

**SAFETYGUIDE: DIGITAL TRANSFORMATION OF OPERATIONAL SAFETY IN
ELECTRICAL SYSTEMS THROUGH AUGMENTED REALITY****SAFETYGUIDE: TRANSFORMAÇÃO DIGITAL DA SEGURANÇA OPERACIONAL EM
SISTEMAS ELÉTRICOS POR MEIO DA REALIDADE AUMENTADA****STONY SILVA**

<https://orcid.org/0009-0000-1650-8659/stonysilveira@gmail.com>

Faculdade de Tecnologia de São Bernardo do Campo "Adib Moisés Dib", São Bernardo do Campo, SP

CAETANO VILELA DIAS DE SOUZA

<http://lattes.cnpq.br/3793020246091994/cvilela122@gmail.com>

Faculdade de Tecnologia de São Bernardo do Campo "Adib Moisés Dib", São Bernardo do Campo, SP

DIEGO ANDRADE FAURA

https://orcid.org/0009-0003-9338-6220/diego_faura@hotmail.com

Faculdade de Tecnologia de São Bernardo do Campo "Adib Moisés Dib", São Bernardo do Campo, SP

WILLIAM APARECIDO CELESTINO LOPES

<https://orcid.org/0009-0009-4437-776X/wilnatelha@gmail.com>

Faculdade de Tecnologia de São Bernardo do Campo "Adib Moisés Dib", São Bernardo do Campo, SP

MARCELINO SIQUEIRA DE CARVALHO

<https://orcid.org/0000-0002-9271-5729/profmarsa@gmail.com>

Faculdade de Tecnologia de São Bernardo do Campo "Adib Moisés Dib", São Bernardo do Campo, SP



Recebido em: 13/01/2025

Aprovado em: 17/01/2025

Publicado em: 02/05/2025

RESUMO

Este estudo investiga a aplicação de Realidade Aumentada (RA) para otimização da segurança operacional na manutenção de sistemas elétricos, focando na digitalização e padronização dos procedimentos de bloqueio de energias perigosas. Utilizando a metodologia *Design Science Research* (DSR), que orienta a estrutura e o desenvolvimento de projetos, sendo fundamental para a criação do artefato, proporcionando uma

abordagem estruturada e focada na resolução dos problemas identificados, foi desenvolvido o aplicativo SafetyGuide, integrado com RA, para automatizar e padronizar os processos de bloqueio de energia elétrica. A eficácia da solução foi testada em uma indústria de metalurgia utilizando simulações dos cenários de risco. A validação do aplicativo SafetyGuide com 11 colaboradores revelou uma aceitação positiva, com a maioria dos usuários avaliando a intuitividade, precisão e usabilidade obtendo nota acima de 9 em uma escala de 0 a 10. O aplicativo foi considerado eficaz para guiar os usuários no procedimento de bloqueio, com 90% dos participantes afirmando que a ferramenta foi útil para o processo de segurança. Os resultados indicam que a integração de RA e digitalização pode transformar significativamente os protocolos de segurança na manutenção elétrica, alinhando-se com as exigências da Indústria 4.0. O SafetyGuide representa uma inovação na área de segurança industrial, com potencial para aplicação em diversas indústrias, oferecendo um modelo para futuras pesquisas sobre a implementação de tecnologias avançadas em segurança.

Palavras-chave: bloqueio de energia; eficiência operacional; indústria 4.0; internet das coisas; manutenção.

ABSTRACT

This study investigates the application of Augmented Reality (AR) for optimizing operational safety in the maintenance of electrical systems, focusing on the digitization and standardization of hazardous energy lockout procedures. Using the Design Science Research (DSR) methodology, which guides the structure and development of projects and is essential for artifact creation, providing a structured and problem-solving-focused approach, the SafetyGuide application was developed. This app, integrated with AR, automates and standardizes the processes for electrical energy lockout. The effectiveness of the solution was tested in the metallurgy industry using risk scenario simulations. Validation of the SafetyGuide application with 11 employees revealed positive acceptance, with most users rating its intuitiveness, accuracy, and usability above 9 on a scale of 0 to 10. The application was considered effective in guiding users through the lockout procedure, with 90% of participants affirming that the tool was useful for the safety process. The results indicate that the integration of AR and digitization can significantly transform safety protocols in electrical maintenance, aligning with the requirements of Industry 4.0. SafetyGuide represents an innovation in industrial safety, with potential applications across various industries, offering a model for future research on implementing advanced technologies in safety practices.

Keywords: energy blocking; industry 4.0; internet of things; maintenance; operational efficiency.

1 INTRODUÇÃO

A indústria brasileira está em constante evolução e desenvolvimento. De acordo com o Mapa Estratégico da Indústria 2023-2032 (CNI, 2023), a indústria brasileira será protagonista ao apresentar soluções ao mundo nas áreas de energias renováveis, bioeconomia e economia circular, comprovando que, com a utilização consciente dos recursos naturais, pode-se gerar um desenvolvimento econômico, gerando empregos e melhorando as condições de vida dos brasileiros.

Para manter a evolução e desenvolvimento, a indústria conta com um setor em especial, que possui uma função muito importante, que é a manutenção. O objetivo da manutenção é sempre aumentar ao máximo a disponibilidade dos equipamentos, seja em suas condições originais ou, ao menos, nas condições necessárias para operação. Com esse objetivo, a manutenção busca através

das novas tecnologias e metodologias, garantir que a indústria continue em atividade de forma quase que ininterrupta, com o menor tempo de paradas possível (Baldissarelli e Fabro, 2019).

A manutenção é necessária, pois pode minimizar custos, otimizar as condições de funcionamento, aumentar a vida útil do recurso e melhorar a segurança quando se tem um bom planejamento (Lima *et al.*, 2017). A padronização permite uma execução consistente e previsível das atividades de manutenção. Por consequência, com o estabelecimento de um padrão nas atividades relacionadas a manutenção, pode-se garantir maior segurança e eficiência nos procedimentos, minimizando os erros e facilitando o treinamento para novos funcionários (MEDYŃSKI *et al.*, 2023).

A Indústria 4.0 está alterando nossas formas de produção, consumo, relações de trabalho e até mesmo as próprias relações interpessoais (Sigahi e Andrade, 2017). No contexto da manutenção, a indústria 4.0 tem a finalidade de integrar os setores através da automação e troca de dados, computação em nuvem e internet das coisas. Além disso, a ela precisa se ajustar a essa realidade tecnológica industrial para que essas mudanças ocorram de forma produtivas em sua implementação.

Um dos principais pilares da Indústria 4.0 é a Realidade Aumentada (RA), sendo uma particularização de um conceito geral, denominado realidade misturada, que consiste na sobreposição de ambientes reais e virtuais, em tempo real, através de um dispositivo tecnológico (DARGAN *et al.*, 2023). A RA, tem aplicações significativas na manutenção de equipamentos, oferecendo vantagens e benefícios (Campara *et al.*, 2021). Uma das aplicações da RA na manutenção pode ser a consulta de manuais e instruções em tempo real pelos técnicos durante a manutenção, melhorando a eficiência, a segurança e a minimização de erros durante o procedimento, tendo como objetivo a manutenção assistida por RA (Runji; Lee; Chu, 2023).

Outra tecnologia que está sendo amplamente utilizada na indústria é a Internet das Coisas (IoT). Amaral, Juliani e Bettio (2020) definem que a internet das coisas tem o objetivo de conectar qualquer objeto físico à internet. Segundo Ismail e Abdulazeez (2023), a IoT tem revolucionado a forma como se vê e gerencia os sistemas de manutenção. A IoT está sendo cada vez mais utilizada nas operações de manutenção industrial em todo o mundo, pois permite que as organizações obtenham informações sobre o desempenho de suas máquinas em tempo real, através de sensores inteligentes que podem ser colocados para monitorar qualquer coisa, como temperatura, umidade, vibração, entre outras.

Utilizando as ideias apresentadas anteriormente, este projeto possui dois principais objetivos, sendo o primeiro, o estudo de uma empresa do segmento de metais não ferrosos que está atualmente enfrentando desafios significativos com os procedimentos de bloqueio de energia para manutenção de suas máquinas industriais. Destacando assim, a necessidade de padronização destes procedimentos e melhoria nos treinamentos para prevenir acidentes graves, e assim, garantir a segurança dos colaboradores.

Tendo isso em mente, o segundo objetivo consiste em desenvolver um artefato tecnológico com base na investigação de um incidente ocorrido nesta empresa, utilizando a metodologia *Design Science Research* (DSR), para criar um sistema com as tecnologias de RA e IoT e implementar um procedimento padronizado de bloqueio de energia exclusivo para a máquina na qual ocorreu o acidente. Este procedimento é vital para a manutenção de máquinas industriais.

A manutenção industrial enfrenta desafios recorrentes relacionados à segurança e à padronização dos processos de bloqueio de energias perigosas, conforme estabelecido na NR 10 (ABBASSI *et al.*, 2022). Embora tecnologias da Indústria 4.0, como aplicativos móveis e realidade aumentada, estejam sendo aplicadas em áreas como manutenção preditiva e treinamentos, a padronização específica de procedimentos de segurança continua sendo um espaço relevante na literatura (EGGER; MASOOD, 2020). Este estudo aborda essa lacuna ao desenvolver o SafetyGuide, um aplicativo que integra soluções tecnológicas para garantir a segurança dos técnicos e a eficiência nos processos de manutenção.

A justificativa para o desenvolvimento deste projeto, é garantir maior eficiência e segurança durante a execução das atividades de manutenção, que são de alto risco para o colaborador e utilizar tecnologias habilitadoras da indústria 4.0 para o desenvolvimento tecnológico na área da manutenção.

2 REFERÊNCIAL TEÓRICO

2.1 Realidade aumentada aplicada à manutenção na indústria 4.0

A Realidade Aumentada (RA) surge como uma tecnologia importante no contexto da indústria 4.0, transformando processos industriais por meio da integração de elementos virtuais ao ambiente físico. A RA na Indústria 4.0 possibilita a sobreposição de objetos e ambientes virtuais em tempo real, além de uma interação intuitiva com máquinas e sistemas de produção (Mesquita e Moreira, 2018).

É possível observar diversas aplicações na indústria com a RA, que vão desde a manutenção preditiva até o treinamento de operadores. De acordo com Bender e Cecconello (2020), também permite que os trabalhadores visualizem instruções de montagem sobrepostas a peças físicas, melhorando a eficiência e a precisão das operações de montagem.

Com a integração da RA na manutenção industrial se obtém vantagens significativas, sendo que ao fornecer acesso a dados em tempo real e instruções contextuais, se pode capacitar os técnicos a diagnosticarem e solucionar falhas com maior precisão e rapidez. Contribuindo assim para a redução do tempo de inatividade das máquinas e resultando em uma melhor alocação de recursos uma gestão mais eficaz dos ativos industriais (Silva *et al.*, 2022).

2.2 IoT e protocolo MQTT

A IoT representa uma grande transformação na manufatura, integrando dispositivos, sensores e sistemas para otimizar processos e impulsionar a eficiência operacional. Conforme destacado por Khanna e Kaur (2020), a IoT representa a interconexão digital em ambientes industriais, permitindo a coleta e compartilhamento de dados em tempo real.

Dispositivos inteligentes interconectados compõem a estrutura da IoT, formando uma malha de sensores e atuadores. Como mencionado por Shi *et al.* (2016), essa arquitetura compreende uma rede diversificada, abrangendo desde sensores de chão de fábrica até sistemas de gestão empresarial, criando uma infraestrutura ágil e adaptável.

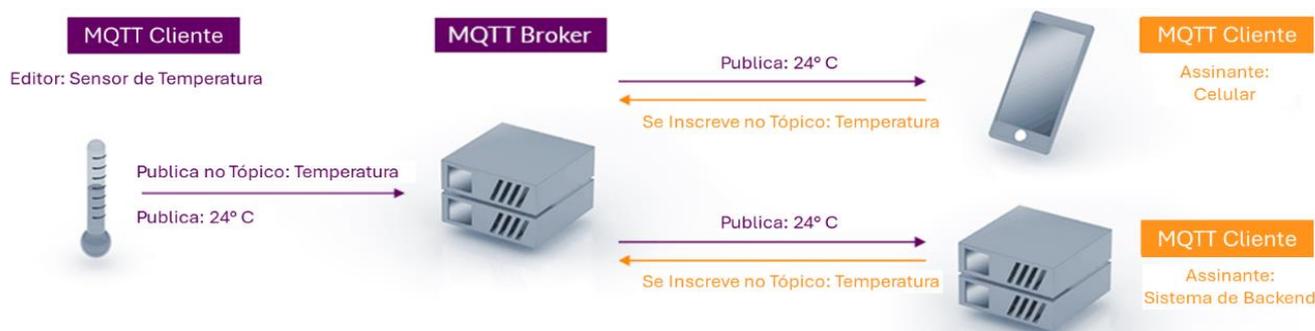
Para o desenvolvimento de tecnologias e aplicações com IoT, o protocolo de comunicação MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*) é o mais utilizado. O protocolo MQTT é um protocolo de comunicação leve e eficiente projetado para dispositivos com restrições de largura de banda e energia. Ele é amplamente utilizado em IoT para troca de mensagens assíncronas entre dispositivos (MQTT, 2022).

Para realizar a integração de dispositivos IoT muitas aplicações fazem uso de um *broker* MQTT. O *broker* MQTT é um elemento crucial na comunicação entre dispositivos em uma rede IoT e atua como um mediador, gerenciando as publicações e as subscrições do protocolo MQTT. Em um artigo, Torres *et al.* (2016) realizaram uma análise de desempenho de *brokers* MQTT em um sistema de baixo custo, destacando a importância do *broker* na gestão eficiente das mensagens entre os dispositivos conectados. Além disso, Mishra, Mishra e Kertesz (2021) discutem a implementação e configuração de *brokers* MQTT, com foco nos populares *brokers* Mosquitto e

HiveMQ que são plataformas bastante utilizadas pela comunidade de sistemas embarcados. Portanto, o *broker* MQTT é essencial para a comunicação eficaz e eficiente em redes IoT.

Na Figura 1 a seguir, ilustra-se a arquitetura de uma rede IoT que utiliza o protocolo MQTT e um *broker*.

Figura 1 – Arquitetura IoT com *broker* MQTT



Fonte: MQTT (2024). Disponível em: < <https://mqtt.org/>>. Acesso em: 07, maio, 2024.

A partir de uma arquitetura IoT com *broker* MQTT, pode-se desenvolver inúmeras aplicações nas indústrias e nos mais variados setores e atividades, como a qualidade, a manutenção, o treinamento, a segurança, entre outras aplicações que possam tirar proveito desta tecnologia que faz parte dos pilares da indústria 4.0.

2.3 Manutenção e bloqueio de energia

A manutenção tem como missão garantir o funcionamento de máquinas, ferramentas, instalações e equipamentos com o mínimo de paradas possível. E para continuar sua missão, é importante uma classificação dos tipos de manutenção existentes para que se possa ter mais eficiência, pois cada um dos tipos possui uma finalidade diferente (Lima *et al.*, 2017). Seus principais tipos são:

- **Manutenção Corretiva:** A manutenção corretiva tem a finalidade de corrigir os problemas conforme eles surgem em um determinado ambiente, no caso de uma máquina, ela só é utilizada quando a máquina apresenta falhas (ABNT, 1994).
- **Manutenção Preventiva:** A manutenção preventiva é uma forma de manutenção que busca evitar a ocorrência de falhas ou a degradação do funcionamento de uma máquina, equipamento ou ferramenta (ABNT, 1994).

- **Manutenção Preditiva:** A manutenção preditiva se foca no monitoramento e análise dos dados de um equipamento, e a partir destas análises, ela tenta prever falhas. Ela é mais adequada para equipamentos críticos para o processo (ABNT, 1994).
- **Manutenção Centrada na Confiabilidade:** A manutenção centrada na confiabilidade, consiste em estudar os principais defeitos e falhas e tentar antecipar sua ocorrência, (ABNT, 1994).

Cada tipo de manutenção apresenta uma proposta específica e tem como objetivos comuns garantir a disponibilidade e a qualidade dos equipamentos, fazer a correção de problemas, restabelecer a eficiência perdida e propiciar o menor custo de produção. A escolha do tipo de manutenção a ser aplicado depende de vários fatores, como as características da máquina ou equipamento a ser mantido, o tempo disponível para a manutenção e o custo envolvido.

O procedimento de segurança conhecido como LOTO (*LOCKOUT TAGOUT*) visa proteger os trabalhadores contra a ativação inesperada de máquinas e equipamentos ou a liberação de energia perigosa durante a manutenção (Stadler e Leal, 2020). De acordo com as diretrizes de Stadler e Leal (2020), A norma OSHA 29 CFR 1910.147 de origem americana, estipula ações para prevenir acidentes relacionados a energias perigosas, incluindo bloqueio, travamento e interrupção do fornecimento de energia. O empregador é responsável por estabelecer um programa de controle de energia, envolvendo elaboração de procedimentos, treinamento dos funcionários e auditorias periódicas.

No Brasil, o controle de energias perigosas é descrito em algumas normas regulamentadoras, como na NR 10 e NR 12. As instalações elétricas só são consideradas desenergizadas após seguir uma sequência específica, incluindo seccionamento, impedimento de reenergização e confirmação da ausência de tensão. O estado desenergizado deve ser mantido até autorização para reenergização, seguindo outra sequência de procedimentos, como retirada de ferramentas e equipamentos, remoção de trabalhadores da área e religação dos dispositivos de seccionamento (Brasil, 2016).

As orientações da norma OSHA 1910.147 estão em conformidade com a legislação brasileira, complementando as lacunas das NRs. Essa norma é mais rigorosa e abrangente, fornecendo instruções detalhadas sobre o controle de energias perigosas.

De acordo com relatório publicado pela Confederação Nacional da Indústria (2016, p. 17), Sigahi e Andrade (2017) estimam que, até 2025, os processos relacionados à Indústria 4.0 poderão reduzir custos de manutenção de equipamentos em até 40%, reduzir o consumo de energia em até

20% e aumentar a eficiência do trabalho em até 25%, podendo impactar o PIB brasileiro em aproximadamente US\$ 39 bilhões até 2030.

3 METODOLOGIA

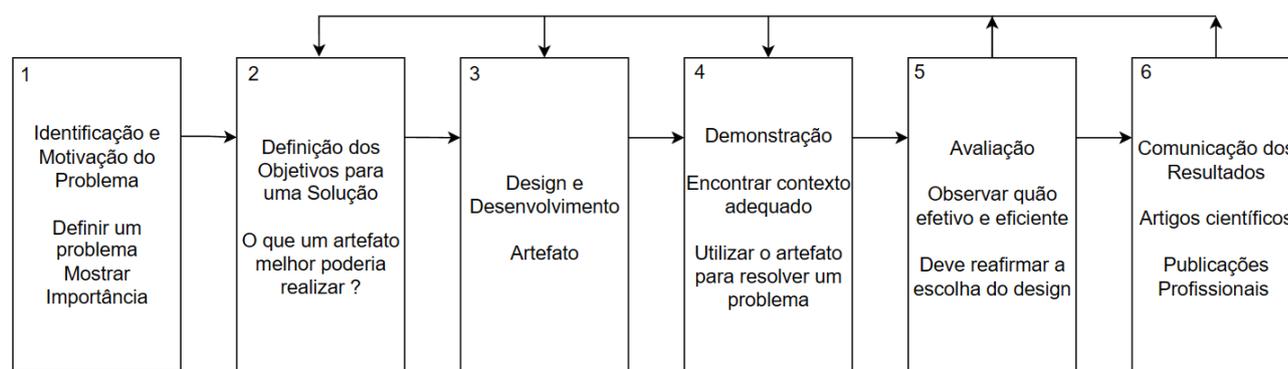
De acordo com Cauchick (2019), a importância metodológica de um trabalho pode ser justificada pela necessidade de embasamento científico adequado, pela busca da melhor abordagem para endereçar as questões da pesquisa.

Para o desenvolvimento deste projeto, utilizou-se como metodologia a *Design Science Research* (DSR), sendo uma metodologia denominada como “Pesquisa em Ciência do Projeto”.

A DSR é uma abordagem de pesquisa que tem como objetivo criar artefatos inovadores para resolver problemas e aprimorar o ambiente em que são aplicados. Ela combina conhecimento científico e tecnológico por meio da criação desses artefatos, proporcionando um melhor resultado (Brocke *et al.*, 2020).

Esta metodologia é dividida em 6 fases de desenvolvimento para um projeto completo. Na Figura 2 a seguir, veja um fluxograma com a sequência das fases definidas pela DSR e na sequência, a explicação de cada uma delas.

Figura 2 – Sequência das fases do DSR (adaptado de Brocke *et al.*, 2020)



Fonte: Brocke *et al.*, (2020).

- **1. Identificação e Motivação do Problema:** Esta fase define o problema de pesquisa específico e justifica o valor de uma solução. Justificar o valor de uma solução motiva o pesquisador a buscar uma solução e ajuda o público a apreciar a compreensão do pesquisador sobre o problema (Brocke *et al.*, 2020). Para desenvolver esta fase, será

realizado uma investigação sobre os problemas encontrados e algumas visitas técnicas a uma empresa metalúrgica de médio porte, situada na região de Santo André - SP, referida como 'Empresa X'.

- **2. Definição dos Objetivos para uma Solução:** Para esta fase os objetivos para uma solução devem ser claramente definidos, indicando o que se espera alcançar com o artefato proposto (Brocke *et al.*, 2020). Para desenvolver esta fase, serão utilizados os resultados da investigação e das visitas técnicas, propostas na fase 1, com o objetivo de determinar as causas e propor uma solução para sanar o problema. Utilizando assim, algumas ferramentas para coletar respostas como o Microsoft Forms, através de perguntas elaboradas previamente e direcionadas ao problema enfrentado.
- **3. Design e Desenvolvimento:** Nesta fase, o artefato é projetado e desenvolvido com base nos objetivos definidos. É importante seguir as práticas rigorosas de design e desenvolvimento (Brocke *et al.*, 2020). Para desenvolver esta fase, será realizado estudos e aplicação de softwares, como por exemplo o Autodesk *Inventor* e o *Unity*, para atingir os objetivos determinados na fase 2 e desenvolver um artefato tecnológico que possa eliminar o problema.
- **4. Demonstração:** Esta fase demonstra a utilização do artefato para solucionar um ou mais variações do problema. Ela pode envolver a experimentação, simulação, estudo de caso, provas de funcionamento e outras atividades apropriadas para o teste (Brocke *et al.*, 2020). Para desenvolver esta fase, será utilizado os resultados da fase 3, que resultam em um artefato tecnológico para resolver o problema, e realizar testes das funcionalidades, como por exemplo o reconhecimento de objetos e comunicação IoT.
- **5. Avaliação:** Esta fase tem como objetivo avaliar os artefatos em termos de eficácia, eficiência e aceitação, que é crucial para determinar sua utilidade e impacto (Brocke *et al.*, 2020). Para desenvolver esta fase, será realizado uma apresentação do artefato tecnológico, que foi desenvolvido na fase 3 e validado para testes na fase 4, na empresa com todas as pessoas envolvidas e após a apresentação, será proposto um questionário com perguntas específicas sobre a performance do funcionamento do artefato apresentado.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Identificação e Motivação do Problema

A primeira fase da DSR tem como foco para esta pesquisa, a identificação do problema ou demanda a ser atendida, que se concentra em uma empresa metalúrgica de médio porte referida como 'Empresa X', que enfrenta desafios significativos em relação aos procedimentos de bloqueio de energia para a manutenção de suas máquinas industriais. Devido à natureza competitiva do setor e à sensibilidade das informações, a empresa optou por manter sua identidade confidencial. Foram realizadas algumas visitas técnicas aos setores de manutenção e segurança do trabalho para o levantamento de dados para estudar tais desafios enfrentados pela empresa.

No ano de 2022, a Empresa X registrou 25 acidentes com afastamento, dos quais 7 ocorreram no setor de manutenção. Dentre esses, um incidente específico foi selecionado para análise devido ao seu alto potencial de gravidade. O evento foi classificado como tal devido à origem na falta ou ineficiência do bloqueio de energias perigosas, resultando no risco iminente de amputação de membro.

O incidente em questão envolveu um colaborador que realizava a manutenção em uma máquina hidráulica nomeada como “apontador hidráulico”, utilizado no processo de preparação de tubos de cobre e latão para a trefilação. Ao notar que parte do mecanismo da prensagem hidráulica estava solto, o colaborador colocou o dedo no local do parafuso para verificá-lo. Sem intenção, ele acionou o pedal do equipamento, causando um movimento brusco que resultou em um corte grave no dedo.

A investigação revelou vários fatores que contribuíram para o ocorrido. Um deles foi a falta de padronização nos procedimentos de bloqueio de energias perigosas para cada máquina. O colaborador envolvido no acidente era novo na empresa e não possuía o conhecimento necessário para executar o procedimento de forma autônoma, e seu treinamento, ministrado pela empresa, estava vencido.

A justificativa para encontrar uma solução para problemas como este baseia-se no princípio de melhorar a segurança durante a realização dessas atividades, que, em muitas situações, podem resultar em lesões graves aos funcionários ou até mesmo em consequências fatais. Assim, ao aprimorar a segurança e os procedimentos, os trabalhadores estarão mais protegidos e confiantes para executar as atividades de manutenção, que possuem grande relevância para a indústria.

4.2 Definição de dificuldades a serem sanadas

Diante das constatações citadas no item 4.1, a Empresa X desenvolveu um plano de ação com o objetivo de aprimorar a administração da reciclagem de treinamentos e implementou novas proteções mecânicas nas máquinas. Contudo, através da entrevista com o acidentado, realizada durante a visita técnica, percebeu-se que ainda faltava a padronização das atividades desses procedimentos, o que poderia resultar em futuros acidentes semelhantes.

Para resolver o problema de forma abrangente, era necessário sanar as seguintes dificuldades:

- Dificuldades para recordar as etapas do procedimento de bloqueio de energias perigosas;
- Dificuldade em executar o bloqueio pela falta de familiaridade com manutenção da máquina;
- Falta de registros físicos ou digitais da execução do procedimento de bloqueio;
- Falta de conhecimento na operação da máquina.

Para atender a essas necessidades, foi desenvolvido um aplicativo que instrui o colaborador, de forma digital, durante o procedimento de bloqueio para manutenções. Além disso, o aplicativo valida se o bloqueio foi realizado de maneira eficaz. Ele é utilizado em conjunto com um cadeado de bloqueio IoT, que transmite sinais de abertura e fechamento durante o processo, permitindo o monitoramento do uso do cadeado ao longo da execução da manutenção.

4.3 Design e Desenvolvimento

O alvo do aplicativo nomeado “SafetyGuide” (traduzido em português como “Guia de Segurança”) é oferecer uma solução inovadora e segura para o processo de bloqueio de máquinas industriais, alinhada aos objetivos da pesquisa e às necessidades dos usuários.

A idealização e desenvolvimento do aplicativo foi realizado através do software Unity (motor gráfico e ambiente de desenvolvimento para programas) integrado as APIs (*Application Programming Interface*) do Vuforia (kit de desenvolvimento para aplicações com RA) para utilização da RA e do protocolo MQTT para troca de dados com o cadeado IoT.

No geral, o aplicativo tem o objetivo de auxiliar os profissionais de manutenção no processo de bloqueio de máquinas industriais de forma segura e eficaz, desenvolvendo as etapas de bloqueio característico para cada máquina, a fim de esboçar um procedimento com as particularidades de cada uma e tornando o momento da execução rápido e claro. Também se usou na etapa de bloqueio dois sistemas para o reconhecimento e autenticação, sendo um para receber o estado do cadeado

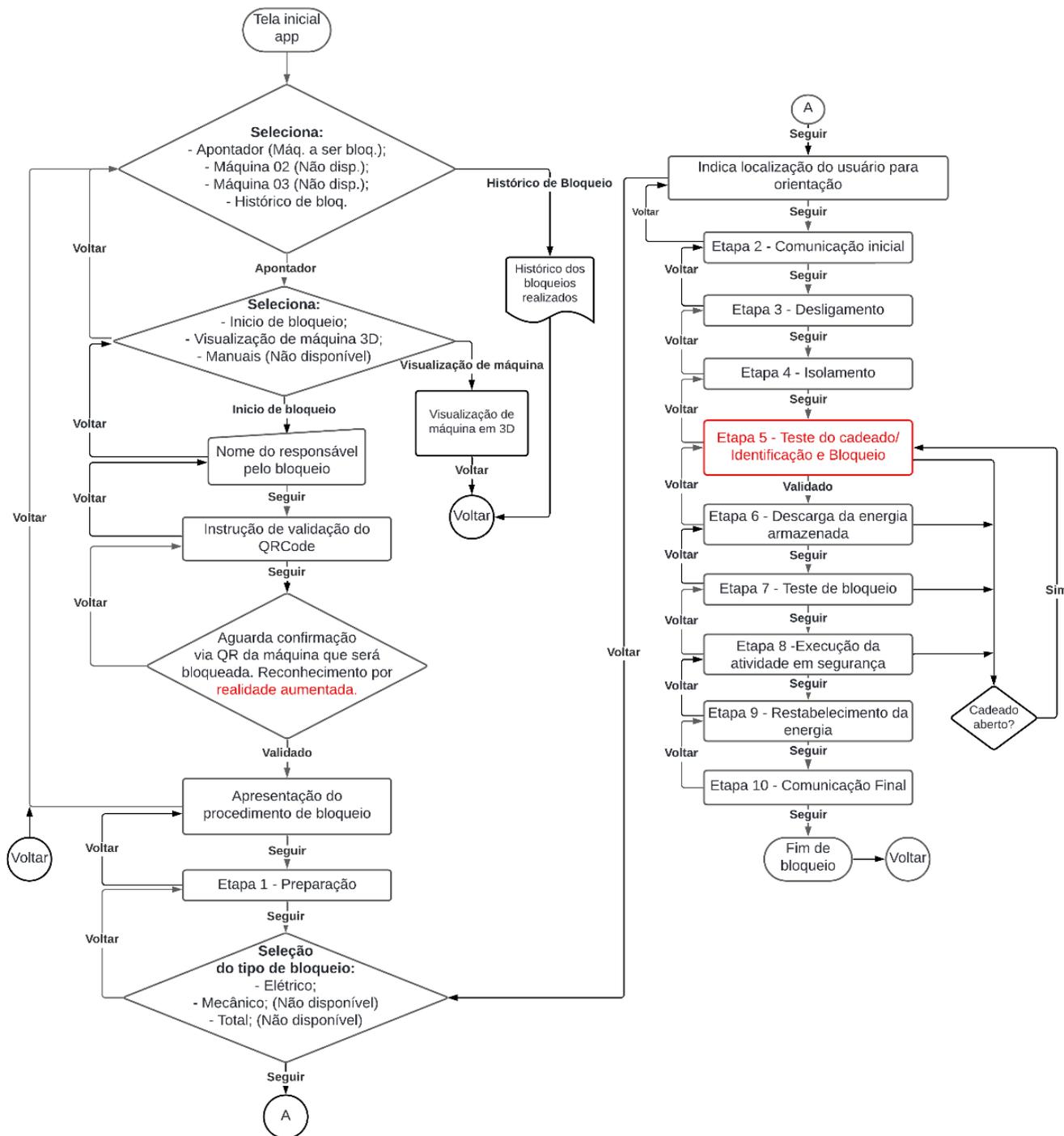
(aberto/ fechado), e outro para certificar a condição do bloqueio, efetivo ou não, através da realidade aumentada.

O *SafetyGuide* é projetado para orientar os usuários por meio de nove passos específicos, se baseando na norma OSHA 29 CFR 1910.147, e procedimentos existentes na empresa, sendo as etapas:

1. Preparação;
2. Comunicação inicial;
3. Desligamento;
4. Isolamento;
5. Bloqueio e identificação;
6. Descarga na energia armazenada;
7. Teste de bloqueio;
8. Execução da atividade em segurança;
9. Restabelecimento da energia e comunicação final.

O design do sistema envolveu uma análise detalhada dos requisitos de segurança e funcionalidade, resultando na definição de um processo de bloqueio dividido em etapas claras e sequenciais conforme Figura 3. Durante o desenvolvimento do aplicativo, foram implementadas funcionalidades essenciais, incluindo as interações que garantem que a máquina selecionada no menu principal é a mesma que se encontra diante do operador para efetuar o bloqueio.

Figura 3 – Fluxograma de funcionamento do aplicativo

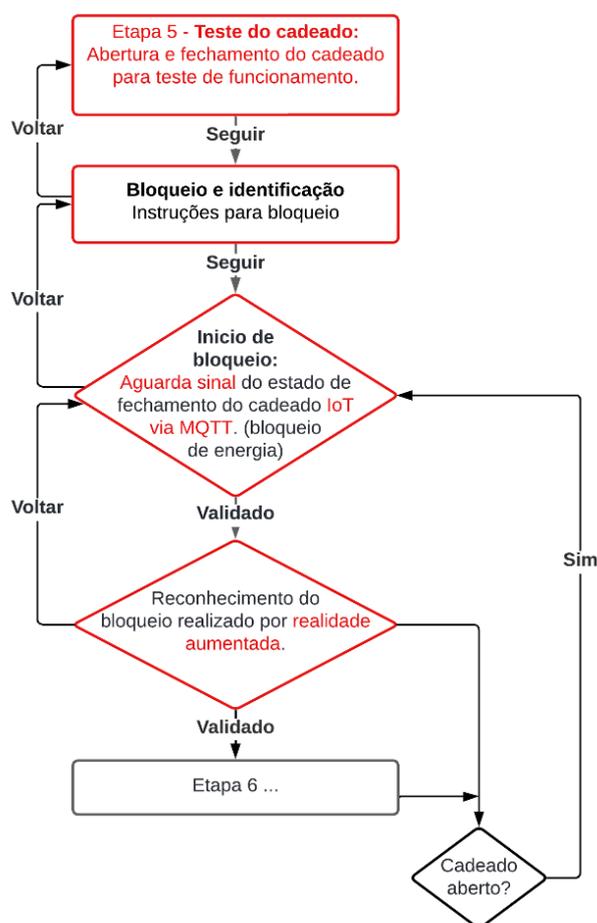


Fonte: Dos autores, 2024.

Uma das principais etapas do procedimento é a de número 5 - Bloqueio e identificação, responsável por orientar e garantir a realização de todo o bloqueio e assegurar que na condição do usuário realizar a remoção do cadeado antes da etapa 9 - Restabelecimento da Energia,

automaticamente o aplicativo retorne para a etapa 5. Devido à complexidade, todo o processo de bloqueio realizado na etapa 5 foi detalhado pela Figura 4.

Figura 4 – Fluxograma de funcionamento da etapa 5



Fonte: Dos autores, 2024.

Para a criação do cadeado de bloqueio IoT foi aplicado conceitos de eletrônica embarcada para a transmissão de dados a partir do sensoriamento do estado do cadeado (aberto/fechado), e através de um software CAD (*Computer Aided Design*, sendo traduzidos como desenho assistido por computador) para elaboração de um modelamento matemático tridimensional para realizar a

customização de um cadeado de bloqueio tradicional, para um que tenha características de um dispositivo IoT. O cadeado IoT possui autonomia de bateria para 48 horas de operação contínua. Através da manufatura aditiva, utilizou-se a impressão 3D para a fabricação das peças de customização do cadeado. A Figura 5 exibe o design do cadeado no software CAD, e o resultado alcançado pela impressão 3D e montagem final das peças.

Figura 5 – Cadeado de bloqueio IoT virtual e real



Fonte: Dos autores, 2024.

4.4 Demonstração

O SafetyGuide foi projetado para simplificar e aprimorar o procedimento de bloqueio de máquinas, essencial para a segurança dos operadores industriais. O aplicativo guia os operadores desde a comunicação e identificação dos pontos de bloqueio até a confirmação da conclusão do procedimento, através de instruções imagens e vídeos, garantindo uma execução totalmente guiada. Combinando praticidade e segurança, o SafetyGuide tem o potencial de transformar a maneira como o bloqueio de máquinas é realizado, tornando-o mais seguro e eficiente.

Inicialmente foi desenvolvido telas com interface simplificada, conforme a Figura 6 demonstra, sendo possível realizar navegações através dos menus que norteiam para um afinamento de seleções, até que se chegue no bloqueio propriamente dito. Primeiramente, foi

criado o procedimento de bloqueio elétrico para a máquina apontador hidráulico que é o alvo desta implementação.

Figura 6 – Menus de Seleção



Fonte: Dos autores, 2024.

O procedimento é dividido em dez etapas, abrangendo desde o comissionamento até o descomissionamento do bloqueio. Para facilitar a orientação dos operadores, as etapas que exigem maior complexidade são acompanhadas por vídeos instrutivos, conforme ilustrado na Figura 7. Esses vídeos apresentam a maneira ideal de executar cada etapa, disponibilizando um conteúdo visual que facilite a compreensão do procedimento durante a execução.

Figura 7 – Etapas com orientação por vídeo



Fonte: Dos autores, 2024.

A etapa cinco é iniciada com o teste do cadeado IoT, cujo objetivo é verificar a capacidade do dispositivo em enviar sinais de seu estado para o aplicativo. Utilizando um método guiado pelo aplicativo, conforme ilustrado na Figura 8, os operadores realizam a abertura e o fechamento do cadeado, monitorando os resultados na tela do SafetyGuide. Após a confirmação do funcionamento adequado, o aplicativo autoriza a continuidade do procedimento de bloqueio.

Figura 8 – Teste do Cadeado IoT



Fonte: Dos autores, 2024.

Foram implementadas duas etapas de verificação/confirmação para aprimorar a segurança do procedimento. A primeira etapa ocorre imediatamente após a seleção no menu da máquina que o operador deseja bloquear, exigindo que ele escaneie o QRCode no painel de comando para garantir que ele esteja diante da máquina na qual o aplicativo irá guiá-lo. A segunda está localizada na etapa cinco do processo, e adota uma abordagem de dupla verificação. Inicialmente é verificado o estado do cadeado IoT para confirmar o fechamento adequado, seguido pela verificação visual por meio de realidade aumentada do cadeado bloqueando a chave seccionadora, conforme ilustrado na Figura 9.

Figura 9 – Telas de confirmação de máquina e reconhecimento do bloqueio.



Fonte: Dos autores, 2024.

Quando selecionado no aplicativo a máquina que se deseja bloquear, é oferecida a opção de visualização tridimensional da máquina, onde se disponibiliza o modelamento tridimensional da máquina tendo opções de rotacionar o modelo 3D para direita e esquerda podendo ter um vislumbre de diversos ângulos.

Conforme a Figura 10 demonstra, essa funcionalidade visa facilitar o reconhecimento e situar a amplitude física da máquina, especialmente para colaboradores menos familiarizados com o processo, proporcionando uma compreensão mais intuitiva da operação.

Figura 10 – Máquina Tridimensional

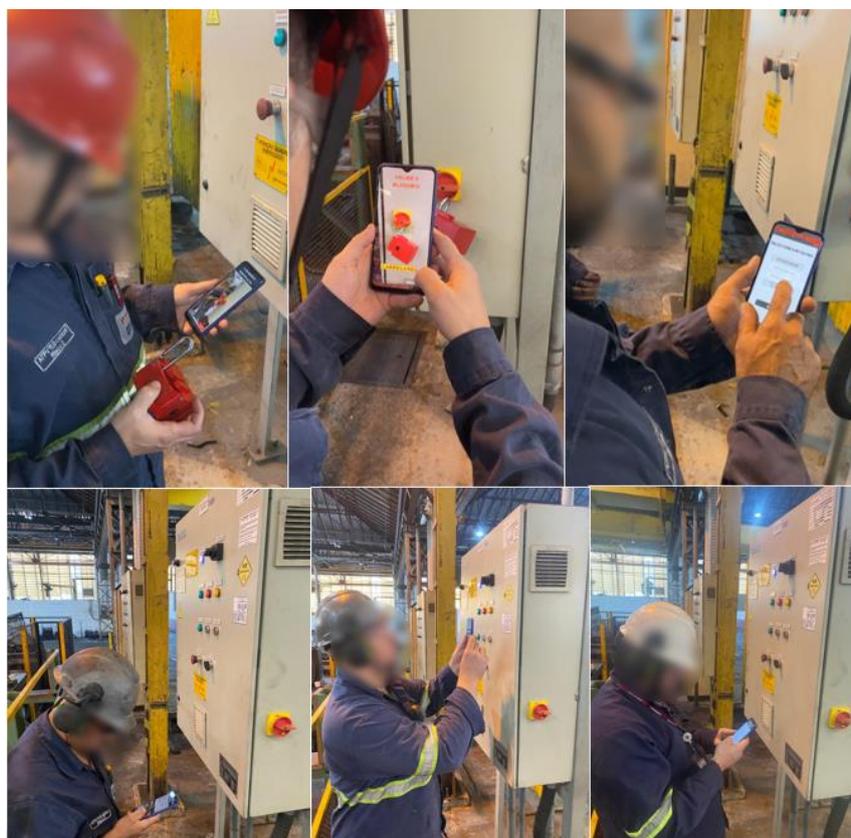


Fonte: Dos autores, 2024.

4.5 Avaliação

Após o desenvolvimento do aplicativo SafetyGuide empregado na empresa X, foi feita a seleção de alguns colaboradores que estão diretamente ligados a utilização do procedimento de bloqueio para realizar a validação do aplicativo. O teste, ilustrado pela Figura 11, foi feito com 11 colaboradores que atuam entre 6 e 27 anos na empresa, dentre eles: 1 técnico de segurança, 2 supervisores de manutenção, 1 especialista industrial, 1 técnico eletrônico e 6 eletricitistas de manutenção.

Figura 11 – Validação



Fonte: Dos autores, 2024.

Com o intuito de coletar os dados para validar e avaliar o protótipo, foi elaborado um questionário com 8 perguntas que foram respondidas logo após a utilização do aplicativo:

- **Questão 1** - Qual é o seu nível de familiaridade com aplicativos de realidade aumentada?
- **Questão 2** - Em uma escala de zero a dez, onde zero representa "muito difícil" e dez representa "muito fácil", quão intuitivo você considera o uso do aplicativo para procedimento de bloqueio de energias perigosas?

- **Questão 3** - Em uma escala de zero a dez, onde zero representa "totalmente insatisfatório" e dez representa "totalmente satisfatório", qual seria sua avaliação da precisão da identificação do bloqueio realizada pelo aplicativo?
- **Questão 4** - Como você avalia a usabilidade da interface de usuário do aplicativo?
- **Questão 5** - O aplicativo conseguiu guiá-lo de forma efetiva em todos os passos para a realização do bloqueio?
- **Questão 6** - Você acredita que o aplicativo pode ser uma ferramenta útil para a realização do procedimento de bloqueio de energias perigosas de forma digital, levando em consideração a utilização por um colaborador não familiarizado com a máquina ou a utilização em uma máquina que possui um procedimento de bloqueio mais elaborado ou complexo?
- **Questão 7** - Você encontrou algum problema de usabilidade ao interagir com o aplicativo? Se sim, por favor, descreva-o brevemente.
- **Questão 8** - Gostaria de inserir um comentário adicional ou sugestão de melhoria sobre o aplicativo? Se sim, por favor, descreva-o brevemente.

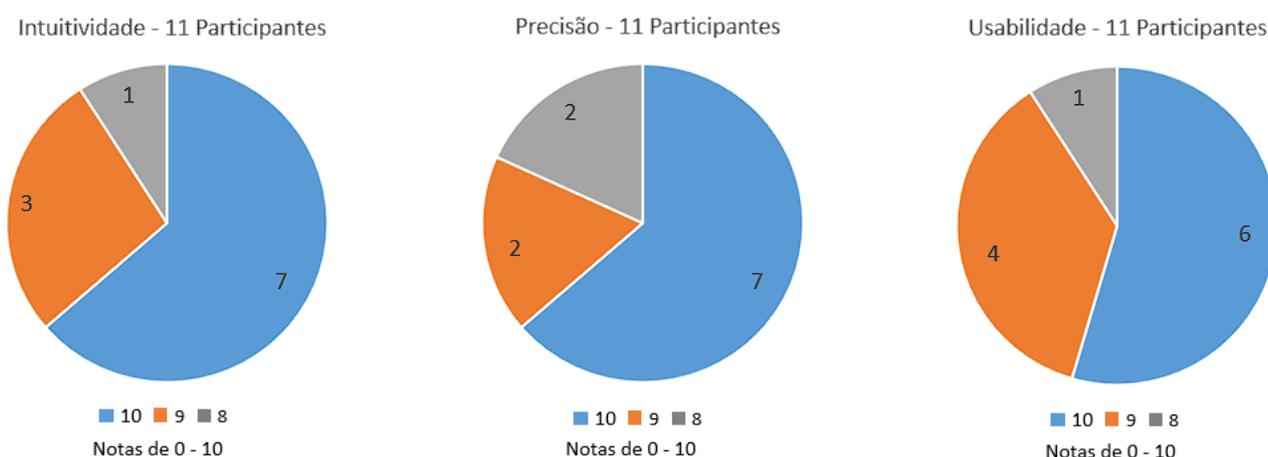
Este questionário foi elaborado para avaliar de forma geral o artefato, contendo uma pergunta para estimar quantos usuários conhecem a tecnologia de realidade aumentada para uma melhor compreensão nas possíveis dificuldades em utilizar o aplicativo, três perguntas avaliativas em função da experiência proporcionada pela utilização, duas perguntas objetivas sobre pertinência em sua utilização e mais duas perguntas pessoais sobre possíveis falhas e sugestões para fundamentar trabalhos futuros.

A Questão 1 teve como objetivo avaliar o nível de familiaridade dos participantes com aplicativos de realidade aumentada, proporcionando uma compreensão do contexto dos usuários e verificando se o conhecimento prévio influenciaria na interação com o aplicativo proposto. Essa análise foi fundamental para identificar a necessidade de capacitação adicional ou de ajustes no design final do aplicativo caso fosse necessária alguma melhoria, a fim de torná-lo mais acessível. Os resultados revelaram que 73% dos participantes possuem conhecimento moderado sobre a tecnologia, 2% têm um conhecimento elevado, enquanto 1% demonstrou baixo conhecimento. Esses dados indicam que a maioria dos usuários possui uma base que facilita a utilização do aplicativo.

O gráfico 1 a seguir demonstra que as notas de avaliação entre os 11 usuários nos critérios de intuitividade, precisão e usabilidade sobre o aplicativo, e a partir das notas registradas para cada categoria, pode-se analisar que a maioria delas estão entre as notas 9 e 10, caracterizando uma ótima aceitação por parte do aplicativo.

Gráfico 1 – Questões avaliativas 2, 3, 4 e notas de avaliação do aplicativo

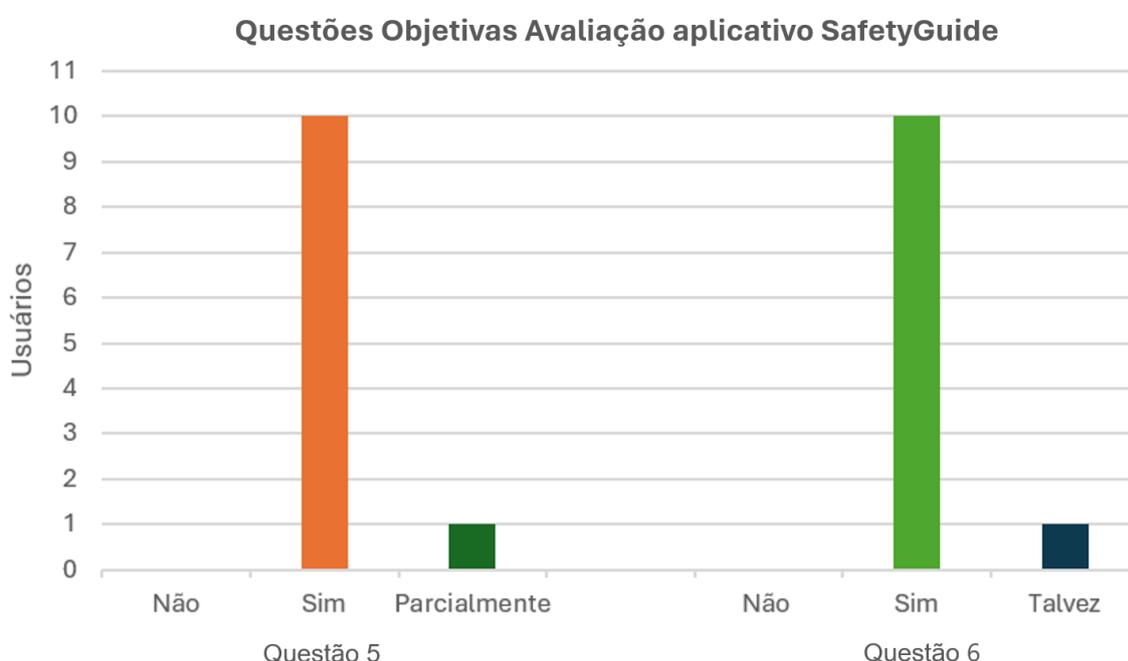
Avaliação do aplicativo Safety Guide com os especialistas e técnicos da manutenção



Fonte: Dos autores, 2024.

Os resultados da pesquisa de avaliação revelam uma tendência positiva em relação à eficácia do aplicativo no processo de bloqueio de energias perigosas. A maioria dos participantes responderam afirmativamente à pergunta 5, indicando que o aplicativo conseguiu guiá-los de forma efetiva em todos os passos necessários para realizar o bloqueio, com apenas uma resposta indicando uma experiência parcialmente eficaz, conforme demonstra o gráfico 2.

Gráfico 2 – Questões objetivas 5 e 6 de avaliação do aplicativo



Fonte: Dos autores, 2024.

As Questões 7 e 8 tiveram como objetivo identificar possíveis problemas de usabilidade no aplicativo e reunir sugestões para um possível aprimoramento. Essa análise foi essencial para verificar se a solução atendia de forma eficiente às necessidades dos usuários. Os resultados apontaram aspectos que podem ser aprimorados, como a sugestão de utilizar o touchscreen para controlar o movimento tridimensional da máquina deslizando o dedo sobre o objeto 3D, em substituição aos botões, a necessidade de melhorar o reconhecimento do lockout em diferentes posições e a implementação de registros, a níveis gerenciais, de datas, horários e nome dos usuários que utilizaram o aplicativo em atividades de bloqueio de energias perigosas, estes foram os únicos pontos citados nesta questão pelos usuários.

Esses resultados sugerem que o aplicativo é capaz de fornecer orientações claras e úteis durante o procedimento. Além disso, as avaliações da pergunta 6 demonstram que a maioria dos usuários também vê o aplicativo como uma ferramenta útil para o procedimento de bloqueio definitivamente.

Segundo Venturelli (2019), a digitalização na área de manutenção industrial oferece soluções relevantes, como o gerenciamento de ativos em rede (*Cloud Computing*), a aplicação de realidade aumentada e o desenvolvimento de modelos preditivos baseados em *Machine Learning*, entre outras inovações. Neste caso existe a possibilidade de incorporar a função de registros de bloqueio conforma um dos usuários pontuou na questão 8.

Embora uma pequena parcela tenha respondido "talvez" à questão 6, que pode indicar uma necessidade de melhorias adicionais para tornar o aplicativo mais abrangente e adaptável a diferentes contextos de acordo com rotina, experiência e conhecimento prático de cada usuário.

A técnica de avaliação para esta etapa foi baseada na metodologia Delphi adaptada com a DSR. Segundo Dalkey e Helmer (1963), o método Delphi visa obter consenso confiável de opiniões de especialistas por meio de questionários estruturados, intercalados por feedbacks controlados. Tal metodologia configura-se como uma técnica sistemática e cientificamente válida para coletar percepções sobre um tema específico (DALKEY, 1969). A forma de adaptação foi implementando questões com respostas quantitativas e um critério de avaliação apoiado na metodologia DSR, que estabelece a aprovação mínima de 80% dos especialistas participantes.

Em geral, os resultados sugerem que o aplicativo tem potencial para ser uma ferramenta valiosa na promoção da segurança e eficiência nos procedimentos de bloqueios de energias perigosas, tendo médias de avaliação, demonstradas pelo gráfico 1, 9,5, 9,4 e 9,4 nos critérios de intuitividade, precisão e usabilidade respectivamente, registrando um valor mínimo de 94% de aceitação nesta avaliação.

5 CONCLUSÃO

O desenvolvimento do aplicativo SafetyGuide e sua implementação na Empresa X proporcionaram uma avaliação significativa do potencial de soluções tecnológicas no contexto de segurança durante atividades de manutenção, especialmente nos procedimentos de bloqueio de energias perigosas. Embora os resultados da avaliação sugiram benefícios tangíveis, como a melhoria da segurança e padronização nas atividades de bloqueio, é importante ressaltar que as evidências obtidas não garantem, de forma definitiva, a resolução completa dos desafios enfrentados. O aplicativo contribuiu para um processo mais eficiente, mas sua eficácia a longo prazo e a adaptação a diferentes contextos e ambientes ainda necessitam de uma investigação mais aprofundada.

A aplicação da metodologia DSR permitiu uma abordagem estruturada para o desenvolvimento da solução, dividindo claramente as etapas do processo e facilitando a consecução dos objetivos de pesquisa. No entanto, a implementação dessa metodologia não fornece garantias absolutas de que todos os problemas de segurança foram resolvidos, sendo necessária uma avaliação contínua e ajustes conforme o uso e as variáveis do ambiente de trabalho.

Embora o SafetyGuide tenha mostrado potencial de expandir suas aplicações para além do setor de manutenção, como exemplo para futuras implementações de tecnologias da Indústria 4.0, a pesquisa revelou que os resultados dependem de uma série de fatores contextuais e operacionais. A adoção de novas tecnologias deve ser acompanhada de uma análise crítica das necessidades específicas de cada setor e das implicações práticas de sua aplicação.

Este trabalho alcançou os objetivos propostos, demonstrando que a combinação de uma pesquisa bem estruturada com o desenvolvimento de soluções tecnológicas pode gerar impactos positivos em áreas específicas, como a segurança no ambiente de trabalho. Contudo, a solução apresentada não deve ser vista como uma resposta definitiva para todos os problemas, mas como um ponto de partida para novas pesquisas e desenvolvimentos.

Para futuros trabalhos, sugere-se explorar o potencial de tecnologias como realidade mista (uma combinação de realidade aumentada e realidade virtual), que pode proporcionar avanços significativos, especialmente em treinamentos para novos funcionários. Além disso, a utilização de visão computacional nas atividades de manutenção e montagem promete agregar valor significativo às operações industriais, trazendo novas vantagens em termos de precisão e eficiência.

REFERÊNCIAS

ABBASSI, Rouzbeh; ARZAGHI, Ehsan; YAZDI, Mohammad; ARYAI, Vahid; GARANIYA, Vikram; RAHNAMAYIEZEKAVAT, Payam. Risk-based and predictive maintenance planning of engineering infrastructure: Existing quantitative techniques and future directions. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 165, p. 776-790, 2022. ISSN 0957-5820. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.07.046>

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5462 - Confiabilidade e manutenibilidade. **ABNT**, Rio de Janeiro, Novembro 1994. 1-37.

AMRAL, F. V.; JULIANI, J. P.; BETTIO, R. W. D. Internet das coisas aplicada no ambiente das bibliotecas: Uma revisão sistemática da literatura internacional. **Perspectivas em Ciência da Informação**, Belo Horizonte, Dezembro 2020. 20-101.

BALDISSARELLI, L.; FABRO, E. Manutenção Preditiva na industria 4.0. **SCIENTIA CUM INDUSTRIA**, 23 Abril 2019. 12-22.

BENDER, I.; CECCONELLO, I. Aplicações da Realidade Aumentada na Manufatura: uma Revisão da Literatura. **SCIENTIA CUM INDUSTRIA**, V.8, N.2, Universidade de Caxias do Sul (UCS), Outubro 2020. 100-114.

BRASIL. MINISTÉRIO DO TRABALHO E PREVIDÊNCIA SOCIAL. NR 10 - Segurança em instalações e serviços em eletricidade. **trabalho.gov.br**, 2016. Disponível em: <<http://trabalho.gov.br/images/Documentos/SST/NR/NR-10-atualizada-2016.pdf>>. Acesso em: 17 nov. 2023.

BROCKE, J. V.; HEVNER, A.; MAEDCHE, A. Introduction to Design Science Research. In: BROCKE, J. V.; HEVNER, A.; MAEDCHE, A. **Design Science Research. Cases**. [S.l.]: Springer, Cham, 2020. Cap. 1, p. 1-13.

CAMPARA, E. *et al.* Realidade Aumentada Aplicada na Manutenção. **Revista Científica da Faculdade SENAI de Tecnologia Mecatrônica**, São Caetano do Sul, 19 out. 2021. 24-43.

CAUCHICK, P. P. **Metodologia Científica para Engenharia**. 1a edição ed. [s.l.] GEN LTC, 2019.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA (CNI). Mapa Estratégico da Indústria 2023 - 2032. **Revista Indústria Brasileira**, Brasília, Outubro 2023. 20-20.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. Desafios para a Indústria 4.0 no Brasil. **CNI**, Brasília, 2016.

DALKEY, N. C. The Delphi method. An experimental study of group opinion. **Santa Monica: Rand Corporation**, 1969.

DALKEY, N; HELMER, O. An experimental application of the Delphi method to the use of experts. **Management Science**, v.9, n. 3, p. 458-467, 1963.

DARGAN, S. *et al.* Augmented Reality: A Comprehensive Review. **Archives of Computational Methods in Engineering**, v. 30, n. 2, p. 1057–1080, 1 mar. 2023.

EGGER, Johannes; MASOOD, Tariq. Augmented reality in support of intelligent manufacturing – A systematic literature review. **Computers & Industrial Engineering**, v. 140, p. 106195, 2020. ISSN 0360-8352. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106195>

ISMAIL, A. S.; ABDULAZEEZ, F. A. **Leveraging Machine Learning Algorithms for Predictive Maintenance in Internet of Things (IoT) Systems**. 2023 12th International Conference on System Modeling & Advancement in Research Trends (SMART). **Anais...** Em: 2023 12TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON SYSTEM MODELING & ADVANCEMENT IN RESEARCH TRENDS (SMART). dez. 2023. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10428136>>. Acesso em: 1 jun. 2024

KHANNA, A.; KAUR, S. Internet of Things (IoT), Applications and Challenges: A Comprehensive Review. **Wireless Personal Communications**, v. 114, n. 2, p. 1687–1762, 1 set. 2020.

LIMA, N. C. D. S. *et al.* Análise e proposição de melhorias na área de manutenção: Um estudo de caso em uma fábrica de embalagens plásticas. **XXXVII Encontro Nacional de Engenharia de Produção (enegep)**, Joinville, 10 a 13 Outubro 2017. 1-17.

MEDYŃSKI, D. *et al.* Digital Standardization of Lean Manufacturing Tools According to Industry 4.0 Concept. **Applied Sciences**, v. 13, n. 10, p. 6259, jan. 2023.

MESQUITA, V. B.; MOREIRA, F. C. Indústria 4.0: Aplicação de Realidade Aumentada. **Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia - SEGeT**, Resende - RJ, 30 out. 2018.

MISHRA, B.; MISHRA, B.; KERTESZ, A. Stress-Testing MQTT *Brokers*: A Comparative Analysis of Performance Measurements. **Energies**, v. 14, n. 18, p. 5817, jan. 2021.

MQTT.ORG. MQTT: The Standard for IoT Messaging. **MQTT.org**, 2022. Disponível em: <<https://mqtt.org>>. Acesso em: 6 Maio 2024.

SHI, W.; CAO, J.; ZHANG, Q. Edge Computing: Vision and Challenges. **IEEE Internet of Things Journal Vol 3**, Detroit, Outubro 2016. 637-646.

SIGAHI, T. F. A. C.; ANDRADE, B. C. D. A Indústria 4.0 na perspectiva da engenharia de produção no Brasil: Levantamento e síntese de trabalhos publicados em congressos nacionais. **XXXVII Encontro Nacional de Engenharia de produção (enegep)**, Joinville, 10 a 13 Outubro 2017. 1-13.

SILVA, M. P. D. *et al.* Usos e Benefícios da Realidade Aumentada na Indústria 4.0. **Revista Brasileira de Mecatrônica - Faculdade SENAI SP**, São Paulo, 27 Junho 2022. 1-17.

STADLER, J. F.; LEAL, J. A. Sistema de Bloqueio e Etiquetagem em Equipamentos - LOCKOUT TAGOUT. **Revista TechnoEng. 21° Edição**, Ponta Grossa, PR, Jan-Julho 2020.

TORRES, A. B. B.; ROCHA, A. R.; SOUZA, J. N. D. Analise de Desempenho de Brokers MQTT em Sistema de Baixo Custo. **XXXVI Congresso da Sociedade Brasileira de Computação**, Universidade Federal do Ceara (UFC) – Fortaleza, Julho 2016. 1-13

VENTURELLI, M. **Manutenção 4.0: Impactos na Manutenção Industrial com a Indústria 4.0**. , 19 abr. 2022. Disponível em: <<https://www.automacaoindustrial.info/manutencao-4-0-impactos-na-manutencao-industrial-com-a-industria-4-0/>>. Acesso em: 6 Set. 2024.