

DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE DE SISTEMAS DE POSICIONAMENTO DE END-EFFECTORS EM ROBÔS ANTROPOMÓRFICOS ATRAVÉS DE REALIDADE AUMENTADA

Luigi Pieroni da Silva ¹; Diego Hernandez Arjoni ²

¹ Aluno de Iniciação Científica do Instituto Mauá de Tecnologia (IMT);

² Professor do Instituto Mauá de Tecnologia (IMT).

Resumo. *Este artigo apresenta o estudo do posicionamento de end-effectors em ambientes reais para a execução de movimentos com robôs antropomórficos, utilizando técnicas de Realidade Aumentada (RA) aplicadas à Indústria 4.0. O objetivo do estudo foi comparar o desempenho de dois dispositivos de RA, o headset Meta Quest 3 e o HoloLens 2, por meio das técnicas de Image Detection e Object Tracking. A pesquisa buscou avaliar a precisão, responsividade e aplicabilidade dessas abordagens em cenários industriais simulados. Os resultados evidenciam tanto a funcionalidade quanto as limitações de cada técnica, demonstrando o êxito no posicionamento de objetos virtuais e a viabilidade de aplicação em sistemas robóticos. Conclui-se que o uso da Realidade Aumentada pode contribuir significativamente para a melhoria do desempenho, precisão e redução de custos em processos industriais baseados em robótica.*

Introdução

A necessidade de inovação constante e aprimoramento tecnológico é fundamental para que as indústrias se mantenham competitivas e sustentáveis em um mercado globalizado e dinâmico. Neste contexto, tecnologias imersivas como Realidade Virtual (RV), Realidade Aumentada (RA) e Realidade Misturada (RM) representam um pilar estratégico da Indústria 4.0, permitindo a otimização de fluxos produtivos, a redução de erros humanos, a diminuição de custos operacionais e o aumento da produtividade e da qualidade. Mais do que uma ferramenta técnica, a RA transforma a relação entre operadores, máquinas e dados, tornando os processos mais interativos, inteligentes e adaptáveis às necessidades da produção. Seus benefícios se estendem desde o planejamento e monitoramento de tarefas até a execução de operações complexas, reforçando sua aplicabilidade em diversos setores industriais (MÉNDEZ e VELÁZQUEZ, 2024). A Figura 1 apresenta uma síntese dos principais ganhos observados com a adoção da RA nesses ambientes.

Figura 1 - Benefícios da Realidade Aumentada Para a Indústria



Fonte: (SEBRAE, 2023)

Ainda que pertençam a um agrupamento de tecnologias imersivas, as utilidades, e características de RA, RV e RM visuais possuem diferenças que podem ser compreendidas como: a RV substitui completamente a percepção sensorial do usuário por um ambiente digital imersivo, enquanto a RA combina o mundo físico e elementos virtuais, mantendo a percepção do ambiente real e adicionando informações digitais sobre ele. Já a RM se posiciona entre essas duas abordagens e permite a interação dinâmica entre objetos reais e virtuais, criando situações em que elementos digitais podem ser manipulados, ocultados ou influenciados pelo ambiente físico. Essas três tecnologias formam o espectro da realidade estendida e são aplicadas para simulação, análise e operação em cenários complexos, como comissionamento industrial, treinamento e manufatura, ampliando as possibilidades de controle, visualização e precisão nas tarefas (MILGRAM, TAKEMURA, *et al.*, 1995) (FLAVIÁN, IBÁÑEZ-SÁNCHEZ e ORÚS, 2019) (MUJUMDAR, 2022).

Um outro aspecto do ambiente industrial está relacionado com a interação humano-robô (HRI), fundamento essencial para garantir segurança, previsibilidade e eficiência operacional. A confiança dos operadores no sistema robótico é determinante para sua aceitação e colaboração. Estudos indicam que o antropomorfismo, semelhança estrutural e comportamental do robô com o corpo humano, fortalece essa confiança. Dessa forma, robôs antropomórficos, por apresentarem movimentos e proporções similares aos humanos, promovem interações mais intuitivas, seguras e eficientes em ambientes industriais (SCHREITER, MORILLO-MENDEZ, *et al.*, 2022).

Diversas pesquisas recentes têm demonstrado o potencial da realidade aumentada aplicada ao posicionamento e controle de objetos virtuais em ambientes industriais. Um dos trabalhos mais representativos é o de Ostanin, *et al.* (2020), no qual os autores analisaram o uso do headset HoloLens 2 como dispositivo exclusivo de realidade aumentada. O estudo evidenciou que o HoloLens 2 apresenta alta confiabilidade e precisão no registro espacial entre objetos reais e virtuais, permitindo escalonamento adequado do ambiente digital sobre o físico. Os autores destacam a estabilidade do rastreamento e a resposta robusta mesmo em cenários dinâmicos, reforçando a viabilidade da tecnologia para aplicações industriais.

Outro trabalho de relevância é o de Dogangun, Bahar *et al.* (2024) que investigaram a realidade mista por meio do Meta Quest 3 para programação de robôs industriais por demonstração. O estudo apresentou o sistema RAMPA, que integra RA, XR e técnicas de aprendizado de máquina, possibilitando que o operador programe um robô manipulador manipulando diretamente objetos virtuais sobrepostos ao ambiente real. Os autores destacaram que o método reduz o tempo de programação e torna o processo mais intuitivo, possibilitando que operadores com menor experiência técnica realizem tarefas complexas de maneira eficiente.

Por fim, um terceiro grupo de estudos analisa métodos de rastreamento e posicionamento visual baseados em imagens-alvo e reconhecimento espacial. Ahmadyan, Hou *et al.* (2020) propõem um sistema de *object tracking* tridimensional capaz de rastrear objetos móveis com seis graus de liberdade e sem calibração prévia. Essa abordagem mostrou-se eficiente para aplicações dinâmicas, permitindo ancoragem precisa entre modelos virtuais e objetos físicos durante a execução de movimentos. Resultados semelhantes foram reportados por Shott, Heinrich *et al.* (2022), que avaliaram um sistema baseado em múltiplos *image targets* e registraram um desvio médio inferior a dois centímetros em 385 posições diferentes, reforçando o potencial da técnica para manufatura e treinamento robotizado.

Em conjunto, estes trabalhos demonstram que o uso de realidade aumentada e realidade mista, aliado a técnicas avançadas de rastreamento espacial, permite a criação de sistemas industriais mais flexíveis, seguros e intuitivos. As evidências reforçam que a evolução dos *headsets* e algoritmos de rastreamento tem ampliado significativamente a precisão e a estabilidade do posicionamento virtual, tornando essas tecnologias cada vez mais adequadas ao comissionamento, programação e operação de robôs antropomórficos em ambientes fabris.

Desta forma, o objetivo deste trabalho é, em continuidade à pesquisa de Morales e Arjoni (2024), analisar o comportamento do posicionamento de um end-effector virtual instanciado por RA no órgão terminal de um robô antropomórfico. Para isso, foram comparados dois dispositivos de RA

e RM: o HoloLens 2 da Microsoft e o Meta Quest 3 da Meta, que apresentam arquiteturas e modos de operação distintos. Foram aplicadas duas técnicas de ancoragem e rastreamento de objetos virtuais, *Image Target* e *Object Tracking*, de modo a avaliar diferenças de estabilidade, responsividade e precisão no alinhamento espacial entre o modelo virtual e o manipulador físico. A comparação dos resultados permitirá identificar benefícios e limitações de cada dispositivo e cada técnica, para aplicações industriais envolvendo posicionamento virtual de *end-effectors* e comissionamento de células robóticas.

Material e Métodos

Nesta seção são abordados os equipamentos e sistemas necessários para efetuar o estudo de técnicas de posicionamento RA, bem como os procedimentos e implementações destas técnicas.

Inicialmente, como base do estudo, utilizou-se um ambiente físico controlado, baseado em um robô da série Yaskawa MHFJ (Figura 2), fabricado pela Yaskawa Electric Corporation. Esse modelo possui seis graus de liberdade, característica típica de manipuladores antropomórficos, o que lhe confere ampla capacidade de movimentação em posição e orientação. O manipulador serviu como base para a movimentação dos objetos virtuais, que deverão acompanhar com precisão seus deslocamentos físicos. Nesse caso, a garra original do robô foi removida e posteriormente modelada em ferramentas de design tridimensional, sendo utilizada como objeto virtual a ser visualizado por meio da RA.

Figura 2 – Robô Antropomórfico Utilizado no Estudo



Fonte: Autoria Própria

O uso de RA e RM pode ser executado através de diversos dispositivos com diferentes graus de complexidade que vão desde smartphones até sistemas oculares como HoloLens 2 e Meta Quest 3, considerando que o ambiente industrial possui a necessidade de liberdade para o manuseio de ferramentas e outros dispositivos, optou-se pela utilização de um sistema ocular, eliminando a necessidade de o operador segurar equipamentos durante a execução das tarefas.

Entre as diversas opções disponíveis no mercado, destaca-se o HoloLens 2, da Microsoft (Figura 3), um dos dispositivos mais avançados e amplamente utilizados em pesquisas voltadas à Realidade Aumentada (MICROSOFT, 2024) (MICROSOFT, 2024b). Projetado para ser um equipamento de RA autônomo e sem fio, que proporciona experiências integrando o mundo físico e digital de forma natural e equipado com sensores avançados, incluindo câmeras de profundidade e rastreamento ocular, o HoloLens 2 apresenta alto desempenho em rastreabilidade, precisão e interação em tempo real. Estudos citados anteriormente, como os de Morales e Arjoni (2024), já demonstraram sua eficácia e aplicabilidade em técnicas de posicionamento e ancoragem de objetos

virtuais, reforçando sua adequação para o presente estudo. Em ambientes industriais, o dispositivo é amplamente utilizado para visualização de dados em tempo real, treinamento remoto e assistência técnica, aumentando a produtividade e precisão das operações, o que viabilizou a aplicação de técnicas como o método de *Image Targets* estudado neste trabalho (OSTANIN, MIKHEL, *et al.*, 2020) (MUQEET, JAVED, *et al.*, 2022).

Figura 3 – Microsoft HoloLens 2



Fonte: Autoria Própria

Como complemento, considerando a limitação do HoloLens 2 em oferecer dispositivos rastreáveis integrados, como controles, optou-se também pela utilização do óculos Meta Quest 3 (Figura 4), um *headset* de Realidade Virtual (RV) e Realidade Mista (RM) que combina a imersão completa de ambientes virtuais com a sobreposição de elementos digitais no mundo real. Trata-se de um dispositivo autônomo, que dispensa conexão com PCs ou consoles, oferecendo maior mobilidade e praticidade ao usuário (META, 2025).

Figura 4– Óculos de realidade mista Meta Quest 3



Fonte: Autoria Própria

O Meta Quest 3 possui dois controles, denominados Touch Plus e suporte a *hand tracking*, permitindo o reconhecimento preciso dos movimentos das mãos. Para este estudo, foram utilizados os controles físicos, que oferecem maior estabilidade e precisão nas interações e no rastreamento de movimentos, já que sua posição pode ser captada por meio de âncoras, viabilizando a implementação do método *Object Tracking*. Essa combinação de recursos torna o Meta Quest 3 uma plataforma versátil e acessível para aplicações em realidade aumentada e mista, especialmente em cenários que exigem controle espacial preciso, além de ser mais intuitivo e de fácil utilização quando comparado ao HoloLens 2.

Dessa forma, o estudo envolve dois tipos de *headsets* e dois métodos de virtualização. Em vista de trabalhos anteriores, optou-se pela aplicação e estudo de duas técnicas, *Image Targets* e *Object Tracking*, sendo que, no caso dos *Image Targets*, algumas soluções de evolução serão propostas como os *Multiple Image Targets*. Ainda assim, o HoloLens 2 não permite a aplicação efetiva e precisa de um *Object Tracking*, que, dessa forma, será estudado apenas no Meta Quest 3. O desenvolvimento destas técnicas será explicado a seguir.

Image Target

Um *Image Target* em realidade aumentada consiste na utilização de uma imagem física como elemento de referência para estimativa de pose e ancoragem de hologramas no espaço tridimensional. Quando o marcador é identificado pela câmera do dispositivo, algoritmos de visão computacional realizam a extração de características, correspondência de pontos e cálculo de matriz de homografia, permitindo determinar posição e orientação do objeto virtual sobre o plano da imagem. A eficácia do método depende diretamente da qualidade visual do marcador, considerando contraste, variação de textura e ausência de padrões repetitivos, conforme diretrizes descritas na documentação do Vuforia Engine, amplamente utilizada em sistemas comerciais de rastreamento por imagem (VUFORIA, 2024).

No caso do Meta Quest 3, não há suporte nativo ao Vuforia Engine ou AR Foundation, o que demanda acesso direto ao fluxo de imagem da câmera. Para isso, emprega-se a biblioteca *Unity Passthrough Camera API Samples*, disponibilizada pela Meta, a qual fornece acesso ao feed da câmera via *WebCamTexture* e à API *Camera2* do Android. Essa solução inclui classes auxiliares como *WebCamTextureManager* para inicialização de captura e permissões e *PassthroughCameraUtils* para obtenção de metadados e conversão de coordenadas bidimensionais para tridimensionais. O repositório disponibiliza exemplos de captura, ajuste de brilho, detecção via Unity Sentis e geração de efeitos visuais baseados em *shaders*, possibilitando aplicação prática de reconhecimento de marcadores visuais em ambiente Unity (OCULUS SAMPLES, 2025).

A etapa de reconhecimento do marcador e instanciação do modelo virtual foi desenvolvida no Visual Studio 2019, onde scripts de detecção foram implementados para mapear o marcador ao objeto virtual, permitindo ajustes de transformação espacial por meio de *offsets*. Na Unity versão 6000.0.38f1, o *script* foi associado a um *GameObject* vazio responsável pela hierarquia do modelo 3D, garantindo sua renderização sincronizada ao plano da imagem detectada. Após a compilação do projeto para a plataforma Android, o aplicativo resultante foi transferido para o Meta Quest 3 e executado no ambiente *VR Station*. O resultado operacional demonstra o rastreamento contínuo do marcador e a persistência espacial do objeto (garra branca) virtual durante movimentações do *headset*, como ilustrado na Figura 5.

Figura 5 – Funcionamento do *Image Target* no Meta Quest 3



Fonte: Autoria Própria

Já no HoloLens 2, utiliza-se o Vuforia Engine para a criação dos *Image Targets*, de forma semelhante ao procedimento aplicado no Meta Quest 3, porém com diferenças significativas na implementação e na capacidade de rastreamento. A principal vantagem do HoloLens 2 é seu raio de ação ampliado, que permite o uso de múltiplas imagens conectadas: quando uma deixa de ser reconhecida, o sistema identifica automaticamente a próxima, garantindo continuidade no

rastreamento e visualização sob múltiplos ângulos. Esta técnica pode ser referida como *Multiple Image Targets*.

Para configurar o sistema, cria-se uma licença no portal da Vuforia, importa-se o *asset* Vuforia Engine para o Unity 6000.0.38f1 e insere-se a chave de licença nas configurações do projeto. Em seguida, adiciona-se à cena o MRTK XR Rig (Mixed Reality Toolkit), dentro do qual são inseridos os *Image Targets* como objetos filhos. Cada marcador deve possuir dimensões de 12cm × 12cm e apresentar alto contraste, riqueza de detalhes e baixa repetição de padrões, conforme as recomendações da documentação oficial da Vuforia (VUFORIA, 2024), garantindo maior precisão e estabilidade no rastreamento. Após essa etapa, o objeto virtual é instanciado sobre cada marcador e posicionado com os *offsets* necessários para o alinhamento espacial adequado.

Para execução, realizou-se a compilação da aplicação, configurando a plataforma como Local Machine e arquitetura ARM64. O projeto é então aberto no Visual Studio 2019, com as mesmas configurações, gerando um arquivo *.appx*, posteriormente transferido para o HoloLens 2 por meio do Windows Device Portal (MICROSOFT, 2024). A Figura 6 ilustra os *Targets* e o funcionamento da técnica, apresentando uma sequência de imagens que mostram o rastreamento de um *Image Target* simples (parte superior) e de um *Multiple Image Target* (parte inferior), destacando a evolução do sistema em termos de estabilidade e amplitude de visualização.

Figura 6 – Funcionamento do *Image Target* no HoloLens 2



Fonte: Autoria Própria

Object Tracking

O *Object Tracking*, é uma técnica utilizada para ancorar e manter um objeto virtual sobre um objeto real em movimento no espaço, garantindo que o modelo digital acompanhe com precisão o deslocamento físico. Uma vez estabelecida a ancoragem, o objeto virtual move-se de forma sincronizada com o real, preservando estabilidade, fidelidade espacial e coerência visual. Além disso, o método permite ajustes finos de posicionamento, assegurando alta acurácia no alinhamento entre os mundos real e virtual. Este método foi implementado exclusivamente no Meta Quest 3, uma vez que o dispositivo conta com controles equipados com âncoras espaciais nativas, capazes de fornecer rastreamento tridimensional preciso requisito essencial para a aplicação do *Object Tracking*.

Para o desenvolvimento, foi utilizada a Unity 6000.0.38f1. Após a criação do projeto, realizou-se o *download* e a integração do Meta XR Core SDK 77.0.0, que fornece as ferramentas necessárias para o uso das funcionalidades avançadas do ecossistema Meta XR. Na cena, foram empregados dois componentes principais: o *Camera Rig*, responsável pela renderização e pelo gerenciamento das âncoras espaciais dos controles, e o *Passthrough*, recurso que permite a transição

do modo de Realidade Virtual (VR) para Realidade Aumentada (AR), exibindo o ambiente real em tempo real por meio do Meta Quest Link (META, 2025b).

O objeto virtual foi instanciado como filho da âncora do controle, garantindo que seu movimento acompanhasse diretamente a posição e orientação do objeto físico rastreado. A Figura 7 ilustra o funcionamento do método com uma sequência de imagens do movimento, apresentando a garra virtual ancorada à ponta do robô antropomórfico, acompanhando em tempo real seus movimentos com precisão espacial.

Figura 7– Funcionamento do *Object Tracking*



Fonte: Autoria Própria

Resultados e Discussão

A partir da aplicação das técnicas em ambos os dispositivos, foi possível analisar e comparar os resultados experimentais com as expectativas teóricas, considerando os seguintes critérios: fluidez do movimento, dependência do posicionamento do observador, dificuldade de implementação, precisão no posicionamento do objeto virtual e amplitude do ângulo de ação da técnica. Estes critérios foram observados através da análise do movimento de todas as juntas do robô antropomórfico.

O primeiro estudo realizado foi o *Object Tracking*, utilizando o Meta Quest 3. Por ser um dispositivo mais intuitivo e acessível, com ferramentas nativas para rastreamento espacial, o processo de implementação foi o mais rápido e direto. O próprio *Asset* oficial da Meta já disponibiliza os recursos necessários para o reconhecimento das âncoras dos controles, permitindo uma configuração ágil e estável do sistema.

Durante os testes, observou-se uma visualização fluida e precisa da garra virtual, que acompanhava fielmente os movimentos da âncora do controle, porém em altas velocidades apresentava um pequeno *delay*. Um diferencial relevante foi a possibilidade de ajustar a posição do objeto virtual em tempo real, graças à integração do Meta Quest Link com a Unity, facilitando calibrações e testes interativos durante a execução.

Outro ponto de destaque foi a independência em relação ao posicionamento do observador. Diferentemente do método de *Image Target*, o *Object Tracking* não exige que o usuário mantenha o foco visual em uma imagem de referência, permitindo liberdade de movimento e observação sob qualquer ângulo. Entretanto, esse método também apresentou como limitação a ausência de oclusão

realista, ou seja, quando o controle ficava atrás de algum objeto físico, o sistema continuava exibindo a garra virtual, como na Figura 8, onde a garra se sobrepõe ao órgão terminal, mesmo que, na prática, ela devesse estar escondida. Esse efeito, conhecido como oclusão, pode ser corrigido por meio da implementação do bloco “*Occlusion*”, disponível no SDK da Meta, recurso que não pôde ser integrado nesta etapa, por limitação de tempo.

Figura 8– Problema da oclusão



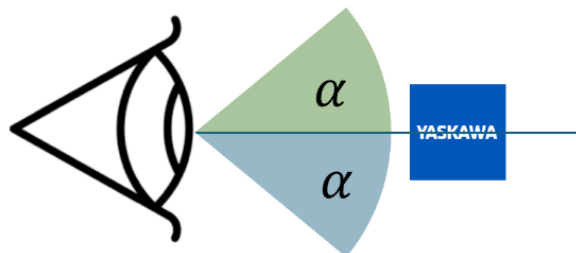
Fonte: Autoria Própria

Ainda dentro do escopo do Meta Quest 3, foi desenvolvido o *Image Target*, técnica que apresentou maior complexidade técnica em comparação ao *Object Tracking*, pois exigiu a criação e configuração de scripts diretamente na Unity, demandando um nível mais avançado de conhecimento e precisão na calibração.

A análise seguiu os mesmos critérios de avaliação anteriores, considerando fluidez, dependência do observador, dificuldade de implementação, precisão de posicionamento e ângulo de ação. Observou-se que o objeto virtual acompanhava adequadamente o movimento da imagem-alvo, mantendo boa coerência espacial. Contudo, a técnica apresentou latência perceptível e movimentos menos fluídos, especialmente em velocidades elevadas, resultando em certo delay na atualização da posição.

Um ponto crítico identificado foi a forte dependência para com o ângulo de observação. Quando o marcador se afastava do campo de visão ou atingia seu ângulo crítico (α), o objeto virtual deixava de ser exibido (Figura 9). No experimento, foram medidos ângulos críticos de aproximadamente 22° no eixo X e 3° no eixo Y, valores insatisfatórios que inviabilizaram a aplicação do método *Multiple Image Target* para o Meta Quest 3

Figura 9 - Ângulo de ação do *Image Target*



Fonte: Autoria Própria

Além disso, o ajuste do *offset* mostrou-se um processo lento e trabalhoso, já que cada modificação exigia novo build e transferência para o *headset*, tornando a calibração pouco ágil. A estabilidade limitada também dificultou o alinhamento preciso da garra virtual sobre a imagem física, comprometendo parcialmente a acurácia esperada. Outro problema identificado foi o não acompanhamento do objeto virtual pela rotação da imagem real, que permanecia fixo em sua orientação inicial. Essa limitação reduz a precisão do *Image Target* em aplicações que exigem rastreamento rotacional fiel.

Já no HoloLens 2, um dispositivo mais robusto e tecnicamente avançado, projetado para aplicações profissionais de RA, o método aplicado de *Image Targets* apresentou posicionamento preciso e coerente, com latência significativamente menor em comparação ao Meta Quest 3, resultando em um movimento virtual mais fluído e natural.

Apesar disso, o HoloLens 2 ainda compartilha a mesma limitação estrutural do método de *Image Target*, isto é, a dependência da visibilidade do marcador. Entretanto, neste dispositivo, o ângulo crítico de rastreamento pode ser substancialmente ampliado, atingindo valores próximos de 90° em ambos os eixos, o que viabilizou a implementação do método *Multiple Image Targets*. Essa melhoria permitiu a visualização contínua do objeto virtual sob diferentes ângulos, perdendo o rastreamento apenas quando todas as imagens de referência estavam completamente encobertas, como ocorre quando o robô se encontra alinhado à câmera. Entretanto, essa técnica permite a rotação sincronizada do objeto virtual com a imagem real, solucionando uma das limitações observadas na implementação realizada no Meta Quest.

A principal limitação observada no HoloLens 2 esteve relacionada à complexidade da implementação técnica, que exige uma configuração detalhada e minuciosa de componentes e parâmetros na Unity e no sistema Vuforia, demandando tempo e precisão para garantir o correto funcionamento.

Por fim, para consolidar e comparar os resultados obtidos, foi elaborada uma tabela de análise de desempenho entre as técnicas estudadas. A Tabela 1 apresenta uma visão comparativa entre as aplicações das técnicas de *Image Target* no HoloLens 2 e no Meta Quest 3, bem como do *Object Tracking*, destacando suas principais vantagens e limitações.

Tabela 1 - Análise das competências das técnicas de posicionamento virtual

	<i>Image Target</i> (Meta Quest 3)	<i>Image Target</i> (HoloLens 2)	<i>Object Tracking</i>
Precisão no Posicionamento	Adequada, com dificuldade no ajuste	Adequada, fácil ajuste	Adequada, fácil ajuste
Fluidez do Movimento	Fluído	Alta Latência	Fluído
Dependência da Posição	Alta	Alta	Baixa
Ângulo de Ação	Horizontal: $\cong 22^\circ$ Vertical: $\cong 3^\circ$	$\cong 82,5^\circ$ em ambos os eixos	Não se aplica
Dificuldade de Implementação	Média, necessita código	Difícil, necessita código e configurações dos óculos	Fácil, sistemas de fácil uso no Unity

Fonte: Autoria Própria

Conclusões

Todos os métodos analisados demonstraram ser capazes de posicionar e movimentar objetos virtuais sobre elementos físicos reais, cada um com características específicas que influenciam diretamente seu desempenho. Os resultados obtidos indicam que o estudo é viável para aplicação em ambientes fabris, apresentando potencial para melhorar a produtividade, a visualização prévia de processos e a interação entre operador e sistema.

Entre as técnicas avaliadas, o *Object Tracking* destacou-se por não depender da posição do observador e por oferecer maior facilidade de implementação e ajuste, conforme evidenciado na Tabela 1. Quanto aos dispositivos, observou-se que o HoloLens 2, ao aplicar a técnica de *Image Target*, apresentou melhor desempenho, com maior ângulo de visualização e menor latência. Trata-se de um equipamento mais robusto e otimizado para realidade aumentada pura, o que o torna uma opção superior para aplicações industriais.

Como proposta para trabalhos futuros, sugere-se a integração de Sensores Inerciais para gerar sistemas de referências compatíveis com o HoloLens 2, possibilitando a implementação da técnica de *Object Tracking*. Além disso, recomenda-se o desenvolvimento de um sistema de oclusão, de modo a aumentar o realismo e a precisão na sobreposição entre os objetos virtuais e o ambiente físico.

Referências Bibliográficas

AHMADYAN, Adel et al. Instant 3D Object Tracking with Applications in Augmented Reality. **arXiv**, 2020.

DOGANGUN, Fatih et al. RAMPA: Robotic Augmented Reality for Machine Programming by DemonstrAtion. **arXiv**, 2024.

FLAVIÁN, Carlos; IBÁÑEZ-SÁNCHEZ, Sergio ; ORÚS, Carlos. The impact of virtual, augmented and mixed reality technologies on the customer experience. **Journal of Business Research**, 100, 1 Julho 2019. 547 - 560.

MÉNDEZ, Ginés M.; VELÁZQUEZ, Francisco D. C. Augmented Reality in Industry 4.0 Assistance and Training Areas: A Systematic Literature Review and Bibliometric Analysis. **Electronics**, 2024.

META. Meta. **Meta Quest 3**, 2025. Disponível em: <<https://www.meta.com/quest/quest-3>>. Acesso em: 01 fev. 2025.

META. Develop Unity apps for Meta Quest VR headsets, 2025b. Disponível em: <<https://developers.meta.com/horizon/documentation/unity/unity-development-overview/>>. Acesso em: Abril 2025.

MICROSOFT. HoloLens 2. **Microsoft**, Junho 2024. Disponível em: <<https://www.microsoft.com/pt-br/hololens/hardware#documente-experi%C3%A4ncias>>.

MICROSOFT. U.S. Army to use HoloLens technology in high-tech headsets for soldiers. **Microsoft**, Junho 2024b. Disponível em: <<https://news.microsoft.com/source/features/digital-transformation/u-s-army-to-use-hololens-technology-in-high-tech-headsets-for-soldiers/>>.

MILGRAM, Paul et al. Augmented Reality: A class of displays on the reality-virtuality continuum. **Telemanipulator and Telepresence Technologies**, 1995.

MORALES, Rodrigo R. M.; ARJONI, Diego H. **Análise de Sistemas de Posicionamento e Alocação de Elementos Virtuais em Sistemas de Realidade Aumentada**. 16.º Seminário Mauá de Iniciação Científica. [S.l.]: [s.n.]. 2024.

MUJUMDAR, Omkar. Augmented Reality. **International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology**, Sonipat, 1 Dezembro 2022. 487 - 495.

MUQEET, Hafiz A. et al. Sustainable Solutions for Advanced Energy Management System of Campus Microgrids: Model Opportunities and Future Challenges. **Sensors - Scalable Blockchain and AI-Based Embedded IoT Systems for Smart Spaces**, 2022.

OCULUS SAMPLES. Unity-PassthroughCameraApiSamples. **https://github.com/oculus-samples/Unity-PassthroughCameraApiSamples**, 2025. Acesso em: Abril 2025.

OSTANIN, Mikhail et al. **Human-robot interaction for robotic manipulator programming in Mixed Reality**. IEEE International Conference on Robotics and Automation. Paris: [s.n.]. 2020.

SCHOTT, Danny et al. Exploring object and multi-target instrument tracking for AR-guided interventions. **Current Directions in Biomedical Engineering**, 2022.

SCHREITER, Tim et al. The Effect of Anthropomorphism on Trust in an Industrial Human-Robot Interaction. **arXiv**, Setembro 2022.

SEBRAE. Realidade aumentada na indústria. **sebrae.com.br**, 2023. Disponível em: <<https://sebrae.com.br/sites/PortalSebrae/artigos/realidade-aumentada-na-industria,63706a131b486810VgnVCM1000001b00320aRCRD>>. Acesso em: Maio 2025.

VUFORIA. Image Targets, 2024. Disponível em: <<https://developer.vuforia.com/library/objects/image-targets>>. Acesso em: 15 julho 2024.