



Recebido em: 06/09/2024.

Aceito em: 30/12/2024.

Revista SODEBRAS – Volume 19  
Nº 222 – SETEMBRO/ DEZEMBRO - 2024

## PROPOSTA DE UM FRAMEWORK PARA DESENVOLVIMENTO DE AMBIENTES INDUSTRIAIS DE SIMULAÇÃO INTERATIVA

### PROPOSAL OF A FRAMEWORK FOR DEVELOPING INTERACTIVE SIMULATION INDUSTRIAL ENVIRONMENTS

Richard Valandro<sup>1</sup>  
Marcelo Rudek<sup>2</sup>  
João Cláudio Nogueira<sup>3</sup>

**Resumo** – Os conceitos de Indústria 4.0 e Sociedade 5.0 impulsionam a convergência entre os mundos físico e digital, demandando novas abordagens para a formação e desenvolvimento de profissionais em ambientes industriais complexos e de acesso restrito. Neste contexto, este artigo propõe a criação de um framework que aplica os conceitos de realidade mista e gêmeos digitais para criar um ambiente virtual imersivo para treinamento de funcionários industriais, especificamente na manutenção de máquinas e equipamentos em subestações elétricas. O ambiente real é uma subestação elétrica que não pode ser acessada com frequência devido aos riscos de segurança aos funcionários e à impossibilidade de parar a operação de máquinas e equipamentos durante as operações da fábrica. Assim, o artigo apresenta um framework composto por cenários de treinamento baseados em tecnologias imersivas existentes para preparar os funcionários para execução de tarefas de manutenção. Inclui também a criação de uma ferramenta computacional, através de reconstrução e modelagem 3D, que permite a representação do ambiente real e a apresentação de informações (textos e vídeos) sobre os equipamentos.

**Palavras-chave:** Ambiente imersivo, digital Twin, indústria 4.0, interação, realidade mista e simulações.

**Abstract** - The concepts of Industry 4.0 and Society 5.0 drive the convergence between the physical and digital worlds, demanding new approaches to the training and development of professionals in complex and restricted-access industrial environments. In this context, this article proposes the creation of a framework that applies the concepts of mixed reality and digital twins to create an immersive virtual environment for training industrial employees, specifically in the maintenance of machines and equipment in electrical substations. The real

<sup>1</sup> Mestrando em Engenharia de Produção e Sistemas (Pontifícia Universidade Católica do Paraná – PUC/PR); Especialista em Gerenciamento de Projetos (ISAE-PR/FGV); Bacharelado em Engenharia Mecatrônica (Pontifícia Universidade Católica do Paraná – PUC/PR). Contato: richard.valandro@gmail.com.

<sup>2</sup> Doutor em Engenharia Mecânica (Unicamp); Mestre em Informática Industrial (UTFPR); Graduado em Engenharia de Computação (PUCPR); Professor Titular da Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Pesquisador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas – PPGEPS-PUCPR; Bolsista de Produtividade em Desenvolvimento Tecnológico e Extensão Inovadora nível 2. Contato: marcelo.rudek@pucpr.br.

<sup>3</sup> Mestre em Engenharia de Manufatura (Universidade Federal do Paraná – UFPR); Bacharelado em Engenharia Mecânica (Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR). Contato: joaoclaudio.nogueira@br.bosch.com.

*environment is an electrical substation that cannot be accessed frequently due to safety risks to employees and the impossibility of stopping the operation of machines and equipment during factory operations. Thus, the article presents a framework composed of training scenarios based on existing immersive technologies to prepare employees to perform maintenance tasks. It also includes the creation of a computational tool, through 3D reconstruction and modeling, that allows the representation of the real environment and the presentation of information (texts and videos) about the equipment.*

**Keywords:** *Immersive environment, digital Twin, industry 4.0, interaction, mixed reality and simulations.*

## I. INTRODUÇÃO

A competição historicamente leva as empresas a adotarem recursos inovadores para se destacarem. Yildiz et al. (2021) destacam que inovação, regulamentações e demografia exigem ferramentas adaptativas para melhorar os processos industriais. A Quarta Revolução Industrial, marcada pela Indústria 4.0, e a emergente Sociedade 5.0 centrada no ser humano, estão impulsionando a convergência entre os mundos físico e digital, exigindo novas abordagens para treinar e desenvolver profissionais em ambientes industriais complexos e de acesso restrito. Tecnologias imersivas, como Realidade Virtual (RV), Realidade Aumentada (RA) e Realidade Mista (RM), surgiram como ferramentas promissoras para aprimorar o processo de aprendizagem, proporcionando experiências interativas e realistas que simulam situações do mundo real. Tecnologias imersivas permitem a transmissão de conteúdo de aprendizagem de forma adaptável e interativa, conforme apresentado no artigo de Zhang et al. (2022).

Entretanto, criar ambientes virtuais imersivos para treinamento industrial se torna desafiador porque há elementos de difícil implementação, como: a complexidade dos ambientes, riscos de segurança e acesso restrito a locais críticos, como subestações elétricas. Esses fatores limitam o uso de métodos tradicionais de treinamento, que muitas vezes carecem de precisão e realismo em modelos 3D, bem como interatividade e engajamento adequados (Oyekan et al., 2019). A falta de acesso frequente a esses ambientes impede o desenvolvimento de habilidades práticas, essenciais para a execução segura de tarefas de manutenção, aumentando o risco de erros e prejudicando a tomada de decisão em situações críticas.

Além disso, a ausência de um histórico formalizado de falhas e suas causas dificulta a previsão de problemas e a implementação de medidas preventivas. A falta de treinamento prático agrava essa situação, prolongando o tempo de inatividade em paradas não programadas, o que resulta em perdas financeiras consideráveis. Diante desse cenário, este artigo aborda o desenvolvimento de um framework que integra fotogrametria, modelagem 3D e interação em tempo real, possibilitando a criação de ambientes virtuais simulados, o que permite ao usuário uma experiência imersiva e interativa por meio da aplicação de Realidade Mista (RM). Com isso, os usuários podem visualizar e manipular objetos virtuais em contextos reais, facilitando a compreensão espacial e melhorando a tomada de decisão.

## II. CONTEXTO

Com o avanço de tecnologias inovadoras de visualização e interação, novas possibilidades de aprendizagem prática surgiram. RA e RV fornecem a base para novas formas de compartilhar conhecimento tanto visual quanto interativamente.

Segundo Valandro (2024), para algumas situações de aprendizagem, principalmente quando envolvem o desenvolvimento de habilidades, o contato prático

com equipamentos, ambientes e fenômenos é a melhor forma de aprender. Usar ambientes reais nem sempre é viável ou seguro. RV e RA são excelentes alternativas nesses casos. Além disso, a evolução natural das interfaces computacionais tende a transformar ambientes atualmente gráficos e bidimensionais em ambientes imersivos e tridimensionais, aumentando a demanda das indústrias por interfaces desse tipo.

### ***Estado da arte da tecnologia***

Em relação à revisão da literatura, uma vez definido o tema da pesquisa, as principais palavras-chave foram identificadas como: Digital Twin, Realidade Mista, Ambiente imersivo, interação, simulações e indústria 4.0. A plataforma SCOPUS foi utilizada para buscar artigos relevantes revisados por pares dos últimos dez anos. Alguns critérios de inclusão/exclusão também foram definidos e aplicados para selecionar os artigos, tais como: fase de publicação, tipo de fonte, áreas temáticas, palavras-chave e classificação dos artigos de acordo com o Scimago Journal & Country Rank (índice h). Os artigos foram analisados considerando a conversão de títulos e resumos para selecionar artigos que seriam lidos na íntegra e utilizados como base para a pesquisa.

Com base na leitura dos artigos, foi criada a tabela 1, que fornece uma visão geral das ferramentas de software e suas aplicações em diferentes áreas de tecnologias imersivas e simulação.

**Tabela 1**  
Métricas analisadas nos resultados da aplicação.

System \ Key Application	3D Modelling	AR	VR	Digital Twin	Mixed Reality	Simulations	Training and Education
3D Max	x	o	o	o	o		o
Unity 3D	x	o	x	x	x	x	x
Plant Simulation	o	o		x		x	o
HTC Vive			x		x		o
AnyLogic	o			x		x	o
Arena				o		x	o
Teamcenter Lifecycle Visualization	x	o		x		x	x
Microsoft HoloLens 2	o	x		o	x	o	x
Spectator View		o	o	o			o
SketchUp	x			o			o
Lanner Witness	o	x	x	x	x	o	x
Simul8	o			o		x	x
DESMO-J			o	o		x	
Visionary Render (Virtualis)			x		x	o	x
FARO Focus3D X130 HDR	x	o	o	x	o		
CloudCompare	x			o			
Blender	x	o	o	o	o	o	o
Rift glasses			x		x		o
Kinect v2	o	x			o		o
Dassault Systems	x	o	o	x	o	x	x
Vuforia SDK		x	x		x		o

Legend (O partial / X full).

A partir da Tabela 1, pode-se concluir:

- **Popularidade das Ferramentas:** A frequência com que uma ferramenta aparece na tabela sugere sua popularidade nos artigos analisados. O Unity 3D, por exemplo, é amplamente utilizado em uma variedade de aplicações, indicando sua versatilidade e adoção no campo.
- **Funcionalidade por ferramenta:** A distribuição dos pontos preenchidos indica as áreas de especialização de cada ferramenta. Por exemplo, AnyLogic se destaca em simulações, enquanto 3D Max é predominante em modelagem 3D.
- **Sobreposição de aplicativos:** Algumas ferramentas, como Unity 3D, cobrem várias áreas, sugerindo sua capacidade de integrar diferentes aspectos do desenvolvimento de tecnologia imersiva.
- **Tendências de uso:** A tabela pode revelar tendências no uso de software em diferentes aplicativos. Por exemplo, se a maioria dos artigos sobre Realidade Aumentada (RA) usa o Vuforia SDK, isso indica sua relevância neste campo. No entanto, a escolha do software a ser usado depende de uma série de variáveis, como: custo, facilidade de uso, compatibilidade etc.

Ainda de acordo com a revisão da literatura, é possível aplicar tecnologias imersivas devido às seguintes características:

- A convergência entre os mundos físico e virtual. A convergência entre os mundos físico e virtual. O artigo de Li (2022) aborda que a impossibilidade de inspeção visual dificulta a realização das mais diversas avaliações quantitativas de um determinado processo, e o artigo de He (2021) apresenta os desafios da digitalização de alta qualidade, que requer uma descrição abrangente e renderização em tempo real do sistema. Além disso, o sistema DT orientado a modelos, como novamente apresentado por He (2021), é baseado nas descrições de regras geométricas, físicas e sequenciais para produzir uma simulação precisa em tempo real. Essa convergência disruptiva tende a aumentar operações e serviços tradicionalmente restritos a espaços físicos com novas capacidades baseadas na virtualidade.
- A questão das habilidades motoras humanas. Como o treinamento prático tradicional é intensivo em recursos e trabalho, e o treinamento virtual baseado em demonstrações em vídeo carece de interatividade, o artigo de Mokhtari et al. (2023) aborda a importância de desenvolver modelos de treinamento remoto que forneçam feedback sensorial eficaz. Para Buchmann (2004), a interação consiste na capacidade do usuário de agir no ambiente de uma forma que promova mudanças e reações às suas ações, o que pode trazer ganhos de desempenho à medida que o usuário interage de forma mais intuitiva com o sistema.

Além disso, Oyekan et al. (2019) propõem o uso de um gêmeo digital de realidade virtual de um layout físico como um mecanismo para entender as reações humanas. Finalmente, Ferreira et al. (2020), a simulação é abordada como uma ferramenta tecnológica para o desenvolvimento de modelos exploratórios e de planejamento para otimizar a tomada de decisão.

### ***Descrição do ambiente operacional***

A subestação SD-01 69KV (Figura 1) desempenha um papel crucial na infraestrutura da planta industrial, sendo responsável pela distribuição de energia elétrica para outras 14 subestações. Essa centralidade a torna um ponto crítico para a operação contínua da planta.



(a)



(b)

**Fig.1.** Subestação: Vista aérea da Subestação e Sala de Controle (a) Vista aérea frontal (b)

A subestação (Figura 1) é composta por uma série de componentes vitais, incluindo Painéis de controle [1], Painéis de proteção [2], Transformadores de potência [3], Bancos de capacitores, Medidores, Sistemas de aterramento, Isoladores, Linhas de transmissão [4], Linhas de barramento [5], Pára-raios [6], Chaves seccionadoras [7], Disjuntores de alta tensão [8], Sistemas de refrigeração [9]. Qualquer falha em um desses elementos impacta diretamente o fornecimento de energia para as outras subestações, potencialmente paralisando a produção.

O risco de paradas não programadas é uma ameaça constante, com causas que vão desde invasão de animais, quedas de objetos, até falhas em componentes elétricos. Essas interrupções não planejadas geram perdas financeiras significativas, estimadas em milhões de reais por hora de inatividade. Devido a necessidade de estar em funcionamento em tempo contínuo não é possível realizar treinamentos de manutenção in loco devido aos altos riscos de choque elétrico.

A falta de treinamento prático dos funcionários para execução de reparos nos equipamentos, prolonga o tempo de parada. A Abracopel (Associação Brasileira de Conscientização dos Perigos da Eletricidade) registrou 35 mortes por choque elétrico em 2022, sendo 11 em subestações, evidenciando a gravidade do problema.

Identificar a causa raiz de uma paralisação também é desafiador. Mesmo com conhecimento básico da subestação, em manutenções periódicas programadas toda a área fica desenergizada para segurança, dificultando a análise. E, a falta de um histórico formalizado de paradas e suas causas impede a previsão de falhas futuras.

### **Reconstrução 3D**

Segundo Valandro (2024), a reconstrução 3D é uma técnica que utiliza fotografias para criar modelos tridimensionais detalhados de objetos, estruturas ou ambientes. Essa técnica pode ser realizada por meio de diversas metodologias, entre elas a fotogrametria, o uso de scanners a laser e técnicas baseadas em visão computacional.

A fotogrametria, como técnica de reconstrução 3D, oferece vantagens significativas em termos de precisão, realismo e eficiência, principalmente em ambientes industriais complexos. A literatura especializada destaca a importância da fotogrametria para a criação de modelos 3D em diversos setores, como controle de qualidade, inspeção de equipamentos e documentação de processos (Feng & Zhang, 2017; Genovese et al., 2019; Chen et al., 2020).

As imagens e vídeos capturados são processados pelo Polycam, que é um software de fotogrametria que gera modelos 3D detalhados do ambiente. O Polycam foi escolhido devido à sua eficiência na captura tridimensional, à qualidade visual dos modelos gerados e à sua facilidade de uso em dispositivos móveis, tornando a ferramenta acessível e prática para aplicações industriais. Além disso, o Polycam roda na nuvem, tornando o processamento mais rápido. A comparação com outras ferramentas de fotogrametria, como o Meshroom, demonstrou a superioridade do Polycam em termos de tempo de processamento, demanda de hardware e qualidade visual dos modelos 3D, conforme mostrado na Tabela 2.

**Tabela 2**

Métricas analisadas nos resultados da aplicação.

<b>Métrica*</b>	<b>Meshroom</b>	<b>Polycam</b>
Tempo de processamento	2h e 31 min**	42 min***
*Utilizando 152 frames para o processo de reconstrução 3D, totalizando 2,27 GB).	** Tempo no qual a aplicação foi interrompida devido ao erro.	*** Taxa de transferência da internet: 418 Mbps download e 256 Mbps upload.
Utilização da CPU do PC	Em média acima de 80%	Em média 15%
Utilização da GPU (Placa de Vídeo)	Em média de 40%	Em média 5%
Quantidade de Vértices	-----	328,9k
Tamanho do Arquivo Gerado (Formato OBJ)	-----	35,5 MB

As métricas apresentadas são definidas da seguinte forma:

1. Tempo de processamento: é o tempo que um computador leva para executar uma tarefa.
2. Utilização da CPU do PC: é uma medida da quantidade de tempo que o processador está ocupado executando tarefas. É expresso como uma porcentagem, com 100% significando que o processador está totalmente ocupado e 0% significando que o processador está ocioso.
3. Utilização da GPU: é uma medida da quantidade de tempo que a placa de vídeo está ocupada executando tarefas. É expresso como uma porcentagem, com 100% significando que a placa de vídeo está totalmente ocupada e 0% significando que a placa de vídeo está ociosa.
4. Número de vértices é o número de pontos que definem um modelo 3D. Os vértices são conectados por arestas para formar faces, que são as unidades básicas de um modelo 3D. O número de vértices é um dos principais fatores que determinam a qualidade visual em relação à suavidade e realidade do modelo 3D.
5. Tamanho do arquivo gerado (OBJ): Um arquivo OBJ é um formato de arquivo de modelo 3D usado em aplicativos de modelagem 3D.

Ainda considerando a qualidade visual, a Tabela 3 apresenta a avaliação qualitativa dos ambientes, tendo como base a escala de avaliação de Arapakis et al. (2014).

**Tabela 3**  
Avaliação qualitativa da reconstrução 3D

<b>Métrica</b>	<b>Pol ycam</b>	<b>Mesh room</b>
Nitidez	5	3
Contraste	5	3
Precisão	2	3
Compleitude	3	2
Qualidade geral da imagem	3	2
<b>TOTAL</b>	<b>20</b>	<b>13</b>

Cada métrica é apresentada a seguir, sendo que cada uma delas apresenta uma escala de classificação, conforme Tabela 4:

1. Nitidez: refere-se à clareza dos detalhes na representação visual do modelo. Um modelo com baixa nitidez pode parecer desfocado ou com detalhes indistinguíveis, enquanto um modelo com alta nitidez apresenta contornos e detalhes bem definidos.
2. Contraste: avalia a diferença entre as áreas claras e escuras do modelo. Um bom contraste ajuda a destacar os detalhes e a forma do modelo, tornando-o mais fácil de visualizar e entender.
3. Precisão: mede o quão fielmente o modelo 3D representa a geometria do objeto ou cena real que ele busca reproduzir. Um modelo preciso terá medidas e proporções corretas, enquanto um modelo impreciso pode apresentar distorções ou deformações.

4. **Completude:** considera a quantidade de detalhes incluídos no modelo. Um modelo completo representa todos os elementos relevantes do objeto ou cena, enquanto um modelo incompleto pode ter partes ausentes ou simplificadas.
5. **Qualidade geral da imagem:** Esta é uma avaliação holística que leva em consideração todos os aspectos acima, resultando em um julgamento final sobre a qualidade geral do modelo 3D.

**Tabela 4**

Escala de classificação para avaliação subjetiva da qualidade da imagem

Característica	1	2	3	4	5
Nitidez	Zero visibilidade	Nitidez fraca – visibilidade ruim	Nitidez moderada	Boa nitidez	Excelente nitidez
Contraste	Imagem semelhante ao uso de nenhum contraste	Contraste ruim	Contraste moderado	Bom contraste	Excelente contraste
Precisão	Precisão zero – sem diagnóstico	Precisão ruim	Precisão boa	Precisão muito boa	Representa precisamente a geometria real do objeto ou cena.
Completude	Completude zero – sem diagnóstico	Completude ruim	Completude moderada	Completude boa	Representa todos os detalhes relevantes do objeto ou cena.
Qualidade geral da imagem	Qualidade zero	Qualidade fraca	Qualidade moderada	Boa qualidade	Qualidade excelente

Na Tabela 4, uma escala de 1 a 5 é usada para classificar diferentes características que contribuem para a qualidade geral do modelo. Cada nível na escala representa tudo, desde a ausência completa da característica (nível 1) até sua representação ideal (nível 5). Essas descrições ajudam a tornar a avaliação mais objetiva e consistente.

Para os resultados da Tabela 2 e Tabela 3, foi considerado um processo de reconstrução 3D de 152 quadros (Figura 2), totalizando 2,27 GB de espaço em disco rígido.



**Fig. 2.** Experimento considerando 152 frames

Após a realização das análises, foi revelado que a comparação direta entre a eficiência e a qualidade da aplicação usando o Polycam foi mais adequada.

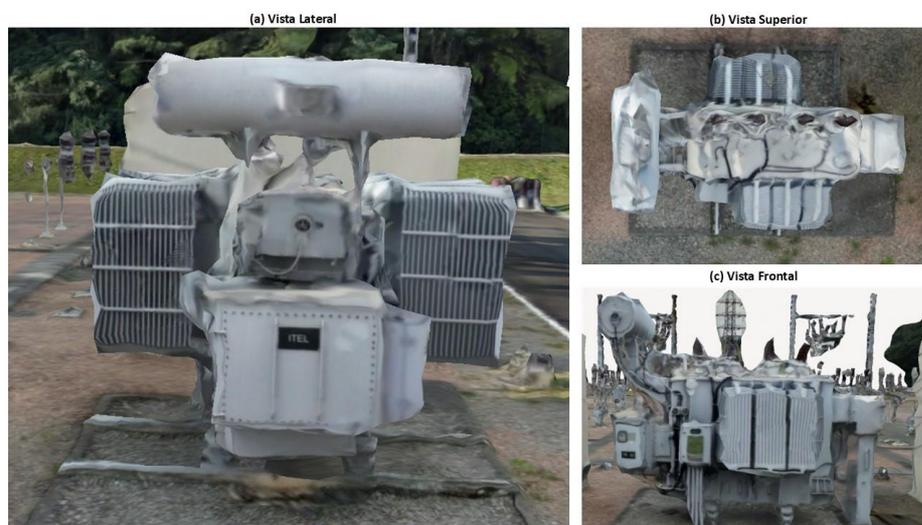
No entanto, a questão da interação varia entre as abordagens. Na construção direta do ambiente virtual, a interação é mais imediata, permitindo ajustes em tempo

real e resposta instantânea às mudanças. Por outro lado, na reconstrução 3D, especialmente com o Meshroom, a interação está sujeita a um tempo de processamento adicional devido à complexidade do algoritmo de reconstrução. Isso pode resultar em uma experiência menos fluida durante a fase de edição e ajuste.

Quanto ao realismo, a reconstrução 3D, quando realizada com precisão, tende a oferecer um nível maior de realismo devido à sua fidelidade aos dados do ambiente físico. O Polycam, ao gerar modelos 3D com qualidade visual superior, contribui significativamente para a criação de ambientes virtuais mais realistas, preservando a autenticidade das formas e texturas originais.

Em resumo, a eficiência da construção do ambiente virtual sem recorrer à reconstrução 3D depende das especificidades do projeto, enquanto ferramentas como o Polycam e o Meshroom oferecem abordagens diferentes. O Polycam se destacou pela sua eficácia e qualidade. A escolha entre as abordagens deve ser guiada pelos requisitos do projeto e pelo equilíbrio entre eficiência, interatividade e realismo desejados.

Uma vez definido o software a ser utilizado, retornamos ao teste 5 para analisar a reconstrução 3D em termos de detalhes. Observamos que ao dar zoom (zoom +) nos objetos no ambiente virtual, ficou evidente a falta de detalhes (Figura 3), o que pode comprometer a precisão das simulações e a capacidade dos usuários de interagir efetivamente com o ambiente virtual.



**Fig. 3.** Vistas do transformador

Isso é especialmente crítico em ambientes industriais, onde pequenos detalhes podem ter um impacto significativo na segurança, eficiência e qualidade dos processos. Ambientes imersivos com poucos detalhes podem não replicar com precisão situações reais de trabalho, dificultando o aprendizado e a prática de procedimentos pelos funcionários, o que pode levar a erros e acidentes no trabalho real.

Desse ponto de vista qualitativo, foi descoberto que o Polycam também permite, além do processo padrão de fotogrametria, a criação de ambientes por meio de um método chamado Gaussian Splats (Figura 4).



**Fig. 4.** Experimento usando Gaussian Splats – Polycam

O processo em si é um pouco semelhante ao padrão aplicado até então (fotogrametria), a diferença está em alguns aspectos técnicos que, segundo Kerbl et al. (2023), são:

- **Representação:** No processo Gaussian Splats, gaussianas 3D são usadas como uma primitiva para representar campos de radiância (NeRF). Essas gaussianas têm propriedades como posição 3D, opacidade, covariância anisotrópica e coeficientes harmônicos esféricos, fornecendo uma representação compacta e precisa da cena.
- **Otimização:** As propriedades das gaussianas 3D são otimizadas por meio de etapas de controle de densidade adaptativa. Este procedimento de otimização visa criar uma representação de alta qualidade da cena capturada com o uso eficiente de gaussianas.
- **Renderização:** O processo Gaussian splats envolve um rasterizador baseado em blocos que permite a rápida ordenação de primitivas para uma imagem inteira.

### ***Tecnologias Imersivas***

Tecnologias imersivas, como a Realidade Mista (RM), estão surgindo como uma solução promissora para os desafios do treinamento em ambientes industriais complexos. A capacidade da RM de criar ambientes virtuais imersivos que reproduzem fielmente cenários do mundo real oferece uma alternativa segura e eficaz para o treinamento de funcionários, mesmo em locais de difícil acesso e com riscos operacionais.

A literatura especializada destaca o potencial das tecnologias imersivas para aprimorar o processo de aprendizagem em vários contextos. Paes et al. (2017) demonstraram que ambientes imersivos podem melhorar a compreensão espacial e a capacidade de tomada de decisão em projetos arquitetônicos. Pérez (2019) explorou a aplicação da RV no controle de robôs industriais e no treinamento de operadores, demonstrando a redução de riscos e a otimização do processo de aprendizagem.

O uso de dispositivos como o Microsoft HoloLens 2, que combina óculos de realidade aumentada com sensores de movimento e rastreamento ocular, permite uma interação intuitiva e natural com o ambiente virtual. Os usuários podem visualizar instruções passo a passo, modelos 3D sobrepostos em equipamentos reais e realizar simulações de procedimentos de manutenção, aprimorando suas habilidades e conhecimentos de forma prática e segura. Siyaev et al. (2021) destacam a importância da interação por voz em dispositivos de RM, permitindo o controle do fluxo de trabalho

sem a necessidade de clicar em botões ou usar gestos com as mãos, o que aumenta a eficiência e a segurança do processo de treinamento.

Além disso, a integração da RM com o conceito de Digital Twin (DT) potencializa ainda mais os benefícios do treinamento em ambientes virtuais. O DT permite a criação de uma réplica virtual inteligente do ambiente físico, que pode ser atualizada e monitorada em tempo real, proporcionando uma experiência de aprendizagem dinâmica e contextualizada. A combinação da RM com o DT possibilita simular diferentes cenários e analisar o impacto de ações e decisões em um ambiente virtual seguro e controlado, preparando os profissionais para lidar com situações complexas e imprevistas do mundo real.

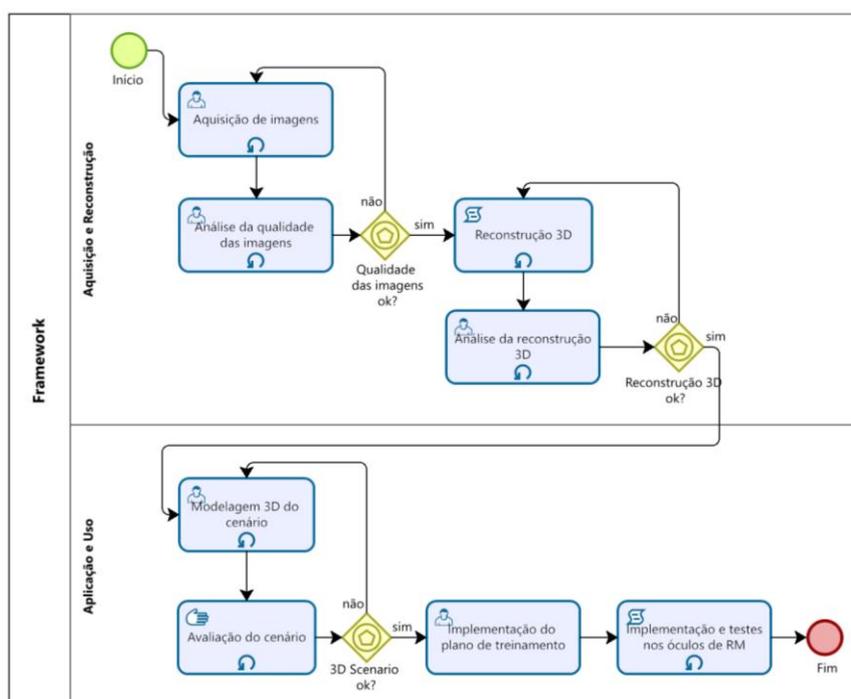
### III. PROPOSTA DE FRAMEWORK

A estrutura proposta, como pode ser visto na Figura 5, é dividida em duas partes principais:

- Aquisição e reconstrução.
- Aplicação e uso.

Ambas são independentes entre si e, após a conclusão da primeira parte, obtém-se uma reconstrução 3D e, ao final da segunda parte, obtém-se o ambiente 3D modelado com o plano de treinamento implementado para teste pelos funcionários da indústria.

O plano de treinamento aplicado depende da reconstrução 3D porque se a reconstrução for incorreta, o treinamento pode ser prejudicado, pois os cenários apresentados não refletiriam adequadamente a realidade que se pretende simular. Além disso, a reconstrução tridimensional fornece a base para a modelagem do cenário de treinamento, que posteriormente é avaliado na etapa de "Avaliação do Cenário 3D". Se a reconstrução 3D não for satisfatória, os cenários modelados podem conter erros ou inconsistências que impactariam na eficácia do plano de treinamento.



**Fig.5.** Framework proposto com as respectivas etapas (Adaptado de Valandro [2024]).

### *Aquisição de Imagem*

O processo inicia com a captura de imagens e vídeos do ambiente físico por meio de um drone equipado com uma câmera de alta resolução. A escolha do equipamento de captura é influenciada pelas características do ambiente e pelas necessidades específicas do projeto. Neste trabalho, optamos por utilizar um drone Mavic 2 Enterprise Advanced para capturar imagens aéreas da subestação elétrica, garantindo a segurança dos profissionais e a cobertura completa do ambiente.

Após isso, o drone foi utilizado mais duas vezes (dois voos com durações e ângulos diferentes) para obtenção de vídeos em que sobrevoava a subestação, conforme mostra o croqui do mapa apresentado na Figura 6. As gravações foram feitas a uma altura (vertical) de aproximadamente 50 metros, de acordo com as normas da Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) e diretrizes contidas na NR-10. No entanto, essa altura dificultou a obtenção de filmagens mais nítidas e detalhadas.



**Fig. 6.** Esboço do mapa de varredura do drone.

### *Análise de Qualidade das Imagens*

Para esta etapa de análise, as imagens são avaliadas qualitativamente considerando algumas métricas, conforme Tabela 5:

**Tabela 5**

Métricas analisadas nos resultados da aplicação.

<b>Característica</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
Resolução da Imagem	Baixa resolução da imagem	Média resolução da imagem	Excelente resolução da imagem
Estabilidade do Drone	Drone instável	Estabilidade média do drone	Drone estável
Iluminação	Baixa iluminação	Média iluminação	Excelente iluminação

- Resolução da imagem: segundo Liu et al. (2019), a captura pode precisar ser refeita caso a resolução seja insuficiente para identificar detalhes necessários, como falhas estruturais ou determinadas características.

- A estabilidade do drone durante a captura influencia diretamente na nitidez da imagem. Vibrações ou movimentos bruscos podem causar imagens borradas, o que compromete a utilidade da captura. Critérios como a velocidade do drone e a presença de estabilização óptica ou eletrônica podem afetar esse aspecto.
- Iluminação: capturas feitas sob iluminação inadequada, como em dias nublados ou ao anoitecer, podem ficar escuras ou conter sombras indesejadas, sendo necessária uma nova captura.

Entretanto, para ainda melhorar a qualidade dos detalhes, o drone foi reposicionado mais próximo da subestação, permitindo uma nova captura com foco nos detalhes do ambiente.

Para iniciar a próxima etapa, as imagens devem atingir pelo menos o nível 2 em todas as características avaliadas. Caso algum item atinja o nível 1 na avaliação, a captura da imagem será refeita.

### ***Reconstrução 3D***

Na etapa de reconstrução 3D, todas as fotos e vídeos (capturados pelo drone) são utilizados para criar ambientes virtuais, utilizando tanto o ambiente de desenvolvimento Meshroom quanto o Polycam.

Em relação ao processo de reconstrução, inicialmente é utilizada a fotogrametria. Para Mikhail et al. (2001), ela consiste em analisar imagens fotográficas para extrair informações precisas sobre as características físicas do ambiente real. Esse processo inclui a obtenção de medidas, como posições e distâncias, a partir das fotografias analisadas.

Além disso, no contexto do Polycam, como já dito no subitem 2.3, há outro método que permite a criação de ambientes imersivos com maior nível de qualidade e detalhes: Gaussian Splats.

### ***Avaliação das ferramentas***

Foram realizados cinco testes com Polycam e Meshroom, processando todas as fotos e vídeos capturados pelo drone. A Tabela 6 apresenta os resultados após o processamento em software específico.

O teste número um (Tabela 6) foi realizado utilizando o Meshroom e aproximadamente 69 imagens aéreas da torre da empresa para reconstrução 3D utilizando fotogrametria.

O teste número dois (Tabela 6), ainda utilizando o Meshroom, utilizou um processo chamado retopologia. Esse processo de modelagem 3D recria a topologia de um modelo tridimensional. Em termos simples, topologia se refere à estrutura da malha poligonal que compõe um modelo 3D. Durante o processo de retopologia, um modelo existente, muitas vezes criado com detalhes complexos, é redesenhado com uma topologia mais eficiente e organizada.

O teste número três (Tabela 6) utilizou o Polycam, com as mesmas 69 imagens utilizadas nos testes do Meshroom.

**Tabela 6**  
Resultados do teste de reconstrução 3D

Teste	Imagem ou vídeo original	Detalhamento	Resultado
1		Meshroom (parâmetros de software padrão).	
2	69 fotos 	Meshroom + retopologia.	
3		Polycam com fotos aéreas (configuração de parâmetros de software padrão).	
4	152 frames 	Polycam com quadros extraídos do vídeo (configuração de parâmetros padrão do software).	
5	682 frames 	Polycam com aumento de dados com quantidades máximas de frames extraídos do vídeo (configuração de parâmetros de software padrão).	

O teste número 4 (Tabela 6) utilizou vídeos aéreos da subestação, também capturados usando um drone. Como o Polycam não permite o upload de vídeos, decidiu-se converter os arquivos em frames usando um algoritmo em Python.

Após a conclusão dos testes de reconstrução 3D, observou-se que:

- O primeiro resultado obtido utilizando o Meshroom não foi muito satisfatório, pois produziu apenas um esboço do ambiente 3D. O resultado foi um ambiente em preto e branco com poucos detalhes.
- Também utilizando o Meshroom, o segundo teste envolveu um processo chamado retopologia. Foi obtida uma melhora no resultado, mas a perda de detalhes ainda é significativa em relação ao ambiente real.
- No terceiro teste, já utilizando o Polycam, foi possível observar que os resultados foram muito satisfatórios em termos de detalhes e qualidade, principalmente quando comparados à imagem original.

- Para o quarto teste, foram utilizados vídeos aéreos da subestação, também capturados utilizando o drone. Como não é possível fazer upload dos vídeos no Polycam, optou-se por converter os arquivos em frames utilizando um algoritmo em linguagem Python. Foi utilizada uma taxa de amostragem de 1 frame por segundo de vídeo, totalizando 152 frames para os primeiros vídeos capturados. Ao mesmo tempo, foram realizadas aplicações utilizando o Meshroom e a conclusão não foi possível devido a um erro retornado pelo software referente à placa de vídeo do computador utilizado.
- Considerando diferentes ângulos e posições de câmera, foi realizada novamente a gravação de vídeo aéreo da subestação, convertendo os arquivos de vídeo em frames. Ao mesmo tempo, foram realizadas aplicações usando o Meshroom, mas a conclusão não foi possível devido a um erro retornado pelo software em relação à placa de vídeo do computador utilizado.

### ***Análise da reconstrução 3D***

Com base nos testes realizados e apresentados na subseção 3.3.1, os resultados da reconstrução 3D são avaliados qualitativamente e escalados para cada uma das cinco características (Tabela 4).

A reconstrução 3D só é validada se atingir pelo menos o nível 3 em todas as características avaliadas. Se algum item atingir o nível 1 ou 2, a reconstrução é refeita.

### ***Modelagem 3D do cenário***

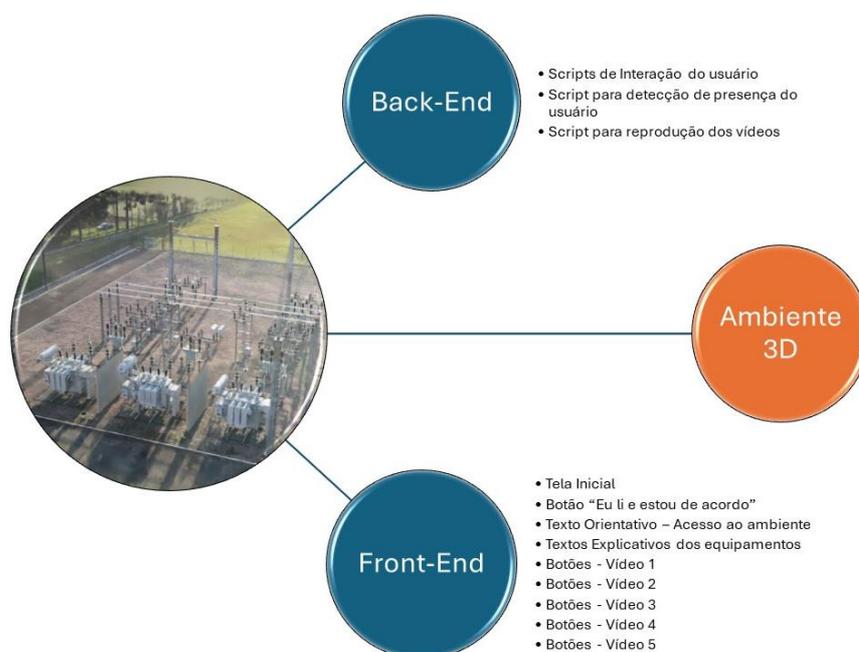
Após a reconstrução 3D, segundo Valandro (2024), é necessário modelar os cenários em que o usuário estará imerso para o treinamento.

O software Unity foi utilizado como principal plataforma de desenvolvimento para implementação do ambiente virtual devido à sua flexibilidade, ferramentas específicas para realidade aumentada e virtual, compatibilidade e comunicação completa com o HoloLens 2.

Inicialmente, o modelo 3D gerado pelo Polycam foi importado para o Unity. Este arquivo, no formato .obj, foi complementado pelos arquivos de textura correspondentes, garantindo que a perda de detalhes visuais do ambiente fosse a menor possível.

Após a importação, iniciou-se a configuração do ambiente, envolvendo o posicionamento do modelo 3D e a melhoria da iluminação do espaço virtual, pensando na melhor experiência possível do usuário. A atenção aos detalhes foi importante, principalmente em relação ao posicionamento dos equipamentos e máquinas, para que o usuário pudesse se orientar e interagir intuitivamente dentro do ambiente virtual. Além disso, foram adicionadas ao ambiente telas com informações textuais, marcadores de piso e botões.

A Figura 7 mostra um diagrama contendo os módulos do sistema computacional.



**Fig. 7.** Diagrama – Módulos do Sistema

Para complementar a experiência do usuário quanto ao treinamento virtual, algumas interações foram implementadas no ambiente virtual. Utilizando o pacote Mixed Reality Toolkit (MRTK) da Unity, foram desenvolvidas algumas funcionalidades que permitem ao usuário obter informações contextuais sobre os equipamentos presentes na cena.

#### ***Avaliação do cenário 3D***

Em relação a esta etapa, a avaliação do cenário 3D é realizada na forma de pesquisa qualitativa na qual foram avaliados os seguintes aspectos, conforme Tabela 7 apresentada por Valandro (2024):

1. Em termos de "fidelidade de cenário", ela é avaliada em termos de quão bem ela reproduz as condições do mundo real que os usuários enfrentariam em um cenário de treinamento ou simulação. Isso envolve analisar as texturas, geometria, interações de objetos e física dentro do ambiente.
2. Relevância educacional: Outro critério é a relevância do cenário para os objetivos educacionais ou de treinamento. Isso inclui verificar se o cenário cobre os aspectos mais críticos e práticos que o usuário enfrentaria no mundo real.
3. Engajamento e aplicabilidade: A avaliação qualitativa também deve considerar o nível de engajamento do usuário com o cenário. Um cenário bem avaliado é aquele que mantém os participantes focados e envolvidos, geralmente por meio de sua capacidade de desafiar e fazer os usuários aplicarem o conhecimento em contextos práticos.
4. Engajamento e aplicabilidade: A avaliação qualitativa também deve considerar o nível de engajamento do usuário com o cenário. Um cenário bem avaliado é aquele que mantém os participantes focados e envolvidos, geralmente por meio de sua capacidade de desafiar e fazer os usuários aplicarem o conhecimento em contextos práticos.

**Tabela 7**

Escala de classificação para avaliar a qualidade da cena 3D

<b>Característica</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
Fidelidade do Cenário	Zero fidelidade	Fidelidade moderada	Excelente fidelidade
Relevância Educacional	Zero relevância educacional	Moderada relevância educacional	Excelente relevância educacional
Engajamento e Aplicabilidade	Engajamento e aplicabilidade zero	Engajamento e aplicabilidade moderados	Engajamento e aplicabilidade excelentes
Usabilidade e Acessibilidade	Usabilidade e acessibilidade zero	Usabilidade e acessibilidade moderadas	Usabilidade e acessibilidade excelentes

Na Tabela 7, foi criada uma escala de 1 a 3 para classificar diferentes características que contribuem para a qualidade geral do modelo. Cada nível na escala representa tudo, desde a ausência completa da característica (nível 1) até sua representação ideal (nível 3). Essas descrições ajudam a tornar a avaliação mais objetiva e consistente.

Finalmente, o cenário 3D só é validado se atingir pelo menos o nível 2 em todas as características. Se algum item atingir o nível 1, o modelo 3D é refeito.

### ***Implementação do plano de treinamento***

Com o cenário 3D validado, é possível implementar o plano de treinamento que, (conforme será apresentado no subitem 4.1), é composto por três níveis de treinamento/aprendizagem abrangendo todos os tipos de funcionários, desde os iniciantes até os mais experientes. O framework foi testado contendo apenas o nível 1 do plano de treinamento, conforme detalhado na interação entre o usuário e o ambiente 3D:

- Ao acessar o ambiente, o usuário encontra uma tela inicial contendo informações de segurança. Após confirmar que leu e concordou com as instruções, o usuário é direcionado para o ambiente principal.
- Neste ambiente virtual, o usuário pode livremente "andar"/navegar com o mouse e interagir com vários elementos presentes. Marcadores no chão representam equipamentos da subestação. Ao se aproximar de um marcador, o usuário vê informações detalhadas sobre o equipamento em questão. Essa interação é automatizada por um script que detecta a proximidade do usuário e exibe as informações correspondentes.
- Além disso, o ambiente virtual conta com botões interativos que, ao serem clicados, iniciam a reprodução de vídeos relacionados à subestação, oferecendo um conteúdo mais dinâmico e aprofundado sobre os equipamentos e processos.

### ***Implementação e testes nos óculos de RM***

Após a implementação do plano de treinamento, a etapa de implementação e testes com óculos de RM será utilizada como parâmetro para ajustes na interatividade do usuário, incluindo alguns critérios (Tabela 8), conforme Gear Lab Homepage (2024):

1. Rastreamento de movimento: avalia a precisão e latência dos sensores de movimento.
2. Conforto: considera aspectos como o design ergonômico dos óculos, o ajuste e a distribuição de peso.
3. Qualidade visual: envolve avaliar a clareza da tela, o campo de visão (FOV) e o efeito "screen door" (visibilidade da grade de pixels).
4. Usabilidade diária: foca na facilidade de uso dos óculos, desde o processo de colocá-los e ajustá-los até a qualidade do áudio e do microfone integrados.

**Tabela 8**

Escala de classificação para avaliar a implementação em óculos de RM

<b>Característica</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
Rastreamento de movimento	Atrasos frequentes, movimentos imprecisos.	Razoável, com pequenos atrasos ou instabilidade.	Preciso e responsivo, sem perda de rastreamento.
Conforto	Desconforto após uso curto, peso mal distribuído.	Confortável por períodos moderados de tempo, pressão leve perceptível.	Confortável por longos períodos, peso bem distribuído.
Qualidade visual	Baixa resolução, distorções visuais.	Boa qualidade, mas falta nitidez nos detalhes.	Alta resolução, cores vibrantes, sem distorções.
Usabilidade diária	Difícil de usar continuamente, interface complicada.	Funcional, mas cansativo com uso prolongado.	Intuitivo e prático para uso diário contínuo.

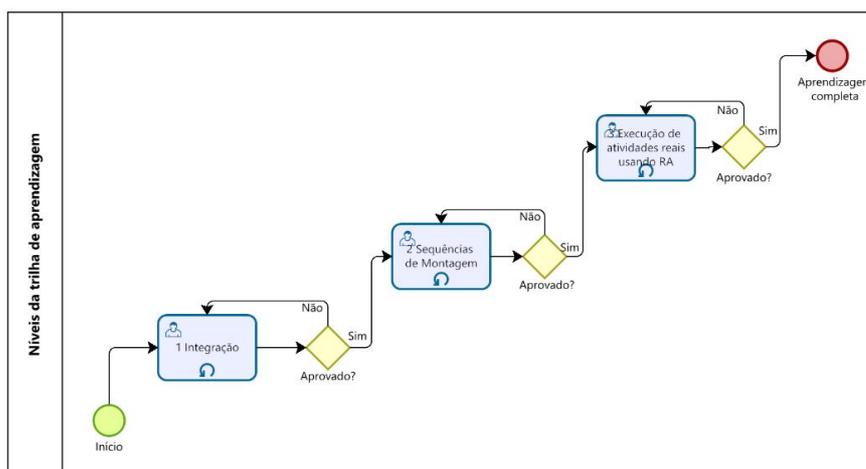
#### **IV. APLICAÇÃO DO FRAMEWORK**

O estudo apresentado investiga a estrutura criada para treinamento de RM que auxilia na manutenção de subestações elétricas, com foco na experiência do usuário e no potencial de aprendizagem. A análise é baseada em um estudo de caso e feedback do usuário, buscando identificar pontos fortes e áreas para melhoria da estrutura.

#### ***Metodologia educacional***

No planejamento deste projeto, um ponto levantado foi a questão educacional. Não somente em relação à criação do ambiente virtual imersivo, mas este se baseia em procedimentos educacionais, uma vez que o foco do projeto é a capacitação de operadores na indústria. O operador passará por um treinamento no ambiente com o objetivo de aprender em sua área de atuação, realizando atividades que agregarão ao seu

cotidiano, como: ampliação de peças para análise de manutenção, sequências de montagem de equipamentos, entre outras. A partir deste contexto, foi desenhada uma trilha de aprendizagem que abrangerá todos os tipos de funcionários, a partir do exemplo apresentado por Havard et al. (2019) em que foram definidos três níveis de dificuldade/aprendizagem: 1) o aluno apenas assiste, 2) o aluno é guiado no ambiente real através do ambiente virtual apresentado pelos óculos e 3) o aluno é autônomo para desenvolver a atividade). A trilha de aprendizagem atende desde os iniciantes até os funcionários mais experientes, conforme Figura 8.



**Fig. 8.** Níveis da trilha de aprendizagem

Na Figura 8, o nível 1 foi chamado de “integração” porque é onde parte do processo de integração dos funcionários acontece. É o início da jornada de aprendizagem e é voltado para novos funcionários ou pessoas que estão mudando de área de atividade. A integração inicial dos funcionários na indústria desempenha um papel crucial na construção de um relacionamento produtivo e satisfatório entre os novos membros e a organização. Este processo não é apenas uma formalidade, mas um investimento estratégico que impacta positivamente o desempenho, o engajamento e a satisfação a longo prazo. Além disso, a adaptação aos processos e procedimentos específicos da indústria é acelerada por meio da integração efetiva (Bauer & Erdogan, 2011). Isso não apenas facilita a curva de aprendizagem, mas também permite que os novos funcionários contribuam de forma mais rápida e eficaz para os objetivos organizacionais.

É importante destacar que a integração inicial acelerada é essencial para atingir uma produtividade mais rápida e efetiva (Bauer, 2021). Ao fornecer um processo eficiente, os funcionários se tornam produtivos mais rapidamente, contribuindo para o sucesso geral da organização. Por fim, o aluno utilizará os óculos Hololens 2 para visualizar os ambientes e conhecer os equipamentos e ferramentas disponíveis. Ao final desta etapa, cada aluno fará uma avaliação administrada pela empresa e, se aprovado, concluirá o nível 2. Caso seja reprovado, terá que refazer o treinamento de nível 1.

No nível 2, o usuário iniciará o treinamento simulando sequências de montagem no equipamento (no ambiente virtual). Como o foco é aprender a realizar a manutenção real, o usuário treinará nas mais diversas formas de montagem, e também poderá ampliar as peças para análises mais precisas e maior conhecimento do que encontrará no mundo real. Além disso, será possível realizar medições de grandezas elétricas simulando situações reais. Ao final desta etapa, o aluno fará uma avaliação prática na qual realizará manutenções reais em equipamentos ou peças eletromecânicas.

No nível 3, o usuário poderá ir ao ambiente real para realizar montagens e/ou reparos utilizando RA como auxílio, por meio do uso de óculos. Essas montagens/reparos serão os mesmos realizados no nível 2 (RV), porém no nível 3 serão realizados de forma real com RA como suporte. Nesta fase, o colaborador será acompanhado por um técnico/instrutor da área que realizará uma avaliação da capacidade técnica desenvolvida ao longo do treinamento. Adicionalmente, o uso de RA permitirá que os colaboradores visualizem instruções passo a passo e modelos 3D sobrepostos em equipamentos reais, facilitando a execução correta das tarefas e aumentando a precisão dos reparos. A interação com equipamentos reais, guiada por RA, proporcionará uma experiência de aprendizado imersiva, consolidando conhecimentos adquiridos e aprimorando habilidades práticas essenciais para o desempenho profissional.

### ***Exemplo de uso/operação do sistema***

Foi realizado um estudo de caso, com foco apenas no treinamento de nível 1, denominado “Integração”, conforme apresentado na Figura 8.

O primeiro elemento interativo inserido no ambiente é destacado para o usuário quando ele inicia a imersão. A tela tem fundo branco e é exibido um rótulo com as instruções de segurança necessárias para acessar a subestação (ambiente físico), conforme mostrado na Figura 9.



**Fig. 9.** Tela inicial do Ambiente Virtual

Conforme mostrado na Figura 9, até que o usuário clique no botão “Eu li e estou de acordo!”, essas informações não desaparecerão, nem o fundo branco. Além disso, as demais funções e interações permanecerão desabilitadas. Imediatamente após esse passo, as demais funcionalidades ficarão disponíveis para o usuário, conforme mostrado na Figura 9. No ambiente, o usuário pode se movimentar livremente e acessar algumas informações sobre os equipamentos da subestação.



**Fig. 10.** Vista geral (aérea) do ambiente virtual

Ainda na Figura 10, é possível observar cinco marcadores (quadrados brancos) no chão. Quando o usuário se posiciona sobre qualquer um desses marcadores, são acionados rótulos (exibindo textos que descrevem os equipamentos expostos) e imagens dos dispositivos que compõem o equipamento, apresentado na Tabela 9.

Obs: todos os textos são apresentados no exemplo da Figura 10.

**Tabela 9**

Textos descritivos dos equipamentos do ambiente virtual

<p><i>a) Transformadores de potência: “Transformadores de potência são dispositivos que aumentam ou reduzem a tensão elétrica para facilitar a transmissão eficiente de energia. Eles convertem energia elétrica de uma tensão para outra, permitindo a distribuição segura e eficaz de energia elétrica em linhas de transmissão de alta tensão.”</i></p>
<p><i>b) Pára-raios: “Pára-raios são dispositivos de proteção projetados para desviar correntes elétricas de surto, como as causadas por descargas atmosféricas, para o solo, protegendo assim os equipamentos e o sistema elétrico contra danos devido a sobretensões. Eles são essenciais para garantir a segurança e a confiabilidade da subestação, evitando danos aos equipamentos e interrupções no fornecimento de energia causados por surtos de alta tensão.”</i></p>
<p><i>c) Chaves seccionadoras: “Chaves seccionadoras são dispositivos de comutação projetados para abrir e fechar circuitos elétricos sem carga. Eles são usados para isolar seções específicas do sistema elétrico para manutenção, reparo ou emergência, permitindo o desligamento seguro dos equipamentos sem interromper o fornecimento de energia para outras partes do sistema.”</i></p>
<p><i>d) Disjuntores de alta tensão: “Disjuntores de alta tensão são dispositivos de proteção elétrica usados em subestações para interromper o fluxo de corrente elétrica em situações de sobrecarga ou curto-circuito, protegendo o sistema e os equipamentos de danos e garantindo a continuidade do fornecimento de energia.”</i></p>
<p><i>e) Linhas de barramento: “As linhas de barramento em uma subestação elétrica são condutores de alta capacidade que conectam os principais componentes do sistema, como transformadores e disjuntores. Eles servem como o principal meio de distribuição e transmissão de energia elétrica dentro da subestação, permitindo o fluxo eficiente de energia entre os diferentes equipamentos e circuitos.”</i></p>

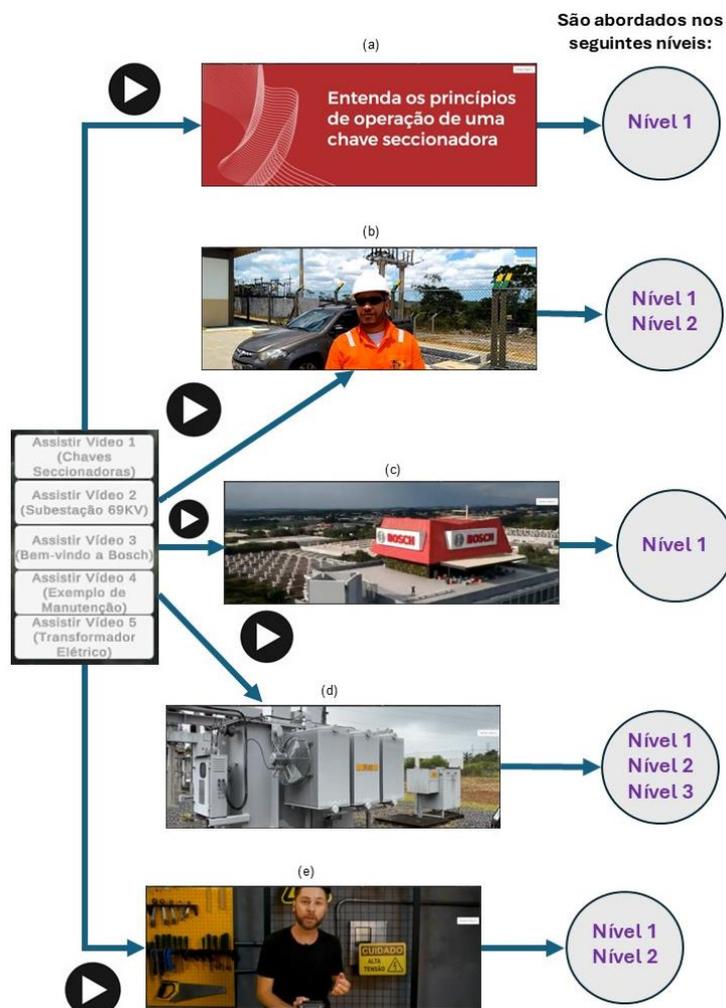
A Figura 11 apresenta um exemplo do acionamento de um rótulo que se refere aos transformadores de potência e através de figuras destalha brevemente os componentes que fazem parte do equipamento.



**Fig. 11.** Equipamento: Transformadores de potência e detalhamento do equipamento

Para essa funcionalidade, foi criado um script em linguagem C# para monitorar a proximidade do usuário ao equipamento. Quando uma distância pré-determinada é detectada, o texto é exibido. Essa abordagem não só facilita o entendimento do equipamento pelos usuários, como também adiciona uma camada de interatividade que aumenta o engajamento no treinamento.

Outra proposta incluída, para complementar a imersão do usuário, foi a inserção de botões que, ao serem clicados, exibiriam vídeos (Figura 12) relacionados à subestação elétrica.



**Fig. 12.** Vídeos disponíveis no Nível 1

É importante ressaltar que o usuário pode assistir aos vídeos em qualquer sequência, pois eles só são habilitados no nível 1, onde ocorre a imersão no ambiente virtual. Nos níveis 2 e 3, o usuário aplicará o conteúdo apresentado nos vídeos na prática, conforme mostrado na Figura 12 e explicado abaixo:

- O conteúdo dos vídeos 1 e 3 é praticado apenas no nível 1.
- O conteúdo dos vídeos 2 e 5 é praticado nos níveis 1 e 2 (VR).
- O conteúdo do vídeo 4 é praticado nos níveis 1, 2 (VR) e 3 (AR).
- O usuário só pode iniciar o nível 2 se tiver assistido aos vídeos 2, 3 e 5.
- O usuário só pode iniciar o nível 3 se tiver assistido ao vídeo 4.

### *Feedback/avaliação do usuário*

Conforme mencionado na seção 4, a análise do framework é baseada em um estudo de caso realizado e devido feedback dos usuários, buscando identificar pontos fortes e pontos de melhoria.

Para obter o feedback dos usuários, foi proposto um questionário no qual foram avaliadas a experiência de interação, a interface, as informações fornecidas, os aspectos 3D e as dificuldades durante a interação com o ambiente 3D. A Figura 13 apresenta as perguntas e algumas respostas obtidas dos usuários.

Questionário	Usuário 1	Usuário 2	Usuário 3
Qual é sua avaliação geral da experiência de interação com o modelo 3D da subestação?	A experiência foi muito positiva! O modelo 3D me proporcionou uma visão clara e detalhada da subestação, facilitando o entendimento do seu funcionamento.	A experiência foi interessante, mas senti falta de mais interatividade. Gostaria de poder manipular alguns componentes para entender melhor como eles funcionam.	Achei a experiência um pouco confusa no início, mas depois que me acostumei com a interface, consegui visualizar melhor os equipamentos e suas conexões.
Você achou a interface intuitiva e fácil de usar?	Achei a interface um pouco complicada no começo, mas com a ajuda do tutorial consegui me orientar melhor.	Sim, a interface foi muito intuitiva e fácil de navegar. Não demorou muito para me acostumar.	A interface era razoavelmente intuitiva, mas algumas funções poderiam ser mais claras, como a forma de dar zoom e girar.
As informações apresentadas foram suficientes para você entender como a subestação funciona?	Sim, as informações apresentadas foram suficientes para me dar uma boa ideia de como a subestação funciona de modo geral.	As informações sobre os principais componentes foram claras, mas faltaram detalhes sobre alguns processos específicos.	Eu já tinha algum conhecimento prévio sobre subestações, então as informações adicionais foram muito úteis.
Quais aspectos do modelo 3D você achou mais úteis?	A visualização 3D dos equipamentos e suas conexões foi o aspecto mais útil. Facilitou muito o entendimento da estrutura da subestação.	Os rótulos e informações adicionais sobre cada componente foram muito importantes para meu aprendizado.	A possibilidade de visualizar a subestação de diferentes ângulos me ajudou a ter uma visão mais completa do ambiente.
Quais foram as maiores dificuldades que você encontrou durante a interação?	Não tive muitas dificuldades. A experiência foi bem fluida.	Em alguns momentos, o desempenho do sistema ficou um pouco lento, o que atrapalhou um pouco a navegação.	Senti falta de mais informações sobre os procedimentos de segurança e normas técnicas aplicáveis à subestação.

**Fig. 13.** Questionário

A partir das respostas dos usuários, pode-se ver que o modelo 3D foi eficaz em fornecer uma compreensão espacial da subestação. No entanto, alguns usuários solicitaram mais detalhes e interatividade. A interface foi considerada intuitiva por muitos, mas alguns destacaram a necessidade de melhorias em termos de clareza e desempenho. As informações fornecidas foram consideradas úteis, mas alguns usuários solicitaram mais detalhes sobre processos específicos e padrões técnicos.

## V. CONCLUSÃO

A combinação de fotogrametria, modelagem 3D e interação em tempo real, aliada ao uso de óculos de Realidade Mista, proporciona uma experiência imersiva e eficaz para treinar funcionários na execução de tarefas de manutenção, promovendo a segurança, eficiência e qualidade dos processos industriais.

A pesquisa contribui para o avanço do conhecimento na área de tecnologias imersivas aplicadas à indústria, oferecendo uma solução inovadora para os desafios de treinamento em ambientes de difícil acesso e que apresentam riscos operacionais. A metodologia educacional proposta, com três níveis de dificuldade, garante uma aprendizagem progressiva e adaptada às necessidades dos usuários, independentemente do seu nível de experiência.

Os resultados obtidos, apoiados pela literatura e validados por meio de um estudo de caso, demonstram o impacto positivo do modelo proposto na capacitação de profissionais em ambientes industriais complexos. A melhora na percepção espacial, a facilidade de uso do aplicativo e a relevância das informações fornecidas demonstram o potencial da solução desenvolvida para melhorar o processo de treinamento e promover a segurança, eficiência e qualidade das operações industriais.

Ao priorizar a interatividade e a imersão, este trabalho busca validar o conceito de uso de tecnologias de baixo custo para criação de ambientes virtuais. Ainda que a qualidade da reconstrução 3D possa ser melhorada em trabalhos futuros, este estudo demonstra que é possível operar e interagir efetivamente em cenários virtuais reconstruídos. A pesquisa abre caminho para o desenvolvimento de novas melhorias, tanto na qualidade da reconstrução quanto na fluidez das interações, permitindo que essas soluções sejam aprimoradas com o avanço das tecnologias.

Espera-se que este trabalho inspire futuras pesquisas e desenvolvimentos na área, explorando o potencial das tecnologias imersivas para melhorar a educação, o treinamento e a segurança em diversos setores industriais. A evolução tecnológica exige soluções inovadoras para capacitar profissionais e impulsionar a inovação, e o framework proposto neste artigo representa um passo importante nessa direção.

As recomendações para trabalhos futuros incluem a ampliação da amostra de usuários para validar os resultados em diferentes contextos industriais e com diferentes perfis profissionais. O desenvolvimento dos níveis de treinamento 2 e 3, que envolvem a execução de tarefas guiadas e autônomas em ambientes virtuais, aprimorando ainda mais o aprendizado e o treinamento do usuário. Investigar os efeitos de longo prazo do treinamento em ambientes virtuais, avaliando a retenção de conhecimento e a transferência de habilidades para o mundo real. E, por fim, incluir métricas fisiológicas para avaliar a interação dos trabalhadores com o ambiente industrial, como frequência cardíaca, resposta galvânica da pele e eletroencefalografia, permitindo uma análise mais aprofundada do impacto do treinamento na experiência do usuário e sua capacidade de lidar com situações estressantes e de risco.

## V. REFERÊNCIAS

Abracopel Homepage. Anuário Estatístico de Acidentes de Origem Elétrica 2022. Disponível em: [https://abracopel.org/wp-content/uploads/2022/04/Abracopel\\_Digital\\_Correto-final.pdf](https://abracopel.org/wp-content/uploads/2022/04/Abracopel_Digital_Correto-final.pdf). Acesso: 05/04/2024.

ARAPAKIS, I., EFSTATHOPOULOS, E., TSITSIA, V., KORDOLAIMI, S., ECONOMOPOULOS, N., ARGENTOS, S., PLOUSSI, A., ALEXOPOULOU, E. Using "iDose4" iterative reconstruction algorithm in adults' chest-abdomen-pelvis CT examinations: Effect on image quality in relation to patient radiation exposure - Scientific Figure on ResearchGate. Available from: [https://www.researchgate.net/figure/Grading-scale-for-subjective-image-quality-evaluation\\_tbl2\\_260948952](https://www.researchgate.net/figure/Grading-scale-for-subjective-image-quality-evaluation_tbl2_260948952)>. Acesso: 23/11/2023.

- BAUER, T. N. Handbook of Human Resource Management (2021).
- BAUER, T. N.; ERDOGAN, B. The Oxford Handbook of Organizational Recruitment (2011).
- BUCHMANN, V. et al.: FingARtips: gesture based direct manipulation in augmented reality. In: Graphite '04: Proceedings of the 2nd international conference on computer graphics and interactive techniques in Australasia and South East Asia. New York: ACM, pp. 212-221 (2004).
- CHEN, Q., et al. Photogrammetric 3D Modeling of Industrial Processes. Industrial Engineering and Management (2020).
- FENG, J., ZHANG, Z. Photogrammetry-Based Quality Inspection System for Aerospace Components. Journal of Intelligent Manufacturing, 28(5), 1041–1052 (2017).
- GAVISH, N., GUTIÉRREZ, T., WEBEL, S., RODRÍGUEZ, J., PEVERI, M., BOCKHOLT, U., TECCHIA, F., 2015. Evaluating virtual reality and augmented reality training for industrial maintenance and assembly tasks. Interact. Learn. Environ. 23 (6), 778–798. <http://dx.doi.org/10.1080/10494820.2013.815221>.
- Gear Lab Homepage. How We Tested VR Headsets. Disponível em: <https://www.techgearlab.com/topics/wearable-tech/best-vr-headset/how-we-test>. Acesso: 10/06/2024.
- GENOVESE, K., et al. Photogrammetric Techniques for the 3D Modeling of Industrial Plants. International Journal of Mechanics (2019).
- HAVARD, V., JEANNE, B., LACOMBLEZ, M., BAUDRY, D. Digital twin and virtual reality: a co-simulation environment for design and assessment of industrial workstations. DOI: 10.1080/21693277.2019.1660283 (2019).
- KERBL, B., KAPANAS, G., LEIMKUHNER, T., DRETTAKIS, G. “3D Gaussian Splatting for Real-Time Radiance Field Rendering.” (2023).
- HE, B., LI, X., ZHOU, Y., LI, G.: Multisource Model-Driven Digital Twin System of Robotic Assembly, IEEE Systems Journal, vol. 15, no. 1, 114-123 (2021).
- LI, M., FENG, X., HAN, Y.: Brillouin fiber optic sensors and mobile augmented reality-based digital twins for quantitative safety assessment of underground pipelines, Automation in Construction, Volume 144 (2022).
- LIU, Q., ZHANG, Z., LI, Z. (2019). "Aerial Image Quality Analysis and Applications for UAV-based Remote Sensing." Remote Sensing, 11(3), 306.
- MAKRANSKY, G., BORRE-GUDE, S., MAYER, R.E., 2019. Motivational and cognitive benefits of training in immersive virtual reality based on multiple assessments. J. Comput. Assist. Learn. 35 (6), 691–707. <http://dx.doi.org/10.1111/jcal.12375>.

MIKHAIL, E. M., BETHEL, J.S., MCGLONE, J.C. Introduction to modern photogrammetry. John Wiley & Sons (2001).

OYEKAN, J.O., HUTABARAT, W., TIWARI, A., GRECH, R., AUNG, M.H., MARIANI, M.P., LÓPEZ-DÁVALOS, L., RICAUD, T., SINGH, S., DUPUIS, C.: The effectiveness of virtual environments in developing collaborative strategies between industrial robots and humans, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 55, Part A (2019).

PAULA FERREIRA, W., ARMELLINI, F., DE SANTA-EULALIA, L.A. Simulation in industry 4.0: A state-of-the-art review, *Computers & Industrial Engineering*, 1-17 (2020).

PAES, D., ARANTES, E., IRIZARRY, J. Immersive environment for improving the understanding of architectural 3D models: Comparing user spatial perception between immersive and traditional virtual reality systems. DOI: 10.1016/j.autcon.2017.09.016 (2017).

PEREZ, M. Microsoft unveils HoloLens 2: twice the field of view, eye tracking. TechCrunch. Disponível em: <<https://techcrunch.com/2019/02/24/microsoft-unveils-hololens-2-twice-the-field-of-view-eye-tracking/>>. Acesso: 03/11/2023.

SIYAEV, A., JO, G.-S. Towards aircraft maintenance metaverse using speech interactions with virtual objects in mixed reality. DOI: 10.3390/s21062066 (2021).

VALANDRO, R. “Tecnologia imersiva na indústria: Um framework para a construção de ambientes virtuais para simulação interativa” (2024).

YILDIZ, E., MOLLER, C., BILBERG, A. “Demonstration and evaluation of a digital twin-based virtual factory.” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 114:185-203. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-06825-w>. (2021).

ZHANG, M., SHU, L., LUO, X., YUAN, M., ZHENG, X., 2022. Virtual reality technology in construction safety training: Extended technology acceptance model. *Autom. Constr.* 135, 104113. <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2021.104113>.

## VI. COPYRIGHT

Direitos autorais: os autores são os únicos responsáveis pelo material incluído no artigo.