

**INSTITUTO FEDERAL GOIANO  
CAMPUS MORRINHOS  
CURSO DE BACHARELADO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO**

**DAYANNE BLEIDÃO AFONSO DA SILVA**

**REVISÃO SISTEMÁTICA SOBRE A REALIDADE AUMENTADA  
APLICADA NO PROCESSO DE MANUTENÇÃO DA INDÚSTRIA  
BRASILEIRA**

**MORRINHOS – GO  
2025**

**DAYANNE BLEIDÃO AFONSO DA SILVA**

**REVISÃO SISTEMÁTICA SOBRE A REALIDADE AUMENTADA  
APLICADA NO PROCESSO DE MANUTENÇÃO DA INDÚSTRIA  
BRASILEIRA**

Monografia apresentada ao Curso Superior de Ciências da Computação do Instituto Federal Goiano – Campus Morrinhos, como requisito parcial para obtenção de título de Bacharel em Ciências da Computação.

**Área de concentração:** Ciência da Computação.

**Orientador:** Prof. Dr. Alexandre Carvalho Silva.

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**  
**Sistema Integrado de Bibliotecas – SIBI/IF Goiano Campus Morrinhos**

S586r Silva, Dayanne Bleidão Afonso da.  
Revisão sistemática sobre a realidade aumentada aplicada no processo de manutenção da indústria brasileira. / Dayanne Bleidão Afonso da Silva. – Morrinhos, GO: IF Goiano, 2025.  
59 f. : il. color.

Orientador: Dr. Alexandre Carvalho Silva.

Trabalho de conclusão de curso (graduação) – Instituto Federal Goiano Campus Morrinhos, Bacharelado em Ciências da Computação, 2025.

1. Realidade aumentada. 2. Indústria Brasileira. 3. Revisão Sistemática.  
I. Silva, Alexandre Carvalho. II. Instituto Federal Goiano. III. Título.

CDU 004.946

Fonte: Elaborado pela Bibliotecária-documentalista Morgana Guimarães, CRB1/2837



## TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR PRODUÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DO IF GOIANO

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610, de 19 de fevereiro de 1998, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano a disponibilizar gratuitamente o documento em formato digital no Repositório Institucional do IF Goiano (RIIF Goiano), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IF Goiano.

### IDENTIFICAÇÃO DA PRODUÇÃO TÉCNICO-CIENTÍFICA

- Tese (doutorado)  Artigo científico  
 Dissertação (mestrado)  Capítulo de livro  
 Monografia (especialização)  Livro  
 TCC (graduação)  Trabalho apresentado em evento

Produto técnico e educacional - Tipo:

Nome completo do autor:

Dayanne Bleidão Afonso da Silva

Matrícula:

2018104201940259

Título do trabalho:

REVISÃO SISTEMÁTICA SOBRE A REALIDADE AUMENTADA APLICADA NO PROCESSO DE  
MANUTENÇÃO DA INDÚSTRIA BRASILEIRA

### RESTRIÇÕES DE ACESSO AO DOCUMENTO

Documento confidencial:  Não  Sim, justifique:

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIIF Goiano: 18 /02 /2025

O documento está sujeito a registro de patente?  Sim  Não

O documento pode vir a ser publicado como livro?  Sim  Não

### DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O(a) referido(a) autor(a) declara:

- Que o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- Que obteve autorização de quaisquer materiais incluídos no documento do qual não detém os direitos de autoria, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- Que cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano.

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** DAYANNE BLEIDAO AFONSO DA SILVA  
Data: 18/02/2025 18:18:44-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Morrinhos - GO  
Local

18 /02 /2025  
Data

Assinatura do autor e/ou detentor dos direitos autorais

Ciente e de acordo:

Assinatura do(a) orientador(a)

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** ALEXANDRE CARVALHO SILVA  
Data: 28/02/2025 16:02:37-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL  
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA  
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO

Ata nº 9/2025 - CCEG-MO/CEG-MO/DE-MO/CMPMHOS/IFGOIANO

### ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CURSO

### ATA DE DEFESA DA BANCA DE EXAME DE TRABALHO DE CURSO POR VIDEOCONFERÊNCIA

Aos **06** dias do mês de fevereiro de **2025**, às **19** horas foi realizada a Banca de Exame, em formato remoto para a apresentação pública e defesa do trabalho de curso do discente **DAYANNE BLEIDÃO AFONSO DA SILVA** intitulado **REVISÃO SISTEMÁTICA SOBRE A REALIDADE AUMENTADA APLICADA NO PROCESSO DE MANUTENÇÃO DA INDÚSTRIA BRASILEIRA**, como requisito necessário para a conclusão do curso.

A Banca de Exame foi constituída pelos membros: **Prof. Dr. Alexandre Carvalho Silva (orientador)**, **Prof. Esp. Odilon Fernandes Neto**, **Prof. Me. Maurício José Aureliano Júnior**. Após a análise, emitiram o seguinte resultado:

1 - (  ) **Aprovado**

2 - (  ) **Aprovado com ressalva**

(A Banca Examinadora deve definir as exigências a serem cumpridas pelo aluno na revisão, ficando o orientador responsável pela verificação do cumprimento das mesmas.)

Observações: \_\_\_\_\_

3 - (  ) **Reprovado com o seguinte parecer:** \_\_\_\_\_

Morrinhos -GO, 06 de fevereiro de 2025.

Por ser verdade firmamos a presente:

*(Assinado Eletronicamente)*

**Prof. Dr. Alexandre Carvalho Silva**

Orientador(a)

*(Assinado Eletronicamente)*

**Prof. Esp. Odilon Fernandes Neto**

Membro

*(Assinado Eletronicamente)*

**Prof. Me. Mauricio José Aureliano**

Membro

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** MAURICIO JOSE AURELIANO JUNIOR  
Data: 13/02/2025 10:27:42-0300  
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Documento assinado eletronicamente por:

- **Alexandre Carvalho Silva**, CHEFE - FG2 - UPIC-MO, em 06/02/2025 19:54:25.
- **Odilon Fernandes Neto**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 06/02/2025 19:57:41.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 06/02/2025. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifgoiano.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 673131  
Código de Autenticação: b39a9f02f8



INSTITUTO FEDERAL GOIANO

Campus Morrinhos

Rodovia BR-153, Km 633, Zona Rural, SN, Zona Rural, MORRINHOS / GO, CEP 75650-000

(64) 3413-7900

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, agradeço a Deus e à minha espiritualidade, que foram fontes constantes de força, sabedoria e fé durante toda essa jornada. Com a ajuda de uma energia maior, encontrei coragem e serenidade nos momentos de desafio. Sem essa orientação, nada disso seria possível.

Aos meus pais e irmãos, que, mesmo à distância, sempre se orgulharam de mim e torceram pelo meu sucesso. O apoio e incentivo de vocês foram fundamentais para que eu chegasse até aqui, e sou eternamente grata pelo amor incondicional e pelas orientações ao longo de toda a minha vida.

Ao Vitor Hugo, meu namorado, que esteve ao meu lado nessa caminhada. Por horas de apoio em chamadas, pelas palavras de encorajamento e por me motivar a nunca desistir. Seu amor e apoio foram essenciais para que eu seguisse em frente.

Ao meu orientador, Alexandre Carvalho, agradeço profundamente pela paciência, ensinamentos e por sempre me incentivar a buscar o melhor em cada etapa deste trabalho. Sua orientação foi crucial para o meu crescimento acadêmico e pessoal.

Aos meus amigos, pelo apoio constante e por acreditarem em mim, mesmo nas horas mais difíceis. Cada um de vocês teve um papel importante nesta trajetória, e sou grata pela amizade e incentivo.

A todos que fizeram parte dessa jornada, minha gratidão.

## RESUMO

A Realidade Aumentada (RA) vem se destacando no contexto industrial como uma tecnologia capaz de fornecer suporte visual e informações em tempo real durante a execução de processos complexos, como a manutenção de equipamentos. Essa tecnologia possibilita uma abordagem mais eficiente e segura, permitindo que os trabalhadores realizem tarefas com maior precisão e reduzindo o tempo necessário para a execução de atividades críticas. No setor industrial, especialmente na indústria brasileira, a RA apresenta um potencial relevante para otimizar a produtividade e aprimorar a segurança nas operações.

Este trabalho apresenta uma revisão sistemática sobre a aplicação da RA no processo de manutenção na indústria brasileira, com o objetivo de avaliar sua aplicabilidade e impactos na eficiência operacional e na segurança dos trabalhadores. A partir da análise de nove artigos selecionados, busca-se responder a três questões de pesquisa: (1) O estudo obteve aplicação em campo? (2) Como o estudo impacta a produtividade e eficiência dos trabalhadores no setor industrial? (3) Como o estudo pode ajudar a mitigar riscos de segurança? Esta pesquisa pretende contribuir com a compreensão do papel da RA no cenário industrial brasileiro e apoiar o desenvolvimento de práticas e políticas para sua implementação.

**Palavras-chave:** Realidade Aumentada, indústria brasileira, revisão sistemática, produtividade.

## **ABSTRACT**

Augmented reality (AR) has been gaining prominence in the industrial context as a technology capable of providing visual support and real-time information during the execution of complex processes, such as equipment maintenance. This technology enables a more efficient and safer approach, allowing workers to perform tasks with greater precision while reducing the time required for critical activities. In the industrial sector, particularly in Brazilian industry, AR presents significant potential for optimizing productivity and enhancing safety in operations.

This study presents a systematic review of the application of AR in the maintenance process within Brazilian industry, aiming to evaluate its applicability and impacts on operational efficiency and worker safety. Based on the analysis of nine selected articles, the study seeks to address three research questions: (1) Was the study applied in the field? (2) How does the study impact worker's productivity and efficiency in the industrial sector? (3) How can the study help mitigate safety risks?

This research aims to contribute with the understanding of AR's role in the Brazilian industrial context and support the development of practices and policies for its implementation.

**Keywords:** Augmented Reality, Brazilian industry, systematic review, productivity.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Head Mounted Display desenvolvido por Ivan Sutherland.....	5
Figura 2 – Utilização do HoloLens 2 .....	7
Figura 3 – Níveis de maturidade tecnológica (TRL) .....	10
Figura 4 – Comparativo entre as bases de dados .....	12
Figura 5 – Distribuição dos componentes para visualização do operador após a leitura de uma TAG.....	15
Figura 6 – Instruções para a inspeção de válvulas de segurança, após a leitura do marcador .....	16
Figura 7 – Comparativo dos anos de publicação dos artigos .....	29
Figura 8 – Comparativo entre as áreas de aplicação dos artigos .....	30
Figura 9 – Comparativo entre os equipamentos utilizados nos artigos .....	31
Figura 10 – Comparativo entre os estados dos artigos .....	32
Figura 11 – Sobreposição dos objetos em RA ao ambiente real, após a leitura de uma TAG .....	33
Figura 12 – Usuário realizando a leitura de um marcador .....	34
Figura 13 – Exemplificação do armazém utilizado na simulação da aplicação .....	34
Figura 14 – Tela conceitual de como o usuário visualiza os elementos exibidos pela <i>interface</i> .....	35
Figura 15 – Teste em ambiente fechado da aplicação .....	35
Figura 16 – Teste em ambiente aberto da aplicação .....	36
Figura 17 – Imagem da aplicação anexada no artigo de Riboldi <i>et al</i> .....	36
Figura 18 – Imagem da aplicação anexada no artigo de Corso <i>et al</i> .....	37
Figura 19 – Comparativo entre o TRL dos artigos .....	38

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Quadro comparativo dos artigos selecionados

24

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

API	Application Programming Interface
CNI	Confederação Nacional da Indústria
EPI	Equipamento de Proteção Individual
GASI	Grupo de Automação e Sistemas Integráveis
HMD	Head-Mounted Display
HVDC	High Voltage Direct Current
IA	Inteligência Artificial
IGI	Índice Global de Inovação
IoT	Internet das Coisas
NST	Non See-Through
OST	Optical See-Through
PIB	Produto Interno Bruto
QP	Questão de pesquisa
QR	Quick Response
RA	Realidade Aumentada
RAM	Random Access Memory
RV	Realidade Virtual
SDK	Software Development Kit
TMPM	Terminal Marítimo Ponta da Madeira
TRL	Technology Readiness Levels
Unesp	Universidade Estadual Paulista

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
<b>1.1</b>	<b>Organização do trabalho</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b>	<b>3</b>
<b>2.1</b>	<b>Indústria 4.0</b>	<b>3</b>
2.1.1	Indústria 4.0 no Brasil	4
<b>2.2</b>	<b>Realidade Aumentada</b>	<b>5</b>
2.2.1	Dispositivos de Realidade Aumentada	6
2.2.2	Realidade Aumentada no setor industrial	7
<b>2.3</b>	<b>TRL</b>	<b>8</b>
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>11</b>
<b>4</b>	<b>ANÁLISE DOS ARTIGOS SELECIONADOS</b>	<b>14</b>
<b>4.1</b>	<b>Comparação estruturada dos artigos</b>	<b>24</b>
<b>4.2</b>	<b>Questões de pesquisa</b>	<b>32</b>
4.2.1	Q.P. 1: “O estudo obteve aplicação em campo?”	32
4.2.2	Q.P. 2: “Como o estudo impacta a produtividade e eficiência dos trabalhadores no setor industrial?”	38
4.2.3	Q.P: 3: “Como o estudo pode ajudar a mitigar riscos de segurança?”	41
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>44</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>46</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Atualmente, a sociedade se encontra na era da Indústria 4.0, também chamada de quarta revolução industrial, marcada pela integração de tecnologias digitais avançadas que transformam os processos produtivos (CHMIELEWSKI, 2020). No entanto, para compreender sua relevância, é importante revisar as revoluções industriais anteriores.

A primeira revolução industrial, que ocorreu entre os séculos XVIII e XIX, foi marcada pela substituição dos métodos artesanais por máquinas movidas a vapor e a água. Mais tarde, a segunda revolução industrial, no final do século XIX e início do século XX, trouxe avanços importantes em áreas como química, eletricidade e a produção de aço. Nesse período, surgiram as primeiras linhas de produção, que viabilizaram a produção em massa (COELHO, 2016).

Já a terceira revolução industrial, que começou na segunda metade do século XX, foi marcada pela chegada dos computadores, automação, telefones móveis e internet (COELHO, 2016).

Por fim, a quarta revolução industrial, ou Indústria 4.0, representa uma transformação ainda mais significativa, integrando tecnologias como Robôs Autônomos, Internet das Coisas (IoT), Computação em Nuvem, Cibersegurança, Realidade Aumentada (RA), Realidade Virtual (RV) e Inteligência Artificial (IA) (CHMIELEWSKI, 2020).

Dentre as tecnologias que integram a Indústria 4.0, a Realidade Aumentada destaca-se por oferecer benefícios relevantes para os profissionais do setor industrial. Sua capacidade de sobrepor informações digitais ao mundo físico em tempo real transforma diversas áreas, tornando os processos mais ágeis, seguros e eficientes (GÉLIO, 2022). Esta tecnologia oferece benefícios também no aprimoramento da performance dos processos produtivos, redução de erros, ao fornecer instruções visuais detalhadas e precisas diretamente no ambiente de trabalho, minimizando falhas humanas e melhorando a execução de tarefas (COLETA, 2022). Além de que, a RA promove uma maior segurança ao orientar os operadores em tempo real, reduzindo riscos associados a procedimentos complexos ou perigosos (ROCHA, 2021).

Portanto, este trabalho tem como objetivo geral realizar uma revisão sistemática sobre a aderência do uso da Realidade Aumentada no processo de

manutenção na indústria brasileira. A partir de uma análise de artigos científicos, busca-se avaliar a aplicabilidade de projetos de pesquisa, desenvolvimento e inovação (P&DI) que se apropriam desta tecnologia e seus impactos na eficiência operacional e na segurança dos profissionais envolvidos. Com base nesta busca, este trabalho tem como objetivos específicos responder a três questões de pesquisa:

1. O estudo obteve aplicação em campo?
2. Como o estudo impacta a produtividade e eficiência dos trabalhadores no setor industrial?
3. Como o estudo pode ajudar a mitigar riscos de segurança?

Com base nas respostas obtidas para as questões de pesquisa, espera-se contribuir para o avanço do conhecimento e a identificação de oportunidades relacionadas ao uso da Realidade Aumentada no contexto industrial brasileiro. O objetivo é fornecer informações relevantes que possam apoiar tanto o desenvolvimento tecnológico quanto a implementação prática dessa tecnologia no setor, fortalecendo sua aplicação e impacto na indústria nacional.

## **1.1 Organização do trabalho**

Este trabalho monográfico está estruturado em quatro seções principais, apresentadas de forma a garantir uma abordagem clara e objetiva sobre o tema.

A primeira seção contextualiza o tema abordado, apresentando o objetivo geral, juntamente com as questões de pesquisa e relevância do estudo.

Em seguida, o referencial teórico reúne os principais conceitos e estudos relacionados ao tema, fornecendo embasamento necessário para a análise e discussão.

A terceira seção aborda a metodologia, detalhando os métodos, ferramentas, bases de busca e estratégias utilizadas para a condução da pesquisa.

Por fim, a quarta seção, análise e conclusões, apresenta os resultados obtidos, realiza uma discussão baseada no referencial teórico e destaca as contribuições do estudo e suas limitações.

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

O referencial teórico deste trabalho aborda os conceitos e fundamentos essenciais para compreender o uso da Realidade Aumentada no contexto da manutenção industrial. Inicialmente, explora-se a Indústria 4.0 e suas tecnologias habilitadoras, com ênfase na RA como uma ferramenta inovadora para otimizar processos produtivos e aumentar a eficiência operacional. Além disso, investiga-se como essa tecnologia tem sido implementada no cenário brasileiro, considerando particularidades do setor industrial do país. Por fim, será apresentado o conceito de TRL (Technology Readiness Level), juntamente com a descrição de seus níveis, como uma metodologia para avaliar o nível de maturidade das tecnologias dos artigos selecionados.

### **2.1 Indústria 4.0**

O termo Indústria 4.0 foi introduzido pela primeira vez em 2011, durante a Feira de Hannover, na Alemanha. Esse termo se refere à quarta revolução industrial, caracterizada pela integração de tecnologias avançadas que unem o mundo físico ao digital, promovendo a automação, a conectividade e a análise inteligente de dados (COELHO, 2016).

A Indústria 4.0 é definida como a transformação dos processos produtivos por meio de Sistemas Ciberfísicos, Robôs Autônomos, Internet das Coisas, Computação em Nuvem, Cibersegurança, Realidade Aumentada, Realidade Virtual e Inteligência Artificial. Esses elementos trabalham de forma integrada para criar um ambiente de produção mais eficiente, flexível e personalizado (DA SILVA, 2022). Esta era da quarta revolução industrial tem como principal objetivo aprimorar a eficiência dos sistemas de produção e gestão, visando maximizar os lucros e possibilitar o desenvolvimento de fábricas digitais e inteligentes (LASKURAIN-ITURBE, 2021).

A adoção de tecnologias da Indústria 4.0 permitirá que as indústrias se tornem inteligentes, com a capacidade de operar de forma autônoma. Isso inclui programar manutenções de forma proativa, prever e antecipar falhas nos equipamentos e adaptar-se rapidamente a requisitos e mudanças não planejadas no processo produtivo (YAMADA, 2018).

### **2.1.1 Indústria 4.0 no Brasil**

O setor industrial brasileiro desempenha um papel fundamental na economia do país contribuindo significativamente para a geração de riquezas e a criação de empregos. No entanto, esse setor também demanda investimentos substanciais para se manter competitivo. Paralelamente, retrações econômicas têm um impacto direto e negativo sobre a indústria. Essa interdependência entre o setor industrial e a economia pode ser avaliada por meio de indicadores como: a participação da indústria de transformação no Produto Interno Bruto (PIB), o Índice Global de Inovação (IGI), a produtividade industrial, o Índice Global de Competitividade da Manufatura e o próprio Produto Interno Bruto (PIB). Esses índices fornecem uma visão abrangente sobre a saúde e a competitividade do setor, bem como seu impacto na economia nacional (TEIXEIRA, 2019).

Em uma pesquisa realizada pela Confederação Nacional da Indústria (CNI) em 2016, que envolveu 2.225 empresas, distribuídas entre 910 pequenas, 815 médias e 500 grandes, constatou-se que 58% das indústrias reconhecem a importância das tecnologias digitais para a competitividade industrial. Contudo, menos da metade delas efetivamente adotam essas tecnologias. A mesma pesquisa revelou um padrão comum entre as indústrias brasileiras: elas tendem a priorizar iniciativas voltadas para o aumento da eficiência operacional antes de investir em aplicações voltadas ao desenvolvimento de novos produtos ou à criação de novos modelos de negócio. Entretanto, dada a posição competitiva do Brasil na economia global, o ideal seria que os esforços de digitalização fossem conduzidos de maneira integrada, abordando simultaneamente todas essas dimensões para maximizar os resultados e impulsionar a competitividade (CNI, 2016).

Embora a adoção das tecnologias da Indústria 4.0 ofereça inúmeras vantagens, como aumento de produtividade, maior integração de processos e acesso facilitado a informações operacionais, surgem também desafios significativos associados à sua implementação no cenário brasileiro. Entre as principais preocupações estão as consequências no mercado de trabalho, que incluem a possível substituição de empregos tradicionais por funções altamente especializadas, a segurança da informação, devido ao aumento do volume e da sensibilidade dos dados gerados, e a demanda por novos perfis de mão de obra

qualificada. Esses fatores refletem os principais dilemas enfrentados pelas organizações ao buscarem equilibrar os benefícios tecnológicos com os impactos sociais e econômicos de sua adoção (TEIXEIRA, 2019).

A indústria brasileira está se preparando para um avanço significativo em 2025, com a adoção crescente de tecnologias da Indústria 4.0. Espera-se que o PIB industrial cresça até 2,5% em 2025, refletindo a resiliência do setor e seu foco em eficiência, competitividade e sustentabilidade (CANAL, 2025).

## 2.2 Realidade Aumentada

O termo "Realidade Aumentada" foi introduzido na década de 1990 pelo pesquisador da Boeing, Tom Caudell. Caudell desenvolveu um sistema de Realidade Aumentada com o objetivo de auxiliar os trabalhadores da produção, permitindo que acessassem informações necessárias que atualizam dinamicamente durante as operações de fabricação ou montagem (CAUDELL, 1992). Porém, anos antes, por volta de 1960, Ivan Sutherland, professor da Universidade de *Harvard*, desenvolveu o primeiro capacete controlado por computador. Esse dispositivo pioneiro permitia que as imagens se ajustassem dinamicamente aos movimentos da cabeça do usuário (Figura 1) (BORODKIN, 2022).

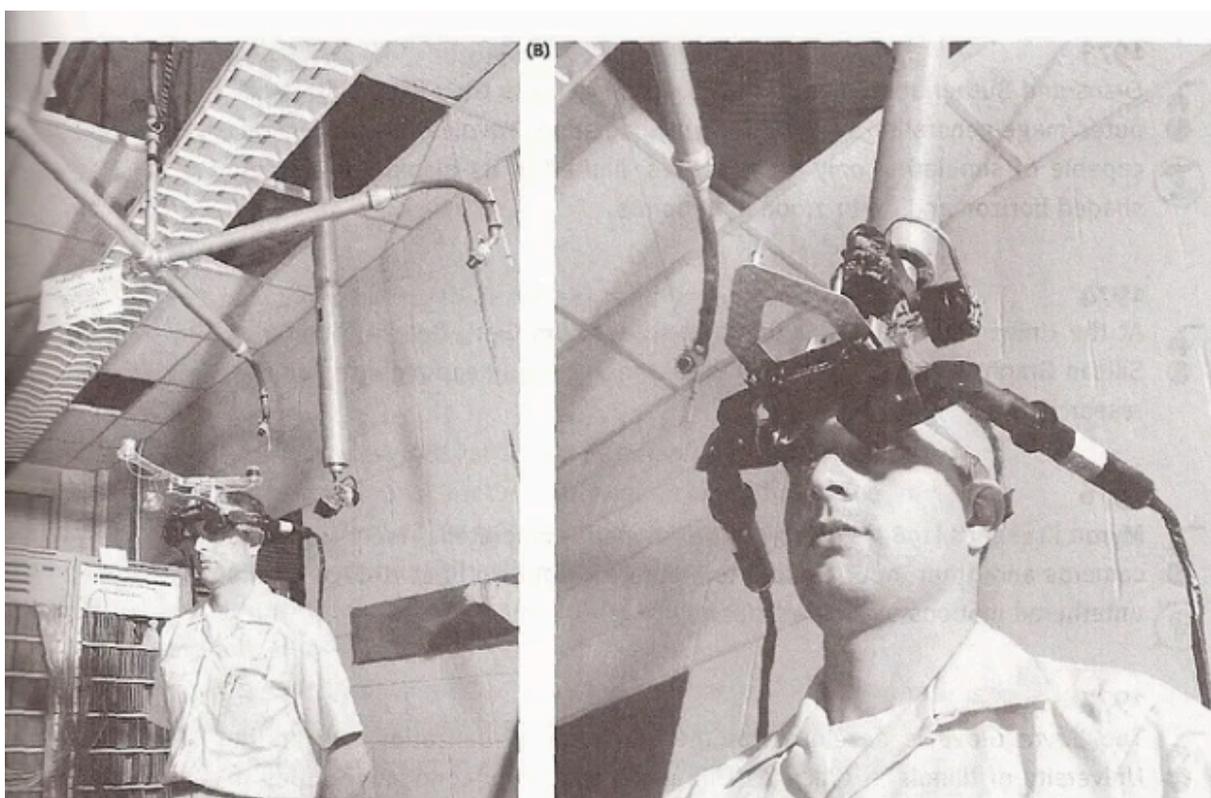


Figura 1: Head Mounted Display desenvolvido por Ivan Sutherland.

Fonte:

<https://medium.com/@educuarone/realidade-virtual-passado-lisergico-futuro-distopico-presente-alienante-3b68fe5647f>

Esta tecnologia é utilizada para “aumentar” o campo visual do usuário com informações essenciais para a execução da tarefa em andamento, por essa razão, ela passou a ser conhecida como “Realidade Aumentada” (CAUDELL, 1992).

Já foi considerado que a RA seria uma extensão da Realidade Virtual (TORI, 2020), porém, há diferenças importantes entre essas tecnologias. De acordo com Azuma *et al.* (2001), a Realidade Aumentada é um sistema que complementa o mundo real com objetos virtuais que parecem coexistir no mesmo espaço do mundo real. Em contraste, a RV tem como objetivo substituir completamente a percepção do mundo real, imergindo o usuário em um ambiente virtual (TORI, 2020).

O propósito da Realidade Aumentada é permitir que o usuário interaja de forma mais natural e intuitiva com o mundo real e os elementos virtuais, minimizando obstáculos na interação. Para isso, os sistemas de RA utilizam técnicas de rastreamento que possibilitam identificar a posição ideal para inserir os elementos virtuais e determinar a forma como devem ser exibidos ao usuário, considerando sua perspectiva em tempo real (TORI, 2020).

### **2.2.1 Dispositivos de Realidade Aumentada**

A tecnologia de RA destaca-se por sua alta flexibilidade, permitindo sua integração em diversos ambientes, inclusive em setores industriais. Além disso, a ampla disponibilidade de dispositivos de *hardware*, como *smartphones* e *tablets*, torna a adoção da RA mais acessível e prática nos ambientes industriais (DA SILVA, 2024).

A experiência de Realidade Aumentada só se torna viável com o uso de dispositivos específicos, como óculos de Realidade Virtual e Realidade Aumentada, conhecidos como HMDs (*Head-Mounted Displays*), ou dispositivos móveis, como *smartphones* e *tablets* (WILLIG, 2024).

Os óculos de RV e RA são equipamentos eletrônicos projetados para integrar elementos digitais tridimensionais ao ambiente real, proporcionando uma experiência imersiva ao usuário (WILLIG, 2024), na Figura 2 é apresentado a utilização do óculos inteligente HoloLens 2.



Figura 2: Utilização do HoloLens 2.

Fonte: Microsoft

Já no caso dos *smartphones* e *tablets*, a visualização da RA requer a utilização de aplicativos especializados. Esses aplicativos processam as imagens capturadas pela câmera do dispositivo, permitindo que elementos virtuais sejam inseridos e sobrepostos ao ambiente real em tempo real. Assim, a câmera atua como uma ponte entre o mundo físico e o digital, enquanto o *software* de RA realiza a integração dos objetos virtuais à cena capturada (WILLIG, 2024).

### 2.2.2 Realidade Aumentada no setor industrial

Segundo Iker Laskurain-Iturbe *et al.* (2021), a Realidade Aumentada possibilita a simulação de situações para o treinamento de trabalhadores, a prevenção de riscos em ambientes perigosos, a melhoria na tomada de decisões e a execução de procedimentos complexos, além de proporcionar maior interatividade e eficiência.

Por estar demonstrando um potencial considerável para melhorar a eficiência e produtividade no setor industrial, estudos apontam que a RA pode ser aplicada em diversas áreas da indústria, como segurança, manutenção, treinamento, montagem, entre outros (DA SILVA, 2024), tendo os seguintes benefícios:

- **Segurança:** por ser possível localizar os equipamentos corretos e guiar passo a passo os trabalhadores, tem-se uma redução de erro humano, assim ajudando na segurança de todos (ROCHA, 2021);
- **Treinamento:** o treinamento por meio da RA facilita para que tenha um auxílio na execução de serviços de montagem, manutenção de equipamentos, entre outros. Tendo em vista que não é necessário o trabalhador ir diretamente para o local para receber o treinamento, reduz o número de erros e diminui o tempo do treinamento (JUSTIMIANO, 2021);
- **Manutenção:** tem-se a manutenção e reparos de equipamentos mais rápido, visando que não haja uma busca manual de informações técnicas e de operação, já que as informações serão computadorizadas e mostradas através da RA (ROCHA, 2021).

## 2.3 TRL

Os *Technology Readiness Levels* (TRL, ou Níveis de Prontidão Tecnológicas) são uma ferramenta desenvolvida pela NASA para avaliar a maturidade de uma tecnologia ao longo do seu ciclo de desenvolvimento. Essa metodologia fornece uma métrica padronizada para determinar o estágio de evolução de uma tecnologia, facilitando a tomada de decisão e permitindo comparações claras entre diferentes tecnologias (CORRÊA, 2018). Essas métricas foram utilizadas neste trabalho monográfico para medir o nível de maturidade das aplicações dos artigos selecionados.

Os TRL são divididos em nove níveis, que abrangem desde os primeiros estudos conceituais até a implementação plena em um ambiente operacional. Os níveis são (GIL, 2014):

1. TRL 1 - Observação e registro dos princípios básicos: neste nível, a pesquisa científica básica é conduzida, e os princípios fundamentais da tecnologia são identificados.

2. TRL 2 - Conceito tecnológico e/ou aplicação formulada: com base nos princípios identificados, desenvolve-se um conceito tecnológico inicial.
3. TRL 3 - Função crítica analítica e experimental e/ou prova do conceito característico: com base nos princípios identificados, desenvolve-se um conceito tecnológico inicial. Esse estágio envolve hipóteses e estudos de viabilidade para aplicações específicas; uma prova de conceito.
4. TRL 4 - Validação do componente e/ou equipamento em ambiente laboratorial: a tecnologia é validada em um ambiente controlado de laboratório, integrando os componentes e subsistemas.
5. TRL 5 - Validação do componente e/ou equipamento em ambiente relevante: os componentes e subsistemas são testados em um ambiente relevante que simula condições operacionais reais, embora ainda não seja o ambiente final.
6. TRL 6 - Modelo de sistema/subsistema ou protótipo de demonstração em ambiente relevante (no solo ou no espaço): um protótipo representativo do sistema final é desenvolvido e demonstrado em um ambiente relevante, aproximando-se das condições reais de operação.
7. TRL 7 - Demonstração do protótipo do sistema num ambiente espacial: o protótipo do sistema é testado em um ambiente operacional real, comprovando sua funcionalidade em condições práticas.
8. TRL 8 - Sistema completado e “qualificado para voo” através de testes e demonstração (no solo ou no espaço): a tecnologia está pronta para uso e foi testada e validada como um sistema completo, atingindo todas as especificações exigidas para a aplicação.
9. TRL 9 - Sistema “aprovado em voo” em operações de missões sucessivas: o sistema está em pleno funcionamento no ambiente operacional real, concluindo o ciclo de desenvolvimento e implantação.

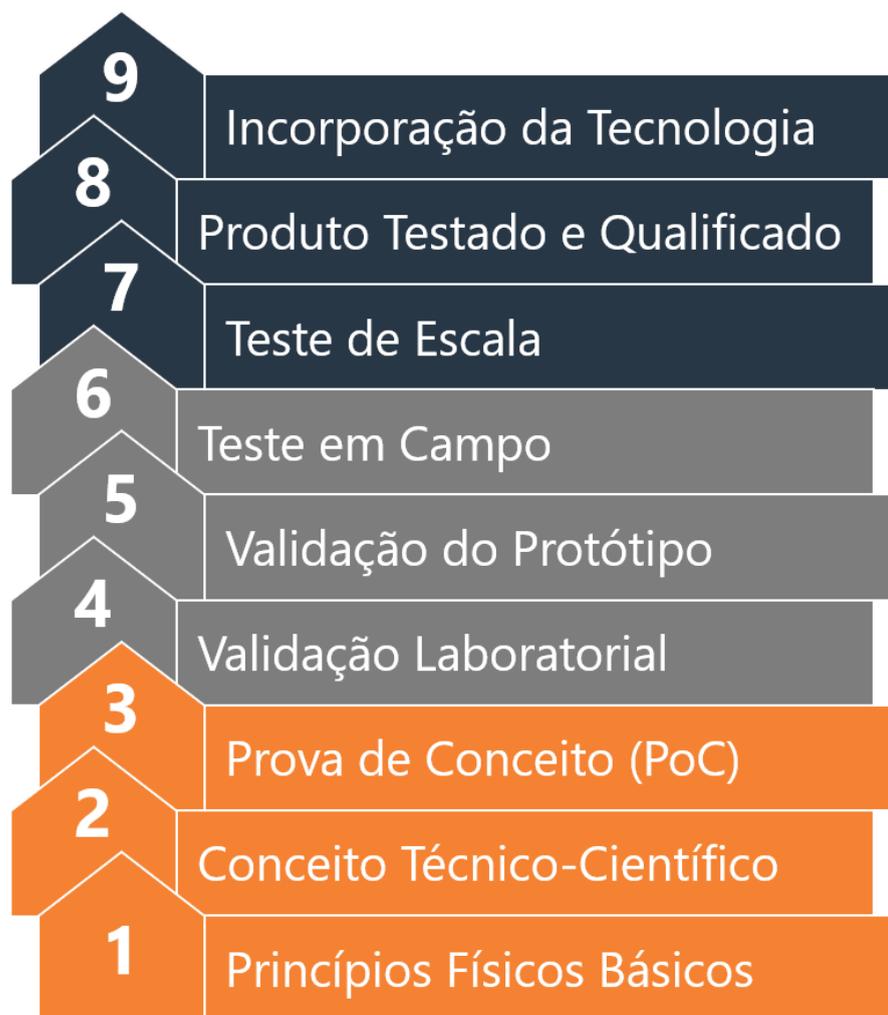


Figura 3: Níveis de maturidade tecnológica (TRL).

Fonte: Instituto SENAI SC.

### 3 METODOLOGIA

Para a realização da revisão sistemática deste trabalho, optou-se por analisar pesquisas do setor industrial brasileiro que utilizaram a Realidade Aumentada como ferramenta para aprimorar suas atividades. O foco principal recaiu sobre as áreas de aplicação em segurança, manutenção e treinamento.

Foram consultadas as seguintes bases de dados: *ACM Digital Library*, *Google Acadêmico* e *IEEE Xplore*. Os critérios de inclusão limitaram a seleção a artigos publicados no intervalo de 10 anos, entre 2014 e 2024.

Adicionalmente, a pesquisa considerou exclusivamente artigos realizados e aplicados no Brasil, uma vez que o estudo está diretamente relacionado ao setor industrial brasileiro.

As seguintes palavras, tanto em português quanto em inglês, foram utilizadas como parâmetro durante a fase de busca: “Realidade Aumentada” *AND* “manutenção” *AND* “segurança”; “Realidade Aumentada” *AND* “indústria”; “Realidade Aumentada” *AND* “indústria”; “Realidade Aumentada” *AND* “óculos inteligente” *AND* “segurança”; “Realidade Aumentada” *AND* “indústria” *AND* “treinamento”; “Realidade Aumentada” *AND* “setor industrial”.

Com o objetivo de otimizar o processo, foram conduzidas cinco etapas de filtragem, descritas a seguir:

- Etapa 1: Leitura do título, resumo e palavras-chave;
  - Aplicação dos critérios de inclusão e exclusão;
- Etapa 2: Análise da introdução;
- Etapa 3: Análise da conclusão;
  - Verificando se o artigo possuía de fato uma aplicação;
- Etapa 4: Leitura completa dos artigos;
  - Reaplicação dos critérios de inclusão e exclusão;
- Etapa 5: Apresentação dos resultados.

No desenvolvimento desta revisão sistemática, não foi utilizada nenhuma ferramenta específica para a gestão de referências e citações. A seleção e análise dos estudos foram realizadas manualmente, seguindo rigorosamente as etapas de filtragem previamente estabelecidas, garantindo que a inclusão dos trabalhos fosse baseada exclusivamente nos critérios definidos para a pesquisa.

Os artigos selecionados para a revisão sistemática serão apresentados através de um quadro comparativo, onde serão listados: título, autor(es), áreas de aplicação, setor, equipamento, TRL, ano de publicação, região e escopo, sendo um breve resumo sobre o artigo.

A revisão sistemática tem como objetivo responder às seguintes questões de pesquisa identificadas nos artigos selecionados:

1. O estudo obteve aplicação em campo?
2. Como o estudo impacta a produtividade e eficiência dos trabalhadores no setor industrial?
3. Como o estudo pode ajudar a mitigar riscos de segurança?

Na primeira questão de pesquisa, também será avaliado o TRL em que a pesquisa se encontra. Essa análise considera se a aplicação passou por validação em laboratório, testes em campo, testes em escala, entre outros estágios de desenvolvimento.

Como a busca está relacionada à área da computação, é importante destacar que essa área possui forte aderência a conferências, eventos, congressos, simpósios e *workshops*. Essa abordagem está alinhada à normativa Qualis CAPES, que reconhece a relevância de eventos científicos na área de computação (CAPES, 2021).

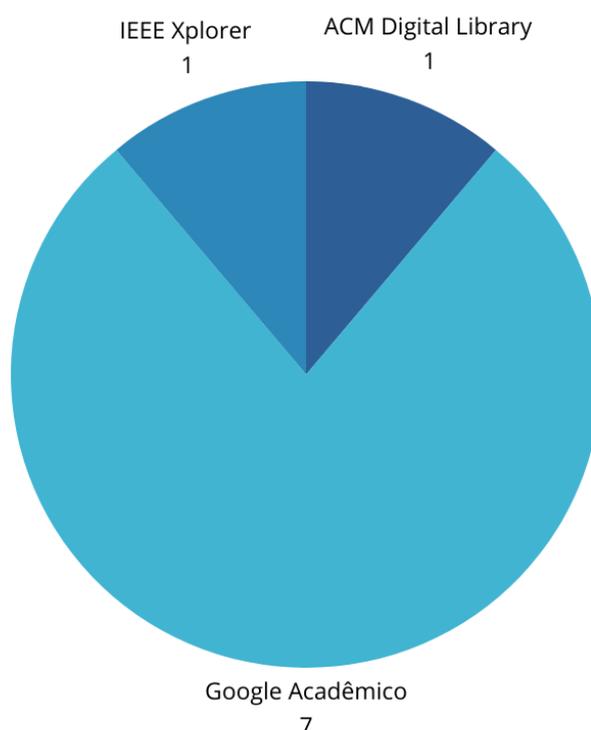


Figura 4: Comparativo entre as bases de dados.

Fonte: A autora.

A Figura 4 apresenta a distribuição dos artigos selecionados, observa-se que a maior parte dos artigos (7 de 9) foi encontrada na plataforma *Google Acadêmico*, enquanto apenas um artigo foi encontrado em cada uma das outras duas bases de dados: *IEEE Xplore* e *ACM Digital Library*.

Esse resultado sugere que o *Google Acadêmico* foi a fonte mais eficiente para identificar estudos relacionados ao tema no contexto brasileiro. Isso pode ser explicado pelo fato de o *Google Acadêmico* incluir uma ampla variedade de publicações, incluindo artigos de eventos e periódicos regionais, que frequentemente abordam pesquisas realizadas no Brasil. Em contrapartida, bases de dados mais específicas, como *IEEE Xplore* e *ACM Digital Library*, tendem a focar em publicações de alcance global, o que pode limitar a visibilidade de trabalhos locais ou regionais.

## 4 ANÁLISE DOS ARTIGOS SELECIONADOS

Nesta seção, será apresentada a análise dos artigos selecionados para a revisão sistemática, com base nos critérios estabelecidos previamente.

O processo de análise dos artigos será iniciado com uma apresentação descritiva, oferecendo uma visão geral do trabalho realizado em cada estudo. Em seguida, as principais informações de cada artigo serão apresentadas em um quadro comparativo (Quadro 1, que incluirá campos como título, autor(es), área de aplicação, setor, equipamento, TRL, ano de publicação, região e escopo. Os campos que estiverem com um traço (—) significa que a informação não foi identificada no artigo.

- Realidade Aumentada Aplicada à Redução de Riscos na Segurança do Trabalho em Subestações Elétricas:

Conforme descrito no artigo de Rocha (2021), o objetivo geral do trabalho consiste em desenvolver uma aplicação da Tecnologia de Realidade Aumentada Móvel como meio de orientação de acesso e instruções de segurança junto a operadores/mantenedores de subestações elétricas industriais. Tem-se este objetivo visto que o trabalhador fica exposto a diversos riscos para a saúde, tendo como exemplo o choque elétrico. O intuito do trabalho seria mitigar os riscos nos trabalhos que envolvem eletricidade.

Inicialmente foi modelado uma subestação elétrica simplificada em 3D para experimentação em Realidade Virtual, com o objetivo de realizar testes com os operadores/mantenedores dos equipamentos, para assim avaliar a experiência do usuário quanto ao uso do protótipo e definir quais são os principais requisitos que podem ser utilizados para a construção da aplicação final. Com os resultados obtidos com o protótipo em Realidade Virtual, foi construído o sistema em Realidade Aumentada, como forma de reduzir os custos necessários para a possível implementação nas empresas.

O estudo foi feito em uma subestação elétrica responsável pela alimentação da empilhadeira EP-313K-06, localizada no Terminal Marítimo Ponta da Madeira (TMPM) — um porto privado operado pela empresa Vale S/A, situado em São Luís, Maranhão.

Com o desenvolvimento da aplicação de Realidade Aumentada foi utilizada a plataforma SDK *Vuforia* integrada ao *Unity 3D*. No desenvolvimento também foi definido que cada painel elétrico seria representado por somente uma *TAG*. Após vincular a *TAG* ao painel, foram elaboradas telas com informações de destaque personalizadas exibindo o grau de risco, distância segura, EPI's recomendados, corrente elétrica instantânea, descritivos de cada um dos painéis e rotas de fuga, como mostrado na figura 5.



Figura 5: Distribuição dos componentes para visualização do operador após a leitura de uma *TAG*.

Fonte: Rocha, 2021.

- Potencial de Aplicação de *Workflow* Baseado em Realidade Aumentada na Inspeção em Válvulas de Segurança:

Rossi desenvolveu um *workflow* (um fluxograma) que representa visualmente as ações necessárias para a realização de tarefas específicas de manutenção utilizando Realidade Aumentada. A motivação para esse desenvolvimento surgiu a partir da identificação, por Rossi, de uma lacuna no processo de manutenção de equipamentos no ambiente industrial. O estudo de De Brito et al. (2021) analisou o potencial de aplicação do *workflow* baseado em RA, proposto por Rossi, no contexto da inspeção de válvulas de segurança.

A pesquisa foi conduzida em uma empresa especializada na manutenção de válvulas industriais, com mais de trinta anos de atuação no mercado. Embora a empresa já possuísse um *workflow* interno para os procedimentos de manutenção, a análise das equipes envolvidas revelou deficiências na etapa de inspeção final do processo, considerada uma fase crítica. Com isso, essa

etapa foi escolhida como foco para a aplicação do fluxograma proposto por Rossi.

Para implementar o *workflow*, foi necessário o uso de um dispositivo eletrônico, como um *tablet* ou *smartphone*, que atendesse aos seguintes requisitos mínimos: processador *Octa-Core* 2.0GHz, 64 GB de memória interna, 3 GB de memória *RAM*, câmera integrada de 8 MP, conexão *Wi-Fi*, bateria de 5000 mAh, tela de 6 polegadas e sistema operacional *Android* 9.0. A implementação utilizou a plataforma *Unity* em conjunto com o *software* SDK do *Vuforia*.

A análise do *workflow* existente na empresa revelou desvios associados à falta de atenção dos inspetores, o que frequentemente resultava na entrega de válvulas de segurança com falhas aos clientes. Para mitigar esses problemas, foi desenvolvido uma aplicação em RA com um *checklist* detalhado, especificando os itens a serem inspecionados e a melhor forma de realizar a inspeção. Esse *checklist* pode ser acessado por meio de um marcador fixado diretamente no equipamento a ser inspecionado, reduzindo significativamente a possibilidade de erros. Na figura 6 é possível visualizar a tela da aplicação realizada em RA com o *checklist*.



Figura 6: Instruções para a inspeção de válvulas de segurança, após a leitura do marcador.

Fonte: De Brito *et al.* (2021)

- Realidade Aumentada nos Processos Logísticos de Armazenamento:

No artigo de Soares (2021), é relatado que o Brasil enfrenta um atraso significativo em relação à evolução da indústria mundial. De acordo com a CNI, em 2016, cerca de 52% das empresas industriais brasileiras não utilizavam nenhuma tecnologia digital. Além disso, foi constatado que grande parte das indústrias brasileiras ainda operava no patamar da Indústria 2.0. Dada a importância das indústrias para a economia nacional, o artigo aponta que um estudo sobre a implementação de RA e óculos inteligentes nos processos logísticos poderia contribuir para superar barreiras relacionadas à adoção dessas tecnologias no setor industrial e logístico brasileiro.

Acredita-se que, ao mitigar essas dificuldades e facilitar a implementação de tecnologias associadas à Indústria 4.0, será possível impulsionar o crescimento econômico do país de forma acelerada. A proposta apresentada no estudo inclui benefícios como a redução de custos internos, tanto estruturais quanto de produção, o aumento da produtividade, a viabilização de produção customizada em larga escala e a possibilidade de decisões estratégicas mais rápidas e assertivas.

O objetivo do trabalho foi simular a implementação da Realidade Aumentada, com o uso de óculos inteligentes, nos processos de coleta e separação de materiais em um armazém, trazendo mais segurança e eficiência aos operadores envolvidos.

Para selecionar o equipamento mais adequado, foram analisados quatro modelos de óculos inteligentes: *Realwear* HMT-1, *Zebra* HD4000, *Vuzix* M300 e *Microsoft HoloLens 2*. Após a análise, o modelo escolhido foi o HMT-1, da fabricante *Realwear*. Esse dispositivo permite que os operadores visualizem informações essenciais sem ocupar as mãos, utilizando apenas comandos de voz. Entre as informações exibidas estão a lista de materiais a serem coletados, o endereço de cada item e o local de entrega.

Para integrar as funcionalidades dos óculos inteligentes ao fluxo de trabalho, foi utilizada a plataforma *TeamViewer Frontline*, que oferece soluções de RA configuráveis. No projeto, foram empregadas as soluções específicas *XPick*, *Frontline Creator* e *Frontline Workplace*. O *XPick* foi utilizado devido às suas características adequadas para a aplicação de RA, o *Frontline Creator* foi essencial para o desenvolvimento do fluxo de trabalho, e o *Frontline*

*Workplace*, instalado nos óculos inteligentes, permitiu a execução das atividades diretamente no dispositivo.

O fluxo de trabalho desenvolvido inclui opções como "Minhas tarefas", "Nova tarefa", "Ler tarefa" e "Ligue para o suporte". Por exemplo, ao selecionar a opção "Nova tarefa", o operador é direcionado para uma tela com as atividades designadas. Após escolher uma atividade, o sistema exibe o código de coleta correspondente, seguido das informações necessárias para realizar a tarefa, como localização do produto, código, quantidade e local de entrega. No final do processo, o operador deve emitir o comando de voz "Separe" seguido do número indicado, transportar o material ao local de entrega e realizar a leitura do código do local com o dispositivo, conforme orientações da aplicação.

- Avaliação de Dispositivos Vestíveis para Inspeção de Transportadores de Correia Utilizando Realidade Aumentada:

O artigo de Keller *et al.* (2018) aborda os desafios na inspeção de transportadores de correia na mineração, um processo crítico devido à sua extensão e complexidade. A inspeção tradicional depende das habilidades individuais dos inspetores, o que gera falta de padronização e limita a eficiência. Além disso, o ambiente apresenta riscos à saúde e segurança, tornando o processo demorado e sujeito a falhas.

Como opções para resolver o problema, foram citados: uso de *drones* - proposto como uma solução para coletar dados de inspeção, reduzindo a exposição humana ao risco; uso de dispositivos vestíveis, como óculos de RA, para melhorar a experiência do operador na análise de dados capturados.

O estudo propôs uma arquitetura dividida em dois módulos: um para dispositivos *Android* e outro para óculos de RA, com foco na interação do operador com o drone e os dados. O sistema *Android* atua como um intermediário entre as informações na nuvem e os óculos. Ele é responsável por receber dados de sensores, do *drone* e possíveis alertas de problemas e convertê-los em um formato mais simples para que possam ser transmitidos aos óculos e serem exibidos.

Foram testados dois dispositivos de RA: *Recon Jet* (NST) e *Epson Moverio* (OST), em ambientes internos e externos.

Os testes validaram a viabilidade das *interfaces*, destacando que o *Epson Moverio* oferece melhor experiência devido à sua maior resolução e integração com o ambiente real. O estudo também revelou que problemas de visão dos usuários podem impactar a experiência de uso e que o ambiente de trabalho influencia significativamente a visualização das informações

- Uma Solução de Realidade Aumentada para Manutenção Assistida em Subestações de Energia Elétrica em HVDC:

O artigo de Júnior *et al.* (2024), apresenta o desenvolvimento de uma aplicação de Realidade Aumentada para apoiar a manutenção em subestações HVDC (*High Voltage Direct Current*). O objetivo central é otimizar os processos de manutenção em equipamentos críticos, garantindo maior segurança, eficiência e confiabilidade nas operações.

Para alcançar esse objetivo, os autores propuseram uma solução que utiliza dispositivos móveis, como *smartphones* e *tablets*, além de HMDs, como o *HoloLens 2*, para visualização e interação em tempo real com informações técnicas dos componentes das subestações. As etapas do projeto envolveram: análise de requisitos, com a coleta de informações junto aos usuários para identificar necessidades e desafios no processo de manutenção; desenvolvimento do sistema, tendo a definição de requisitos funcionais e não funcionais, construção da interface de usuário e integração com o banco de dados usando tecnologias como *NodeJS*, *MongoDB* e *SDK Vuforia*; e protótipos e testes, contendo a implementação de protótipos para a validação da aplicação em ambientes *indoor* e *outdoor*, considerando diferentes condições atmosféricas.

Os testes demonstraram que a solução permite uma interação intuitiva e enriquecida com os equipamentos, exibindo informações textuais, vídeos, objetos 3D, entre outros, diretamente no ambiente de trabalho. Como resultado, a aplicação de RA melhorou a precisão e a eficiência das atividades de manutenção, comprovando seu potencial para reduzir o tempo de parada programada e os riscos associados às operações.

- Realidade Aumentada Industrial como Ferramenta de Auxílio em Manutenções de Painéis Elétricos:

O trabalho de Riboldi *et al.* (2020) tem como objetivo apresentar as etapas de criação e desenvolvimento de um produto mínimo viável para a implementação de Realidade Aumentada no contexto industrial. A proposta busca auxiliar na manutenção de painéis elétricos de comando e potência, promovendo maior segurança aos profissionais envolvidos nesses processos e facilitando o treinamento técnico.

Na aplicação desenvolvida, as etapas do processo de desenergização são apresentadas inicialmente, seguidas pelas instruções específicas para a execução de rotinas padronizadas de manutenção. Essas instruções são personalizadas de acordo com cada painel elétrico em uso. Após a conclusão das tarefas de manutenção, o aplicativo orienta os usuários sobre o processo de reenergização do painel. Além disso, o aplicativo conta com uma interface intuitiva que permite ao usuário navegar entre as etapas do procedimento, avançando ou retornando conforme necessário.

Para o desenvolvimento da aplicação, foi utilizado o *SDK* do *Vuforia* para reconhecimento e atuação da RA, em conjunto com a *Unity Engine* e o *Android Studio*. O aplicativo foi compilado para dispositivos *Android* com versão 7.0 ou superior. Os testes foram realizados em um *tablet Samsung Galaxy Tab A P585M*, equipado com uma câmera de 8 MP, 3 GB de memória RAM, processador *Octa-core* de 1.6 GHz, sistema operacional *Android 8.1* e tela de 10.1 polegadas. Os resultados indicaram que a aplicação atendeu aos requisitos de funcionalidade e usabilidade esperados, demonstrando potencial para aplicação prática no ambiente industrial.

- Uso de Realidade Aumentada como Meio de Visualização de Instruções de Trabalho:

O artigo de Corso *et al.* (2019) destaca que as instruções de trabalho convencionais, sejam elas impressas ou digitais, frequentemente apresentam dificuldades de interpretação, são extensas e pouco atrativas para os operadores. Além disso, esses documentos tendem a se tornar obsoletos rapidamente e não atendem às demandas interativas do ambiente industrial moderno. Diante disso, o estudo teve como objetivo demonstrar as etapas

para a criação de uma experiência em Realidade Aumentada a ser utilizada no ambiente fabril, fornecendo informações sobre o processo de montagem de uma central elétrica. Essa abordagem buscou substituir, em atividades pontuais, as instruções de trabalho tradicionais por uma solução mais interativa e eficiente.

Para o desenvolvimento da aplicação, foi utilizado um *smartphone Samsung A6 Plus*, com câmera de 16 MP, 4 GB de RAM, processador *Octa-Core* de 1.8 GHz, sistema operacional *Android 8.0* e tela de 6 polegadas. Apesar da preferência inicial por *smart glasses*, o *smartphone* foi escolhido devido a restrições orçamentárias. O estudo utilizou o *software SolidWorks* para a criação de modelos 3D, o *Creo Illustrate 5.1* para a geração de animações da sequência de montagem, o *Vuforia Studio* para o desenvolvimento e publicação da experiência de RA e o *Vuforia View* para a visualização da experiência no *smartphone*.

O sistema desenvolvido foi capaz de exibir animações e informações em 3D diretamente no posto de trabalho, proporcionando uma experiência interativa e imersiva. Apesar das limitações financeiras que levaram ao uso de um *smartphone* em vez de *smart glasses*, a solução demonstrou-se eficaz e alinhada com os princípios da Indústria 4.0.

- Tecnologias Digitais para o Monitoramento de Processos na Indústria 4.0:

O trabalho de Santana *et al.* (2023) propõe o desenvolvimento de uma solução alternativa para monitoramento e acesso sistemático aos dados de uma planta de controle de processos industriais, alinhada aos conceitos da Indústria 4.0 e utilizando RA. O objetivo é criar uma alternativa acessível e de baixo custo que impulsiona o progresso tecnológico e facilite a implementação da Indústria 4.0 no Brasil. O estudo foi realizado em uma planta piloto localizada no laboratório do Grupo de Automação e Sistemas Integráveis (GASI) da Unesp Sorocaba.

Para alcançar esse objetivo, foi desenvolvida uma aplicação móvel que centraliza todos os dados e documentos gerados durante o processo. O sistema utiliza as ferramentas de *software Unity* e *Vuforia* para integrar a RA, enquanto o *framework Molecular* é empregado para gerenciar a solicitação de dados por meio de APIs padronizadas. O aplicativo apresenta um menu inicial

que permite acessar suas principais funcionalidades, como a centralização de documentos relacionados à bancada, que simplifica a busca e o acesso a informações; o monitoramento remoto de dados em tempo real, mesmo à distância da bancada; e a consulta de dados, que possibilita o acesso a informações importantes de forma simples e eficaz por meio de uma página de consulta integrada.

Na funcionalidade de Realidade Aumentada, o aplicativo utiliza a câmera do dispositivo móvel para reconhecer a bancada. Após identificar o alvo, o sistema gera uma *interface* gráfica interativa composta por um modelo 3D da bancada. O usuário pode interagir com o ambiente por meio dessa *interface*, acessando dados e funcionalidades de forma imersiva, o que melhora significativamente a experiência de monitoramento e supervisão.

- Aplicação da Realidade Aumentada como Guia de Montagem em Processos Industriais:

De acordo com o artigo de De Lima (2024), as abordagens tradicionais de guias de montagem são frequentemente baseadas em manuais impressos e treinamentos presenciais. No entanto, essas metodologias podem dificultar a compreensão, especialmente em processos mais complexos, levando a erros e aumento do tempo necessário para treinamento de operadores.

Com o objetivo de aumentar a eficiência e reduzir o tempo de aprendizagem, o estudo propõe a aplicação da Realidade Aumentada como ferramenta para ilustrar instruções de trabalho operacional em processos produtivos industriais. A proposta inclui o uso de dispositivos móveis para oferecer guias visuais interativos em 3D, facilitando o entendimento das etapas de montagem.

Para atingir esse objetivo, foi desenvolvido um aplicativo para dispositivos Android que utiliza *QR codes* para projetar modelos tridimensionais e animações de montagem. A modelagem das peças foi realizada utilizando o *software Blender*, enquanto a criação da *interface* foi desenvolvida no *Unity*. O rastreamento em tempo real dos alvos foi implementado com o *software* de RA *Vuforia*, conhecido por seus recursos avançados de rastreamento e reconhecimento de objetos por meio de câmeras.

A pesquisa utilizou um *kit* didático de montagem de uma escavadeira para simular uma tarefa de montagem em escala reduzida, permitindo a validação da aplicação proposta em um ambiente controlado. Os resultados indicaram que o uso da RA contribuiu significativamente para a compreensão das instruções de montagem, promovendo maior agilidade e precisão no processo.

#### 4.1 Comparação estruturada dos artigos

Após a descrição dos nove artigos selecionados, torna-se essencial organizar as informações de forma sistemática para facilitar a análise e comparação dos estudos. Para isso, foi elaborado um quadro comparativo (Quadro 1) que lista as principais características de cada artigo.

O quadro apresenta colunas específicas que incluem o título do artigo, seus autores, a área de aplicação, o setor, os tipos de equipamentos abordados, o TRL, sendo o nível de maturidade tecnológica, o ano de publicação, a região de origem e o escopo principal de cada estudo.

<b>Título</b>	<b>Autor(es)</b>	<b>Área de aplicação</b>	<b>Setor</b>	<b>Equipamento</b>	<b>TRL</b>	<b>Ano</b>	<b>Região</b>	<b>Escopo</b>
Realidade Aumentada Aplicada à Redução de Riscos na Segurança do Trabalho em Subestações Elétricas	Victor Menezes Rocha	Segurança	Engenharia Elétrica	<i>Smartphone</i>	7	2021	Ouro Preto - Minas Gerais	O estudo desenvolveu uma aplicação de RA que fornece instruções de segurança e recomendações visuais em tempo real para trabalhadores de subestações elétricas. O objetivo é mitigar riscos e aumentar a segurança operacional, alinhando o uso de tecnologia às exigências de normas regulamentadoras e promovendo maior controle durante tarefas críticas.

Potencial de Aplicação de <i>Workflow</i> Baseado em Realidade Aumentada na Inspeção em Válvulas de Segurança	De Brito <i>et al.</i>	Manutenção e segurança	Engenharia de Qualidade e Manutenção	<i>Smartphone e tablet</i>	7	2021	Florianópolis - Santa Catarina	O trabalho busca avaliar o potencial do <i>workflow</i> baseado em RA proposto por Rossi (2019) para inspeção de válvulas, substituindo procedimentos tradicionais. Isso inclui reduzir falhas no processo de inspeção final, que antecede a entrega dos equipamentos ao cliente.
Realidade Aumentada nos Processos Logísticos de Armazenamento	Jhonathan Fernando da Silva Soares	Logística e segurança	Logística	Óculos Inteligente	4	2021	Barueri - São Paulo	Propõe a aplicação de RA em processos logísticos, utilizando óculos inteligentes para aumentar a eficiência e reduzir riscos associados ao manuseio de dispositivos manuais. A pesquisa simula a implementação dessa tecnologia em um centro de distribuição, demonstrando melhorias significativas nos fluxos de trabalho.
Avaliação de Dispositivos Vestíveis para Inspeção de Transportadores de Correia Utilizando	Keller <i>et al.</i>	Segurança e manutenção	Mineração	<i>Drones e óculos inteligente</i>	7	2018	Belém - Pará	Desenvolver e avaliar <i>interfaces</i> de Realidade Aumentada (RA) para dispositivos vestíveis, aplicados à inspeção de transportadores de correia. O objetivo é fornecer

Realidade Aumentada								suporte visual em tempo real para operadores de drones, melhorando a detecção de defeitos e a usabilidade em ambientes industriais desafiadores
Uma Solução de Realidade Aumentada para Manutenção Assistida em Subestações de Energia Elétrica em HVDC	Júnior <i>et al.</i>	Manutenção, treinamento e segurança	Engenharia Elétrica	<i>Smartphone, tablet</i> e óculos inteligente	7	2024	—	Criar uma solução baseada em RA para otimizar a manutenção assistida em subestações HVDC ( <i>High Voltage Direct Current</i> ). O trabalho visa melhorar a precisão e a segurança das operações, além de reduzir o tempo e os custos associados a paradas programadas para manutenção.
Realidade Aumentada Industrial como Ferramenta de Auxílio em Manutenções de Painéis Elétricos	Riboldi <i>et al.</i>	Manutenção, treinamento e segurança	Engenharia Elétrica	<i>Tablet</i>	5	2020	Caxias do Sul - Rio Grande do Sul	O artigo desenvolve um aplicativo de RA que guia os profissionais passo a passo, promovendo o correto seguimento de protocolos de segurança e manutenção. O objetivo é aumentar a adesão às normas e reduzir erros, melhorando a segurança e a produtividade na manutenção industrial.
Uso de	Corso <i>et al.</i>	Treinamento	Engenharia	<i>Smartphone</i>	5	2019	Caxias do	Demonstrar como

Realidade Aumentada como Meio de Visualização de Instruções de Trabalho		o	a Industrial				Sul - Rio Grande do Sul	construir e implementar um sistema de RA para visualizar instruções de trabalho em um ambiente fabril. O objetivo é substituir documentos impressos por instruções visuais e interativas, melhorando a eficiência operacional e reduzindo erros
Tecnologias Digitais para o Monitoramento de Processos na Indústria 4.0	Santana <i>et al.</i>	Monitoramento e segurança	Automação e Controle	<i>Smartphone</i>	4	2023	São Bernardo do Campo - São Paulo	Desenvolver uma solução de monitoramento digital alinhada aos princípios da Indústria 4.0, permitindo acesso remoto a dados e documentação por meio de dispositivos móveis e RA. O propósito é integrar tecnologias digitais para aumentar a produtividade e reduzir custos operacionais
Aplicação da Realidade Aumentada como Guia de Montagem em Processos Industriais	Thalyta da Silva Rodrigues de Lima	Treinamento e montagem	Engenharia de Produção	<i>Smartphone</i>	4	2024	Itacoatiara - Amazonas	Desenvolver uma aplicação de RA para guiar operadores na montagem de componentes industriais, usando modelos 3D e animações. O projeto visa simplificar a compreensão das etapas, reduzir erros, melhorar a eficiência do

								aprendizado e diminuir o tempo de treinamento.
--	--	--	--	--	--	--	--	--

Quadro 1: Quadro comparativo dos artigos selecionados.

Fonte: A autora.

De acordo com o quadro comparativo, é possível verificar que, dos artigos selecionados, o ano com a maior quantidade de artigos foi em 2021 e os anos com menor quantidade de artigos foram 2018 e 2019 (Figura 7).

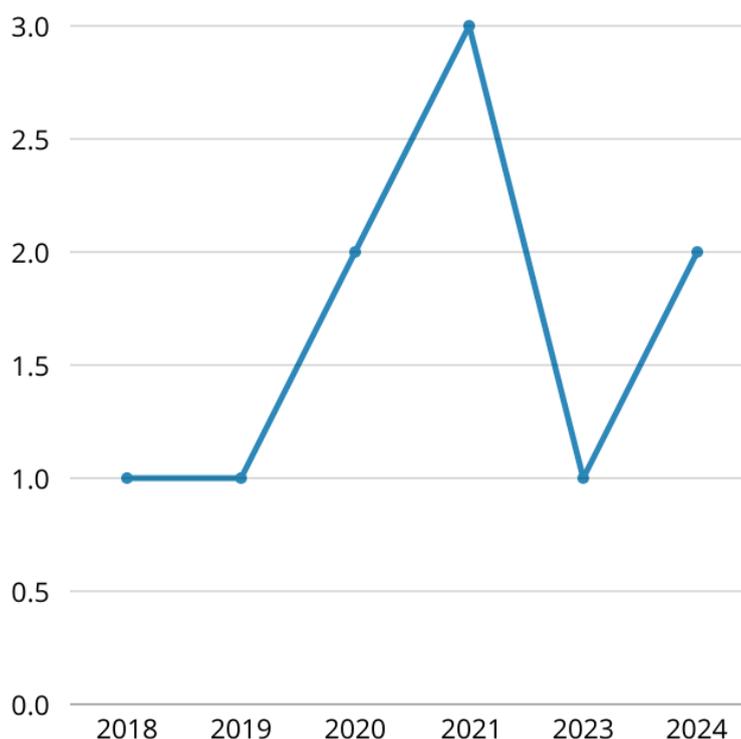


Figura 7: Comparativo dos anos de publicação dos artigos.

Fonte: A autora.

Também foi possível observar que a área de aplicação relacionada à segurança é a mais abordada nos artigos analisados. No gráfico apresentado, foram agrupados os artigos que abrangem múltiplas áreas de aplicação, permitindo uma visão consolidada das tendências identificadas (Figura 8).

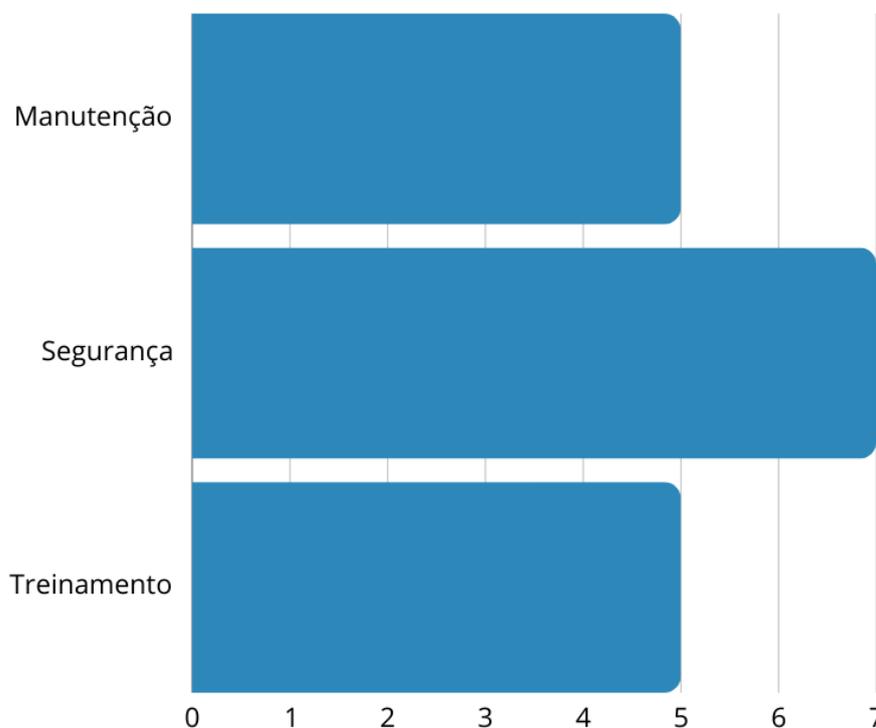


Figura 8: Comparativo entre as áreas de aplicação dos artigos.

Fonte: A autora.

O gráfico abaixo (Figura 9) representa a distribuição dos equipamentos utilizados nos artigos selecionados. O equipamento *smartphone* foi o mais utilizado, correspondendo a 46,2% do total, sendo usado em 6 artigos. Isso reflete sua ampla acessibilidade, facilidade de uso e custo relativamente baixo.

*Tablets* e óculos inteligentes tiveram a mesma proporção de uso, sendo 23,1%, em 3 artigos cada. Isso indica que esses dispositivos também têm relevância significativa em aplicações específicas, como aquelas que demandam telas maiores ou interfaces imersivas.

Por último, os *drones* correspondem a apenas 7,7% das aplicações, em apenas 1 trabalho, o que sugere que eles são utilizados em cenários mais específicos, possivelmente em inspeções visuais remotas ou áreas de difícil acesso.

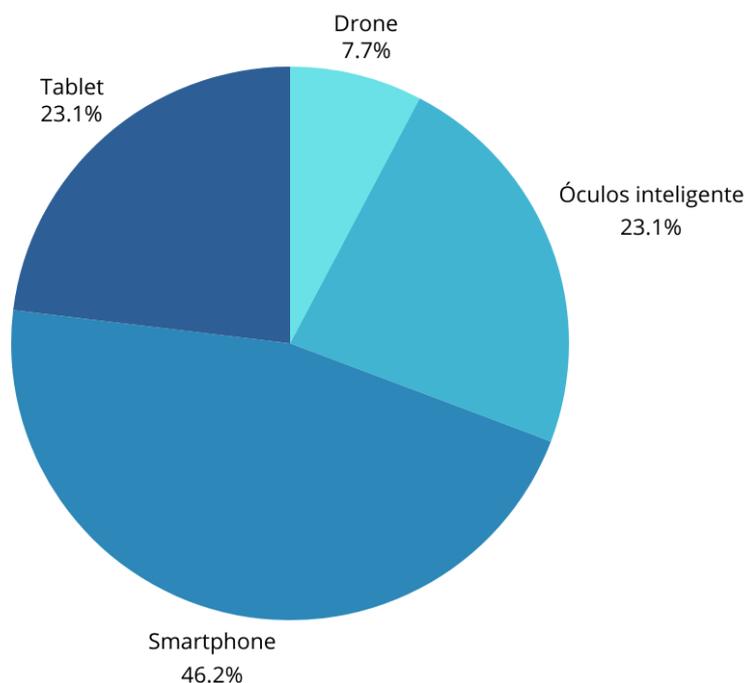


Figura 9: Comparativo entre os equipamentos utilizados nos artigos.

Fonte: A autora.

Com base na coluna de região do quadro comparativo, o gráfico abaixo (Figura 10) apresenta a distribuição geográfica dos artigos selecionados. Os estados de São Paulo e Rio Grande do Sul lideram, com 2 artigos cada. Isso pode ser explicado pela forte presença de centros de pesquisa e desenvolvimento tecnológico nesses estados.

Amazonas, Minas Gerais, Pará e Santa Catarina aparecem com 1 artigo cada, indicando iniciativas em outras regiões do país, mas em menor quantidade.

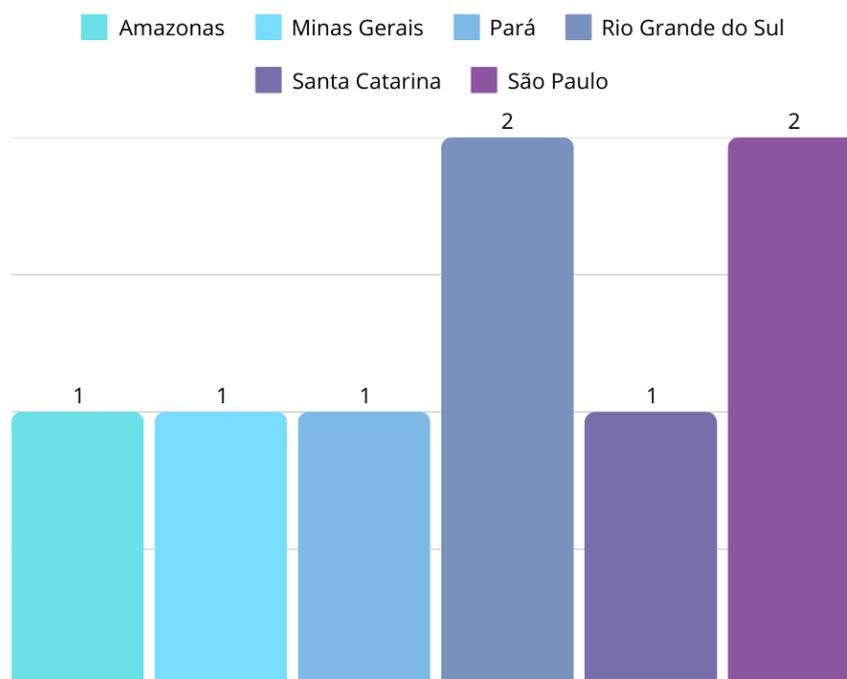


Figura 10: Comparativo entre os estados dos artigos.

Fonte: A autora.

## 4.2 Questões de pesquisa

Para orientar esta revisão sistemática sobre a Realidade Aumentada aplicada no processo de manutenção da indústria brasileira, foram elaboradas três questões de pesquisa que buscam esclarecer aspectos sobre o tema, além de avaliar em qual nível de maturidade tecnológica esses artigos se encontram. Essas questões têm o objetivo de estruturar a análise e facilitar a identificação de padrões, podendo contribuir para o avanço do conhecimento e a identificação de oportunidades relacionadas ao uso da RA no contexto industrial brasileiro, a fim de garantir que os objetivos do estudo sejam atendidos de forma clara e objetiva.

### 4.2.1 Q.P. 1: “O estudo obteve aplicação em campo?”

No artigo sobre Realidade Aumentada Aplicada à Redução de Riscos na Segurança do Trabalho em Subestações Elétricas (ROCHA, 2021), tendo em vista que o teste da aplicação foi realizado em um ambiente operacional real,

comprovando suas funcionalidades em condições práticas, como mostra na Figura 11, o nível de maturidade do artigo se encaixa no TRL 7.

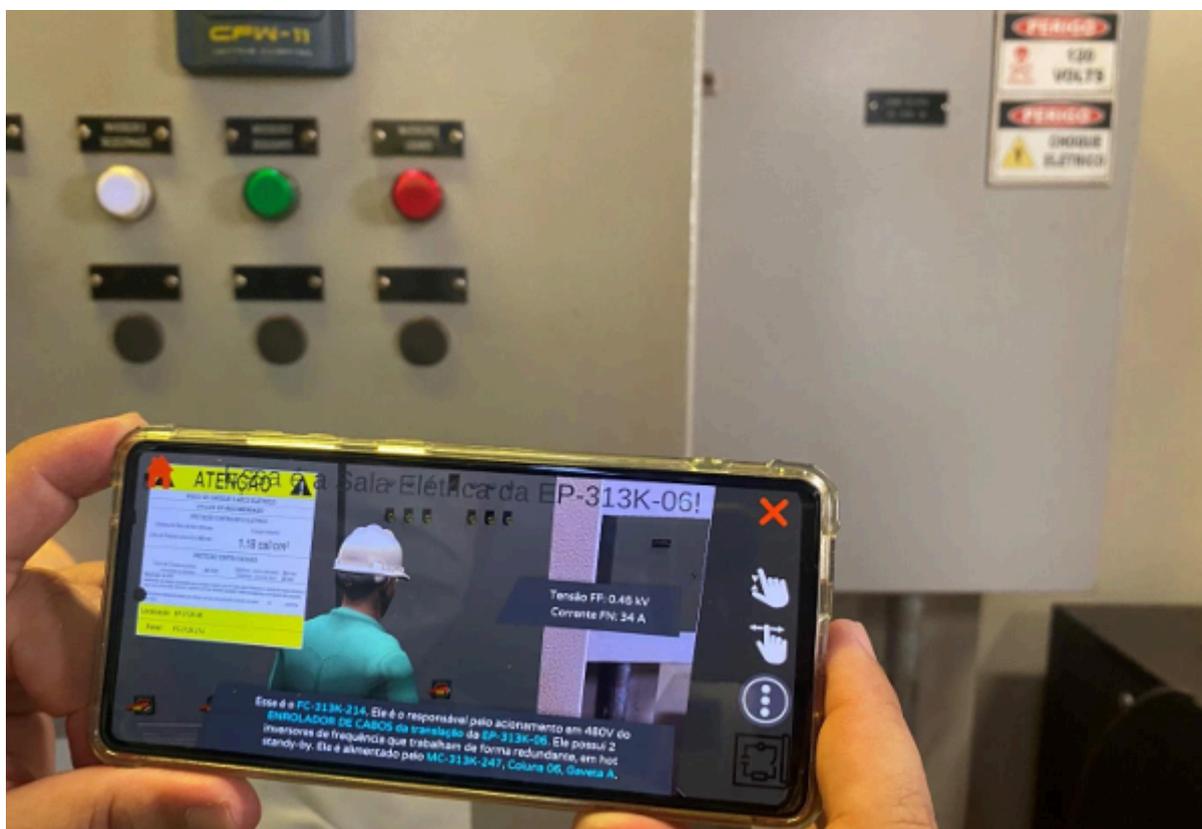


Figura 11: Sobreposição dos objetos em RA ao ambiente real, após a leitura de uma TAG.

Fonte: Rocha (2021)

Igualmente, no artigo de De Brito *et al.*, sobre Potencial de Aplicação de *Workflow* Baseado em Realidade Aumentada na Inspeção em Válvulas de Segurança, este projeto foi realizado em um ambiente operacional real (como mostra na Figura 12), comprovando suas funcionalidades em condições práticas, foi avaliado que o nível de maturidade desta tecnologia seria TRL 7.



Figura 12: Usuário realizando a leitura de um marcador.

Fonte: De Brito *et al.* (2021)

De acordo com o artigo de Soares (2021), os testes da aplicação ocorreram após criarem um ambiente com as características próximas a um armazém. Sendo assim, o estudo não obteve aplicação em campo. Analisando os níveis de TRL, foi verificado que o nível da aplicação de Soares seria TRL 4, já que o mesmo foi testado em um ambiente controlado de laboratório, pela criação de um ambiente de testes, como mostra a Figura 13.

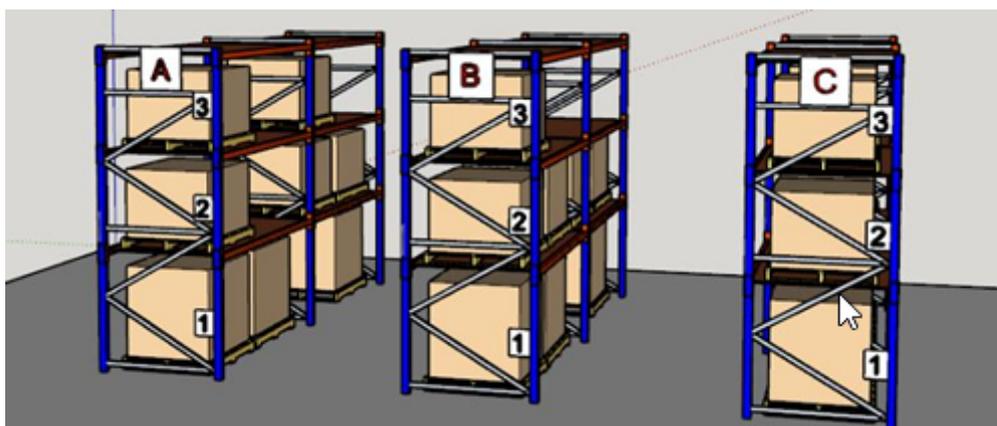


Figura 13: Exemplificação do armazém utilizado na simulação da aplicação.

Fonte: Soares (2021)

Keller *et al.* (2018) cita o Porto da Madeira como um porto que possui transportadores de correia de mais de 120 km. Seus testes são mostrados com imagens de telas conceituais de como o usuário visualiza os elementos exibidos

pela *interface* (Figura 14), por não ser possível obter imagens de boa qualidade da aplicação durante o uso dos óculos. Com os testes realizados no porto, um ambiente operacional real, o nível de maturidade da tecnologia foi avaliado como TRL 7.



Figura 14: Tela conceitual de como o usuário visualiza os elementos exibidos pela *interface*.

Fonte: Keller (2018)

No artigo de Júnior *et al.* (2024), os testes foram realizados em ambientes fechados e abertos de uma subestação HVDC, para poderem analisar as diferentes condições atmosféricas de campo (Figuras 15 e 16). Tendo em vista que o trabalho foi testado em um ambiente operacional real, assim testando suas funcionalidades, o nível de maturidade seria o TRL 7.



Figura 15: Teste em ambiente fechado da aplicação.

Fonte: Júnior *et al.* (2024)



Figura 16: Teste em ambiente aberto da aplicação.

Fonte: Júnior *et al.* (2024)

Nos artigos de Riboldi *et al.* (2020) e Corso *et al.* (2019) não é possível identificar se os estudos obtiveram aplicação em campo, não é especificado em nenhum dos dois artigos se os testes foram feitos em alguma empresa. Com isso, após analisar as imagens colocadas nos artigos, avaliando ambos com a TRL 5, sendo uma validação da aplicação apenas em um ambiente relevante. As imagens aparentam mostrar um ambiente que não seja o final para os testes (Figuras 17 e 18).

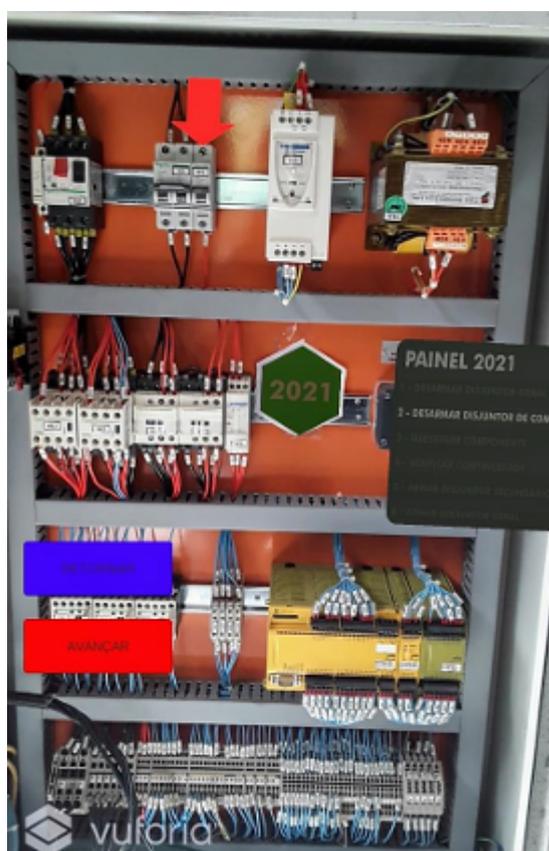


Figura 17: Imagem da aplicação anexada no artigo de Riboldi *et al.*

Fonte: Riboldi *et al.* (2020)



Figura 18: Imagem da aplicação anexada no artigo de Corso *et al.*

Fonte: Corso *et al.* (2019)

Conforme o artigo de Santana *et al.* (2023), os testes da aplicação foram realizados no laboratório do Grupo de Automação e Sistemas Integráveis da Unesp Sorocaba, utilizando uma planta piloto que controla o processo industrial. Com isso, o projeto é avaliado com TRL 4.

No artigo de De Lima (2024) é mencionado que a aplicação foi realizada em um ambiente experimental utilizando um *kit* didático de montagem de uma escavadeira. Com o trabalho sendo conduzido em um contexto controlado de laboratório, o mesmo é avaliado com nível de maturidade TRL 4.

Avaliando as respostas da questão de pesquisa 1, foi gerado um gráfico comparativo (Figura 19) dos níveis de maturidade que foram classificados nos artigos. O TRL 7 apresenta o maior número de artigos entre os níveis mostrados no gráfico, sendo avaliado com esse nível para 4 artigos. O TRL 5 tem o menor número de artigos, sendo 2 artigos. O TRL 4 apresenta um número intermediário de artigos, sendo 3 artigos.

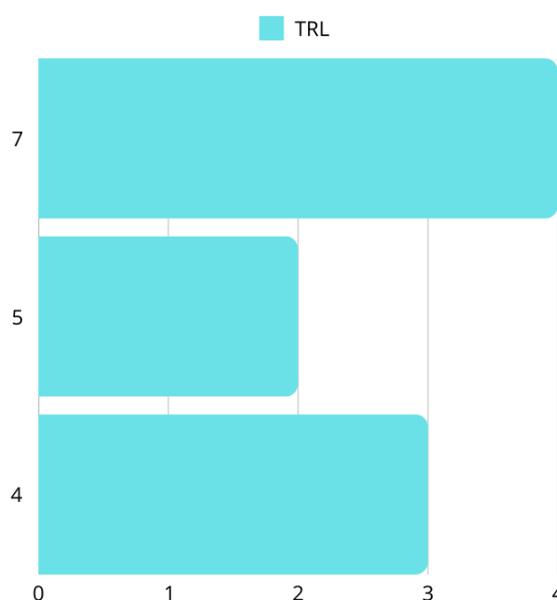


Figura 19: Comparativo entre o TRL dos artigos.

Fonte: A autora.

Embora alguns estudos tenham atingido níveis mais avançados de maturidade tecnológica, a maioria ainda se encontra em estágios intermediários ou iniciais. Essa diversidade reflete os desafios enfrentados na implementação da RA no setor industrial brasileiro. Testes em ambientes controlados são essenciais para o desenvolvimento inicial, mas não garantem a aplicabilidade prática da tecnologia em condições reais de operação. Os artigos com TRL 7 demonstram um avanço considerável, mostrando que a RA, quando validada em cenários reais, pode atender a demandas específicas da indústria, como maior eficiência em processos, redução de custos e aumento da segurança. No entanto, os artigos com TRL 4 e 5 indicam que ainda existem dificuldades em escalar essas soluções para ambientes industriais reais, devido à falta de integração com processos já existentes ou à carência de investimentos em validações práticas.

#### 4.2.2 Q.P. 2: “Como o estudo impacta a produtividade e eficiência dos trabalhadores no setor industrial?”

No artigo de Rocha (2021), sobre a RA aplicada à redução de riscos na segurança do trabalho em subestações elétricas, os resultados indicaram que o

cenário sem a Realidade Aumentada apresentou uma carga de trabalho significativamente maior em comparação ao cenário com a Realidade Aumentada, sugerindo que a aplicação tem o potencial de melhorar o processo de inspeção e manutenção das subestações. Ademais, conseguiu reduzir o tempo de manutenção e aprimorou o treinamento técnico.

Já na pesquisa sobre o potencial de aplicação de *workflow* baseado em RA na inspeção em válvulas de segurança (DE BRITO, 2021), a empresa onde o estudo foi realizado já utilizava um procedimento de inspeção para a manutenção de seus equipamentos. No entanto, segundo os autores, a adoção do *workflow* proposto por Rossi para o processo de inspeção mostrou que grande parte das deficiências presentes no método atual poderia ser corrigida, o que resulta em uma redução do tempo de execução do trabalho e erros, além de um aumento na qualidade e na confiabilidade do serviço final.

O autor Soares *et al.* (2021) relatou em seu artigo sobre a RA nos processos logísticos de armazenamento que o uso de óculos inteligentes com RA nos processos logísticos (como coleta e separação de materiais) aumentou a produtividade em até 15% em estudos de caso e melhorou o fluxo de trabalho, reduzindo o tempo gasto por tarefa.

O estudo de Keller *et al.* (2018) fez uso dos dispositivos *Recon Jet*, que é um *head-up display* (HUD), e *Epson Moverio*, uma linha de HMDs, para testes com os trabalhadores do setor. Apesar de ter ocorrido alguns problemas nos testes, devido aos usuários terem algum problema de visão, foi observado que o uso do *Epson Moverio* forneceu uma melhor experiência ao usuário. Os defeitos nos equipamentos são identificados através da temperatura do equipamento ou do som que está sendo produzido, além de haver uma limitação humana que acaba tornando o processo lento, por haver grande quantidade de equipamentos para serem inspecionados. Com esse projeto funcionando na indústria, reduziria o tempo de inspeção e aumentaria a precisão na identificação de defeitos.

De acordo com o artigo “Uma solução de Realidade Aumentada para manutenção assistida em subestações de energia elétrica em HVDC” (JÚNIOR, 2024), os serviços de transmissão de energia elétrica do sistema elétrico nacional podem ter os sistemas indisponíveis anualmente por um período de 80 horas de forma programada. As particularidades dos sistemas de transmissão HVDC dificultam o treinamento de colaboradores ao realizar manutenções em

equipamentos essenciais, podendo, em determinados casos, ocasionar atrasos nas paradas programadas. Cabe destacar que os treinamentos tornam-se caros e muitas vezes incompletos, uma vez que o sistema deve ser restabelecido dentro do prazo estipulado pela parada programada, devido às características específicas dos sistemas de transmissão HVDC. Além disso, mesmo com o agendamento da parada, o sistema ainda pode resultar em perdas financeiras, já que permanece indisponível por até 80 horas anualmente. A aplicação de Realidade Aumentada nesse contexto permite otimizar o processo de manutenção, dando ênfase aos equipamentos mais críticos durante o período de inatividade, o que contribui para a redução de custos e aumento da eficiência operacional.

No artigo de Riboldi *et al.* (2020), sobre a RA industrial como ferramenta de auxílio em manutenções de painéis elétricos, tem-se que, a criação de um aplicativo de RA que auxilia a manutenção facilita o treinamento de novos profissionais e permite que as tarefas sejam executadas de forma mais precisa e rápida, promovendo ganhos significativos na produtividade.

Segundo o artigo sobre RA como meio de visualização de instruções de trabalho (CORSO, 2019), a substituição de manuais tradicionais por sistemas interativos de RA permitiu maior agilidade e clareza no desempenho das tarefas. Foi apontado no artigo que, como o sistema teve o uso de *smartphone* como dispositivo de RA, para esse tipo de aplicação, seria mais adequado o uso de dispositivos vestíveis, como um *smart glasses*, para que as mãos do operador ficassem livres para executar as atividades no mesmo tempo que recebe as informações da aplicação. Ainda assim, a tecnologia tornou as instruções mais acessíveis e dinâmicas, reduzindo o tempo de consulta e otimizando a linha de montagem, sendo possível atuar de forma mais imersiva e interativa, tornando as atividades de montagem mais claras ao mesclar o ambiente real com a visualização do ambiente virtual.

Santana *et al.* (2023) descreveu no artigo “Tecnologias digitais para o monitoramento de processos na indústria 4.0” que o objetivo seria de desenvolver uma aplicação de custo reduzido e altamente versátil para supervisão e visualização de dados de processos industriais, para um monitoramento de processos. Destaca-se no decorrer do artigo que o posicionamento dos dados juntamente com o sensor e a inserção da documentação, facilita a tomada de decisão e supera a

forma feita antes no processo original, podendo ter uma melhor visualização e interação com o processo, além de acelerar o processo da tomada de decisão.

Segunda a autora De Lima (2024), em seu trabalho é possível identificar que, com a utilização da aplicação em campo, seria possível ter uma melhora na eficiência e produtividade, além de reduzir erros na execução da tarefa. Por ser um guia passo a passo em tempo real durante o processo de montagem, na indústria essa tecnologia pode facilitar o treinamento de novos funcionários, já que a aprendizagem do processo seria feita de forma interativa e visual. Vale ressaltar que nesse artigo também é utilizado o dispositivo *smartphone*, como no artigo de Corso (2019), sugerindo, da mesma forma, a utilização de *smart glasses*, para ter as mãos livres no processo da montagem, assim facilitando o trabalho do usuário.

Em síntese, a Realidade Aumentada se apresenta como uma tecnologia indispensável para a Indústria 4.0, promovendo melhorias em eficiência e produtividade, enquanto reduz erros e aprimora o treinamento e a capacitação de profissionais. Contudo, para que seus benefícios sejam plenamente alcançados, é essencial considerar o contexto de aplicação e investir em dispositivos mais adequados e acessíveis, além de superar desafios associados à implementação.

#### **4.2.3 Q.P. 3: “Como o estudo pode ajudar a mitigar riscos de segurança?”**

O autor Rocha (2021) explicou em seu artigo que, na sala elétrica da empilhadeira EP-313K-06, foram identificados cenários de risco e modos de operação que expõem os eletricitistas a níveis de energia incidente variando entre 11,2 e 0,79 cal/cm<sup>2</sup>. O limite de proteção contra arco elétrico, nesses cenários, varia de 1829 mm a 495 mm. Foi permitido, através do aplicativo de RA, a correta aplicação de sinalizações de distâncias de segurança, alertando os riscos de arco e choque elétrico, o EPI adequado para realizar a atividade, entre outros. Ao fornecer informações em tempo real com o sistema de realidade aumentada, por meio da identificação de parâmetros elétricos com o uso da tecnologia, os trabalhadores podem agir de forma mais segura, o que diminui a probabilidade de acidentes graves.

De Brito *et al.* (2021) descreveu em seu artigo que a utilização de RA permite o acesso a informações críticas e orientações visuais em tempo real, reduzindo erros humanos e minimizando riscos durante a inspeção e manutenção.

Segundo Soares (2021), a solução apresentada em seu artigo traz mais segurança aos operadores que realizam os processos logísticos de coleta de materiais de um armazém em tomadas de decisões.

De acordo com Keller *et al.* (2018), a tecnologia de RA usada em dispositivos vestíveis reduziria a necessidade de inspeções manuais em áreas de alto risco, como transportadores de correia extensos e perigosos. A visualização remota e precisa por meio de drones e RA limita a exposição dos trabalhadores a condições inseguras, como calor extremo e quedas, já que os transportadores de correia estão posicionados em locais que oferecem diversos riscos à saúde e segurança do funcionário.

No artigo de Júnior *et al.* (2024) é possível concluir que, na manutenção assistida de subestações HVDC, a RA facilitou o treinamento e a orientação de técnicos, garantindo que seguissem os procedimentos corretos com maior precisão. Ademais, a visualização de informações críticas em tempo real reduziu os riscos associados a erros humanos durante operações de alta complexidade.

A pesquisa referente à RA industrial em manutenção de painéis elétricos (RIBOLDI, 2020) descreve que a RA fornece instruções detalhadas para os protocolos de desenergização e reenergização, essenciais para evitar acidentes elétricos. Além disso, a *interface* promove maior adesão às normas de segurança.

No artigo de Corso *et al.* (2019), é possível identificar que, na aplicação do projeto, a RA permite que operadores realizem tarefas críticas com maior precisão ao fornecer orientações claras e visuais em tempo real, evitando erros manuais que poderiam causar acidentes ou falhas no processo.

Santana *et al.* (2023) relata em seu artigo que na aplicação desenvolvida estão centralizados todos os dados e documentos obtidos durante o processo. De acordo com a pesquisa do artigo, por ter uma grande quantidade de dados para ser gerada e analisada nos processos industriais, com o monitoramento de dados da aplicação é proporcionado uma melhora de qualidade e produtividade além de permitir identificar possíveis situações de falhas, promovendo um ambiente mais seguro para os trabalhadores.

No artigo de De Lima (2024), sobre a RA como guia de montagem em processos industriais, ao minimizar a necessidade de interpretação de manuais impressos, a RA reduz o risco de erros durante a montagem, promovendo maior precisão e segurança no ambiente industrial.

Os autores convergem ao indicar que a RA contribui significativamente para a redução de acidentes e erros, promovendo um ambiente de trabalho mais seguro e eficiente. Além de mitigar os riscos de segurança para a saúde do trabalhador, a RA nesses contextos contribui também com maior segurança na tomada de decisões de tarefas complexas. Suas aplicações vão desde a visualização de informações críticas em tempo real até o treinamento de técnicos em cenários de alta complexidade.

No entanto, para que os benefícios sejam plenamente alcançados, é essencial investir em dispositivos adequados e em programas de treinamento que maximizem o uso da tecnologia. Além disso, a integração da RA com processos industriais deve ser planejada para atender às normas de segurança específicas de cada setor.

## 5 CONCLUSÃO

A revisão sistemática realizada sobre a aplicação da Realidade Aumentada no processo de manutenção da indústria brasileira trouxe informações importantes acerca do estágio de desenvolvimento e dos impactos potenciais desta tecnologia. Ao explorar os estudos selecionados, foi possível mapear tanto as oportunidades quanto as limitações da RA no setor industrial, destacando as lacunas a serem preenchidas para que a tecnologia alcance um uso mais consolidado e efetivo.

No que se refere à aplicação em campo, os estudos analisados demonstraram diferentes níveis de maturidade tecnológica, medidos pelo TRL. Dos nove artigos avaliados, quatro atingiram o TRL 7, o que significa que seus protótipos foram testados em ambientes reais, indicando um estágio avançado de desenvolvimento. Contudo, ainda há uma quantidade expressiva de estudos em estágios iniciais ou intermediários: três artigos apresentaram TRL 4, com validações restritas a ambientes controlados, enquanto dois artigos foram classificados como TRL 5, em que não foi possível identificar claramente se os testes ocorreram em condições reais de operação. Essa variedade no estágio de maturidade tecnológica reforça que a RA, apesar de promissora, ainda está distante de uma ampla adoção prática no setor industrial brasileiro.

A análise também evidenciou o potencial transformador da RA na produtividade e eficiência operacional. A tecnologia possibilita maior precisão na execução de tarefas, oferecendo instruções em tempo real e sobreposições visuais no ambiente físico que facilitam o trabalho dos operadores. Essas características podem resultar em uma manutenção mais ágil e assertiva, reduzindo o tempo de inatividade de equipamentos críticos. No entanto, a maior parte das evidências apresentadas nos estudos analisados se baseia em simulações e testes piloto, sem validações extensivas em cenários industriais reais. Esse fato sugere que ainda há um caminho a percorrer até que seus impactos práticos sejam amplamente comprovados e disseminados no setor produtivo.

Outro aspecto relevante destacado pela revisão é o potencial da RA para mitigar riscos de segurança no ambiente industrial. A capacidade de sobrepor informações visuais diretamente no campo de visão dos trabalhadores permite a identificação de áreas de risco, a orientação em procedimentos críticos e a garantia de cumprimento das normas de segurança. Essas funcionalidades são

especialmente importantes em tarefas de alta complexidade ou perigo, onde um pequeno erro pode gerar consequências graves. Contudo, o sucesso dessa aplicação depende não apenas do avanço da tecnologia, mas também da sua integração com sistemas de gestão de segurança e do alinhamento com as normas regulamentadoras aplicáveis. Além disso, para que a RA seja efetivamente utilizada como ferramenta de segurança, é essencial que as empresas invistam em treinamento e adaptação tecnológica de seus colaboradores.

De maneira geral, os resultados da revisão indicam que a Realidade Aumentada é uma tecnologia com elevado potencial para transformar os processos de manutenção industrial no Brasil. Apesar disso, seu desenvolvimento tecnológico e aplicação prática ainda enfrentam desafios significativos. Para que os benefícios esperados sejam materializados, é necessário intensificar a realização de estudos de caso em campo, promovendo a validação de soluções em condições reais de operação.

Além disso, a pesquisa futura deve priorizar o desenvolvimento de sistemas de RA que atendam às demandas específicas do setor industrial brasileiro, focando em estudos de caso em campo, validações em empresas e desenvolvimento de soluções que atendam às demandas específicas do setor, considerando a diversidade de cenários e necessidades existentes. Esses avanços serão fundamentais para acelerar a adoção da RA no ambiente industrial, promovendo ganhos expressivos em produtividade, eficiência e segurança.

## REFERÊNCIAS

AZUMA, R., BAILLOT, Y., BEHRINGER, R., FEINER, S., JULIER, S. & MACINTYRE, B. **Recent Advances in Augmented Reality**. IEEE computer graphics and applications, v. 21, n. 6, 2001.

BORODKIN, L. **Evolution of Virtual and Augmented Reality Technologies in Historical and Archaeological Research**. International Workshop on High Technologies History and Development, Moscou, Rússia, 2022.

CANAL INDÚSTRIA 4.0. **Caminhos para Inovação da Indústria Brasileira em 2025**. 2025: CANAL, 2025. Disponível em: <https://www.industria40.ind.br/artigo/25847-caminhos-inovacao-industria-brasileira-2025>

CAPES. **Relatório da Comissão de Qualis Eventos**. 2021. Disponível em: [https://www.gov.br/capes/pt-br/centrais-de-conteudo/documentos/avaliacao/09012022\\_RELATORIOQUALISEVENTOS20172020COMPUTACAO.PDF](https://www.gov.br/capes/pt-br/centrais-de-conteudo/documentos/avaliacao/09012022_RELATORIOQUALISEVENTOS20172020COMPUTACAO.PDF). Acesso em 20 dez. 2024.

CARDOSO, A., JÚNIOR, E. L., KIRNER, C., & KELNER, J. **Tecnologias e Ferramentas para o Desenvolvimento de Sistemas de Realidade Virtual e Aumentada**. Universidade Federal de Pernambuco, 2007.

CAUDELL, T. P. & MIZELL, D. W. **Augmented Reality: An Application of Heads-Up Display Technology to Manual Manufacturing Processes**. Proceedings of the Twenty-Fifth Hawaii International Conference on System Sciences, Kauai, HI, USA, 1992.

CHMIELEWSKI, A. M. M., SILVA, A. J. D. & LEITE, J. R. E. **Indústria 4.0: Revolução e Impacto no Mundo Moderno**. Projectus, v. 5, n. 1, 2020.

COELHO, P. M. N. **Rumo à Indústria 4.0**. Universidade de Coimbra, 2016.

COLETA, G. F. D., CARDOSO, A., JÚNIOR, E. A. L., LIMA, G. F. M. & FERNANDES, M. **Um framework baseado em Realidade Aumentada como apoio a atividades de manutenção em campo**. Research, Society and Development, v. 11, n. 13, ISSN 2525-3409, 2022.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. **Indústria 4.0: novo desafio para a indústria brasileira**. 2016: CNI, 2016. Disponível em: [https://static.portaldaindustria.com.br/media/filer\\_public/e0/aa/e0aabd52-53ee-4fd8-82ba-9a0ffd192db8/sondespecial\\_industria40\\_abril2016.pdf](https://static.portaldaindustria.com.br/media/filer_public/e0/aa/e0aabd52-53ee-4fd8-82ba-9a0ffd192db8/sondespecial_industria40_abril2016.pdf). Acesso em 14 jan. 2025.

CORRÊA, V. A. **Uma Proposta de Níveis de Maturidade Baseado no TRL para Tecnologias Imunobiológicas**. Belo Horizonte, 2018.

CORSO, G. S. & CECCONELLO, I. **Uso de Realidade Aumentada como Meio de Visualização de Instruções de Trabalho**. SCIENTIA CUM INDUSTRIA, v. 7, n. 2, 2019.

DA SILVA, A. R., JUNIOR, J. S. M. & BALDO, R. L. **Monitoramento Imersivo: Uso da Realidade Aumentada para Visualização Contextual de Sinais em Tempo Real de Máquinas Industriais**. Revista Científica SENAI-SP - Tecnologia, Inovação & Educação, v. 3, n. 1, 2024.

DA SILVA, M. P., UESUGUI, E. A., ALMEIDA, D. R., OLIVEIRA, D. J. & SILVA, A. D. **Usos e Benefícios da Realidade Aumentada na Indústria 4.0**. Revista Brasileira de Mecatrônica, São Paulo, 2022.

DE BRITO, F. A., LIMA, L. R. S., WINKLER, I. & AMPARO, K. K. S. **Potencial de aplicação de Workflow baseado em Realidade Aumentada na Inspeção em Válvulas de Segurança**. Revista e-TECH: Tecnologias para Competitividade Industrial-ISSN-1983-1838 14.2 (2021).

DE LIMA, T. S. R. **Aplicação da Realidade Aumentada como Guia de Montagem em Processos Industriais**. Universidade Federal do Amazonas - UFAM, Itacoatiara, 2024.

GÉLIO, L. G. & CÉSAR, F. I. G. **Utilização da Realidade Aumentada na Manutenção Industrial**. Revista Científica Acertte, ISSN 2763-8928, 2022.

GIL, L. ANDRADE, M. H. & COSTA, M. C. **Os TRL (Technology Readiness Levels) como Ferramenta na Avaliação Tecnológica**. Revista Ingenium, p. 94-96, 2014.

JÚNIOR, M. J. A., CARDOSO, A., LAMOUNIER, E., LIMA, D. A. C., FERREIRA, A. R., SILVA, A. C., CAMPOS, D. P., & QUEIROZ, L. F. **Uma solução de Realidade Aumentada para manutenção assistida em subestações de energia elétrica em HVDC**. Revista Ibérica de Sistemas e Tecnologias de Informação, 2024.

JUSTIMIANO, A. C., GOMES, C., DA MOTTA, E. S. & SEMENTILLE, A. C. **Sistema de Realidade Aumentada para o Ensino e Treinamento de Pessoas Quando a Execução de Serviços de Montagem e Manutenção de Equipamentos**. Revista Iberoamericana de Tecnología en Educación y Educación en Tecnología, n. 28, 2021.

KELLER, B., D'ANGELO, T., LONCZYNSKI, J. P. & DELABRIDA, S. **Evaluation of Wearable Devices for Belt Conveyor Inspection Using Augmented Reality**. In 17th Brazilian Symposium on Human Factors in Computing Systems (IHC 2018), Belém - Brasil, ACM, 2018.

KIRNER, C. & TORI, R. Fundamentos de Realidade Aumentada. **Fundamentos e Tecnologia de Realidade Virtual e Aumentada**. v.1, 2006.

LASKURAIN-ITURBE, I., ARANA-LANDÍN, G., LANDETA-MANZANO, B., URIARTE-GALLASTEGI, N. **Exploring the Influence of Industry 4.0 Technologies**

**on the Circular Economy.** Journal of Cleaner Production, v. 321, ISSN 0959-6526, 2021.

RIBOLDI, R. M. & CECCONELLO, I. **Realidade Aumentada Industrial como Ferramenta de Auxílio em Manutenções de Painéis Elétricos.** SCIENTIA CUM INDUSTRIA, v.8, n.2, 2020.

ROCHA, V. M. **Realidade Aumentada Aplicada à Redução de Riscos na Segurança do Trabalho em Subestações Elétricas.** 2021.

SANTANA, J. V. R., PONTAROLLI, R. P. & GODOY, E. P. **Tecnologias Digitais para o Monitoramento de Processos na Indústria 4.0.** 15th IEEE International Conference on Industry Applications, 2023.

SOARES, J. F. S. **Realidade Aumentada nos Processos Logísticos de Armazenamento.** Adelpha Repositório Digital, 2021.

TEIXEIRA, R. L. P., TEIXEIRA, C. H. S. B., BRITO, M. L. A. & SILVA, P. C. D. **Os Discursos Acerca dos Desafios da Siderurgia na Indústria 4.0 no Brasil.** Brazilian Journal of Development, 2019.

TORI, R. & HOUNSELL, M. S. **Introdução a Realidade Virtual e Aumentada.** Porto Alegre: Editora SBC, 2020.

WILLIG, M. M. P. **Desenvolvimento e Teste de um Dispositivo de Realidade Aumentada no Ensino de Técnica Radiográfica.** Porto Alegre, 2024.

YAMADA, V. Y. & MARTINS, L. M. **Indústria 4.0: Um Comparativo da Indústria Brasileira Perante o Mundo.** Revista Terra & Cultura: Cadernos de Ensino e Pesquisa, v. 34, n. especial, 2018.