

ARProsthesis: Uma ferramenta de treinamento para a reabilitação de amputados de membros superiores utilizando realidade aumentada

Diogo Lima¹, Edgard Lamounier¹, Alcimar Soares¹, Gabriel Cyrino¹,
Alexandre Carvalho¹, Alexandre Cardoso¹

diogoiub@gmail.com; lamounie@ufu.br; alcima@ufu.br; gabrielcyrino@ufu.br;
alexandre.silva1@ufu.br; alexandre@ufu.br

¹ Universidade Federal de Uberlândia, Av. João Naves de Ávila, 2121 - Santa Mônica, Uberlândia - MG, 38408-100, Brasil.

DOI: 10.17013/risti.56.82-97

Resumo: Este artigo apresenta uma aplicação de Realidade Aumentada (RA) que utiliza rastreamento sem marcadores fiduciais, destinada ao treinamento e reabilitação de amputados de membros superiores que utilizarão próteses mioelétricas. A ausência de marcadores otimiza o rastreamento dos movimentos, proporcionando maior amplitude e tornando o treinamento mais eficaz e intuitivo, facilitando a adaptação funcional dos usuários às próteses. Espera-se que, futuramente, o sistema promova a sensação de incorporação da prótese virtual. Para alcançar esse objetivo, métricas de usabilidade foram utilizadas, com resultados preliminares indicando uma experiência de treinamento mais envolvente e rápida adaptação à manipulação da prótese virtual. Apesar da usabilidade satisfatória observada, o estudo requer amostras maiores e mais diversificadas para validar os achados e consolidar o potencial da aplicação em promover a sensação de incorporação desejada.

Palavras-chave: Realidade Aumentada; Sem Marcadores; Treinamento; Reabilitação; Amputados de Membros Superiores.

ARProsthesis: A Training Tool for the Rehabilitation of Upper Limb Amputees Using Augmented Reality

Abstract: This article presents an Augmented Reality (AR) application employing markerless tracking, designed for the training and rehabilitation of upper limb amputees who will use myoelectric prostheses. The absence of fiducial markers optimizes motion tracking, providing greater range of movement and enhancing the intuitiveness and effectiveness of training, thereby facilitating users' functional adaptation to prosthetic devices. It is anticipated that, in the future, the system will foster a sense of embodiment of the virtual prosthesis. To achieve this goal, usability metrics were evaluated, with preliminary results indicating a more engaging training experience and rapid adaptation to virtual prosthesis manipulation. Despite the satisfactory usability observed, further research with larger and more diverse

samples is necessary to validate the findings and consolidate the application's potential to promote the desired sense of embodiment.

Keywords: Augmented Reality; Markerless; Training; Rehabilitation; Upper Limb Amputees.

1. Introdução

A amputação refere-se à remoção cirúrgica de parte do corpo, geralmente realizada para preservar a vida após um trauma ou prevenir a progressão de doenças (Uellendahl, 2020). Nos casos de amputação parcial, o coto remanescente desempenha um papel essencial no uso de próteses funcionais durante atividades diárias (Carvalho, 2003; Costa, 2017). As consequências da perda de membros afetam significativamente aspectos como funcionalidade, autonomia e qualidade de vida (Pastre et al., 2005; Both et al., 2011).

A reabilitação pós-amputação é fundamental para promover a aceitação da nova condição corporal e recuperar a autonomia física (Ministério da Saúde, 2013). Programas de treinamento, conduzidos por fisioterapeutas e terapeutas ocupacionais, ajudam os amputados a se adaptarem ao uso de próteses ou do membro residual, fortalecendo músculos e melhorando a coordenação motora (Both et al., 2011). Contudo, o processo tradicional de reabilitação pode ser longo e exaustivo, frequentemente levando ao abandono pelos pacientes (Igual et al., 2019).

Normalmente, seis meses separam a cirurgia da adaptação de uma prótese, devido ao tempo necessário para a recuperação do paciente e à personalização do dispositivo (Costa, 2017). Após receber a prótese, os pacientes enfrentam um longo período de aprendizado, que pode exceder 12 meses (Uellendahl, 2000). Este desafio é agravado pela adaptação natural dos amputados a viver sem a parte do corpo perdida, o que frequentemente dificulta a utilização eficaz da prótese (Jette, 2017). No caso de próteses mioelétricas, esse aprendizado é ainda mais complexo, pois exige que o paciente desenvolva controle sobre os sinais elétricos emitidos pelos músculos residuais, que comandam os movimentos da prótese (Uellendahl, 2000). Essa adaptação demanda não apenas esforço físico, mas também coordenação motora e cognitiva intensiva, prolongando ainda mais o processo de reabilitação e a aceitação funcional do dispositivo (Igual et al., 2019).

Com o objetivo de superar essas limitações, tecnologias como a RA têm sido exploradas para melhorar o treinamento de amputados. A RA integra elementos virtuais ao ambiente real, proporcionando feedback visual interativo e potencializando o aprendizado funcional antes mesmo da adaptação da prótese (Boschmann et al., 2016). Além disso, ela pode oferecer uma experiência mais imersiva, que tem potencial para promover uma sensação de incorporação da prótese virtual como parte do corpo do usuário (Palermo et al., 2019; Lima et al., 2022). Contudo, um rastreamento preciso e a usabilidade do sistema são fatores fundamentais para alcançar a sensação de incorporação (Sun et al., 2021).

Dois métodos de rastreamento são amplamente utilizados em aplicações de RA: com marcadores e sem marcadores (Faria & Miranda, 2023). O rastreamento com marcadores fiduciais é conhecido por sua alta precisão, mas apresenta limitações relacionadas à dependência de condições controladas e restrição de movimentos (Kirner e Siscoutto, 2007). Em contrapartida, o rastreamento sem marcadores também

demonstra elevada precisão, enquanto proporciona maior mobilidade e interação mais intuitiva, posicionando-se como uma alternativa promissora para intensificar a imersão dos usuários (Sharma et al., 2018).

Neste contexto, outra estratégia eficaz para aumentar o engajamento e a eficácia do treino são os jogos sérios (Cavalcante et al., 2024). Os Jogos sérios são jogos projetados com objetivos além do entretenimento, como educação, treinamento e reabilitação (Fernandes et al., 2016). Eles combinam elementos lúdicos com finalidades práticas, utilizando mecânicas de jogo para engajar os usuários em atividades que promovem aprendizado, desenvolvimento de habilidades ou resolução de problemas específicos (Castillo et al., 2020).

Contudo, o desenvolvimento de um ambiente de RA para treinamento de amputados, utilizando rastreamento preciso sem marcadores fiduciais e estratégias de jogos sérios, ainda enfrenta desafios técnicos, particularmente no que diz respeito à precisão do rastreamento e à fidelidade do ambiente simulado (Kirner e Siscoutto, 2007).

Nesse contexto, este artigo apresenta a arquitetura de uma aplicação de RA que utiliza rastreamento sem marcadores fiduciais, aliada a estratégias de jogos sérios, com o objetivo de proporcionar uma experiência de treinamento mais envolvente e facilitar a adaptação à manipulação da prótese virtual. Como passo inicial para que o sistema possa futuramente oferecer uma sensação de extensão natural da prótese para seus usuários, foram aplicadas métricas de usabilidade. A avaliação da usabilidade é essencial para identificar melhorias e garantir que o sistema atenda às necessidades práticas dos usuários, promovendo sua eficácia no treinamento.

2. Trabalhos Relacionais

Para identificar os principais artigos científicos relacionados ao treino de amputados de membros superiores, foram utilizadas as seguintes palavras-chave nas plataformas IEEE Xplorer, ACM Digital Library, Web of Science e Scopus Elsevier: Realidade Aumentada, Treino, Reabilitação, Prótese e Amputados de Membros Superiores. Não foi aplicada qualquer limitação quanto ao ano de publicação, considerando artigos até junho de 2023. Um total de 203 artigos relacionados foi encontrado. Dentre estes, quatro foram selecionados por serem considerados os mais relevantes e pertinentes ao estudo proposto.

2.1. Sistema TAC

O artigo de Boschmann et al. (2016) apresenta uma solução de RA desenvolvida para o treinamento de indivíduos com amputações por desarticulação de punho. O sistema utiliza o dispositivo de visualização Oculus Rift DK2®, câmaras Logitech C610 HD®, marcadores e sensores DAQ MindMedia Nexus para fornecer feedback visual, permitindo que os utilizadores observem como suas contrações musculares influenciam os movimentos de uma mão virtual. Entre os pontos fortes do sistema, destaca-se a eficácia do feedback visual na facilitação do aprendizado e os resultados promissores obtidos nos testes realizados com quatro participantes, os quais evidenciaram melhorias significativas no desempenho.

Entre os pontos fracos, destacam-se a restrição da simulação a movimentos laterais e à abertura e fechamento da mão virtual, o que limita a complexidade e diversidade dos movimentos passíveis de treinamento. Além disso, a dependência de marcadores para o rastreamento reduz a flexibilidade e a aplicabilidade do sistema em diferentes contextos e ambientes.

Por fim, os resultados obtidos indicam que o sistema é eficaz e demonstra potencial significativo como ferramenta de reabilitação.

2.2. MRProsthesis

O artigo de Lima et al. (2022) apresenta uma aplicação de RA para a reabilitação de amputados de membros superiores que utilizarão próteses controladas por alças. A interface foi projetada para operar entre o período imediatamente pós-amputação e a fase pré-prótese, abordando uma lacuna significativa dos métodos tradicionais.

Entre os pontos fortes, destaca-se a inovação ao preencher essa lacuna crítica no processo de reabilitação, além da integração de jogos sérios, que tornam o treinamento mais dinâmico e envolvente. O sistema utiliza o dispositivo de visualização Vuzix® 1200, rastreando o coto do amputado em tempo real por meio de marcadores, e possibilita o controle da mão virtual através de um potenciômetro conectado via Bluetooth, demonstrando funcionalidade promissora nos testes realizados com sete voluntários não amputados.

Entre os pontos fracos, destaca-se a dependência de marcadores, o que pode causar o desaparecimento da prótese virtual durante as sessões de treino em casos de baixa visibilidade. Além disso, a ausência de mecanismos de feedback adicionais, como feedback vibratório ou auditivo, limita o enriquecimento da experiência do utilizador.

Por fim, os testes realizados com voluntários não amputados indicam a necessidade de estudos clínicos mais amplos para validar a aplicação em seu público-alvo.

2.3. AR-Rehabilitation

O artigo de Palermo et al. (2019) apresenta uma solução de RA para indivíduos com amputações transradiais que utilizarão próteses mioelétricas. O sistema combina a braceira Myo™, que capta sinais elétricos dos músculos, e o Microsoft Hololens™, que projeta uma mão virtual controlada pelos movimentos musculares do utilizador. O feedback visual permite observar, em tempo real, como as contrações musculares afetam os movimentos da prótese, auxiliando no aprendizado e controle da mesma. Testado em cinco voluntários fisicamente aptos, o sistema demonstrou eficácia na redução do tempo para agarrar objetos, sugerindo melhorias no desempenho motor.

Entre os pontos fortes, destaca-se a tecnologia avançada e imersiva, que combina dispositivos modernos para criar uma interface intuitiva. O feedback visual mostrou-se eficaz para treinar o controle das próteses, contribuindo para o aprimoramento das habilidades motoras.

Entre os pontos fracos, destaca-se a ausência de visualização do coto do amputado comprometer a sensação de pertencimento à prótese, essencial para sua aceitação.

O feedback exclusivamente visual limita a experiência sensorial, que poderia ser enriquecida com estímulos táteis ou auditivos.

Por fim, a amostra reduzida e composta por indivíduos não amputados dificulta a validação dos resultados no público-alvo real.

2.4.HoloPHAM

O artigo de Sharma et al. (2018) apresenta um ambiente de RA desenvolvido para indivíduos com amputações de membros superiores que utilizam próteses mioelétricas. O sistema combina a braçadeira Myo™, para captar sinais elétricos dos músculos do utilizador, e o dispositivo Microsoft Hololens™, que projeta um braço virtual controlado pelos movimentos musculares. Diferentemente de outros sistemas, este incorpora feedback visual e vibratório, permitindo aos utilizadores observar como suas contrações musculares afetam o braço virtual, enquanto o feedback vibratório proporciona uma sensação de toque. Testado em dois voluntários fisicamente aptos, o sistema demonstrou eficácia na melhoria do desempenho, sugerindo potencial como ferramenta de reabilitação.

Entre os pontos fortes, destaca-se a combinação dos feedbacks, que oferece uma experiência sensorial mais rica, e a utilização de tecnologias avançadas, como o Microsoft Hololens™, que proporciona uma interface moderna e interativa.

Entre os pontos fracos, destaca-se a ausência de estratégias de jogos sérios que reduz o engajamento e a motivação dos utilizadores durante o treinamento. Além disso, a impossibilidade de visualizar a prótese no coto pode comprometer a sensação de pertencimento.

Por fim, o teste com apenas dois voluntários fisicamente aptos limita a validação e generalização dos resultados para o público-alvo de amputados.

2.5.Considerações Correlatadas

A Tabela 1 apresenta uma análise comparativa dos trabalhos relacionados que utilizam a RA como interface para treinamento de amputados. Por ela evidenciada as diferenças nas abordagens e lacunas importantes.

Autor	Rastreamento sem Marcadores	Prótese mioelétrica	Jogos sérios	Incorporação
Boschmann et al., 2016	Não	Sim	Não	Não
Lima et al., 2022	Não	Não	Sim	Não
Palermo et al., 2019	Sim	Sim	Não	Não
Sharma et al., 2018	Sim	Sim	Não	Não

Nota-se que apenas os sistemas AR-Rehabilitation e HoloPHAM utilizam rastreamento sem marcadores, conferindo maior praticidade e flexibilidade. Por outro lado, o Sistema TAC e o MRProsthesis ainda dependem de marcadores, o que pode comprometer a continuidade do treinamento em situações de falha de visibilidade.

Tabela 1 – Comparação entre trabalhos relacionados.

Quanto ao tipo de prótese, os sistemas Sistema TAC, AR-Rehabilitation e HoloPHAM focam em próteses mioelétricas, enquanto MRProsthesis aborda próteses controladas por alças, preenchendo a lacuna no período entre a pós-amputação e a fase pré-prótese.

A inclusão de jogos sérios, essencial para maior engajamento, é vista apenas no MRProsthesis, ausente nos demais estudos. Contudo, nenhum dos trabalhos explora incorporação sensorial entre corpo e prótese, uma dimensão fundamental para melhorar a aceitação do dispositivo.

Essa análise reforça a necessidade de sistemas que integrem tecnologias avançadas, estratégias de gamificação e abordagens que promovam a integração emocional e funcional entre o utilizador e a prótese. Por fim, este artigo propõe uma solução que explora esse aspecto, utilizando RA e jogos sérios para criar um ambiente de treinamento mais integrado.

3. Descrição do Projeto

O sistema ARProsthesis foi desenvolvido para apoiar o treino de indivíduos com amputações de membros superiores, especialmente transradiais e desarticulações de punho. Definiu-se, em reuniões quinzenais com especialistas em realidade aumentada, engenharia biomédica e reabilitação, que o sistema deveria replicar o teste funcional Box and Blocks em um ambiente aumentado, incorporando estratégias de jogos sérios, como sistema de pontuação para medições de precisão e tempo, além de armazenar dados de desempenho para análises futuras.

Além da interface de treino em realidade aumentada, o sistema dispõe de uma interface de gestão, que permite o registo de utilizadores, consulta de históricos, seleção e calibração de sinais EMG por meio de análise gráfica.

3.1. Descrição Funcional do Exercício Box and Blocks

O exercício Box and Blocks é amplamente utilizado na reabilitação de amputados de membros superiores. O objetivo do exercício é melhorar a destreza manual e a coordenação motora fina do utilizador, aumentando consequentemente a amplitude de movimento e a qualidade de vida. Para realizar o exercício, o indivíduo em reabilitação deve estar em posse da sua prótese real, que deve estar pronta para uso e devidamente ajustada ao seu membro residual.

O exercício é realizado utilizando uma caixa preenchida com blocos, dividida ao meio. Inicialmente, os blocos estão posicionados em um lado da caixa, e o utilizador deve usar a prótese para transferir os blocos de um lado para o outro. A abertura e o fechamento da prótese são controlados por leituras dos sinais EMG, com o leitor de EMG localizado no encaixe do dispositivo protético.

Os passos para realizar o exercício são os seguintes:

1. O paciente deve sentar-se numa cadeira confortável com a caixa de blocos à sua frente, posicionada sobre uma superfície plana.
2. O paciente deve usar a sua prótese real e o braço residual para mover os blocos de um lado da caixa para o outro.

3. Os blocos podem ser movidos um a um, em grupos ou em sequência específica, conforme a orientação do terapeuta.

O Box and Blocks também é utilizado como um teste para avaliar o progresso do paciente na reabilitação. Os testes são realizados de duas formas:

1. Cronometrando o tempo que o paciente leva para transferir todos os blocos de um lado da caixa para o outro.
2. Registrando o número de blocos que o paciente consegue transferir em um período de tempo específico, geralmente de um minuto.

3.2. Descrição do Sistema ARProsthesis

A proposta supera a principal limitação da utilização do exercício Box and Blocks por usuário recém amputados, que é a necessidade de uma prótese real. No sistema ARProsthesis, o real e o virtual são misturados, permitindo que o paciente utilize uma prótese virtual juntamente com o seu membro residual.

O exercício Box and Blocks realizado no ARProsthesis é semelhante ao realizado com objetos reais. O treino simula o movimento de transferir blocos de forma idêntica. É realizado utilizando uma caixa virtual preenchida com blocos virtuais. A caixa possui uma divisão no meio, e os blocos são inicialmente posicionados em um lado da caixa virtual. O indivíduo em treino utiliza a prótese virtual para transferir os blocos de um lado da caixa para o outro.

Os objetos virtuais, como a caixa e os blocos, foram projetados para se assemelharem aos objetos reais utilizados no treino convencional. Assim como no treino no mundo real, o exercício pode ser adaptado às necessidades específicas de cada utilizador. No entanto, o procedimento padrão foi ajustado devido ao uso de dispositivos de visualização e rastreamento. O procedimento segue estas diretrizes:

1. O paciente deve sentar-se numa cadeira confortável, de frente para uma mesa plana, com o dispositivo HTC Vive Tracker 2.0, preferencialmente posicionado no centro à direita.
2. Com a assistência de um terapeuta, o paciente deve vestir o HTC Vive Pro 2 HMD, que inclui uma câmara StereoLabs Mini Zed.
3. O terapeuta deve auxiliar o paciente a colocar a braçadeira Myo Gesture Control no braço residual.
4. O paciente deve realizar, com a ajuda do terapeuta, uma calibração de 5 segundos do dispositivo Myo.
5. Ao iniciar os exercícios, o paciente utiliza a prótese virtual e o braço residual para transferir os blocos de um lado da caixa virtual para o outro.
6. A aplicação instrui o paciente a mover os blocos um a um, em grupos ou numa sequência específica.

Como o sistema é personalizável, as primeiras sessões de exercício começam com poucos blocos e gradualmente aumentam o número à medida que o paciente progride. O terapeuta incentiva o paciente a utilizar diferentes estratégias para mover os blocos. Além disso, o paciente é orientado a fazer pausas regulares para evitar fadiga. Para

avaliar o progresso do paciente na reabilitação, o sistema armazena as informações de treino de cada sessão.

4. Arquitetura da Aplicação ARProsthesis

O sistema de treino de reabilitação ARProsthesis é composto por cinco módulos essenciais: Captura, Interface, Rastreamento, Gestos e Processamento. A figura 1 ilustra graficamente a arquitetura do sistema.

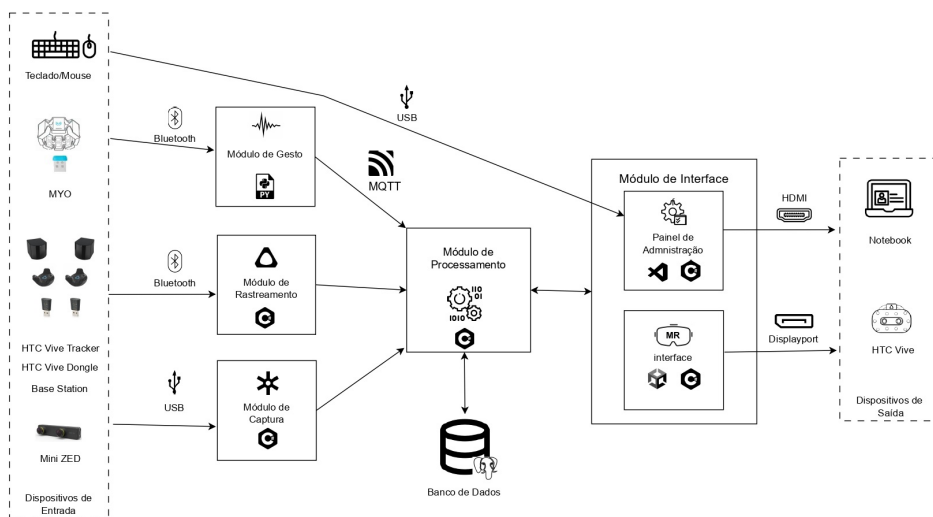


Figura 1 – Sistema de treinamento para amputados ARProsthesis.

4.1. Captura

O módulo de captura é responsável pela aquisição de imagens do ambiente real. Após a captura, as imagens, juntamente com informações adicionais provenientes de giroscópios e acelerómetros que contêm a posição, rotação e orientação da câmara de captura, são transmitidas ao módulo de processamento.

A aquisição de imagens do ambiente real é realizada pela câmara estereoscópica Stereolabs Zed Mini. Para alcançar resultados ótimos, recomenda-se preservar a calibração de fábrica, conforme indicado pelo fabricante. Já para a alimentação de energia e transmissão de dados, é necessário conectar a câmara a um computador com uma porta USB Type-C que suporte até 3 Gb/s.

O uso da câmara Stereolabs Zed Mini é justificado principalmente pela redução da latência de transmissão e pelo aumento da resolução da câmara. As câmaras originais do Vive Pro AR têm uma latência de 200 ms, enquanto a Zed Mini possui uma latência de 60 ms. Essa redução melhora a capacidade da aplicação de sobrepor objetos virtuais a objetos reais em movimento, garantindo maior precisão no alinhamento.

A resolução máxima das câmaras originais do Vive Pro AR é de 480p, enquanto a Zed Mini suporta até 2K, opera a 60 fps e possui um campo de visão de 110 graus, replicando a distância entre os olhos humanos (63 mm). Essa resolução superior melhora a experiência imersiva do utilizador, permitindo maior detalhe no ambiente real. Além disso, a Zed Mini utiliza visão estereoscópica para capturar informações de profundidade, determinando a distância entre objetos no ambiente real. Essas informações são usadas para melhorar a precisão do rastreamento de movimento, que é gerenciado pelo módulo de rastreamento, responsável por lidar com as informações dos HTC Vive Trackers. A figura 2 ilustra a HTC Vive com a Camera Stereolabs Zed Mini acoplada.



Figura 2 – HMD HTC Vive Pro 2 com Stereolabs Zed Mini acoplada.

4.2. Rastreamento

O módulo de rastreamento é responsável por receber as coordenadas de posição, rotação e orientação dos dispositivos HTC Vive Tracker 2.0.

Os HTC Vive Trackers são dispositivos externos usados para rastrear objetos físicos na RA. No ARProsthesis, dois rastreadores são utilizados: um é fixado no antebraço ou braço residual do amputado, e o outro é colocado na mesa onde o utilizador realiza o treino.

Esses rastreadores transmitem informações utilizando o protocolo de comunicação sem fios SteamVR Tracking, que emprega luz infravermelha para rastrear posição, rotação e orientação no espaço. Cada rastreador possui quatro sensores infravermelhos que enviam sinais para as Base Stations 2.0 do SteamVR, responsáveis por criar uma área de rastreamento através de lasers. A figura 3 ilustra a Área de cobertura das Base Stations SteamVR 2.0 utilizada na aplicação de treinamento.

As informações recebidas são transmitidas ao módulo de rastreamento, que as envia ao módulo de processamento. Este combina os dados do rastreamento com informações dos módulos de captura, interface e gestos para criar o ambiente de treino misto.

A escolha de rastreamento sem marcadores foi motivada pela necessidade de rastrear objetos reais fora do campo de visão do utilizador, eliminando interrupções de imersão durante o treino.



Figura 3 – Área de cobertura das Base Stations SteamVR 2.0.

4.3. Gesto

O módulo Gesture desempenha um papel crucial no controle da abertura e fechamento de uma prótese virtual, sendo esse controle realizado através da captura do sinal EMG (eletromiografia) do antebraço do usuário. O sinal EMG é gerado pelo tecido muscular, que conduz potenciais elétricos semelhantes aos nervosos, conhecidos como potenciais de ação muscular.

O dispositivo Myo Gesture Control Armband é usado para capturar esses potenciais de ação muscular. Em usuários sem amputações, o Myo é colocado no antebraço, permitindo que os sensores de EMG fiquem em contato direto com a pele sobre os músculos do braço. Isso possibilita a detecção de variações nos níveis de tensão elétrica durante a contração e o relaxamento muscular.

Entretanto, em indivíduos com amputações de membros superiores, a posição dos sensores e a escolha dos músculos adequados exigem atenção devido às mudanças na anatomia do antebraço e na atividade muscular. O Myo possui 8 canais para leituras de EMG, o que facilita a escolha do canal apropriado.

O sinal EMG capturado pelo Myo é então processado pelo módulo de processamento, que o interpreta, suaviza utilizando o Valor Absoluto Médio (MAV) e classifica o sinal como indicativo de abertura ou fechamento da prótese virtual. O processo de classificação de abertura e fechamento da prótese virtual baseado no EMG funciona da seguinte maneira: a interface de gerenciamento exibe um gráfico com as leituras dos oito canais de EMG do antebraço do usuário, permitindo que o terapeuta escolha o canal mais adequado para a abertura e fechamento da prótese virtual. O terapeuta seleciona o canal do Myo para detectar a abertura e o fechamento da mão. A figura 4 ilustra a tela de escolha do canal de sinal.

A aplicação inicia um período de calibração de cinco segundos, durante o qual o usuário contrai os músculos como se estivesse fechando a prótese. Simultaneamente, a aplicação calcula o Valor Absoluto Médio (MAV) do sinal do canal selecionado e determina o

limiar para abertura e fechamento da mão da prótese virtual utilizando as fórmulas (1). Após a calibração, o módulo de processamento começa a transmitir os dados EMG em tempo real para o módulo de interface. Essa transmissão ocorre via o protocolo Message Queuing Telemetry Transport (MQTT). A aplicação calcula o MAV do canal selecionado para cada amostra de dados EMG. O algoritmo compara o MAV atual com o limiar calculado durante a calibração (fórmula 2). Se o MAV atual for menor ou igual ao limiar, a mão é classificada como aberta. Se for maior que o limiar, a mão é classificada como fechada. A figura 5 ilustra as fórmulas 1 e 2 responsáveis pela classificação do sinal EMG.

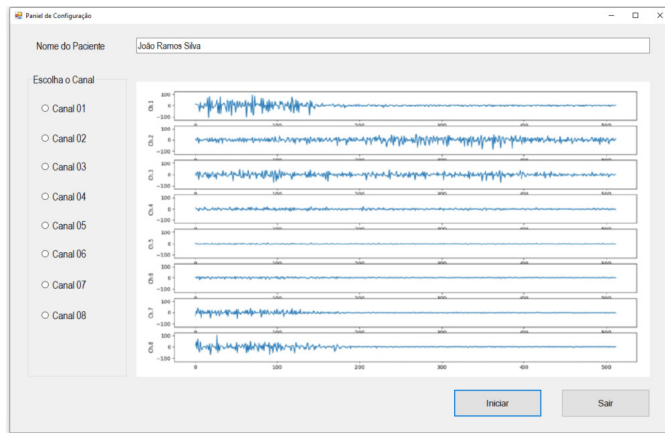


Figura 4 – Leitura de oito canais de sinal EMG pelo Myo.

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

$$\text{threshold} = \text{MAV} \times 0.45 \quad (2)$$

Figura 5 – Sistema de classificação do sinal EMG.

Por fim, o Myo fornece um feedback vibratório para indicar ao usuário que seu gesto foi reconhecido corretamente, ajudando-o a aprender os movimentos corretos para controlar a prótese virtual.

4.4. Processamento

O módulo de processamento combina informações dos módulos de captura, rastreamento e gestos para garantir a renderização precisa do ambiente de treino misto.

O processamento também compensa o atraso entre a captura das imagens pela câmara Zed Mini e a sua exibição na interface, recalibrando continuamente para garantir que

a prótese responda em tempo real aos movimentos do braço residual. Além disso, o módulo de processamento envia feedback visual e vibratório para os módulos de interface e rastreamento, respetivamente, e armazena os dados dos utilizadores na base de dados da aplicação.

Para realizar estas tarefas, o módulo de processamento requer um computador com especificações avançadas, incluindo um processador Intel Core i7, 16 GB de RAM e uma placa gráfica NVIDIA GeForce GTX 2060, além de software específico, como Unity 2019.4.40f1 e SteamVR.

4.5. Interface

O módulo de interface do sistema de reabilitação ARProsthesis é responsável por renderizar o ambiente de treinamento em RA e fornecer feedback ao utilizador. Esse módulo é composto por dois componentes principais: a Plataforma de Gestão e a Aplicação de Treinamento.

A Plataforma de Gestão funciona como um painel administrativo, responsável pela gestão da aplicação de treino. Por meio de uma interface gráfica intuitiva, permite a visualização e edição de dados relacionados a utilizadores, sessões de treino e resultados obtidos durante as atividades. Já a interface de treinamento foi detalhada anteriormente na Seção 3.2 deste estudo. A figura 6 a interface do Sistema de treinamento para amputados ARProsthesis

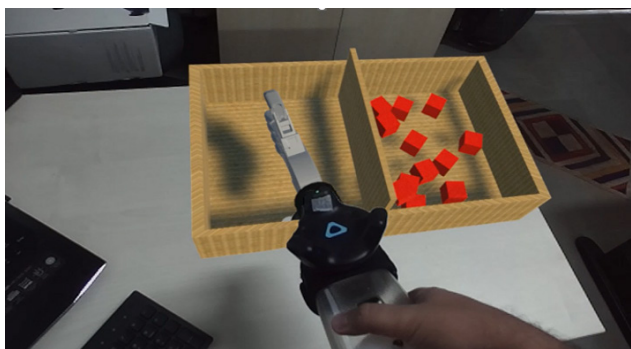


Figura 6 – Interface do Sistema de treinamento para amputados ARProsthesis.

Conforme ilustrado na Figura 3, o sistema de treino para amputados ARProsthesis utiliza como dispositivo principal o headset HTC Vive Pro 2 AR. Esse dispositivo possibilita aos utilizadores a imersão em um ambiente de realidade mista, projetado para simular exercícios como o Box and Blocks, entre outros cenários adaptados para o treino de habilidades motoras e cognitivas.

5. Resultados

Esta pesquisa está vinculada a um projeto registado na plataforma do Ministério da Saúde, atendendo a todos os requisitos necessários. Os testes foram realizados

no Laboratório de Realidade Virtual e Aumentada e no Laboratório de Engenharia Biomédica da Universidade. Em ambos os locais, foi disponibilizada uma sala dedicada para a instalação do equipamento.

Cada utilizador do sistema completou um questionário de avaliação de perfil antes da utilização, para avaliar o seu nível de experiência com tecnologia e RA. Após utilizar a ferramenta ARProsthesis, os utilizadores responderam ao questionário PSSUQ, destinado a avaliar a usabilidade do sistema.

O questionário PSSUQ mede a satisfação percebida pelos utilizadores em relação a sistemas ou aplicações computacionais, produzindo quatro pontuações: uma pontuação geral e três subescalas:

- Satisfação geral do sistema: média das respostas aos itens 1 a 16.
- Utilidade do sistema: média dos itens 1 a 6.
- Qualidade da informação: média dos itens 7 a 12.
- Qualidade da interface: média dos itens 13 a 15.

O questionário utiliza uma escala Likert de 7 pontos, em que 1 representa “Concordo totalmente” e 7 “Discordo totalmente”. Pontuações mais baixas indicam níveis mais altos de satisfação.

5.1. Avaliação de Perfil

Por meio dos questionários de avaliação de perfil dos usuários, foram coletados dados relevantes. Vale destacar que todos os sete participantes da pesquisa, que não eram amputados, eram do sexo masculino, com idades entre 25 e 50 anos. Foram realizadas três perguntas relacionadas à tecnologia.

A primeira pergunta foi: “Qual é o seu nível de experiência no uso de tecnologia e computadores?”. Do total da amostra, 14% consideraram sua experiência excelente, 29% avaliaram como muito boa, 43% classificaram como boa e 14% declararam ter pouca experiência tecnológica. Nenhum dos respondentes avaliou sua experiência como terrível.

A segunda pergunta foi: “Você está familiarizado com Realidade Aumentada?”. Do total, 70% responderam sim, 15% responderam não, e outros 15% não forneceram resposta.

A terceira pergunta abordou o uso de tecnologia para treinamento, com o questionamento: “Você já participou de algum treinamento utilizando dispositivos tecnológicos?”. Do total da amostra, 85% responderam que nunca utilizaram tecnologia para fins de treinamento, enquanto 15% afirmaram já ter participado.

Por fim, os dados coletados a partir dos questionários de avaliação de perfil de usuário indicam que a maioria dos participantes são homens jovens com experiência média no uso de tecnologia. A maioria dos participantes está familiarizada com RA, mas apenas uma pequena parte já utilizou dispositivos tecnológicos para treinamento.

5.2. Usabilidade do Sistema

O sistema ARProsthesis foi avaliado utilizando o questionário de usabilidade PSSUQ, que mede quatro métricas de usabilidade: utilidade do sistema, qualidade da informação, qualidade da interface e usabilidade geral. As avaliações foram realizadas através de uma média aritmética simples.

A pontuação média de utilidade do sistema foi de 5,6, refletindo um nível aceitável de utilidade. O item com menor classificação foi: “Consegui concluir tarefas e cenários rapidamente utilizando este sistema”, o que é expectável, dado que o sistema foi concebido para treino, onde as tarefas tendem a ser mais complexas.

A pontuação média de qualidade da informação foi de 6,1, indicando um bom nível de qualidade da informação. O item com menor classificação foi: “Sempre que cometi um erro ao utilizar o sistema, consegui recuperar de forma fácil e rápida”, o que é previsível, uma vez que os utilizadores estão mais propensos a cometer erros num sistema de treino.

A pontuação média de qualidade da interface foi de 6,4, refletindo um excelente nível de qualidade da interface. O item com menor classificação foi: “Este sistema tem todas as funcionalidades e capacidades que eu esperava”, o que é compreensível para uma versão inicial do sistema, que pode ainda não incluir todas as funcionalidades desejadas.

A pontuação média de usabilidade geral foi de 5,9, representando um nível aceitável de usabilidade geral

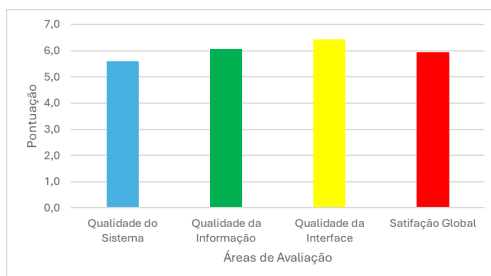


Figura 7 – Avaliação de usabilidade do Sistema de Treinamento para amputados ARProsthesis.

Por fim, os resultados da avaliação de usabilidade sugerem que o sistema ARProsthesis apresenta um nível aceitável de usabilidade. Contudo, existem algumas áreas a melhorar, como a inclusão de funcionalidades adicionais.

6. Conclusões

O sistema ARProsthesis representa um avanço no uso de tecnologias de RA para o treinamento e reabilitação de amputados de membros superiores. A utilização de rastreamento sem marcadores, combinada com estratégias de jogos sérios, mostrou

potencial para promover uma experiência de treinamento mais imersiva e intuitiva. Os resultados preliminares, baseados em métricas de usabilidade, indicam níveis satisfatórios de utilidade e qualidade da interface, evidenciando a viabilidade da aplicação para facilitar a adaptação funcional dos usuários a próteses virtuais.

Apesar do progresso alcançado, o estudo reconhece algumas limitações, como a necessidade de testes com amostras mais amplas e diversificadas, bem como a inclusão de funcionalidades adicionais que possam aprimorar ainda mais a experiência do usuário e a eficácia do sistema. Futuros trabalhos podem explorar métodos para intensificar a sensação de incorporação da prótese virtual, consolidando o uso da tecnologia como uma ferramenta indispensável na reabilitação de amputados.

Por fim, a proposta do ARProsthesis estabelece uma base sólida para o desenvolvimento de soluções tecnológicas inovadoras na área de reabilitação, oferecendo não apenas uma alternativa eficiente aos métodos tradicionais, mas também novas perspectivas para melhorar a qualidade de vida dos indivíduos com amputações.

Referências

- Boschmann, A., Dosen, S., Werner, A., Raies, A., & Farina, D. (2016). A novel immersive augmented reality system for prosthesis training and assessment. In *2016 IEEE-EMBS International Conference on Biomedical and Health Informatics (BHI)* (pp. 280–283). <https://doi.org/10.1109/BHI.2016.7455889>
- Both, J. E., Badke, M. R., Daandels, N., Hepp, D. R., & Santos, A. M. (2011). Acompanhamento de paciente com amputação de membro superior: um estudo de caso. *Revista Contexto & Saúde*, 11(20), 611–616.
- Carvalho, J. A. (2003). *Amputações de membros inferiores: em busca da plena reabilitação*. Malone.
- Cavalcante, R. S., Lamounier, E., Soares, A., Gaballa, A., & Cabibihan, J. J. (2024). Uso de feedback sensorial em um ambiente baseado em jogos sérios e realidade virtual imersiva para treinamento de amputados de membros superiores. *RISTI - Revista Ibérica de Sistemas e Tecnologias de Informação*, (E66), 64-77.
- Castillo, A. M. C., Chantre, V. R. Z., Velasco, E. P., & Villalba, K. M. (2020). Ecosistema Virtual Gamificado de Francisco José de Caldas. *RISTI - Revista Ibérica de Sistemas e Tecnologias de Informação*, (E28), 139-150.
- Costa, R. (2017). *Adaptação do usuário de próteses mioelétricas: Implicações na aprendizagem de movimentos de mão* [Tese de doutorado, Universidade Federal do Espírito Santo]. Repositório UFES. https://sappg.ufes.br/tese_drupal/tese_11375_Tese_Regina%20Mamede%20Costa.pdf
- Faria, A., & Miranda, G. L. (2023). Efeitos da realidade aumentada na aprendizagem das ciências naturais: uma revisão sistemática da literatura. *RISTI - Revista Ibérica de Sistemas e Tecnologias de Informação*, (50), 44-57. <https://doi.org/10.17013/risti.50.44-57>

- Fernandes, F. G., Moraes, I. A., Almeida, P. A. M. T., Oliveira, L. C., Cardoso, A., & Júnior, E. A. L. (2016). Grab the life: Serious game to support physical rehabilitation using virtual reality and wearable myo. In *Proceedings of the XVIII Symposium on Virtual and Augmented Reality (SVR)* (pp. 145–149). IEEE. <https://doi.org/10.1109/SVR.2016.33>
- Igual, C., Pardo Jr, L. A., Hahne, J. M., & Igual, J. (2019). Myoelectric control for upper limb prostheses. *Electronics*, 8(11), 1244. <https://doi.org/10.3390/electronics811244>
- Jette, A. M. (2017). The promise of assistive technology to enhance work participation. *Physical Therapy*, 691-692. <https://doi.org/10.1093/ptj/pzx054>
- Kirner, C., & Siscoutto, R. (2007). Realidade virtual e aumentada: conceitos, projeto e aplicações. In *Proceedings of the IX Symposium on Virtual and Augmented Reality (SVR)* (pp. 2-21). SBC.
- Lima, D. A. C., Lamounier Júnior, E. A., Cardoso, A., Soares, A. B., Cavalcante, R. S., Mattioli, L. R., & Silva, A. C. (2022). An Augmented Reality application for training upper limb amputees. In *Proceedings of the 24th Symposium on Virtual and Augmented Reality* (pp. 97-104). <https://doi.org/10.1145/3604479.3604528>
- Ministério da Saúde. Secretaria de Atenção à Saúde. Departamento de Ações Programáticas Estratégicas. (2013). Diretrizes de atenção à pessoa amputada. Ministério da Saúde. https://bvsms.saude.gov.br/bvs/publicacoes/diretrizes_atencao_pessoa_amputada.pdf
- Palermo, F., Cognolato, M., Eggel, I., Atzori, M., & Müller, H. (2019). An augmented reality environment to provide visual feedback to amputees during sEMG data acquisitions. In *Proceedings of the 20th Annual Conference on Towards Autonomous Robotic Systems (TAROS 2019)* (pp. 3-14). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-25332-5_1
- Pastre, C. M., Salioni, J. F., Oliveira, B. A., Micheletto, M., & Júnior, J. N. (2005). Fisioterapia e amputação transtibial. *Arq Ciênc Saúde*, 12(2), 120-124.
- Sharma, A., Hunt, C. L., Maheshwari, A., Osborn, L., Lévy, G., Kaliki, R. R., Soares, A., & Thakor, N. (2018). A mixed-reality training environment for upper limb prosthesis control. In *2018 IEEE Biomedical Circuits and Systems Conference (BioCAS)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/BIOCAS.2018.8584739>
- Sun, Y. L., Hunt, C., Niu, W., Li, Z., Cyrino, G., Cavalcante, R., & Thakor, N. (2021). A comparison between virtual reality and augmented reality on upper-limb prosthesis control. In *2021 International Symposium on Electrical, Electronics and Information Engineering* (pp. 521-528). <https://doi.org/10.1145/3459104.3459189>
- Uellendahl, J. E. (2000). Upper extremity myoelectric prosthetics. *Physical medicine and rehabilitation clinics of North America*, 11(3), 639-652. [https://doi.org/10.1016/S1047-9651\(18\)30124-4](https://doi.org/10.1016/S1047-9651(18)30124-4)