

DISPOSITIVO DE REALIDADE AUMENTADA (RA) PARA INSPEÇÃO VISUAL EM UNIDADES INDUSTRIAIS

Gabriel Alves Atanasio¹, Luciano Antunes²

Resumo: A crescente complexidade das máquinas na Indústria 4.0 exige inspeções visuais mais eficientes, mas os inspetores enfrentam dificuldades em acessar dados operacionais em tempo real durante avaliações físicas. Visando preencher a lacuna de ferramentas de diagnóstico dinâmicas, que superem as instruções estáticas, este trabalho propõe o uso da Realidade Aumentada (RA) como suporte em tempo real. O objetivo geral foi desenvolver e validar um protótipo de RA para guiar inspeções de máquinas complexas, visando à redução de erros e ao aumento da produtividade do inspetor. A metodologia, classificada como pesquisa aplicada de base tecnológica, consistiu no desenvolvimento de um protótipo de Realidade Mista (RM) na plataforma Unity, utilizando o Microsoft Mixed Reality Toolkit (MRTK3) e o dispositivo Microsoft HoloLens 2. A solução implementa um sistema de inspeção guiado em passos, com manipulação espacial de hologramas e visualização interna via planos de recorte. A validação funcional foi realizada pelo pesquisador em ambiente controlado. Os resultados confirmaram a viabilidade técnica da solução, demonstrando um protótipo funcional que integra todas as interações propostas. Conclui-se que a RM apresenta alto potencial para transformar as inspeções industriais, reduzindo a carga cognitiva e minimizando erros, embora a validação com usuários finais e a integração com dados dinâmicos sejam necessárias em trabalhos futuros.

Palavras-chave: Realidade aumentada; Inspeção industrial; HoloLens 2.

¹Curso de Ciência da Computação, Universidade do Extremo Sul Catarinense (Unesc), gabriel.atanasio9@hotmail.com

²Orientador. Curso de Ciência da Computação, Universidade do Extremo Sul Catarinense (Unesc), luciano@unesc.net

ABSTRACT: The growing complexity of machines in Industry 4.0 demands more efficient visual inspections, but inspectors face difficulties in accessing real-time operational data during physical assessments. Aiming to fill the gap for dynamic diagnostic tools that overcome static instructions, this work proposes the use of Augmented Reality (AR) as real-time support. The general objective was to develop and validate an AR prototype to guide inspections of complex machines, aiming for error reduction and an increase in inspector productivity. The methodology, classified as applied, technology-based research, consisted of developing a Mixed Reality (MR) prototype on the Unity platform, using the Microsoft Mixed Reality Toolkit (MRTK3) and the Microsoft HoloLens 2 device. The solution implements a guided steps inspection system, with spatial manipulation of holograms and internal visualization via clipping planes. The functional validation was performed by the researcher in a controlled environment. The results confirmed the technical feasibility of the solution, demonstrating a functional prototype that integrates all proposed interactions. It is concluded that MR presents high potential to transform industrial inspections, reducing cognitive load and minimizing errors, although validation with end-users and integration with dynamic data are necessary in future work.

Keywords: Augmented reality; Industrial inspection; HoloLens 2.

1 INTRODUÇÃO

A Quarta Revolução Industrial, conhecida como Indústria 4.0, representa um movimento global que integra diversas inovações tecnológicas visando aprimorar a eficiência no uso de recursos e elevar a produtividade. Entre essas inovações, destaca-se a Realidade Aumentada (RA), que serve como uma ferramenta acessível para a disseminação de conhecimento e aprendizado (Paiva; Silva, 2021). A Realidade Aumentada (RA) é definida como uma tecnologia que "aumenta" o mundo real com objetos virtuais. Seus sistemas devem combinar objetos reais e virtuais em um ambiente real, funcionar de forma interativa e em tempo real, e alinhar geometricamente os objetos virtuais com os reais (Palmarini et al., 2018).

Com a crescente digitalização, as máquinas e suas interações na indústria estão se tornando cada vez mais complexas. Essa complexidade exige inspeções visuais mais precisas e detalhadas, nas quais parâmetros específicos precisam ser visualizados e conferidos diretamente nos equipamentos para identificar problemas e corrigir falhas (Vorraber et al., 2020).

O desafio para o inspetor local é acessar e interpretar essa grande quantidade de dados operacionais em tempo real, enquanto realiza a avaliação física da máquina.

Conforme o levantamento bibliográfico, foram encontrados diversos trabalhos que demonstram a aplicação da Realidade Aumentada (RA) para otimizar tarefas complexas e substituir manuais tradicionais, sendo que a principal aplicação identificada é a de instrução e capacitação. Estudos como o de (Marar; Silva; Sementille, 2013) estabelecem a eficácia da RA para o treinamento em montagem e manutenção de equipamentos, utilizando a sobreposição de objetos 3D e animações para guiar o usuário de forma procedural e intuitiva, provando ser uma alternativa eficaz aos métodos convencionais de aprendizado.

Expandindo essa base, a aplicação da tecnologia evoluiu para além do treinamento, abordando a mitigação de riscos em ambientes perigosos e a exploração de novas interfaces. A pesquisa de (Rocha, 2021), por exemplo, empregou a RA em subestações elétricas para fornecer informações contextuais de segurança, como EPIs necessários e parâmetros elétricos. Adicionalmente, a exploração de dispositivos como os Head-Mounted Displays (HMDs) foi validada para auxiliar na montagem em escala real, guiando operadores com instruções visuais e sonoras (Cuperschmid; Grachet; Fabrício, 2015). Em conjunto, esses trabalhos confirmam a RA como uma ferramenta robusta para fornecer instrução, orientação e dados críticos em tempo real, melhorando a eficiência e a segurança em diversos contextos operacionais.

Visando preencher a lacuna existente na aplicação da Realidade Aumentada como ferramenta de suporte em tempo real para o diagnóstico de problemas durante inspeções visuais, a presente pesquisa tem como objetivo avaliar esta tecnologia como suporte para a inspeção em unidades industriais com máquinas de alta complexidade. Atualmente, faltam soluções que superem as instruções estáticas e permitam ao inspetor visualizar parâmetros operacionais críticos e dinâmicos diretamente sobre o equipamento. Desta forma, a proposta é investigar como a RA pode auxiliar na identificação mais eficiente de falhas e na otimização da correção de problemas. Para isso, será utilizada a plataforma Unity 3D em conjunto com o pacote (Engine, 2024) e o dispositivo Microsoft HoloLens, buscando oferecer uma solução que aprimore a eficiência e a assertividade nas inspeções de máquinas complexas.

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver e validar um pro-

tótipo de Realidade Aumentada para guiar inspeções de máquinas complexas, visando à redução de erros e ao aumento da produtividade do inspetor. Os objetivos específicos consistem em: Levantar os requisitos técnicos e funcionalidades da Realidade Aumentada (RA) para otimizar inspeções de máquinas; Projetar e desenvolver um protótipo de Realidade Aumentada, para enriquecer a inspeção em um cenário industrial simulado; Avaliar a eficácia do protótipo de RA em melhorar a visualização de parâmetros operacionais críticos; Analisar a usabilidade do protótipo de RA e a percepção dos inspetores quanto à sua contribuição para a facilidade e qualidade do processo de inspeção.

O artigo está estruturado em seções, iniciando com a introdução. Subsequentemente, são apresentados os materiais e métodos, as métricas de avaliação da inspeção (usabilidade e utilidade), a avaliação com critérios adaptados, os resultados e discussões, a conclusão, as referências e, por fim, os apêndices.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo descreve a metodologia empregada no desenvolvimento e na validação do protótipo de Realidade Mista (RM) para inspeção e manutenção de maquinário complexo. A abordagem adotada visa detalhar os procedimentos, ferramentas e arquitetura de software de forma a garantir a reprodutibilidade da pesquisa, permitindo que outros pesquisadores possam conferir, dar continuidade ou adaptar a solução proposta.

2.1 CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA

A presente pesquisa classifica-se como Pesquisa Aplicada, com um forte componente de Pesquisa de Base Tecnológica. O objetivo é a construção de um artefato tecnológico funcional — um protótipo de aplicação em Realidade Mista — para resolver um problema prático no contexto industrial: a otimização de processos de inspeção de máquinas complexas. A metodologia combina a aplicação de tecnologias existentes (Unity, MRTK3, HoloLens 2) de maneira inovadora para criar uma solução com aplicabilidade direta, validada por meio de experimentação em ambiente controlado.

2.2 ARQUITETURA DA SOLUÇÃO

O artefato principal desta pesquisa é um protótipo de aplicação de Realidade Mista desenvolvido na plataforma Unity, utilizando o Microsoft

Mixed Reality Toolkit (MRTK3). A solução foi projetada para ser executada no dispositivo Microsoft HoloLens 2 e tem como foco principal a assistência em processos de inspeção e manutenção de maquinário complexo, oferecendo ao usuário funcionalidades avançadas de interação espacial e orientação procedural.

A arquitetura do sistema foi concebida de forma modular, com componentes especializados que gerenciam diferentes aspectos da experiência de Realidade Mista. O fluxo de dados inicia-se com a captura de entradas do usuário pelo dispositivo de RM e culmina na renderização da cena holográfica.

2.2.1 Módulos e Componentes Principais

O sistema desenvolvido é estruturado em quatro módulos principais, cada um contendo componentes especializados que garantem a funcionalidade completa da aplicação de inspeção.

O primeiro é o Sistema de Interação Espacial (Spatial Manipulation), que governa todas as formas de interação do usuário com o ambiente holográfico. Seus componentes incluem a Manipulação de Objetos 3D, que implementa um sistema completo para translação, rotação e escala de modelos 3D do maquinário, permitindo uma manipulação intuitiva por parte do inspetor. Além disso, a Integração com Eye Tracking utiliza o rastreamento ocular do HoloLens 2 para seleção de alvos e manipulação à distância, o que é crucial quando as mãos do usuário estão ocupadas. Complementando isso, o Rastreamento de Mãos (Hand Tracking) emprega a detecção e o rastreamento articulado das mãos para permitir interações naturais, como agarrar, empurrar e tocar hologramas.

O segundo é o Sistema de Interface de Usuário (UX Components), que gerencia todos os elementos de interface responsáveis por fornecer informação e receber comandos. Este módulo é composto pelo Dialog System, que apresenta diálogos modais para confirmar ações críticas ou guiar processos complexos. Inclui também Canvas Examples, que implementam interfaces 2D flutuantes (como menus e painéis de controle) que podem ser posicionadas e fixadas no espaço físico. As Button Interactions fornecem um conjunto de botões interativos que respondem a diversas modalidades de entrada (toque, olhar, comando de voz) e oferecem feedback visual e háptico. Por fim, os Navigation Systems incorporam menus contextuais e sistemas de navegação espacial para ajudar o usuário a se orientar e a acessar as funcionalidades da aplicação.

O terceiro é o Sistema de Inspeção de Maquinário, que representa o módulo central focado na execução guiada do processo de inspeção. Ele é composto pelo Sequential Dialog System, que implementa diálogos sequenciais para orientar o inspetor passo a passo, assegurando que todos os procedimentos sejam seguidos na ordem correta. A lógica principal do Processo de Inspeção em Passos está contida aqui, dividida em doze etapas distintas, cada uma com seus próprios objetivos e verificações. Para manter o usuário informado, o Visual Feedback fornece indicações visuais claras (como mudança de cor, realce ou animações) para mostrar o progresso e o status de cada etapa da inspeção.

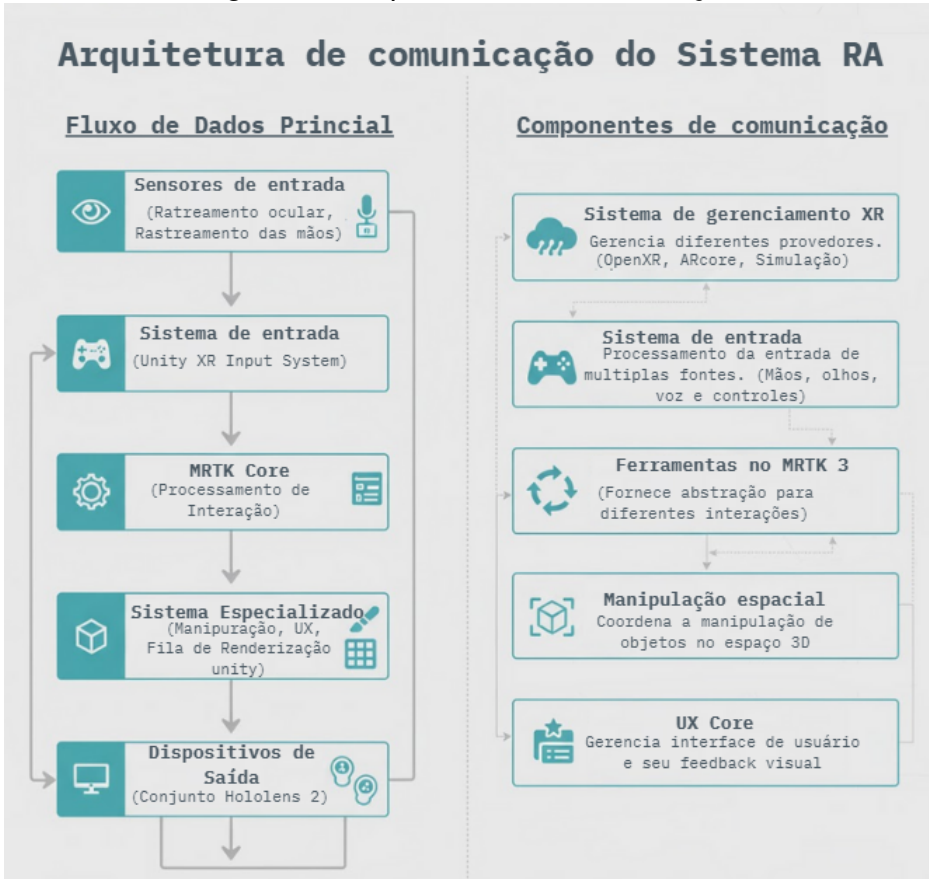
Por último, o Sistema de Renderização e Visualização controla a aparência e a forma como os objetos holográficos são exibidos. O Clipping Systems implementa sistemas de recorte (planos de corte) que permitem ao usuário visualizar o interior de modelos 3D complexos, facilitando a inspeção de componentes internos. O Shader Management gerencia shaders customizados para criar efeitos visuais avançados, como realces, transparências e visualização de dados. O Material Systems controla os materiais aplicados aos objetos 3D para simular diferentes superfícies e estados (e.g., normal, alerta, falha). Finalmente, a Iluminação e Sombras configura a iluminação da cena e a projeção de sombras para aumentar o realismo e a percepção de profundidade dos hologramas.

2.2.2 Fluxo de Dados e Comunicação

A comunicação entre os componentes segue um fluxo de dados bem definido, que se inicia com a entrada de dados, na qual os sensores do dispositivo (câmeras para rastreamento ocular e rastreamento das mãos) capturam as ações do usuário. Em seguida, o Sistema de entrada (Unity XR Management System) abstrai esses dados brutos através de provedores como OpenXR e ARCore, ou simula a entrada em ambiente de desenvolvimento. A partir daí, o Processamento de Interações é realizado pelo MRTK3 Core System, que recebe os dados e os interpreta para identificar intenções de interação (ex: selecionar, agarrar, mover). Posteriormente, a lógica da Aplicação é executada pelos Sistemas Especializados (Manipulação Espacial, UX, Inspeção), que atuam com base nessas interações para realizar as tarefas específicas do protótipo. O processo avança para a Renderização, onde a fila de renderização Unity processa todas as informações visuais da cena. Finalmente, a Saída Visual e Auditiva é concretizada com a renderização da imagem final nos displays do Head-Mounted Display

(HMD), enquanto feedbacks auditivos e hápticos são enviados ao usuário.

Figura 1 - Arquitetura de comunicação



Fonte: Do Autor.

2.3 MATERIAIS UTILIZADOS

A execução do projeto dependeu de um conjunto específico de hardware e software, detalhado a seguir.

2.3.1 Hardware

- **Dispositivo de Realidade Mista:** Microsoft HoloLens 2 (versão comercial), utilizado como a plataforma-alvo para a execução e validação do protótipo.
- **Estação de Desenvolvimento:** Computador pessoal para o desenvolvimento, compilação e depuração da aplicação.
- **Modelo Físico:** Um modelo em miniatura de um motor a reação, utilizado como objeto físico para ancoragem e contextualização da experiência de RA durante a fase de validação.

2.3.2 Software, Plataformas e Bibliotecas

- **Motor Gráfico Principal:** Unity Engine, versão 2021.3.45f2 (LTS). Esta versão de suporte a longo prazo foi escolhida pela estabilidade e compatibilidade com os demais pacotes do projeto.
- **Ambiente de Desenvolvimento (IDE):**
 - Microsoft Visual Studio 2022: Utilizado para o desenvolvimento e depuração dos scripts em C# que compõem a lógica da aplicação, com integração nativa ao Unity.
 - Visual Studio Code: Empregado como editor de código auxiliar, com extensões específicas para suporte ao desenvolvimento em Unity.
- **Framework de Realidade Mista:** Microsoft Mixed Reality Toolkit (MRTK3), utilizado como a base para o desenvolvimento das interações espaciais, interface de usuário e gerenciamento de entrada.

2.4 PROCESSO DE DESENVOLVIMENTO(MÉTODOS)

O desenvolvimento do protótipo seguiu uma arquitetura em camadas, utilizando padrões de projeto de software para garantir a modularidade, escalabilidade e manutenibilidade do código.

2.4.1 Arquitetura de Software

A arquitetura da aplicação foi estruturada em quatro camadas principais. A primeira é a Camada de Runtime, composta pelo Unity Engine e pelo plugin OpenXR, que juntos estabelecem a base para a execução da aplicação e a interface direta com o hardware do dispositivo de Realidade Estendida (XR). Acima dela, a Camada de Framework é onde opera o MRTK3 (Mixed Reality Toolkit), responsável por fornecer um conjunto de subsistemas modulares que abstraem e gerenciam as complexidades da interação em Realidade Mista (RM).

A Camada de Aplicação é o nível onde residem os scripts e componentes customizados, desenvolvidos especificamente para este projeto, incluindo o sistema de inspeção e toda a lógica de manipulação de objetos. Por fim, a Camada de UI/UX engloba todos os componentes visuais da interface, como botões, menus e diálogos, sendo estes construídos a partir das funcionalidades fornecidas pelo MRTK3.

2.4.2 Padrões Arquiteturais e Lógica de Programação

Para a implementação da lógica, foram adotados diversos padrões de projeto de software, essenciais para estruturar a comunicação entre os componentes e o gerenciamento de estado da aplicação. O Observer Pattern é utilizado extensivamente para gerenciar eventos de interação; neste padrão, componentes da aplicação (os observadores) se registram para serem notificados quando eventos específicos ocorrem (como um botão sendo pressionado ou uma mão agarrando um objeto), promovendo um baixo acoplamento entre os sistemas.

O Strategy Pattern foi empregado para encapsular diferentes algoritmos de interação, como a interação baseada no olhar ou na mão, permitindo que o tipo de interação seja alterado dinamicamente em tempo de execução. Para o processamento de comandos de voz, utiliza-se o Command Pattern, onde cada comando é encapsulado como um objeto, o que facilita a criação de filas de comandos, a implementação de funcionalidades de "desfazer" e a clara separação entre quem invoca o comando e quem o executa.

O Data Binding Pattern foi adotado para desacoplar a lógica de negócio (os dados da inspeção) da sua representação visual (a interface de usuário), garantindo que as atualizações na UI reflitam automaticamente as mudanças nos dados subjacentes. Finalmente, uma State Machine (Máquina de Estados Finita) foi implementada para gerenciar os estados complexos do processo de inspeção, controlando a transição entre os passos e assegurando que o fluxo seja executado na ordem correta, com as condições para avançar ou retroceder devidamente validadas.

2.5 METODOLOGIA DE VALIDAÇÃO E EXPERIMENTAÇÃO

A validação do protótipo foi realizada por meio de um estudo de caso experimental, com o objetivo de avaliar a funcionalidade, a usabilidade e a eficácia da solução em um cenário simulado.

2.5.1 Participantes

Para esta fase de validação do protótipo, não houve o recrutamento de participantes externos. O próprio acadêmico-pesquisador assumiu o papel de "inspetor", executando os procedimentos de teste para avaliar o funcionamento técnico e a fluidez da experiência de usuário.

2.5.2 Ambiente e Procedimento Experimental

Os experimentos foram conduzidos em uma sala de estudos na Universidade do Extremo Sul Catarinense (UNESC), configurada para simular um espaço de manutenção industrial. O procedimento consistiu em:

1. **Configuração do Ambiente:** O modelo em miniatura de um motor a reação foi posicionado sobre uma superfície de trabalho. O dispositivo HoloLens 2 foi calibrado para o ambiente e para o usuário.

Figura 2 - Setup da validação com HoloLens 2 e modelo físico do motor



Fonte: Do Autor.

2. **Execução do Ciclo de Inspeção:** A aplicação de Realidade Mista foi iniciada. O pesquisador, atuando como inspetor, seguiu o ciclo completo de inspeção de passos guiado pelo sistema de diálogos sequenciais. A Figura 2 ilustra o ambiente experimental, mostrando o dispositivo HoloLens 2 posicionado ao lado do modelo físico do motor a reação utilizado nos testes.
3. **Avaliação das Funcionalidades:** Durante a execução, foram testadas e avaliadas todas as principais funcionalidades da aplicação, incluindo a manipulação de objetos 3D, o uso dos planos de recorte para visualização interna, a interação com a interface de usuário (botões e menus) e a resposta do sistema aos comandos de voz e gestos.

A avaliação focou em verificar se a aplicação cumpria seus objetivos funcionais e se a experiência de interação era intuitiva e livre de falhas

técnicas significativas.

3 DISCUSSÃO E RESULTADOS

Nesta seção, são apresentados e analisados os resultados obtidos a partir do desenvolvimento e da validação experimental do protótipo de Realidade Aumentada (RA) para inspeção de maquinário industrial complexo, conforme descrito na metodologia (Seção 2). A discussão subsequente interpreta esses resultados em relação aos objetivos propostos e ao contexto da literatura sobre RA na Indústria 4.0.

3.1 DESEMPENHO FUNCIONAL DO PROTÓTIPO

O desenvolvimento da aplicação em Unity, utilizando o MRTK3 e direcionada ao Microsoft HoloLens 2, culminou em um protótipo funcional que implementa as principais características delineadas nos objetivos específicos. A validação experimental, conduzida pelo próprio pesquisador em um ambiente controlado simulando um cenário industrial (conforme Seção 2.5), permitiu avaliar a operacionalidade dos módulos desenvolvidos.

A avaliação confirmou que o **Sistema de Interação Espacial** opera de forma intuitiva, com a manipulação direta de objetos holográficos (translação, rotação e escala) via rastreamento de mãos (*Hand Tracking*) funcionando como esperado. Complementarmente, a integração do rastreamento ocular (*Eye Tracking*) para seleção à distância mostrou-se viável, oferecendo flexibilidade crucial para cenários onde o inspetor pode estar com as mãos ocupadas, embora sua precisão dependa da calibração e iluminação.

Da mesma forma, o **Sistema de Interface de Usuário (UX)** respondeu adequadamente às entradas (gestos de pinça, olhar, comandos de voz básicos). Componentes como diálogos modais (*Dialog System*), painéis 2D flutuantes (*Canvas Examples*) e botões interativos (*Button Interactions*) forneceram feedback visual claro, facilitando o acesso às funcionalidades através dos menus contextuais e sistemas de navegação.

O núcleo da aplicação, o Sistema de Inspeção de Maquinário, também operou corretamente. O processo guiado em passos, gerenciado pelo sistema de diálogo sequencial, apresentou as instruções de forma clara, com feedback visual (como a mudança de cor ou realce de componentes virtuais) indicando o progresso.

Figura 3 - Visão de utilização



Fonte: Do Autor.

A lógica da máquina de estados garantiu a sequência correta dos procedimentos durante o teste. Aliado a isso, o Sistema de Renderização e Visualização demonstrou sua eficácia, especialmente através dos planos de recorte, que permitiram a exploração do interior do modelo 3D do motor, simulando a inspeção de componentes internos. A gestão de *shaders* e materiais proporcionou a diferenciação visual necessária para destacar áreas de interesse ou indicar status, embora os dados nesta fase fossem estáticos.

3.2 AVALIAÇÃO DA USABILIDADE E EXPERIÊNCIA (PERSPECTIVA DO PESQUISADOR)

A execução do ciclo de inspeção completo pelo pesquisador permitiu uma avaliação preliminar da usabilidade. A experiência geral foi considerada fluida, com as instruções guiadas facilitando o seguimento do procedimento. A capacidade de manipular o holograma do motor e utilizar os planos de recorte foi percebida como um recurso potencialmente valioso para a compreensão da estrutura interna do equipamento.

3.3 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os resultados funcionais demonstram a viabilidade técnica da abordagem proposta. O protótipo conseguiu integrar com sucesso as funcionalidades de RA/RM para criar um ambiente de inspeção assistida, atingindo os objetivos primários de desenvolvimento (Objetivo Específico 2).

Os resultados funcionais demonstram a viabilidade técnica da

abordagem proposta, com o protótipo conseguindo integrar com sucesso as funcionalidades de RA/RM para criar um ambiente de inspeção assistida. A arquitetura reflete a implementação dos requisitos de visualização 3D, orientação procedural e interação multimodal. Embora a avaliação da visualização de parâmetros tenha sido parcialmente abordada — demonstrando potencial para exibir dados críticos (simulados visualmente) e permitindo a visualização interna — a integração com dados dinâmicos em tempo real permanece como um trabalho futuro. A análise de usabilidade, limitada à perspectiva do pesquisador, indicou uma interface promissora, mas que necessita de refinamentos, especialmente na robustez do rastreamento e na otimização da navegação 3D.

Os achados corroboram a literatura que aponta a RA/RM como ferramenta eficaz para treinamento e instrução (e.g., Marar, Silva e Sementille (2013), Cuperschmid, Grachet e Fabrício (2015)). No entanto, este trabalho avança ao focar especificamente no *suporte à inspeção em tempo real*, integrando orientação procedural com a capacidade de visualização de dados operacionais (mesmo que simulados nesta fase) sobrepostos ao equipamento. Diferentemente de aplicações focadas apenas em segurança (Rocha, 2021), o protótipo visa diretamente o diagnóstico e a eficiência do processo de inspeção.

O protótipo, mesmo em seu estado atual, sugere um potencial significativo para transformar as inspeções visuais. Ao sobrepor informações contextuais e guiar o inspetor, a tecnologia pode:

- Reduzir a carga cognitiva do inspetor, que não precisaria consultar manuais ou terminais separados.
- Minimizar erros de procedimento, garantindo que todas as etapas sejam cumpridas na ordem correta.
- Acelerar o processo de diagnóstico, permitindo a visualização direta de parâmetros (futuramente dinâmicos) no local da falha.
- Melhorar a segurança, permitindo que o inspetor mantenha o foco no equipamento e no ambiente ao redor.

A principal limitação desta fase da pesquisa é a ausência de validação com usuários finais (inspetores industriais reais). A avaliação realizada pelo pesquisador valida a funcionalidade técnica, mas não mede o

impacto real na performance, tempo de tarefa, taxa de erro ou a percepção subjetiva de usabilidade por profissionais da área. Outras limitações incluem:

- A utilização de um modelo em miniatura e um ambiente simulado, que podem não refletir completamente os desafios de um ambiente industrial real (ruído, iluminação variável, espaço restrito, escala do equipamento).
- A dependência do hardware específico (HoloLens 2), que ainda representa um investimento considerável.
- A ausência de integração com fontes de dados em tempo real (sensores, sistemas SCADA), o que limitou a demonstração da visualização de parâmetros dinâmicos.
- A avaliação não incluiu métricas quantitativas de desempenho (tempo para completar a inspeção, número de erros).

Em suma, os resultados indicam que o protótipo desenvolvido é uma prova de conceito bem-sucedida, demonstrando a aplicação viável da Realidade Mista para suporte à inspeção industrial. As funcionalidades implementadas alinham-se com os objetivos propostos e sugerem um caminho promissor para futuras investigações, que deverão incluir validação com usuários finais e integração com dados dinâmicos para avaliar plenamente o impacto da tecnologia.

4 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo principal desenvolver e validar um protótipo de Realidade Aumentada (RA), especificamente utilizando Realidade Mista (RM) no dispositivo HoloLens 2, para auxiliar na inspeção visual de maquinário industrial complexo.

O protótipo Unity/MRTK3 provou a viabilidade técnica da solução, integrando funcionalmente interação espacial, UI de RM e visualização guiada. A RA/RM demonstrou potencial para otimizar inspeções industriais, reduzindo a carga cognitiva e erros. Contudo, a validação foi preliminar (restrita ao pesquisador, em simulação e sem dados dinâmicos) e dependente do hardware (HoloLens 2), o que limita conclusões sobre a eficácia e usabilidade em contextos industriais reais.

Como contribuição principal, este trabalho apresenta uma prova de conceito robusta, detalhando a arquitetura e a implementação de um sistema de RA/RM para inspeção industrial guiada. Demonstra-se a integração de componentes essenciais e valida-se a funcionalidade da abordagem em ambiente controlado.

Como base nos conhecimentos adquiridos com a elaboração deste trabalho, bem como nos resultados obtidos, propõe-se como trabalhos futuros: a realização de estudos de validação com usuários finais em ambientes industriais reais, utilizando métricas quantitativas (tempo de tarefa, taxa de erro) e qualitativas (questionários de usabilidade, entrevistas); a integração do protótipo com fontes de dados em tempo real (sensores IoT), para habilitar a visualização dinâmica de parâmetros operacionais; a exploração de diferentes dispositivos de hardware (tablets com RA, outros HMDs) e o refinamento das interfaces com base no feedback dos usuários; a expansão do sistema para incluir funcionalidades de manutenção assistida e colaboração remota.

REFERÊNCIAS

CUPERSCHMID, A. R. M.; GRACHET, M. G.; FABRÍCIO, M. M. **Realidade aumentada como auxílio à montagem de parede em wood-frame**. PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção, 2015, v. 6, n. 4, p. 266–276.

ENGINE, V. **Getting Started | Vuforia Library — developer.vuforia.com**. 2024. <<https://developer.vuforia.com/library/>>. Acesso em: 12 out. 2024.

MARAR, J. F.; SILVA, A. C. d.; SEMENTILLE, A. C. Sistema de realidade aumentada para o treinamento em montagem e manutenção de equipamentos. In: BRAZILIAN COMPUTER SOCIETY. **Brazilian Workshop on Educational Computer Games**. Campinas, 2013. p. 1–6.

PAIVA, R. J. de; SILVA, R. I. da. Realidade aumentada na criação de tutoriais para a indústria 4.0. In: **Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente-SBAI**. [S.l.: s.n.], 2021. v. 1, n. 1.

PALMARINI, R. et al. **A systematic review of augmented reality applications in maintenance**. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2018, Elsevier BV, v. 49, p. 215–228. ISSN 0736-5845. Acesso em: 12 out. 2024. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.rcim.2017.06.002>>.

ROCHA, V. M. **Realidade aumentada aplicada à redução de riscos na segurança do trabalho em subestações elétricas**. 71 p. Monografia (Dissertação de Mestrado Profissional) — Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 2021. Programa de Pós-Graduação em Instrumentação, Controle e Automação de Processos

de Mineração. Departamento de Engenharia de Controle e Automação, Escola de Minas. Acesso em: 12 out. 2024. Disponível em: <<http://www.repositorio.ufop.br/jspui/handle/123456789/14333>>.

VORRABER, W. et al. **Assessing augmented reality in production: remote-assisted maintenance with hololens**. Procedia CIRP, 2020, v. 88, p. 139–144. ISSN 2212-8271. 13th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering, 17-19 July 2019, Gulf of Naples, Italy, Acesso em: 12 out. 2024. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827120303401>>.