. University of Rhode Island. 2023. Disponível em: <<https://digitalcommons.uri.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=3328&context=theses>> Acesso em: 02 de janeiro de 2024

DI, Guotong; LI, Haokun; XU, Jie. An Augmented Reality Design Method Based on ARKit for the Fusion of Hierarchical Traditional Media and Real Scenes. In: **2021 International Conference on Culture-oriented Science & Technology (ICCST)**. IEEE, 2021. p. 67-71.

<https://doi.org/10.1109/ICCST53801.2021.00025>

DORNELAS, Lílian de Fátima. Uso da prótese e retorno ao trabalho em amputados por acidentes de transporte. **Acta Ortopédica Brasileira**, v. 18, n. 4, 2010.

<https://doi.org/10.1590/S1413-78522010000400006>

DOS SANTOS, Cristiano Alves et al. Jogos sérios em ambiente virtual para ensino-aprendizagem na saúde. **Rev Rene**, v. 18, n. 5, p. 702-709, 2017.

<https://doi.org/10.15253/2175-6783.2017000500019>

ENGDAHL, Susannah M.; MEEHAN, Sean K.; GATES, Deanna H. Differential experiences of embodiment between body-powered and myoelectric Prosthesis users. **Scientific Reports**, v. 10, n. 1, p. 15471, 2020.

<https://doi.org/10.1038/s41598-020-72470-0>

FABBRI, S. et al. State of the Art through Systematic Review (StArt). Versão 3.0. 3 [software]. **Laboratório de pesquisa em Engenharia de Software da Universidade Federal de São Carlos** (2010). 2018. Disponível em:

<<https://www.lapes.ufscar.br/resources/tools-1/start-1>> Acesso em: 15 de outubro de 2023

FERNANDES, Flávia Gonçalves et al. Grab the Life: Serious Game to Support Physical Rehabilitation Using Virtual Reality and Wearable Myo. In: **2016 XVIII Symposium on Virtual and Augmented Reality (SVR)**. Gramado: IEEE, 2016. p. 145-149.

<https://doi.org/10.1109/SVR.2016.33>

FERRÃO, João Pedro dos Santos. Prótese transradial com servomotores. **Dissertação de Mestrado**. Universidade Beira Interior, 2020. Disponível em: <https://Ubibliorum.Ubi.Pt/Bitstream/10400.6/10885/1/7585_16420.pdf> Acesso em: 15 de janeiro de 2024

FERRARI, Vincenzo et al. Augmented reality in healthcare. **Journal of Healthcare Engineering**, v. 2019, 2019.

<https://doi.org/10.1155/2019/9321535>

FREIRE, Sergio Miranda. Bioestatística básica. **Livro eletrônico**. Rio de Janeiro: Ed. do autor, 2021. Disponível em:
<https://www.lampada.uerj.br/arquivosdb/_book/delineamentos.html> Acesso em: 20 de maio de 2025

FRITSCH, Antonia; LENGENHAGER, Bigna; BEKRATER-BODMANN, Robin. Prosthesis embodiment and attenuation of prosthetic touch in upper limb amputees—A proof-of-concept study. **Consciousness and cognition**, v. 88, p. 103073, 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.concog.2020.103073>

GERUP, Jaris; SOERENSEN, Camilla B.; DIECKMANN, Peter. Augmented reality and mixed reality for healthcare education beyond surgery: an integrative review. **International journal of Medical Education**, v. 11, p. 1, 2020.
<https://doi.org/10.5116/ijme.5e01.eb1a>

GERYES, Maroun et al. A novel biomedical application for the Myo gesture control armband. In: **2017 29th International Conference on Microelectronics (ICM)**. IEEE, 2017. p. 1-4.
<https://doi.org/10.1109/ICM.2017.8268823>

GIUMMARRA, Melita J. et al. Mechanisms underlying embodiment, disembodiment and loss of embodiment. **Neuroscience & Biobehavioral Reviews**, v. 32, n. 1, p. 143-160, 2008.

<https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2007.07.001>

GOGOLLA, M. Unified Modeling Language. In: **LIU, L.; ÖZSU, M. T. (Eds.). Encyclopedia of Database Systems**. Boston, MA: Springer, 2009.
https://doi.org/10.1007/978-0-387-39940-9_440

GONZALEZ-FRANCO, Mar; PECK, Tabitha C. Avatar embodiment. towards a standardized questionnaire. **Frontiers in Robotics and AI**, v. 5, p. 74, 2018.
<https://doi.org/10.3389/frobt.2018.00074/full>

GORBANEV, I. et al. A systematic review of serious games in medical education: quality of evidence and pedagogical strategy. **Medical Education Online**, v. 23, n. 1, p. 1438718, 2018.

<https://doi.org/10.1080/10872981.2018.1438718>

GOUZIEN, Adrienne et al. Reachability and the sense of embodiment in amputees using prostheses. **Scientific Reports**, v. 7, n. 1, p. 4999, 2017.
<https://doi.org/10.1038/s41598-017-05094-6>

GRACZYK, Emily L. et al. The benefits of sensation on the experience of a hand: A qualitative case series. **PloS one**, v. 14, n. 1, p. e0211469, 2019.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0211469>

GRACZYK, Emily L. et al. Home use of a neural-connected sensory Prosthesis provides the functional and psychosocial experience of having a hand again. **Scientific Reports**, v. 8, n. 1, p. 9866, 2018.

<https://doi.org/10.1038/s41598-018-26952-x>

HAO, Dehong et al. A common prosthetic rehabilitation platform based on modular design. In: **Intelligent Robotics and Applications: 11th International Conference, ICIRA 2018**, Newcastle, NSW, Australia, August 9–11, 2018, Proceedings, Part I 11. Springer International Publishing, 2018. p. 244-254.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-97586-3_22

HAVERKATE, Liz; SMIT, Gerwin; PLETENBURG, Dick H. Assessment of body-powered upper limb prostheses by able-bodied subjects, using the Box and Blocks Test and the Nine-Hole Peg Test. **Prosthetics and orthotics international**, v. 40, n. 1, p. 109-116, 2016.
<https://doi.org/10.1177/03093646145540>

HENSON, Amber. Introduction to Myoelectric Prostheses In: **2021 The Upper Limb Library**. Disponível em:
<<https://www.armodynamics.com/upperlimblibrary/introduction-to-myoelectric-prostheses/>> Acesso em: 02 junho 2023

HIGGS, Benjamin G. Prosthetics, Orthotics, and Amputation Rehabilitation. In: **Functional Limb Salvage: The Multidisciplinary Team Approach**. Cham: Springer International Publishing, 2023. p. 349-358.
https://doi.org/10.1007/978-3-031-27725-2_25

HOFMAM, Maurício., CARVALHO, Felipe G., SZENBERG, Flávio, RAPOSO, Alberto, & GATTASS, Marcelo. Um estudo sobre marcas fiduciais em realidade aumentada: combinando detecção de linhas com calibração de câmera. In: **VIII Symposium on Virtual Reality**. Belém: Editora SBC, 2006. p.337-348. Disponível em:
<<https://acesse.dev/SVR2006>> Acesso em: 02 dezembro de 2023

HOUNSELL, Marcelo da Silva; TORI, Romero; KIRNER, Claudio. Realidade Aumentada; In: TORI, Romero; HOUNSELL, Marcelo da Silva (org.). **Introdução à Realidade Virtual e Aumentada**. 3. ed. Porto Alegre: Editora SBC, 2020.

HTC CORPORATION. HTC Vive Tracker (2018) **Developer Guidelines [v1.0]** [PDF]. Disponível em:
<[https://dl.vive.com/Tracker/Guideline/HTC_Vive_Tracker\(2018\)_Developer+Guidelines_v1.0.pdf](https://dl.vive.com/Tracker/Guideline/HTC_Vive_Tracker(2018)_Developer+Guidelines_v1.0.pdf)> 02 dezembro de 2023

HTC VIVE. **VIVE Support**. Disponível em:
<<https://www.vive.com/us/support/vive/>> Acesso em: 05 dezembro de 2023

HUNT, Christopher L. et al. Limb loading enhances skill transfer between augmented and physical reality tasks during limb loss rehabilitation. **Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation**, v. 20, n. 1, p. 1-14, 2023.
<https://doi.org/10.1186/s12984-023-01136-5>

HUSSAIN, Samreen; SHAMS, Sarmad; KHAN, Saad J. Impact of Medical Advancement: Prostheses. In: WANG, Lulu; YU, Liandong (Eds.). **Computer Architecture in Industrial, Biomechanical and Biomedical Engineering**. London: IntechOpen, 2019, cap. 2.

<https://doi.org/10.5772/intechopen.86602>.

IGUAL et al. Myoelectric control for upper limb prostheses. **Electronics**, v. 8, n. 11, p. 1244, 2019.

<https://doi.org/10.3390/electronics8111244>

IKBAL, Mohamed Sadiq; RAMADOSS, Vishal; ZOPPI, Matteo. Dynamic pose tracking performance evaluation of HTC Vive virtual reality system. **IEEE Access**, v. 9, p. 3798-3815, 2020.

<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3047698>

IMAIZUMI, Shu; ASAI, Tomohisa; KOYAMA, Shinichi. Embodied prosthetic arm stabilizes body posture, while unembodied one perturbs it. **Consciousness and cognition**, v. 45, p. 75-88, 2016.

<https://doi.org/10.1016/j.concog.2016.08.019>

JARRASSÉ, N., DE MONTALIVET, E., RICHER, F., NICOL, C., TOUILLET, A., MARTINET, N., ... & DE GRAAF, J. B. Phantom-mobility-based Prosthesis control in transhumeral amputees without surgical reinnervation: A preliminary study. **Frontiers in bioengineering and biotechnology**, v. 6, p. 164, 2018.

<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.304769810.3389/fbioe.2018.00164>

JARRASSÉ, Nathanaël et al.. Voluntary phantom hand and finger movements in transhumeral amputees could be used to naturally control polydigital prostheses. In: **2017 International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR)**. IEEE, 2017. p.1239-1245.

<https://doi.org/10.1109/ICORR.2017.8009419>

JOHNSON, Shawn Swanson; MANSFIELD, Elizabeth. Prosthetic training: upper limb. **Physical Medicine and Rehabilitation Clinics**, v. 25, n. 1, p. 133-151, 2014.

<https://doi.org/10.1016/j.pmr.2013.09.012>

JURADO-RODRÍGUEZ, David et al. Design, detection, and tracking of customized fiducial markers. **IEEE Access**, v. 9, p. 140066-140078, 2021.

<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3118049>

KAUR, Deepti Prit; MANTRI, Archana. Computer vision and sensor fusion for efficient hybrid tracking in augmented reality systems. In: **2015 IEEE 3rd International Conference on MOOCs, Innovation and Technology in Education (MITE)**. IEEE, 2015. p. 176-181.

<https://doi.org/10.1109/MITE.2015.7375310>

KERVER, Nienke et al. User-relevant factors determining Prosthesis choice in persons with major unilateral upper limb defects: A meta-synthesis of qualitative literature and focus group results. **PLoS One**, v. 15, n. 6, p. e0234342, 2020.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0234342>

KIM, Chanyong et al. Marker Based Pedestrian Detection Using Augmented Reality. In: **Proceedings of the 2019 3rd International Conference on Advances in Image Processing**. 2019. p. 19-22.

<https://doi.org/10.1145/3373419.3373456>

KIM, Kangsoo et al. A review of the 2nd decade of ISMAR (2008–2017). **IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics**, v. 24, n. 11, p. 2947-2962, 2018.

<https://doi.org/10.1109/TVCG.2018.2868591>

KIRNER, Claudio; PINHO, Marcio S. Minicurso: Introdução à realidade virtual. In: **1ª workshop de realidade virtual São Carlos**, p. 03-10, 1997

KIRNER, Claudio; SISCOUTTO, Robson. Realidade virtual e aumentada: conceitos, projeto e aplicações. In: **Livro do IX Symposium on Virtual and Augmented Reality**, Petrópolis (RJ), Porto Alegre: SBC. Vol. 28, 2007. Disponível em: <http://www.de.ufpb.br/~labteve/publi/2007_svprs.pdf> Acesso em: 15 de novembro de 2023

KNIGHT, Ashley; CAREY, Stephanie; DUBEY, Rajiv. Transradial Prosthesis Performance Enhanced with the Use of a Computer Assisted Rehabilitation Environment. In: **Proceedings of the 10th International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments**. 2017. p. 59-62.

<https://doi.org/10.1145/3056540.3064947>

KOÇ, Hatice et al. UML diagrams in software engineering research: a systematic literature review. In: **Proceedings**. MDPI, 2021. p. 13.

<https://doi.org/10.3390/proceedings2021074013>

KRATH, J.; SCHÜRMANN, L.; VON KORFLESCH, H. F. Revealing the theoretical basis of gamification: A systematic review and analysis of theory in research on gamification, serious games and game-based learning. **Computers in Human Behavior**, v. 125, p. 106963, 2021.

<https://doi.org/10.1016/j.chb.2021.106963>

KUBIAK, Carrie A. et al. Prosthetic rehabilitation and vascularized composite allotransplantation following upper limb loss. **Plastic and reconstructive surgery**, v. 143, n. 6, p. 1688-1701, 2019.

<https://doi.org/10.1097/PRS.0000000000005638>

KWAH, Li Khim et al. Quality of clinical practice guidelines for management of limb amputations: a systematic review. **Physical Therapy**, v. 99, n. 5, p. 577-590, 2019.

<https://doi.org/10.1093/ptj/pzz006>

LAAMARTI, F. et al. An overview of serious games. **International Journal of Computer Games Technology**, v. 2021, p. 1-21, 2021

<https://doi.org/10.1155/2014/358152>

LAMERAS, Petros et al. Essential features of serious games design in higher education: Linking learning attributes to game mechanics. **British Journal of Educational Technology**, v. 48, n. 4, p. 972-994, 2017.

<https://doi.org/10.1111/bjet.12467>

LAMOUNIER JR, E. A. et al. Using augmented reality techniques to simulate myoelectric upper limb prostheses. **J Bioengineer & Biomedical Sci S**, v. 1, p. 2, 2012.

<https://doi.org/10.4172/2155-9538.S1-010>

LAMPROPOULOS, Georgios et al. Integrating Augmented Reality, Gamification, and Serious Games in Computer Science Education. **Education Sciences**, v. 13, n. 6, p. 618, 2023.

<https://doi.org/10.3390/educsci13060618>

LAVIOLA JR, Joseph J. et al. **3D User Interfaces: Theory and Practice**. 2nd edition Addison-Wesley Professional, 2017. ISBN: 978-0134034324

LEAL, J. V.; GODOY COSTA, E.; FRESCHI, A. C. Realidade Virtual Na Aprendizagem De Inglês: um mapeamento de novas tecnologias. **Revista Interface Tecnológica**, [S. l.], v. 18, n. 2, p. 157–169, 2021.

<https://doi.org/10.31510/infa.v18i2.1255>

LEOW, Michael EL et al. Functional use of esthetic hand Prostheses: A patient's perspective. **Prosthetics and Orthotics International**, p. 10.1097, 2022.

<https://doi.org/10.1097/PXR.0000000000000262>

LEWIS, J.R., **Usability testing**. In: Salvendy, G. (Ed.), *Handbook of Human Factors and Ergonomics*. Wiley, New York, 2012, pp. 1267–1312.

<https://doi.org/10.1002/9781118131350.ch46>

LIMA, Diogo A. C. et al. An Augmented Reality application for training upper limb amputees. In: **XXIV Simpósio de Realidade Virtual e Aumentada**. ACM Digital Library. 2022.

<https://doi.org/10.1145/3604479.3604528>

LIMA, Diogo A. C. Uma arquitetura baseada em técnicas de Realidade Misturada para o treinamento do uso de próteses acionadas por tirantes para indivíduos com amputação de membros superiores. 2019. **Dissertação de Mestrado**. Universidade Federal de Uberlândia, 2019. Disponível em:

<<https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/26914>> Acesso em: 25 de novembro de 2023.

LOPES, Pedro et al. Adding force feedback to mixed reality experiences and games using electrical muscle stimulation. In: **Proceedings of the 2018 Chi Conference on Human Factors in Computing Systems**. 2018. p. 1-13.

<https://doi.org/10.1145/3173574.3174020>

LU, F., ZHOU, H., GUO, L., CHEN, J., & PEI, L. An ARCore-Based Augmented Reality Campus Navigation System. **Applied Sciences**, v. 11, n. 16, p. 7515, 2021.
<https://doi.org/10.3390/app11167515>

MA, Longfei et al. Visualization, registration and tracking techniques for augmented reality guided surgery: a review. **Physics in Medicine & Biology**, 2022.
<https://doi.org/10.1088/1361-6560/acaf23>

MAAT, Bartjan et al. Passive prosthetic hands and tools: A literature review. **Prosthetics and Orthotics International**, v. 42, n. 1, p. 66-74, 2018.
<https://doi.org/10.1177/0309364617691622>

MACHADO, Gustavo Silveira. Órteses e Próteses no Sistema Único de Saúde: Estudo Técnico. In: **Câmara dos Deputados**. v. 01, n. 1, p. 01-130, 2018 Disponível em: <https://bd.camara.leg.br/bd/bitstream/handle/bdcamara/35839/orrese_proteze_mac_hado.pdf?sequence=1&isAllowed=y> Acesso em: 28 de novembro de 2023

MAKIN, Tamar R.; DE VIGNEMONT, Frederique; FAISAL, A. Aldo. Neurocognitive barriers to the embodiment of technology. **Nature Biomedical Engineering**, v. 1, n. 1, p. 0014, 2017.
<https://doi.org/doi.org/10.1038/s41551-016-0014>

MALOUTA, R. et al. Experiences of receiving formal psychological support following lower limb amputation: a qualitative study. **Disability and Rehabilitation**, 2025.
<https://doi.org/10.1080/09638288.2025.2453098>

MANIKA, Evangelia; MICHALOPOULOU, Ioanna; SPILOTIS, Aineias. AR and VR devices in the healthcare business: legal and ethical challenges. In: **International Bar Association: The global voice of the legal profession**. 2023 Disponível em: <<https://www.ibanet.org/AR-VR-devices-in-the-healthcare-business>> Acesso em: 28 de fevereiro de 2024

MEDEIROS, Eliane Julia. Realidade virtual aumentada e mista: conceitos, técnicas e aplicações. 2018. **Universidade Federal Fluminense**. 2018. Disponível em: <<https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/26914>> Acesso em: 21 de novembro de 2023.

MELERO, Marina et al. Upbeat: augmented reality-guided dancing for prosthetic rehabilitation of upper limb amputees. **Journal of Healthcare Engineering**, v. 2019, 2019.
<https://doi.org/10.1155/2019/2163705>

MIDDLETON, Alexandra; ORTIZ-CATALAN, Max. Neuromusculoskeletal arm prostheses: personal and social implications of living with an intimately integrated bionic arm. **Frontiers in neurorobotics**, v. 14, p. 39, 2020.
<https://doi.org/10.3389/fnbot.2020.00039>

MITGUTSCH, Konstantin; ALVARADO, Narda. Purposeful by design? A serious game design assessment framework. In: **Proceedings of the International Conference on the foundations of digital games**. 2012. p. 121-128.

<https://doi.org/10.1145/2282338.2282364>

MORIE, Jacquelyn F. Inspiring the future: merging mass communication, art, entertainment and virtual environments. In: **ACM SIGGRAPH Computer Graphics**, v. 28, n. 2, p. 135-138, 1994.

<https://doi.org/10.1145/178951.178973>

NATIONAL ACADEMIES OF SCIENCES, ENGINEERING, AND MEDICINE. The promise of assistive technology to enhance activity and work participation. In: **National Academies Of Sciences, Engineering, And Medicine**. 2017.
<https://doi.org/10.17226/24740>

NIEDERNHUBER, Maria; BARONE, Damiano G.; LENGENHAGER, Bigna. Prostheses as extensions of the body: Progress and challenges. **Neuroscience & Biobehavioral Reviews**, v. 92, p. 1-6, 2018.

<https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2018.04.020>

NISHINO, Wataru et al. Development of a myoelectric Prosthesis simulator using augmented reality. In: 2017 **IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)**. IEEE, 2017. p. 1046-1051. D

<https://doi.org/10.1109/SMC.2017.8122749>

OLIVEIRA, Luciene Chagas de et al. Realidade aumentada móvel aplicada na navegação indoor para cadeirantes. 2017. **Tese de Doutorado**. Universidade Federal de Uberlândia, 2017. Disponível em:

<<https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/19236>> Acesso em: 09 de julho de 2025.

ORR, Annemarie E. Rehabilitation for Persons With Upper Extremity Amputation. In: **Kevin K. Chui, Milagros "Millee" Jorge, Sheng-Che Yen, Michelle M. Lusardi (org). Orthotics and Prosthetics in Rehabilitation**. 4^aed. E-Book: Elsevier, 2020. cap 31., p. 784-797. ISBN 9780323609135.

<https://doi.org/10.1016/B978-0-323-60913-5.00031-3>

OTONO, Riku et al. I'm Transforming! Effects of Visual Transitions to Change of Avatar on the Sense of Embodiment in AR. In: **2023 IEEE Conference Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)**. Shanghai, China, IEEE, 2023. p. 83-93.

<https://doi.org/10.1109/VR55154.2023.00024>

OTTOBOCK. 2019. Informação para amputados-Vivendo com uma amputação. In: **Ottobock**. Disponível em: <<https://www.ottobock.com/pt-br/prosthetics/informação-para-amputados/>> Acesso em: 02 junho de 2023

PALERMO, Francesca et al. An augmented reality environment to provide visual feedback to amputees during sEMG Data Acquisitions. In: **Towards Autonomous Robotic Systems: 20th Annual Conference**, TAROS 2019, London, UK, July 3–5, 2019, Proceedings, Part II 20. Springer International Publishing, 2019. p. 3-14.

https://doi.org/10.1007/978-3-030-25332-5_1

PANDIAN, G. S. J. et al. Evaluation of treatment of psychiatric morbidity among limb amputees. **Industrial Psychiatry Journal**, v. 27, n. 2, p. 211–218, 2018.
https://doi.org/10.4103/ijp.ipj_42_17

PARAJULI, Nawadita et al. Real-time EMG based pattern recognition control for hand prostheses: A review on existing methods, challenges and future implementation. **Sensors**, v. 19, n. 20, p. 4596, 2019.
<https://doi.org/10.3390/s19204596>

PASTRE, Carlos et al. Fisioterapia e amputação transtibial. ABROTEC - Associação Brasileira de Ortopedia Técnica. **Arq Ciênc Saúde**, 12(2), 120-4. 2005. Disponível em:
<<http://www.abotec.org.br/ilustracoes/Fisioterapiamputacaotranstibial.pdf>> Acesso em: 21 de fevereiro de 2024

PERLMAN, Gary. Electronic surveys. **Behavior Research Methods, Instruments, & Computers**, v. 17, n. 2, p. 203-205, 1995.
<https://doi.org/10.3758/BF03214383>

PETRINI, Francesco Maria et al. Enhancing functional abilities and cognitive integration of the lower limb Prosthesis. **Science Translational Medicine**, v. 11, n. 512, p. eaav8939, 2019.
<https://doi.org/10.1126/scitranslmed.aav8939>

PINZ, Axel et al. Hybrid tracking for augmented reality. **Ögai Journal**, v. 21, n. 1, p. 17-24, 2002. Disponível em:
<https://www.researchgate.net/profile/Harald-Ganster/publication/229025765_Hybrid_tracking_for_augmented_reality/links/0deec52b2d2168fdb7000000/Hybrid-tracking-for-augmented-reality.pdf> Acesso em: 18 de janeiro de 2024

RADHAKRISHNAN, Meera et al. Design and assessment of myoelectric games for Prosthesis training of upper limb amputees. In: **2019 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PerCom Workshops)**. IEEE, 2019. p. 151-157.
<https://doi.org/10.1109/PERCOMW.2019.8730824>

RADU, Iulian; ANTLE, Alissa. Embodied learning mechanics and their relationship to usability of handheld augmented reality. In: **2017 IEEE Virtual Reality Workshop on K-12 Embodied Learning through Virtual & Augmented Reality (KELVAR)**. IEEE, 2017. p. 1-5.
<https://doi.org/10.1109/KELVAR.2017.7961561>

REINKENSMEYER, David J. et al. How a diverse research ecosystem has generated new rehabilitation technologies: Review of NIDILRR's Rehabilitation Engineering Research Centers. **Journal of Neuroengineering and rehabilitation**, v. 14, n. 1, p. 1-53, 2017.
<https://doi.org/10.1186/s12984-017-0321-3>

REIS, João Gabbardo. Concessão De Órteses, Próteses e Meios Auxiliares de Locomoção do Estado do Rio Grande do Sul. In: **Departamento De Assistência Hospitalar E Ambulatorial**. V. 01, N. 1, P. 01-113, 2018; Disponível em: <<https://saude.rs.gov.br/upload/arquivos/carga20180359/07155907-diretrizes-da-reabilitacao-fisica-e-concessao-de-opm-do-rs.pdf>> Acesso em: 10 de janeiro de 2024

RESNIK, Linda et al. Dexterity, activity performance, disability, quality of life, and independence in upper limb Veteran Prosthesis users: a normative study. **Disability and Rehabilitation**, v. 44, n. 11, p. 2470-2481, 2022.
<https://doi.org/10.1080/09638288.2020.1829106>

RESNIK, Linda et al. Advanced upper limb prosthetic devices: implications for upper limb prosthetic rehabilitation. **Archives of Physical Medicine and Rehabilitation**, v. 93, n. 4, p. 710-717, 2012.
<https://doi.org/10.1016/j.apmr.2011.11.010>

RODRIGUES, Karina Aparecida et al. Embodiment of a virtual Prosthesis through training using an EMG-based human-machine interface: Case series. **Frontiers in Human Neuroscience**, v. 16, p. 870103, 2022.
<https://doi.org/10.3389/fnhum.2022.870103>

ROGNINI, Giulio et al. Multisensory bionic limb to achieve Prosthesis embodiment and reduce distorted phantom limb perceptions. **Journal of Neurology, Neurosurgery & Psychiatry**, 2018.
<https://doi.org/10.1136/jnnp-2018-318570>

SADEGHI-NIARAKI, Abolghasem; CHOI, Soo-Mi. A survey of marker-less tracking and registration techniques for health & environmental applications to augmented reality and ubiquitous geospatial information systems. **Sensors**, v. 20, n. 10, p. 2997, 2020.
<https://doi.org/10.3390/s20102997>

SANDERS, Joan E.; FATONE, Stefania. Residual limb volume change: systematic review of measurement and management. **Journal of Rehabilitation Research and Development**, v. 48, n. 8, p. 949, 2011.
<https://doi.org/10.1682/jrrd.2010.09.0189>

SÃO JOSE ORTOPÉDICOS. **Desarticulação de punho**. São Jose Ortopédicos, Teresópolis-RJ, 2022. Disponível em: <<https://saojoseortopedicos.com.br/produtos/proteses/punho>> Acesso em: 04 janeiro de 2024

SAURO, Jeff; LEWIS, James R. **Quantifying the user experience: Practical statistics for user research**. Morgan Kaufmann, 2016.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802308-2.00002-3>

SCHMALSTIEG, Dieter; HOLLERER, Tobias. **Augmented reality: principles and practice**. 2016. 1nd edition. Addison-Wesley Professional, 2016. ISBN: 978-0321883575

SEGIL, Jacob L.; ROLDAN, Leah Marie; GRACZYK, Emily L. Measuring embodiment: A review of methods for prosthetic devices. **Frontiers in Neurorobotics**, v. 16, p. 902162, 2022.

<https://doi.org/10.3389/fnbot.2022.902162>

SHARMA, Avinash et al. A mixed-reality training environment for upper limb Prostheses control. In: **2018 IEEE Biomedical Circuits and Systems Conference (BioCAS)**. Cleveland: IEEE Xplorer, 2018. p. 1-4.

<https://doi.org/10.1109/BIOCAS.2018.8584739>

SHEEHAN, Terrence P. Rehabilitation and prosthetic restoration in upper limb amputation. In: **Braddom's Physical Medicine and Rehabilitation**. Elsevier, 2021. p. 153-173. e2.

<https://doi.org/10.1016/B978-0-323-62539-5.00009-6>

SHORES, Jaimie Troyal. Amputation. **Johns Hopkins Medicine**. 2019. Disponível em: <<https://www.hopkinsmedicine.org/health/treatment-tests-and-therapies/amputation>> Acesso em: 06 junho 2023

SIEGEL, Joshua R. et al. Review and critique of current testing protocols for upper-limb prostheses: a call for standardization amidst rapid technological advancements. **Frontiers in Robotics and AI**, v. 10, p. 1292632, 2023.

<https://doi.org/10.3389/frobt.2023.1292632>

SILVA, Alexandre Carvalho. Uma proposta de camadas de objetos de interface para realidade virtual. 2014. **Dissertação de Mestrado**. Universidade Federal de Uberlândia, 2014. Disponível em:

<<https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/14563>> Acesso em: 16 junho 2023

SILVA, Edward Evêncio. et al. Pesquisa e inteligência de marketing - coleta de dados. 2023. 56, colorida, 16:9. **Apostila**. Disponível em:

<<https://repositorio.pqscognac.com.br//handle/123456789/64261>>. Acesso em: 16 junho 2025.

SILVA, N. A. A. et al. The psychosocial impact of lower limb amputation on quality of life: a cross-sectional study. **Cureus**, v. 14, n. 11, e31252, 2022.

<https://doi.org/10.7759/cureus.31252>

SINGH, Gurjinder; MANTRI, Archana. Ubiquitous hybrid tracking techniques for augmented reality applications. In: **2015 2nd International Conference on Recent Advances in Engineering & Computational Sciences (RAECS)**. IEEE, 2015. p. 1-5.

<https://doi.org/10.1109/RAECS.2015.7453420>

SISCOUTTO, Robson; COSTA, Rosa. Realidade virtual e aumentada: uma abordagem tecnológica. In: **Symposium on Virtual and Augmented Reality**. Porto Alegre: SBC, 2008. ISBN: 857669185-X.

SNOW, Peter W. et al. Robotic therapy for phantom limb pain in upper limb amputees. In: **2017 International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR)**. IEEE, 2017. p. 1019-1024.

<https://doi.org/10.1109/ICORR.2017.8009383>

SOMMERVILLE, Ian. **Engenharia de Software**. 9. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2011. 632 p. Tradução de Ivan Bosnic e Kalinka G. de O. Gonçalves. Revisão técnica de Kechi Hirama. ISBN 978-85-7936-108-1

SON, Yeseul et al. Method and System for Evaluating Tracking Performance of VR/AR/MR Devices. In: **2022 13th International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC)**. IEEE, 2022. p. 2074-2076.
<https://doi.org/10.1109/ICTC55196.2022.9952887>

SOUZA, Dirce et al. **Fisioterapia Ambulatorial em Amputado de Membro Inferior**. Procedimento Operacional Padrão -POP. Unidade de Reabilitação do Hospital das Clínicas da Universidade do Triângulo Mineiro – Uberaba: EBSERH – Empresa Brasileira de Serviços Hospitalares, 2019. Disponível em:
<<https://www.gov.br/ebserh/pt-br/hospitais-universitarios/regiao-sudeste/hc-uftm/documentos/procedimentos-e-rotinas-operacionais-padroao/pops/fisioterapia-em-amputados-mmii-versao-2-final.pdf>> Acesso em: 08 junho de 2023

SOUZA, Emmanuel G., CLASSE, Tadeu M. D., CASTRO, Ronney M.D. Um Game Design Canvas para Auxiliar na Concepção de Jogos para Saúde. **Estudos em Design**, v. 31, n. 3, 2023.
<https://doi.org/10.35522/eed.v31i3.1814>

SOYER, Kardem, UNVER, Banu, TAMER, Seval, & ULMER, Ozlem. The importance of rehabilitation concerning upper extremity amputees: A Systematic Review. **Pakistan Journal of Medical Sciences**, v. 32, n. 5, p. 1312, 2016.
<https://doi.org/10.12669/pjms.325.9922>

SPEICHER, Maximilian; HALL, Brian D.; NEBELING, Michael. What is mixed reality?. In: **Proceedings of the 2019 CHI conference on human factors in computing systems**. 2019. p. 1-15.
<https://doi.org/10.1145/3290605.3300767>

STEREOLABS. ZED SDK 4.0. **Early Access**. Disponível em:
<<https://www.stereolabs.com/developers/release>> Acesso em: 02 de janeiro 2024

STEREOLABS. ZED Mini Stereo Camera – **Product page**. Disponível em:
<<https://www.stereolabs.com/en-br/store/products/zed-mini>> Acesso em: 02 de janeiro 2024

STOKOSA, Jan J. Merck manuals: Fitting the Prosthesis. **American Prosthetics Institute: Merck Manual Professional Version**, 2022. Disponível em:
<<https://www.merckmanuals.com/professional/special-subjects/limb-prosthetics/fitting-the-Prosthesis>> Acesso em: 02 de janeiro 2023

SUNGKUR, Roopesh Kevin; PANCHOO, Akshay; BHOYROO, Nitisha Kirtee. Augmented reality, the future of contextual mobile learning. **Interactive Technology and Smart Education**, v. 13, n. 2, p. 123-146, 2016.
<https://doi.org/10.1108/ITSE-07-2015-0017>

SUTTHISON, Natthawan et al. Evaluation of an interphalangeal-joint prosthetic hand in trans-radial Prosthesis users. **Annals of Medicine**, v. 55, n. 1, p. 447-455, 2023.
<https://doi.org/10.1080/07853890.2023.2166979>

SYED, Toqeer Ali et al. In-depth review of augmented reality: Tracking technologies, development tools, AR displays, collaborative AR, and security concerns. **Sensors**, v. 23, n. 1, p. 146, 2023.
<https://doi.org/10.3390/s23010146>

SZWARCWALD, Célia Landmann. Inquéritos nacionais de saúde: visão geral sobre técnicas de amostragem e dados coletados por desenhos complexos. **Epidemiologia e Serviços de Saúde**, v. 32, p. e2023431, 2023.
<https://doi.org/10.1590/S2237-96222023000300014.pt>

TABOR, Aaron et al. Designing game-based myoelectric Prosthesis training. In: **Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems**. 2017. p. 1352-1363.
<https://doi.org/10.1145/3025453.3025676>

The Amputee Coalition is a National. 2021. Prosthetic FAQs for the New Amputee. In: **The Amputee Coalition is a national**. Disponível em:
<<https://www.amputee-coalition.org/resources/prosthetic-faqs-for-the-new-amputee/>>
Acesso em: 10 outubro 2023.

TORI, Romero; KIRNER, Cláudio; SISCOUTTO, Robson (org.). Fundamentos e tecnologia de realidade virtual e aumentada. Belém, PA: Editora SBC – Sociedade Brasileira de Computação, 2006. **Livro do pré-simpósio do VIII Symposium on Virtual Reality**. Disponível em:
<https://www.researchgate.net/publication/241463735_Fundamentos_e_Tecnologia_de_Realidade_virtual_e_Aumentada> Acesso em: 10 outubro 2023.

TORI, Romero; HOUNSELL, Marcelo da Silva (org.). **Introdução a Realidade Virtual e Aumentada**. Porto Alegre: Editora SBC, 2020.
<https://doi.org/10.5753/sbc.6654.2>

TORI, Romero; HOUNSELL, Marcelo da Silva; KIRNER, Claudio. Realidade Virtual; In: **TORI, Romero; HOUNSELL, Marcelo da Silva (org.). Introdução a Realidade Virtual e Aumentada**. 3. ed. Porto Alegre: Editora SBC, 2020.
<https://doi.org/10.5753/sbc.6654.2>

TREMOSA, Laia. Interaction Design Foundation. Beyond AR vs. VR: What is the Difference between AR vs. MR vs. VR vs. XR. **Interaction Design**, 2023. Disponível em:
<<https://www.interaction-design.org/literature/article/beyond-ar-vs-vr-what-is-the-difference-between-ar-vs-mr-vs-vr-vs-xr>> Acesso em: 27dezembro de 2023

TSAKIRIS, Manos et al. Neural signatures of body ownership: a sensory network for bodily self-consciousness. **Cerebral cortex**, v. 17, n. 10, p. 2235-2244, 2007.
<https://doi.org/10.1093/cercor/bhl131>

UELLENDALH, Jack E. Upper extremity myoelectric prosthetics. **Physical Medicine and Rehabilitation Clinics of North America**, v. 11, n. 3, p. 639-652, 2000.
[https://doi.org/10.1016/s1047-9651\(18\)30124-4](https://doi.org/10.1016/s1047-9651(18)30124-4)

VAKALIUK, Tetiana A.; POCHTOVIUK, Svitlana I. Analysis of tools for the development of augmented reality technologies, In: **AREdu 2021: 4th International Workshop on Augmented Reality in Education**, Kryvyi Rih, Ukraine, 2021. Disponível em:
<<http://ds.knu.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/3764/1/paper06.pdf>> Acesso em: 27 dezembro de 2023.

VAN DEN HEILIGENBERG, Fiona MZ et al. Artificial limb representation in amputees. **Brain**, v. 141, n. 5, p. 1422-1433, 2018.
<https://doi.org/10.1093/brain/awy054>

VASCONCELOS, Camila Lopes et al. A Contribuição da Realidade Virtual na Reabilitação Cardiovascular. **Revista Foco**, v. 16, n. 9, p. e3213-e3213, 2023.
<https://doi.org/10.54751/revistafoco.v16n9-205>

VIGLIALORO, Rosanna M. et al. A Projected AR Serious Game for Shoulder Rehabilitation Using Hand-Finger Tracking and Performance Metrics: A Preliminary Study on Healthy Subjects. **Electronics**, v. 12, n. 11, p. 2516, 2023.
<https://doi.org/10.3390/electronics12112516>

VIGLIALORO, Rosanna Maria et al. Augmented reality, mixed reality, and hybrid approach in healthcare simulation: a systematic review. **Applied Sciences**, v. 11, n. 5, p. 2338, 2021.
<https://doi.org/10.3390/app11052338>

VIGLIALORO, Rosanna Maria et al. Review of the augmented reality systems for shoulder rehabilitation. **Information**, v. 10, n. 5, p. 154, 2019.
<https://doi.org/10.3390/info10050154>

VUJAKLIJA, I.; FARINA, D.; ASZMANN, O. C. New developments in prosthetic arm systems. Vienna, Austria: **Orthopedic Research and Reviews**, 2016.
<https://doi.org/10.2147/ORR.S71468>

WARRANDER, K.; LIM, S. Experiences of receiving formal psychological support following lower limb amputation: a qualitative study. **Disability and Rehabilitation**, 2025.
<https://doi.org/10.1080/09638288.2025.2453098>

WAZLAWICK, Raul. **Engenharia de software: conceitos e práticas**. Elsevier Editora Ltda., 2019. ISBN: 978-8535260847

WHEATON, Lewis A. Neurorehabilitation in upper limb amputation: understanding how neurophysiological changes can affect functional rehabilitation. **Journal Of Neuroengineering and Rehabilitation**, v. 14, p. 1-12, 2017.
<https://doi.org/10.1186/s12984-017-0256-8>

WOODWARD, Julia; RUIZ, Jaime. Analytic review of using augmented reality for situational awareness. **IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics**, v. 29, n. 4, p. 2166-2183, 2022.
<https://doi.org/10.1109/TVCG.2022.3141585>

YANG, Xuerui et al. Hand rehabilitation using virtual reality electromyography signals. In: **2017 5th International Conference on Enterprise Systems (ES)**. IEEE, 2017. p. 125-131.
<https://doi.org/10.1109/ES.2017.27>

ZBINDEN, Jan; LENDARO, Eva; ORTIZ-CATALAN, Max. Prosthetic embodiment: systematic review on definitions, measures, and experimental paradigms. **Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation**, v. 19, n. 1, p. 37, 2022.
<https://doi.org/10.1186/s12984-022-01006-6>

ZHANG, Bo et al. Immersion Experiences in a Tablet-Based Markerless Augmented Reality Working Memory Game: Randomized Controlled Trial and User Experience Study. **JMIR serious games**, v. 9, n. 4, p. e27036, 2021.
<https://doi.org/10.2196/27036>

ZHYLENKO, Tetiana et al. Mobile applications in engineering based on the technology of augmented reality. In: **International Conference Innovation in Engineering**. Cham: Springer International Publishing, 2021. p. 366-376.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-79168-1_33

ZYDA, Michael. From visual simulation to virtual reality to games. **Computer**, v. 38, n. 9, p. 25-32, 2005.
<https://doi.org/10.1109/MC.2005.297>

Apêndice I

Listas de Strings

A partir da String Genérica, foram elaboradas strings personalizadas para cada repositório de dados específico, a saber:

- **String Genérica:** ("augmented reality" OR "augmented-reality" OR "mixed reality" OR "mixed-reality") AND ("upper limb") AND (Prosthesis OR prosthetic) AND (training OR rehabilitation)
- **ACM Digital Library: Fulltext:** (("augmented reality" OR "augmented-reality" OR "mixed reality" OR "mixed-reality") AND ("upper limb") AND (Prosthesis OR prosthetic) AND (training OR rehabilitation))
- **IEEE Xplorer Digital Library:** ("Full Text Only": "augmented reality" OR "Full Text Only": "augmented-reality" OR "Full Text Only": "mixed reality" OR "Full Text Only": "mixed-reality") AND ("Full Text Only": "upper limb") AND ("Full Text Only": Prosthesis OR "Full Text Only": prosthetic) AND ("Full Text Only": training OR "Full Text Only": rehabilitation OR "Full Text Only": embodiment)
- **Scopus Preview:** ALL (("augmented reality" OR "augmented-reality" OR "mixed reality" OR "mixed-reality") AND ("upper limb" OR "upper limbs") AND (Prosthesis OR prosthetic) AND (training OR rehabilitation or embodiment))
- **Biblioteca Digital do Medline/PubMed (via National Library of Medicine):** ("augmented reality" OR "augmented-reality" OR "mixed reality" OR "mixed-reality") AND ("upper limb" OR "upper limbs") AND (Prosthesis OR prosthetic) AND (training OR rehabilitation OR embodiment)
- **Biblioteca Digital do PubMed Central (PMC):** ((augmented reality [Body - All Words]) OR (augmented-reality[Body - All Words]) OR (mixed reality) OR (mixed-reality)) AND (upper limb) AND ((Prosthesis) OR (prosthetic)) AND ((training) OR (rehabilitation) AND (embodiment))
- **Web of Science (All database: Web of Science Core Collection; Derwent Innovations Index; KCI-Korean Journal Database; Russian Science Citation Index; SciELO Citation Index):** ALL=("augmented reality" OR "augmented-reality" OR "mixed reality" OR "mixed-reality") AND ALL=("upper limb" OR "upper limbs") AND ALL=(Prosthesis OR prosthetic) AND ALL=(training OR rehabilitation OR embodiment)

Anexo I

Questionário de Avaliação de Usabilidade – PSSUQ

		Discordo fortemente	-3	-2	-1	0	1	2	3	Concordo fortemente	Na
1	Em geral, estou satisfeito com a facilidade de utilização deste sistema.		<input type="radio"/>		<input type="radio"/>						
2	Este sistema foi simples de utilizar		<input type="radio"/>								
3	Consegui completar rapidamente as tarefas e cenários utilizando este sistema		<input type="radio"/>								
4	Senti-me confortável a utilizar este sistema		<input type="radio"/>								
5	Foi fácil aprender a usar este sistema.		<input type="radio"/>								
6	Acredito que me tornaria rapidamente produtivo se utilizasse este sistema		<input type="radio"/>								
7	O sistema deu mensagens de erros que me indicaram claramente como resolver os problemas		<input type="radio"/>								
8	Sempre que cometí um erro durante a utilização do sistema, consegui recuperar de forma fácil e rápida		<input type="radio"/>								
9	As informações (como ajuda online, mensagens na tela e outras documentações) fornecidas com o sistema foram claras.		<input type="radio"/>								
10	Foi fácil encontrar a informação que precisava		<input type="radio"/>								
11	A informação foi eficaz em ajudar-me a completar as tarefas e cenários.		<input type="radio"/>								
12	A organização de informações sobre as telas do sistema foi clara.		<input type="radio"/>								

13	A interface * do sistema foi agradável.		<input type="radio"/>								
14	Gostei de utilizar a interface deste sistema.		<input type="radio"/>								
15	Este sistema tem todas as funcionalidades e capacidades que eu esperava.		<input type="radio"/>								
16	Em geral, estou satisfeito com este sistema.		<input type="radio"/>								

* A "interface" inclui os itens que você usa para interagir com o sistema. Por exemplo, alguns componentes de a interface é o teclado, o mouse, o microfone e as telas (incluindo gráficos e linguagem)

Anexo II

Escala de Incorporação de Próteses para Amputados de Membros Superiores (PEmbS-ULA)

Que tipo de prótese você está utilizando?

- Cosmética Funcional (Mioelétrica)
 Eu coloquei minha prótese.

Instruções: Certifique-se de que pode observar diretamente sua prótese (por exemplo, usando uma camiseta). Para cada uma das seguintes afirmações, indique o quanto concorda ou discorda. Se concordar com a afirmação, marque um dos números positivos (1, 2, 3): quanto mais positivo o número, mais concorda com a afirmação. Se discordar da afirmação, marque um dos números negativos (-1, -2, -3): quanto mais negativo o número, mais discorda da afirmação. Se não concordar nem discordar da afirmação, marque zero (0). Responda espontaneamente, sem pensar duas vezes, e não pule nenhuma afirmação. Não há respostas certas ou erradas.

Por favor, observe sua prótese por cerca de 60 segundos.

- Eu observei minha prótese por cerca de 60 segundos e estou pronto(a) para continuar.

Questões	Discordo Fortemente	Concordo Fortemente
1. Sinto como se estivesse olhando diretamente para o meu próprio braço (mão), em vez de para uma prótese.	(-3) (-2) (-1) (0) (1) (2) (3)	
2. A prótese me pertence.	(-3) (-2) (-1) (0) (1) (2) (3)	
3. Parece como se eu tivesse dois braços (mãos).	(-3) (-2) (-1) (0) (1) (2) (3)	
4. A prótese é meu braço (mão).	(-3) (-2) (-1) (0) (1) (2) (3)	
5. A prótese é uma parte do meu corpo.	(-3) (-2) (-1) (0) (1) (2) (3)	

6. A postura da prótese corresponde à de um braço (mão) real.	(-3)	(-2)	(-1)	(0)	(1)	(2)	(3)
7. Meu corpo se sente completo.	(-3)	(-2)	(-1)	(0)	(1)	(2)	(3)
8. A prótese está na posição onde eu esperaria que meu braço (mão) estivesse, se não tivesse sido amputado.	(-3)	(-2)	(-1)	(0)	(1)	(2)	(3)

Por favor, move sua prótese por cerca de 30 segundos. Se estiver utilizando uma prótese funcional, feche e abra a mão protética; se estiver usando uma prótese cosmética, levante e abaixe a com seu membro residual.

- Eu movi minha prótese por cerca de 30 segundos e estou pronto(a) para continuar.

	Discordo Fortemente	Concordo Fortemente
9. A prótese está se movendo da maneira como eu gostaria que ela se movesse.	(-3)	(-2)
10. Eu tenho controle sobre a prótese.	(-3)	(-2)