

**Programa de Pós-Graduação em Instrumentação, Controle e
Automação de Processos de Mineração (PROFICAM)
Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP)
Associação Instituto Tecnológico Vale (ITV)**

Dissertação

**REALIDADE AUMENTADA APLICADA À REDUÇÃO DE RISCOS NA
SEGURANÇA DO TRABALHO EM SUBESTAÇÕES ELÉTRICAS**

Victor Menezes Rocha

**Ouro Preto
Minas Gerais, Brasil
2021**

Victor Menezes Rocha

**REALIDADE AUMENTADA APLICADA À REDUÇÃO DE RISCOS NA
SEGURANÇA DO TRABALHO EM SUBESTAÇÕES ELÉTRICAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração da Universidade Federal de Ouro Preto e do Instituto Tecnológico Vale, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Controle e Automação.

Orientador: Prof. Saul Emanuel Delabrida Silva,
D.Sc.

Ouro Preto

2021

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

R672r Rocha, Victor Menezes .
Realidade aumentada aplicada à redução de riscos na segurança do trabalho em subestações elétricas. [manuscrito] / Victor Menezes Rocha. Victor Menezes Rocha. - 2021.
71 f.: il.: color., tab..

Orientador: Prof. Dr. Saul Emanuel Delabrida Silva.
Dissertação (Mestrado Profissional). Universidade Federal de Ouro Preto. Programa de Mestrado Profissional em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração. Programa de Pós-Graduação em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração.
Área de Concentração: Engenharia de Controle e Automação de Processos Mineraiis.

1. Choque Elétrico. 2. Energia Incidente. 3. Riscos em Eletricidade. 4. Acidente - Prevenção. 5. Segurança do trabalho. I. Rocha, Victor Menezes. II. Silva, Saul Emanuel Delabrida. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 681.5:622.2

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



FOLHA DE APROVAÇÃO

Victor Menezes Rocha

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

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração (PROFICAM), Convênio Universidade Federal de Ouro Preto/Associação Instituto Tecnológico Vale - UFOP/ITV, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Controle e Automação na área de concentração em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração.

Aprovada em 10 de setembro de 2021

Membros da banca

Doutor - Saul Emanuel Delabrida Silva - Orientador - Universidade Federal de Ouro Preto
Doutor - Ricardo Augusto Rabelo Oliveira - Universidade Federal de Ouro Preto
Doutor - Rodrigo Geraldo Ribeiro - Universidade Federal de Ouro Preto
Doutor - Rone Ilídio da Silva - Universidade Federal de São João del-Rei

Saul Emanuel Delabrida Silva, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito no Repositório Institucional da UFOP em 07/12/2021



Documento assinado eletronicamente por **Saul Emanuel Delabrida Silva, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 06/01/2022, às 11:00, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0261320** e o código CRC **2883FC66**.

*Dedico todo esse esforço a minha
filha!*

Agradecimentos

Gostaria de agradecer aos amigos Thiago, Fabrício e João pela parceria ao longo das disciplinas do curso, fizemos acontecer para chegarmos nesse momento, vocês são diferenciados. Também gostaria de agradecer aos amigos do laboratório XR4GOOD, Rafael em destaque pelo pronto apoio nos momentos de dúvidas durante o desenvolvimento da aplicação. Também gostaria de agradecer aos amigos Álvaro, Kescijones e Nilvan pelo suporte nos levantamentos de campo e validações ao longo do amadurecimento da aplicação. Também gostaria de agradecer ao Daniel e Adriene por não deixar o processo de investimento corrente parar durante os períodos que tiver que me ausentar para dedicar as disciplinas do mestrado. A minha esposa Mayana, pela amizade, carinho e compreensão ao longo desses 2 anos dessa qualificação. A minha querida e amada irmã Stéphanie pela paciência de me escutar, orientar e ensinar dicas e boas práticas para a construção de um artigo científico. Tenho muita gratidão a vocês pela participação no meu desenvolvimento.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, Brasil (CAPES), Código de Financiamento 001; do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq); da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG); e da Vale SA.

*“A insatisfação é a principal
motivadora do progresso”
(Thomas Edison)*

Resumo

Resumo da Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

REALIDADE AUMENTADA APLICADA À REDUÇÃO DE RISCOS NA SEGURANÇA DO TRABALHO EM SUBESTAÇÕES ELÉTRICAS

Victor Menezes Rocha

Setembro, 2021

Orientador: Dr. Saul Emanuel Delabrida Silva

As atividades que envolvem energia elétrica estão inseridas entre as mais perigosas e mais danosas ao trabalhador que as desempenham. Assim, o objetivo geral desse 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. Para tanto, inicialmente, foi modelada uma subestação elétrica simplificada em 3D para experimentação em realidade virtual e, assim, avaliar a experiência do usuário quanto ao uso do protótipo e definir quais são os principais requisitos que podem ser utilizados para construção da aplicação final. A partir dos resultados obtidos, foi projetado em realidade virtual o arranjo físico e os equipamentos de uma subestação elétrica industrial do Terminal Marítimo de Ponta da Madeira (São Luís-MA). Em seguida, foi desenvolvido um protótipo de realidade aumentada usando o Unity 3D e o Vuforia para a plataforma Android. Este aplicativo permite ler tags instaladas nos equipamentos da subestação e faz a identificação dos EPIs recomendados, da distância segura para trabalho e exibe os principais parâmetros dos painéis elétricos (diagramas unifilares detalhados, corrente de curto circuito, tensão elétrica, entre outros).

Palavras-chave: Choque Elétrico, Arco Elétrico, Energia Incidente, Riscos em Eletricidade.

Macrotema: Logística; **Linha de Pesquisa:** Tecnologias da Informação, Comunicação e Automação Industrial; **Tema:** Saúde e Segurança; **Área Relacionada da Vale:** Porto.

Abstract

Abstract of of Qualifying Exam presented to the Graduate Program on Instrumentation, Control and Automation of Mining Process as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

AUGMENTED REALITY APPLIED TO REDUCING RISKS IN WORK SAFETY IN ELECTRIC SUBSTATIONS

Victor Menezes Rocha

September, 2021

Advisors: Dr. Saul Emanuel Delabrida Silva

Activities involving electricity are among the most dangerous and most harmful to the worker who performs them. Thus, the general objective of this work is to develop an application of mobile augmented reality technology as a means of access guidance and safety instructions with operators/maintainers of electrical substations. To do so, initially, a simplified 3D electrical substation was modeled for experimentation in virtual reality, thus evaluating the user experience regarding the use of the prototype and defining the main requirements that can be used to build the final application. From the results obtained, the physical arrangement and equipment of an industrial electrical substation at the Ponta da Madeira Maritime Terminal (São Luís-MA) was projected in virtual reality. Next, an augmented reality prototype was developed using Unity 3D and Vuforia for the Android platform. This application allows you to read tags installed in the substation equipment and identifies the recommended PPE, the safe distance to work and displays the main parameters of the electrical panels (detailed single-line diagrams, short circuit current, electrical voltage, among others).

Keywords: Electric Shock, Electric Arc, Incident Energy, Electricity Hazards.

Macrotheme: Logistics; **Research Line:** Information Technologies, Communication and Industrial Automation; **Theme:** Health and Safety; **Related Area of Vale:** Port.

Lista de Figuras

Figura 1-1: Representação de um sistema ciberfísico no contexto da Indústria 4.0.	13
Figura 1-2: Realidade Aumentada aplicada ao contexto de manutenção elétrica.	13
Figura 1-3: Representação de como acontece a visualização dos objetos e cenários na Realidade Virtual (Virtual Reality), Realidade Mista (Mixed Reality) e Realidade Aumentada (Augmented Reality).....	14
Figura 3-1: Requisitos da aplicação preliminar.	30
Figura 3-2: Etapas do experimento realizado.	31
Figura 3-3: (A) Visão geral da subestação modelada; (B) Reprodução Prática do Experimento em São Luís; (C) Óculos VR Box e <i>Bluetooth Remote Controller</i> utilizados para o experimento.....	32
Figura 3-4: (A) Tela inicial do aplicativo com as instruções a ser seguidas; (B) Mensagem inicial de boas-vindas, com as orientações do que deve ser realizado e pré-requisitos já estabelecidos.	33
Figura 3-5: (A) Vista dos painéis elétricos pelo usuário. (B) Visão frontal de um painel e tag com suas respectivas informações.	34
Figura 3-6: Imagem com a tag de aviso de entrada na área de risco e indicação do painel. Em destaque dentro do quadrado vermelho sem preenchimento encontra-se a contabilização dos erros cometidos pelo usuário no momento da aplicação dos testes.	35
Figura 3-7: Exemplo de equipamentos dentro de uma subestação elétrica do TPPM. Em destaque, conjuntos de manobra de 34,5 kV e 4,16 kV, respectivamente.	36
Figura 3-8: Layout dos Equipamentos e Subestações do TPPM. Em destaque a sala escolhida, a EP-313K-06.....	37
Figura 3-9: EP-313K-06.	38
Figura 3-10: Planta baixa da sala elétrica da EP-313K-06 em Autocad 2D.	39
Figura 3-11: Etiquetas de identificação de segurança.	39
Figura 3-12: Arquitetura do processo de montagem de cenas.....	40

Figura 3-13: Locação de TAGs na EP-313K-06.	42
Figura 3-14: Sobreposição das áreas definidas com “Limite de proteção contra arco elétrico” indicadas nos estudos de energia incidente da EP-313K-06 no Unity.....	43
Figura 3-15: Distribuição dos componentes para visualização do operador após a leitura de uma TAG.	43
Figura 3-16: Menu da aplicação.	45
Figura 3-17: Rotas de fuga da sala elétrica da EP-313K-06.	45
Figura 3-18: Menu dos diagramas unifilares.	46
Figura 4-1: Comparação de notas finais dos usuários (NASA TLX e média aritmética) em relação as demandas exigidas durante a execução do experimento sem e com o uso de realidade aumentada.	48
Figura 4-2: Posicionamento do usuário, realizando a leitura do TAG 01.	49
Figura 4-3: Resultados obtidos realizando a leitura do TAG 01.	50
Figura 4-4: Ponto de vista do usuário, realizando a leitura do TAG 02.	51
Figura 4-5: Resultados obtidos realizando a leitura do TAG 02.	51
Figura 4-6: Posicionamento do usuário, realizando a leitura do TAG 03.	52
Figura 4-7: Resultados obtidos realizando a leitura do TAG 03.	52
Figura 4-8: Posicionamento do usuário, realizando a leitura do TAG 04.	53
Figura 4-9: Resultados obtidos realizando a leitura do TAG 04.	54
Figura 4-10: Posicionamento do usuário, realizando a leitura dos TAGs 05.	55
Figura 4-11: Resultados obtidos realizando a leitura dos TAGs 05.	55
Figura 4-12: Posicionamento do usuário, realizando a leitura do TAG 06.	56
Figura 4-13: Resultados obtidos realizando a leitura do TAG 06.	57
Figura 4-14: Sobreposição dos objetos em RA ao ambiente real, após a leitura do TAG 06. .	57
Figura 4-15: Calibração da aplicação.	58
Figura 4-16: Requisitos da aplicação em realidade aumentada.	59

Lista de Tabelas

Tabela 4-1: Valores médios de corrente com os seus respectivos efeitos no corpo humano...19

Tabela 4-1: Notas das Etapas 1 e 2, segundo metodologia NASA TLX e Média Aritmética.

Legenda: NP – nota ponderada; MA – média aritmética; DP – desvio padrão.47

Sumário

1	INTRODUÇÃO.....	12
2	REFERENCIAL TEÓRICO E FUNDAMENTAÇÃO CIENTÍFICA.....	18
2.1	Riscos no Setor Elétrico.....	18
2.2	Normas Regulamentadoras.....	20
2.3	Medidas de Prevenção para Controle dos Riscos.....	22
2.4	Trabalhos Relacionados com Realidade Virtual.....	24
2.5	Trabalhos Relacionados com Realidade Aumentada.....	27
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	29
3.1	Estudo Preliminar – Aplicação em Realidade Virtual.....	29
3.2	Construção do Sistema em Realidade Aumentada.....	35
3.2.1	Definição do Estudo de Caso.....	35
3.2.2	Modelagem do Ambiente Virtual.....	40
3.2.3	Criação do Protótipo de Realidade Aumentada.....	41
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	47
4.1	Estudo Preliminar - Aplicação em Realidade Virtual.....	47
4.2	Aplicação em Realidade Aumentada.....	48
4.2.1	Calibração da Aplicação em Realidade Aumentada.....	58
4.2.2	Limitações da Aplicação em Realidade Aumentada.....	59
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	60
5.1	Conclusão.....	60
5.2	Trabalhos Futuros.....	61
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	62

1 Introdução

Uma subestação elétrica industrial é um arranjo físico de dispositivos e equipamentos que têm por finalidade a modificação das características da energia elétrica (tensão e corrente) a níveis adequados para sua utilização nas máquinas constituintes do processo produtivo e sua posterior distribuição até elas (MAMEDE FILHO, 2017). Durante a execução das atividades de manutenção e operação dessas subestações, o trabalhador fica exposto a diversos riscos, entre eles o de choque elétrico, ocasionado pelo contato acidental em partes energizadas, e o da energia incidente resultante de um arco elétrico (QUEIROZ; SENGER, 2012).

Com o intuito de mitigar os riscos associados às atividades que envolvem a eletricidade, ao longo dos anos houve uma constante evolução dos procedimentos de segurança e processos industriais. Atualmente, a gestão de segurança ocupacional aplicada em subestações elétricas está principalmente embasada na Norma Regulamentadora (NR) 10, criada pela Portaria 3.214/78 do Ministério do Trabalho e Emprego e atualizada pela última vez em 2019. Esta norma visa a segurança em instalações e serviços em eletricidade e dispõem sobre medidas de controle individual e coletiva, segurança em instalações elétricas energizadas, trabalhos envolvendo alta tensão e situações de emergência (BRASIL, 2019).

Por sua vez, os processos industriais estão cada vez mais automatizados. Com o advento da quarta Revolução Industrial, uma nova forma de produção mais tecnológica vem sendo alcançada com o intuito de aumentar a produtividade, reduzir custos e ajudar no controle e tomada de decisões rápidas, eficientes e bem qualificadas (RÜßMANN *et al.*, 2015; HOTMANN; RÜSCH, 2017). Por exemplo, o uso de softwares tipo SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*) para monitoramento das condições de cada equipamento e status dos sistemas passou a ser mais utilizado nas indústrias, ajudando na predição de falhas e consequente estagnação da produção (ANTONIJEVIĆ; SUČIĆ; KESERICA, 2016; MNUKWA; SAHA, 2020).

Porém, apesar da Indústria 4.0 representar sistemas cada vez mais independentes, o seu conceito não vai de encontro a uma realidade sem mão de obra humana. Na verdade, o que se busca é uma automação industrial a partir da perfeita relação entre o trabalhador e os sistemas ciberfísicos (CPS – *Cyber Physical System*), sistemas embarcados conectados em rede, capazes de administrar processos físicos e, através de feedbacks, adequarem-se a novas condições em tempo real (LEE; BAGHERI; KAO, 2015). Dessa forma, o ser humano passa a assumir um o

papel de entidade de nível superior de controle, redirecionando os seus esforços para situações que necessitam linhas de raciocínio mais elevadas e de tomadas de decisão mais assertivas. Ou em outras palavras, a função dessas novas tecnologias é realizar o que o ser humano idealizou e transmitir as informações solicitadas de forma rápida e eficiente (OZTEMEL; GURSEV, 2018; Figura 1-1).



Figura 1-1: Representação de um sistema ciberfísico no contexto da Indústria 4.0.
Fonte: <http://www.directaautomacao.com.br/noticias/sistemas-ciber-fisicos-na-industria>.

Outro ponto, é a necessidade de operários de manutenção para que as máquinas continuem em perfeito funcionamento. Neste cenário, a realidade aumentada (RA) entra como outra tecnologia dessa revolução, facilitando esses trabalhos a partir do fornecimento de informações mais detalhadas dos equipamentos e procedimentos a serem executados (BRÜMEL, 2013; MACHADO; WINROTH; SILVA, 2020). Essa tecnologia é capaz de sobrepor informações e objetos virtuais ao ambiente real no qual o usuário se encontra. Assim, dados, vídeos, imagens, fotos, animações, textos e outros objetos gerados por computador podem ser manipulados e aparecem integrados ao ambiente por meio de um dispositivo, como smartphone, tablet ou óculos especiais (Figura 1-2).



Figura 1-2: Realidade Aumentada aplicada ao contexto de manutenção elétrica.
Fontes: <https://www.mtitecnologia.com.br> e <https://se.com>, respectivamente.

Quando associada com a realidade virtual (tecnologia de interface avançada para aplicações computacionais, que permite ao usuário navegar e interagir, em tempo real, com um ambiente tridimensional virtual), a RA também têm se mostrado eficaz para realização de treinamentos virtuais mais seguros aos trabalhadores (HERNÁNDEZ; PÉREZ-RAMÍREZ, 2016; PENG *et al.*, 2018; Figura 3). O grande benefício oferecido pela RV é a possibilidade de uso do conhecimento intuitivo do usuário a respeito do mundo físico poder ser utilizado por ele para manipular o ambiente virtual gerando, com isso, experiências mais próximas da realidade podem ser obtidas (WEXELBLAT, 1993; LIN *et al.*, 2002).



Figura 1-3: Representação de como acontece a visualização dos objetos e cenários na Realidade Virtual (Virtual Reality), Realidade Mista (Mixed Reality) e Realidade Aumentada (Augmented Reality).

Fonte: adaptado de <https://www.actimage.com>.

O uso dessas duas últimas tecnologias tem sido documentado na literatura em ações de simulação, treinamento e escolha de soluções mais acertadas em casos que envolvem subestações de energia elétrica (TORRES-FILHO; VIEIRA; SOARES, 2013; ANTONIJEVIĆ; SUČIĆ; KESERICA, 2016). Porém, a maioria dos trabalhos têm como objeto de estudo subestações a céu aberto pertencentes às concessionárias de energia (HERNÁNDEZ; PÉREZ-RAMÍREZ, 2016; PENG *et al.*, 2018). Assim, diante do exposto, o presente trabalho tem por finalidade desenvolver um aplicativo de RA, a partir de técnicas de RV e RA, que possa contribuir na redução de riscos e acidentes em ambientes de subestações elétricas industriais abrigadas em locais fechados.

Normas de segurança técnica relacionadas a riscos elétricos têm sido criadas para que os processos que envolvem a eletricidade se mantenham dentro de padrões seguros. Mesmo assim, tais ações não conseguem evitar que acidentes fatais ou de graves consequências ocorram

por todo o mundo, seja pelo desconhecimento básico ou falta de informação, seja pela omissão ou não compromisso de diversos atores (governo, indústria, sindicatos, trabalhadores). Considerando o ambiente de trabalho, as atividades que envolvem energia elétrica estão entre as mais perigosas e mais danosas ao trabalhador. Muitas vezes, as consequências destes acidentes são irreparáveis, tanto do ponto de vista pessoal como material. Apenas no Brasil, no período de 2013 a 2019, foram registrados 122 acidentes fatais por choque elétrico no setor industrial e 29 em subestações elétricas (ABRACOPEL, 2020).

No Terminal Marítimo de Ponta da Madeira, 12 acidentes envolvendo serviços com eletricidade foram averbados entre 2010 a 2017 (ARRUDA *et al.*, 2017). As subestações de energia localizadas nesse terminal são operadas e mantidas em frequência elevada para garantir a confiabilidade do sistema elétrico. Dessa forma, durante a execução das atividades de operação e manutenção, o trabalhador fica exposto a uma série de riscos, em especial o de choque elétrico e o das consequências da formação do arco elétrico (*e.g.* energia incidental e ondas de pressão). Além disso, um outro agravante é que, apesar das boas práticas de saúde e segurança exigirem como primeira e melhor opção que intervenções em instalações elétricas sejam realizadas com elas desenergizadas, nem sempre isso é possível. Assim, surge a necessidade da adoção de medidas mais eficazes na tentativa de atenuar os riscos existentes durante essas atividades, preservando a integridade física das pessoas e das instalações.

Uma alternativa é a adoção de tecnologias baseadas em realidade aumentada e virtual, uma vez que estas podem ser aplicadas as atividades de operação e manutenção, dando mais segurança aos trabalhadores na execução das suas funções, além de permitir o aumento de produtividade das equipes. Entre os seus mais diversos benefícios, pode-se citar: tempo de parada reduzido diante dos equipamentos, pois oferece acesso imediato às informações relevantes em campo; manutenção e reparos de equipamentos mais rápidos, eliminando a busca manual de informações técnicas e de operação; redução de erro humano, pois é possível localizar o equipamento certo e guiar os eletricitistas, passo a passo, para concluir os procedimentos de manutenção; entre outros. Assim, o uso de um aplicativo com tecnologias de realidade virtual e aumentada pelas equipes de manutenção do TPM pode auxiliar no controle e prevenção dos os riscos que essas atividades impõem aos trabalhadores, bem como servir de modelo para sua implantação em outras subestações elétricas.

O objetivo geral desse 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.

Para atingir o objetivo principal, são indicados os seguintes objetivos específicos:

- Realizar um estudo preliminar através da modelagem de uma subestação elétrica simplificada em 3D para experimentação em realidade virtual, tendo como objetivo a aplicação de testes com os operadores e mantenedores dos equipamentos. Assim, será possível avaliar a experiência do usuário quanto ao uso do protótipo e definir quais são os principais requisitos que podem ser utilizados para construção da aplicação final;
- Modelar em Realidade Virtual os equipamentos de uma subestação elétrica industrial do Terminal Marítimo de Ponta da Madeira e projetar o seu arranjo físico;
- Elaborar um protótipo de Realidade Aumentada capaz de ler tags instaladas nos equipamentos da subestação e fazer a identificação dos EPIs recomendados, da distância segura para trabalho e dos parâmetros dos painéis elétricos (diagramas unifilares detalhados, corrente de curto circuito, tensão elétrica, entre outros).

O escopo desse trabalho se restringe a uma avaliação qualitativa sobre a perspectiva do pesquisador uma vez que limitações foram encontradas durante o desenvolvimento.

Este trabalho teve como resultado as seguintes contribuições:

- A primeira aplicação em realidade virtual aqui considerada como estudos preliminares, descritas na seção 3.1;
- Uma segunda aplicação, está em realidade aumenta considerada como estudo de caso, descrita na seção 3.2.

Resultado parciais desse trabalho foram publicados no artigo intitulado “*Augmented Reality Applied to Reducing Risks in Work Safety in Electric Substations*” foi apresentado no congresso **ICEIS 2021**, evento organizado pelo **INSTICC** e nele foram apresentados os resultados dos estudos preliminares descritos na seção 4.1.

O presente trabalho foi estruturado em mais quatro capítulos. O Capítulo 2 faz uma breve revisão bibliográfica sobre a tecnologia de realidade virtual (RV), realidade aumenta (RA), apresenta as principais normas do setor elétrico, além de apresentar os trabalhos relacionados a RV e RA aplicados ao tema. O Capítulo 3 apresenta de maneira sucinta os

materiais e métodos utilizado no processo de desenvolvimento das aplicações em RV e RA. O Capítulo 4 discorre sobre os resultados obtidos com as aplicações desenvolvidas. O Capítulo 5 traz a conclusão do trabalho e sugere pontos de melhorias para trabalhos futuros.

2 Referencial Teórico e Fundamentação Científica

Este capítulo tratará, inicialmente, dos fundamentos necessários para o desenvolvimento do trabalho, como os riscos no setor elétrico, principalmente em relação ao choque e arco elétrico; as principais normas regulamentadoras sobre os trabalhos com eletricidade que são utilizadas no Brasil; e as medidas de prevenção para controle efetivo dos riscos elétricos, tendo como base as diretrizes estabelecidas nas normas em vigor. Em seguida, uma discussão sobre a realidade virtual e a realidade aumentada será apresentada em dois tópicos separadamente, sempre tentando definir de forma sintética e clara os seus respectivos conceitos, mostrar as suas diversas aplicações e trazer os trabalhos que fazem uso dessas tecnologias no contexto das subestações de energia elétrica.

2.1 Riscos no Setor Elétrico

Por ser essencialmente invisível, a eletricidade é muitas vezes conhecida como um “assassino silencioso” (CADICK *et al.*, 2012). Atividades a ela relacionadas, apresentam riscos à saúde e segurança das pessoas, podendo ocasionar desde leve formigamento a óbito imediato. No Brasil, de acordo com a Associação Brasileira de Conscientização para os Perigos da Eletricidade (Abracopel), foram registrados 7.040 acidentes nos últimos 5 anos (2015-2019). Suas principais causas são o choque elétrico (60% ou 4196 casos), os incêndios por curto-circuito (39% ou 2764 casos) e as descargas atmosféricas (8% ou 557 casos). Porém, apesar do maior percentual envolver acidentes domésticos e de pessoas não diretamente relacionadas ao setor elétrico, 380 acidentes fatais foram de técnicos ou eletricitas profissionais (ABRACOPEL, 2020).

Dessa forma, o risco elétrico é definido como a probabilidade de ocorrer danos à saúde e à integridade física das pessoas próximas a um sistema elétrico por fenômenos inerentes a ele (SENAI, 2005; VIEIRA, 2005). Na indústria, diversos riscos elétricos podem ser identificados, mas os principais são o choque elétrico, o arco elétrico e o eletromagnetismo, sendo os dois primeiros mais danosos aos trabalhadores (LOURENÇO; SILVA; SILVA-FILHO, 2007; QUEIROZ; SENGER, 2012).

O choque elétrico é o efeito patofisiológico resultante da passagem direta ou indireta da corrente elétrica externa através do corpo de uma pessoa (KILDERMANN, 1995; FOLLIO

1998). A depender do tempo de exposição, da resistência física da vítima e da intensidade e percurso da corrente elétrica circulante, os danos fisiológicos causados pelo choque podem ter complicações mais graves para o indivíduo (CADICK *et al.*, 2012). Nesses quadros, há a possibilidade de queimaduras internas, fibrilação ventricular, parada cardiorrespiratória ou, até mesmo, a morte (CAMINHA, 1977; GUYTON; HALL, 2002).

Por exemplo, quando acontece a tetanização do operador (contração muscular tônica contínua, responsável por não permitir que o indivíduo consiga largar a fonte da corrente), a morte por asfixia poderá dar-se caso a corrente elétrica tenha intensidade superior a 30mA e não seja interrompida dentro de poucos minutos (BRASIL, 2019). De forma representativa, os valores médios de corrente com os seus respectivos efeitos no corpo humano estão copilados na tabela a seguir (Tabela 2-1):

Tabela 2-1: Valores médios de corrente com os seus respectivos efeitos no corpo humano.

Faixa de corrente	Reações fisiológicas
0,1 a 0,5Ma	Leve percepção/formigamento
0,5 a 10mA	Dor, contração muscular
10 a 30 mA	Nem dano grave se houver interrupção em até 200miliseundo
30 a 500Ma	Paralisia torácica ocasionando falta de ar, tontura, fibrilação ventricular acima de 200milisegundo
Acima de 500mA	Trauma cardíaco, podendo haver um efeito letal

Fonte: Senai RS, Coleção NR10 EAD, 1 p.35.

Já o arco elétrico ou arco voltaico, é a passagem de corrente elétrica por um meio não condutivo, como o ar ou o óleo, a altas velocidades (aproximadamente 100 m/s). Em geral, ele ocorre devido a ruptura dielétrica desse meio, causada pela diferença de potencial existente entre os dois materiais e a proximidade entre eles (MAMEDE FILHO, 2005; QUEIROZ; SENGER, 2012; SOUZA; MICHALOSK, 2017). Os três principais problemas que aumentam o perigo do arco elétrico e são igualmente capazes de levar uma pessoa a morte são:

- a) Temperatura do arco - capaz de atingir altas temperaturas e causar queimaduras incuráveis;

- b) Energia incidente - quantidade de energia térmica (fogo repentino) impressa em determinada superfície e liberada durante a formação de um arco elétrico (BRASIL, 2016). Pode levar à ignição das vestimentas de um trabalhador, aumentando ainda mais o risco de queimaduras;
- c) Onda de pressão - desenvolvida através da expansão explosiva do ar e dos metais existentes no trajeto do arco. É capaz de romper tímpanos, esmagar os pulmões, provocar traumatismo cranianos, entre outras coisas.

Assim, o arco elétrico é um perigo evidente tanto para as empresas quanto para os trabalhadores. Nas empresas, esse fenômeno pode causar a destruição total dos painéis elétricos e decorrente perda de produção, uma vez que suas altas temperaturas e os metais fundidos e vaporizados podem atingir rapidamente outros equipamentos e circuitos elétricos (FLOYD *et al.*, 2005). Porém, os riscos são ainda maiores para os trabalhadores. Pessoas diretamente expostas a um evento de arco elétrico estão sujeitas a queimaduras de terceiro grau, possível cegueira, choque, efeitos de explosão, perda auditiva e morte instantânea. Para se ter uma ideia da dimensão do risco de formação de um arco elétrico, Cadick *et al.* (2000) destacam que queimaduras fatais podem ocorrer mesmo em distâncias superiores a 2,5m, pois determinados pontos do arco chegam a atingir temperaturas em torno em 20.000 °C, o que equivale a quatro vezes a temperatura de superfície do sol (LEE, 1982; QUEIROZ; SENGER, 2012).

2.2 Normas Regulamentadoras

No Brasil, o marco inicial da energia elétrica deu-se em 1879 com a instalação da primeira iluminação elétrica na estação central da ferrovia Dom Pedro II (Central do Brasil), localizada na cidade do Rio de Janeiro. Porém, durante quase um século, os critérios e procedimentos de segurança para garantir a integridade física das pessoas que lidavam com a eletricidade permaneceram quase imutáveis, com inúmeros acidentes sendo registrados (MARCOLIN, 2005).

Esse paradigma só começou a ser quebrado em 1978, quando o Ministério do Trabalho e Emprego (MTE) editou a portaria nº 3.214 de 08/06/1978. Nela, a Norma Regulamentadora nº10 (NR-10) foi criada e versava principalmente sobre a mitigação dos riscos de choque elétrico para a segurança de instalações e serviços em eletricidade (BRASIL, 2019). Com a

necessidade de atender os avanços tecnológicos e dos métodos de trabalho, em 2004, a norma passou por sua última grande revisão e novas exigências para a implementação de medidas de controle e sistemas preventivos foram introduzidas (BRASIL, 2019). Desta forma, ficaram estabelecidos os procedimentos a serem adotados desde as etapas de projeto, execução, operação e reformas de serviços em eletricidade; bem como na geração, transmissão, distribuição e recebimento de energia elétrica. Outra novidade, foi a obrigatoriedade no cumprimento desses requisitos, mesmo quando a NR-10 se torna insuficiente. Para tanto, deverão ser adotadas outras normas regulamentadoras e técnicas brasileiras e, na ausência destas, normas internacionais.

As chamadas normas técnicas (ABNT NBR) são produzidas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), entidade privada e sem fins lucrativos. A ABNT é o órgão responsável pela normatização técnica no Brasil, fornecendo insumos que visam permitir a produção, a comercialização e o uso de bens e serviços de forma competitiva e sustentável (ABNT, 2020). Entre as diversas normas que englobam o setor elétrico, destacam-se:

- ABNT NBR 5410:2004 – que trata de instalações elétricas consideradas de baixa tensão (menos de 1.000 volts em tensão alternada);
- ABNT NBR 14039:2005 – que trata de instalações elétricas de média tensão (entre 1.000 volts e 34,6 mil volts em tensão alternada);
- ABNT NBR IEC 60270:2017 – que trata de instalações elétricas de alta tensão (tensão alternada até 400 Hz);
- ABNT NBR IEC 61482 – conjunto de três normas que tratam sobre as vestimentas de proteção contra riscos térmicos de um arco elétrico.

Por fim, as normas internacionais, em especial a IEEE 1584 e NFPA 70E, foram e são aplicadas no Brasil principalmente como referência para as tomadas de decisão que envolvem o arco elétrico, ponto em que a NR-10 é deficitária. Por exemplo, quando define distância segura e zona livre, a norma leva em consideração somente os riscos associados ao choque elétrico, gerando certa confusão de conceitos. Além disso, em toda a NR-10, existe uma indefinição técnica do que é o arco elétrico, sendo sempre citado de forma indireta e/ou superficial, como no trecho que discorre sobre os fatores que devem ser levados em consideração na fabricação das vestimentas para os trabalhadores: “As vestimentas de trabalho devem ser adequadas às atividades, devendo contemplar a condutibilidade, *inflamabilidade* e

influências eletromagnéticas” (BRASIL, 2019). Somente em 2016, a primeira norma brasileira tratando especificamente de arcos elétricos foi estabelecida pela ABNT. Porém, dividida em três partes, esta norma visa basicamente a determinação das vestes de proteção utilizadas em trabalhos com risco de arco elétrico. Assim, as normas americanas IEEE 1584 (*IEEE Guide for performing arc-flash hazard calculations*) e NFPA 70E (*Standard for Electrical Safety in the Workplace*) continuam sendo uma importante referência na aplicação de soluções de engenharia para mitigação dos riscos envolvendo eletricidade no país.

Apesar da não observação da norma brasileira ao arco elétrico, esse trabalho faz suas contribuições correlacionando e seguindo as principais orientações da IEEE 1584 e da NFPA 70E.

2.3 Medidas de Prevenção para Controle dos Riscos

Como visto, a NR-10 é a principal norma regulamentadora brasileira no quesito eletricidade. Ela estabelece quais as medidas de prevenção funcionários e empresas devem adotar para controlar os riscos durante as intervenções em instalações elétricas. Empresas que operam com carga instalada superior a 75 kW, como a Vale S/A, são obrigadas a adotar as seguintes medidas: constituir e manter o Prontuário de Instalações Elétricas contendo, além de outros requisitos, os diagramas unifilares atualizados das suas instalações elétricas e as especificações do sistema de aterramento e demais equipamentos e dispositivos de proteção; aplicar medidas de proteção coletiva; e estabelecer e cumprir as medidas de proteção individual.

As “Medidas de Proteção Coletiva” incluem, prioritariamente, o procedimento de desenergização elétrica dos equipamentos e o aterramento das instalações conforme regulamentação estabelecida pelos órgãos competentes (BRASIL, 2019). Nas indústrias, as principais atividades relacionadas a energia ocorrem dentro de salas elétricas ou subestações. Essas salas, são instalações elétricas de baixa ou alta tensão, contendo equipamentos para distribuição e consumo de energia elétrica, além de equipamentos de proteção e controle (*e.g.* painéis de conjuntos de manobra, centros de comando de motores, quadros de distribuição, transformadores, entre outros).

Assim, para que os serviços de manutenção sejam executados dentro dessas salas, e com o intuito de evitar a reenergização inesperada dos equipamentos, o primeiro passo a ser adotado

é a manobra de bloqueio dos sistemas elétricos, conforme preconiza a NR-10 (BRASIL, 2019). Para tanto, a norma estabelece que:

“Somente serão consideradas desenergizadas as instalações elétricas liberadas para trabalho, mediante os procedimentos apropriados, obedecida a sequência abaixo:

- a) Seccionamento;
- b) Impedimento de reenergização;
- c) Constatação de ausência de tensão;
- d) Instalação de aterramento temporário com equipotencialização dos condutores dos circuitos;
- e) Proteção dos elementos energizados existentes na zona controlada;
- f) Instalação da sinalização de impedimento de energização.”

(BRASIL, 2019, item 10.5.1).

Por sua vez, as “Medidas de Proteção Individual” é a última hierarquia de controle de riscos que a NR-10 propõem. É vedado o uso de adornos pessoais e as vestimentas do trabalhador devem ser adequadas às atividades que irão realizar. Por fim, os Equipamentos de Proteção Individual (EPIs) serão aplicados quando as demais medidas de proteção coletiva forem inviáveis ou não puderem ser adotadas em sua totalidade (BRASIL, 2019).

A NR-6 é a norma brasileira responsável por especificar os tipos de dispositivos ou produtos adequados para cada tipo de situação de risco (BRASIL, 2018). Em geral, para os trabalhos em subestações de energia elétrica, os equipamentos de segurança mais recomendados são capacete com isolamento para eletricidade; calçado contra choques elétricos e agentes abrasivos e escoriantes; óculos de segurança incolor com proteção contra raios ultravioletas; luvas de borracha isolante; e vestimentas adequadas contra arco elétrico (COPEL, 2008). Porém, apesar da NR-6 abranger o uso de equipamentos de proteção individual contra choques elétricos e agentes térmicos, não é clara quanto a necessidade de proteção contra os arcos elétricos. Em termos de vestimenta, a ABNT NBR IEC 6148 supre essa necessidade, no entanto a norma americana NFPA70E continua a ser aplicada para definir quais outros EPIs devem ser utilizados e as especificações técnicas que eles devem cumprir, a fim de atender os requisitos mínimos que situações de risco com arco elétrico podem representar para a segurança dos trabalhadores (ABNT, 2016, 2017a, 2017b; NFPA, 2018).

2.4 Trabalhos Relacionados com Realidade Virtual

Um ambiente virtual é a representação através de computação gráfica de diversos elementos do mundo real ou abstrato, tais como dimensão de um ambiente, iluminação, tamanho, forma e textura de um objeto, entre outros (FERREIRA, 1999). Por sua vez, a Realidade Virtual (RV) pode ser definida como a técnica computacional usada para criar esses ambientes artificiais de forma realística, permitindo que seus usuários interajam com ele em tempo real (KIRNER; SISCOUTO, 2007; LAVIOLA JÚNIOR *et al.*, 2017). De fato, através dessa interface homem-máquina, o usuário além de poder ser sentir imerso em um ambiente tridimensional, também se vê habilitado a navegar, interagir e modificar seus componentes de forma natural e intuitiva (WEXELBLAT, 1993; LIN *et al.*, 2002; CARDOSO *et al.*, 2007; WIEDERHOLD; BOUCHARD, 2014).

Rodrigues e Porto (2013), ao aprofundarem o entendimento dos conceitos em RV, propõem a sua caracterização pela integração de três ideias básicas: imersão, interação e envolvimento. Na primeira (imersão), o usuário experimenta de forma completa as sensações do cenário criado ao isolar-se do mundo externo, manipulando e explorando os objetos com maior naturalidade. Em seguida, os autores sugerem a interação como sendo a capacidade do computador, através de dados de entrada e saída, de detectar os movimentos do usuário e modificar em tempo real os objetos, os sons e os ambientes associados à cena. Por fim, o envolvimento é relacionado ao grau de estimulação do usuário e ao seu comprometimento com determinada atividade, podendo ser ativo como, por exemplo, ao participar de um jogo, ou passivo (*e.g.* ler um livro).

Assim, como forma de enriquecer ainda mais a experiência do usuário, pode se fazer uso de dispositivos multissensoriais capazes de estimular não somente a visão, mas os outros sentidos humanos, como o tato e a audição (GRILO *et al.*, 2001; BURDEA; COIFFET, 2003; KIRNER; SISCOUTO, 2007). Desta forma, a depender do nível de imersão obtidos, um sistema de RV pode ser classificado como imersivo, semi-imersivo ou não imersivo. Nos sistemas imersivo e semi-imersivo, o que se busca é substituir as informações reais obtidas pelos sentidos do usuário por sinais artificiais. Os utilitários mais empregados para isso são capacetes e luvas de RV (*Head Mounted Displays* e *Data gloves*, respectivamente), monitores BOOM (*Binocular omni-orientation monitor*) ou, até mesmo, salas CAVEs (*Cave Automated Virtual Environment* – CARDOSO *et al.*, 2007; ARRUDA *et al.*, 2008). Já na RV não imersiva, a noção

tridimensional das imagens é emulada pelo uso de perspectiva, proporção e posição relativa dos objetos no cenário através de dispositivos mais convencionais, como teclado, mouse e monitor de computador (GRILO *et al.*, 2001).

Diante dos seus benefícios, a RV vem sendo utilizada nas mais diversas áreas do conhecimento. Na medicina, por exemplo, seu uso vai desde o auxílio em processos de reabilitação de pacientes, a simulação de situações complexas, como ensaios cirúrgicos, coleta de medula óssea, entre outros procedimentos, para a fixação do protocolo que deverá ser adotado a partir de um ambiente controlado (BRUNNER *et al.*, 2016; FARIA *et al.*, 2016; SOUZA-JUNIOR *et al.*, 2020). No treinamento militar, por sua vez, a RV pode gerar uma infinidade de simulações de conflito, que possibilitam a exploração dos limites do operador e a correção dos erros cometidos a fim de que não haja comprometimento da missão a ser deflagrada (BRASIL, 2014; CUPERSCHMID; AMORIM; MATOS, 2015). Ainda, em termos de entretenimento, Machado *et al.* (2011) destaca um forte crescimento da indústria de jogos eletrônicos, o que torna sua produção em RV uma atividade promissora.

Na Engenharia, ambientes virtuais voltados à capacitação de colaboradores da construção civil podem auxiliar na redução de lesões e acidentes, pois ajudam o usuário a aprender sobre os riscos inerentes ao trabalho e os procedimentos de segurança que devem ser adotados em situações de risco (GREUTER *et al.*, 2012). De forma semelhante, a RV pode ser utilizada em simulações de subestações de energia elétrica para o treinamento de professores e alunos de graduação, operadores em campo e outros profissionais de suporte e manutenção. Como seus usuários não são expostos aos equipamentos reais durante a simulação, esses cenários podem representar uma diminuição no risco de acidentes inerentes ao processo de aprendizagem e tomada de decisão (LORENSEN; CLINE, 1987; BARCELOS *et al.*, 2013; BARATA; RIBEIRO FILHO; NUNES, 2015). Essa tecnologia também vem sendo considerada uma poderosa ferramenta como interfaces de visualização para simuladores de sistemas de energia e operações de monitoramento e controle de sistemas críticos (OKAPUU-VON VEH *et al.*, 1996; BARCELOS *et al.*, 2013; BARATA; RIBEIRO FILHO; NUNES, 2015). Com ela, as diferenças entre os modelos de operação virtual e o real são mínimas, propiciando aos usuários uma experiência única de interação e maior facilidade de comunicação da equipe (CARDOSO; LAMOUNIER; LIMA, 2018). Além disso, pode representar uma economia de tempo e de gastos para a empresa, uma vez que o operador não precisa necessariamente se deslocar para dentro da subestação, obtendo os dados necessários dos equipamentos a partir da

sua cópia virtual identificada e associada às informações contidas nos sistemas de supervisão e aquisição de dados da empresa (SCADA; BARATA; RIBEIRO FILHO; NUNES, 2015; MATTIOLI, 2015; BARCELOS *et al.*, 2016).

Outros estudos também abordaram o uso da RV em subestações elétricas de energia (*e.g.* GUANGWEI; GUAN, 2009; YAN; ZHANG; WANG, 2010; VASCONCELLOS; HERNANDES, 2015). Vasconcellos e Hernandez (2015), por exemplo, descreveram as soluções adotadas no desenvolvimento de um pacote na ferramenta BIM (*Building Information Modeling*) para projetos e construções de grandes subestações. Uma biblioteca de modelos 3D em escala paramétrica foi desenvolvida e dados elencados para criação de uma data base. Na BIM, os autores inseriram a interoperabilidade e interface IFC para troca de dados e efetivaram o cálculo e análise do sistema de proteção. Com isso, diversos benefícios foram alcançados, como o gerenciamento de todo o ciclo de vida do processo, a indicação de apontadores críticos de execução e de valores de custos na fase inicial de planejamento, a apresentação de dados de anomalias, a listagem de matérias automatizadas e a extração automática de desenhos 2D associados a modelagem 3D.

Ainda, Guangwei e Guan (2009), utilizando uma abordagem de desenvolvimento de grafos de cena para organização e gerenciamento dos modelos na realização do *Level of Detail* (LOD), apresentam um projeto de sistema de RV que possibilita aos operadores terem uma visão completa do processo que envolve simulação, treinamento e controle do ambiente virtual de uma subestação. Torres Filho *et al.* (2013), por sua vez, propuseram um processo de desenvolvimento de cenários em ambientes virtuais tridimensionais para o sistema SimuLIHM. A grande vantagem dessa metodologia seria a padronização de uma sistemática para a modelagem dos cenários e a redução de esforços a partir do reuso de modelos para simulações de diferentes tipos de treinamento. Por fim, Silva *et al.* (2013), fizeram adequações na *engine* de jogos Unity3D para a elaboração de uma aplicação que permitisse melhor monitoramento e controle das subestações. Neste trabalho, o Unity3D apresentou uma boa quantidade de recursos e um desempenho satisfatório em relação ao suporte a cenas com grandes quantidades de polígonos; ao recurso LOD; à flexibilidade para escolha de linguagens de programação (C#, JavaScript e Boo); à criação e utilização de pacotes com funcionalidades suficientemente genéricas que propiciam o reaproveitamento de funções; e à possibilidade de criação de componentes para automatização do editor de cenas.

2.5 Trabalhos Relacionados com Realidade Aumentada

Se de um lado a realidade virtual (RV) utiliza objetos e ambientes virtuais, por outro, a realidade aumentada (RA) possibilita a visualização de forma integrada de um elemento virtual no mundo real em que o usuário se encontra; um verdadeiro “mundo aumentado” (AZUMA, 1997; MULLEN, 2011). De forma simplista, Drascic e Milgram (1996) definem a RA como sendo uma tecnologia capaz de gerar um ambiente real com melhoramentos gráficos. Em outras palavras, a RA traz consigo um novo conceito de visualização de informações e imagens geradas por computador, pois complementa os ambientes reais ao invés de substituí-los como nas aplicações de RV; onde, em geral, o usuário é imerso em uma realidade completamente sintética e fica incapaz de ver e sentir o mundo real ao seu redor. Diversas tecnologias de RA estão disponíveis no mercado e vão desde uma simples uma câmera de smartphone, a opções mais caras, como os óculos de RA, os quais possuem visores semitransparentes, acoplados a uma câmera 3D para a projeção da imagem virtual.

Azuma (2017) reforça que a RA é uma experiência imersiva por ser capaz de gerar uma sensação de conexão entre os usuários, as pessoas e os objetos ao seu redor, em vez de cortá-los do ambiente externo. Na última década, diversos setores foram beneficiados com o desenvolvimento de suas aplicações, tais como o educacional, o turístico, o médico, o de design, o geoespacial, entre outros (CARMIGNIANI *et al.*, 2011; NEE *et al.*, 2012; ENGELKE *et al.*, 2013; MEKNI; LEMIEUX, 2014; FIORENTINO *et al.*, 2014; GHEISARI *et al.*, 2016). No Markentig, por exemplo, sua principal finalidade é melhorar o apelo visual do produto e aumentar a quantidade de informações agregadas à sua apresentação (RODRIGUES; CASTELO, 2019). Por sua vez, técnicas de RA também já foram utilizadas para mostrar informações adicionais em projetos arquitetônicos, possibilitando que o cliente tenha uma visão mais fidedigna de como seu ambiente ficará (WEBSTER *et al.*, 1996).

Considerada um dos pilares da 4ª Revolução Industrial (mais conhecida como Indústria 4.0, caracterizada principalmente pelo desenvolvimento tecnológico de ponta ligado à internet), a RA pode contribuir no aumento da produtividade, redução de custos, diminuição do tempo de manutenção e inspeção, aprimoramento da segurança e ajuda no controle e tomada de decisões rápidas, eficientes e bem qualificadas (RÜßMANN *et al.*, 2015; BITKOM; VDMA; ZVEI, 2016; HERMANN; PENTEK; OTTO, 2016; ROMERO *et al.*, 2017). Sistemas baseados em RA, por exemplo, podem suportar uma variedade de serviços, como enviar instruções de

reparos através de dispositivos móveis ou selecionar peças em um armazém, reduzindo gastos com deslocamentos e evitando que retrabalhos de manutenção precisem ser feitos por interpretações erradas (BAHRIN *et al.*, 2016). Ainda, novas interfaces homem-máquina podem ser criadas a partir de RA na fabricação de aplicações e ativos de TI, exibindo KPIs (*Key Performance Indicator*) e feedbacks sobre os processos de fabricação em tempo real, de forma a melhorar a tomada de decisões (GORECKY *et al.*, 2014). Outra aplicação é no desenvolvimento de protótipos no contexto de gerenciamento de edificações. Peres, Scheer e Faria (2018), por exemplo, propõem a aplicação de RA para o acesso aos dados acumulados e informações em barragens hidrelétricas a ser analisadas em busca de fissuras no concreto, diminuindo, assim, a demanda de carga de trabalho mental do funcionário. Porém, apesar dessa nova área da tecnologia vim sendo discutida a algum tempo em trabalhos acadêmicos, Martinez, Jirsak e Lorenc (2016) fazendo uma revisão da literatura sobre a Indústria 4.0, não encontraram nenhuma referência à realidade aumentada nos 531 resumos das publicações analisadas, o que indica que esse assunto parece ainda estar numa fase inicial de desenvolvimento.

No contexto de subestações elétricas de energia, Barcelos *et al.* (2013), identificando a dificuldade de egressos dos cursos de Engenharia Elétrica em diferenciar e classificar os elementos de uma subestação, apresentam uma proposta para o uso de RA na visualização desses componentes como forma de complementação do aprendizado. Para isto, um protocolo de criação de um catálogo interativo foi sugerido. Inicialmente, objetos virtuais foram criados no 3D Studio Max[®] e, após a geração dos seus respectivos marcadores, a *engine* de construção de jogos Unity 3D[®] e a biblioteca NyARToolKit possibilitaram o sincronismo entre a leitura do catálogo e a visualização desses objetos em três dimensões. Ainda, a disponibilização de óculos de RA para os alunos proporcionou uma maior experiência de usabilidade do sistema gerado e melhor imersão do usuário. Por fim, como sugerido por Antonijević, Sučić e Keserica (2016), a RA também pode ser utilizada como ferramenta de apoio para aumentar as informações visíveis ao usuário e contribuir para a automação das subestações elétricas, a partir do uso de um simples smartphone. Estes autores desenvolveram um aplicativo com base em marcadores QR e uma combinação da comunicação IEC61850 com RA, de forma que os engenheiros recebessem em tempo real as informações necessárias para manutenção e inspeção dos equipamentos a partir dos dados de processo registrados no sistema SCADA.

3 Materiais e Métodos

As etapas deste trabalho consistem em 1) modelar uma subestação elétrica simplificada em 3D para experimentação em **realidade virtual**, tendo como objetivo realizar testes com os operadores e mantenedores dos equipamentos e, assim, avaliar a experiência do usuário quanto ao uso do protótipo e **definir quais são os principais requisitos que podem ser utilizados para construção da aplicação final**. 2) **A partir dos resultados alcançados na fase anterior, construir o sistema em realidade aumentada** como forma de reduzir os custos necessários para a sua possível implementação nas empresas.

3.1 Estudo Preliminar – Aplicação em Realidade Virtual

Um estudo preliminar foi realizado, durante a Disciplina CAM504 do PROFICAM, para avaliar a experiência do usuário (*UX Evaluation*) quanto ao uso de sistemas baseados em computação vestível e realidade aumentada ao que se refere à identificação da forma segura e em tempo real dos perigos aos quais os trabalhadores estão expostos nas atividades de manutenção de uma subestação, propondo uma tomada de decisão segura para eliminação do risco. Para tanto, objetivou-se elaborar um caso de uso a ser aplicado à equipe de manutenção elétrica que envolvia o desenvolvimento de um protótipo usando o Unity 3D, para um ambiente virtual (RV) semelhante à um arranjo físico de uma subestação elétrica industrial no contexto de simulação de atividades de manutenção em equipamentos contidos nesta sala com (e sem) o uso de RA para leitura de informações dos equipamentos (RV simulando ambiente com RA); e avaliar o uso e percepções (experiência do usuário) pelas equipes de execução de manutenção, identificando vantagens e problemas decorrentes de tal solução e verificando a propensão da equipe quanto à necessidade de uso (ou não) da solução proposta para conhecimento de detalhes e informações em tempo real das instalações elétricas.

Assim, o protótipo a ser desenvolvido deveria ser capaz de (Figura 3-1):

- 1) Ser executado em celulares Android e simulado com apoio de *Virtual Reality Glass* (VR Box) e Controladores Remoto Bluetooth;
- 2) Representar o mais fielmente possível o arranjo físico de uma subestação elétrica;
- 3) Permitir que o usuário se locomovesse para todos os lados dentro do cenário e tivesse uma perspectiva de câmera em primeira pessoa;

- 4) Estabelecer barreiras virtuais para possibilitar o correto posicionamento do usuário em relação a área de risco de arco elétrico e, caso esse ultrapasse a delimitação, mostrar uma indicação de alerta na tela;
- 5) Fornecer informações sobre cada painel elétrico (dados de corrente, tensão, potência ativa e categoria do painel) no momento que o usuário se posicionasse a sua frente;
- 6) Registrar a quantidade de infrações cometidas durante a execução da tarefa pré-estabelecida.

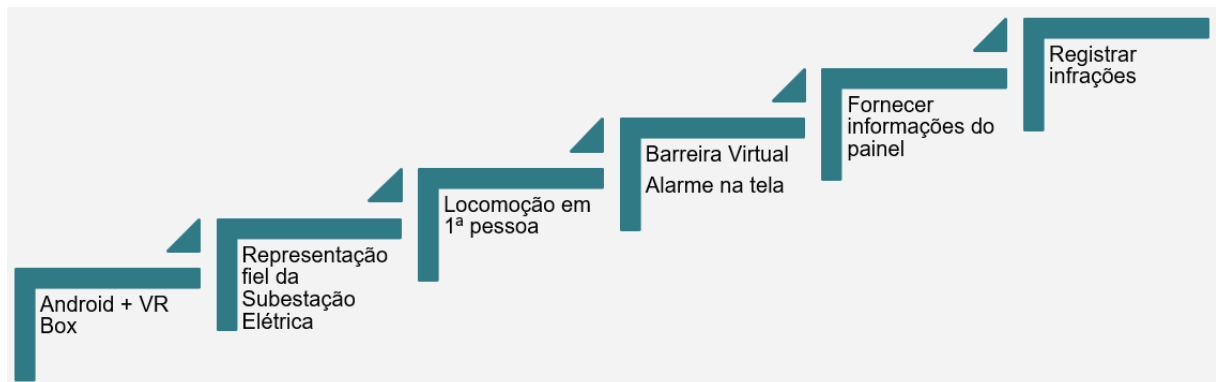


Figura 3-1: Requisitos da aplicação preliminar.

Fonte: Autor.

Um vídeo com a visão da subestação modelada em 3D pode ser acessado atrás do endereço: <https://youtu.be/ZXw46D-LZYM>. Após a finalização dessa primeira etapa, foi elaborado o caso de uso aplicado às equipes de manutenção elétrica das áreas de operações da Vale nos portos de Tubarão (Vitória/ES) e de Ponta da Madeira (São Luís/MA; Figura 3-3 a Figura 3-6). Para tanto, o experimento deu-se da seguinte maneira (Figura 3-2):

1. Ambientação - Foi permitido aos usuários que navegassem momentaneamente pelo ambiente virtual, através de computadores, antes de iniciar o teste propriamente dito, de forma a se familiarizar com o ambiente e com os controles de movimento.
2. Informações Preliminares - Foi solicitado aos participantes que executassem uma tarefa de levantamento de campo de informações de corrente de curto-circuito de todos os painéis contidos na subestação fictícia e anotassem em uma prancheta. Premissas foram passadas aos participantes e deveriam ser consideradas na execução da tarefa:

- i. As informações a serem obtidas (corrente de curto circuito) estariam disponíveis em etiquetas afixadas na parte frontal de cada painel.
 - ii. Os eletricitistas estariam utilizando uma roupa a prova de chamas (Nomex), categoria 2, isto é, proteção mínima de 8 cal/cm² (energia incidente, conforme índice ATPV) como EPI;
 - iii. A subestação não possuiria grupo de ajuste, isto é, não haveria mecanismos para redução da energia incidente dos painéis, através da alteração/ajustes dos tempos de atuação dos relés de proteção e/ou uso de relés de arco interno.
3. Tarefa 1 - O experimento foi realizado uma primeira vez com o cenário virtual sem a indicação das informações em um painel virtual localizado à esquerda da visão nos óculos, simulando o método atual (sem uso de RA). O comportamento esperado para este cenário seria que o eletricitista se recusasse fazer a atividade. Por não possuir o conhecimento prévio destas informações, este deveria adotar o seu direito de recusa ao considerar a possibilidade dos painéis apresentarem uma energia incidente superior à categoria do seu EPI (neste exemplo, categoria 2). Porém, uma vez que ele tomasse a decisão errada em fazer a leitura dos dados, acessando a zona de risco, um contador de acesso indevido era incrementado.
4. Tarefa 2 - O experimento foi repetido em um segundo cenário virtual, com indicação das informações, simulando o método com realidade aumentada, informando ao eletricitista os dados antecipadamente, e permitindo a tomada de decisão segura de não violar a distância segura e adequada ao seu EPI (roupa antichamas, com categoria adequada à energia incidente do painel).

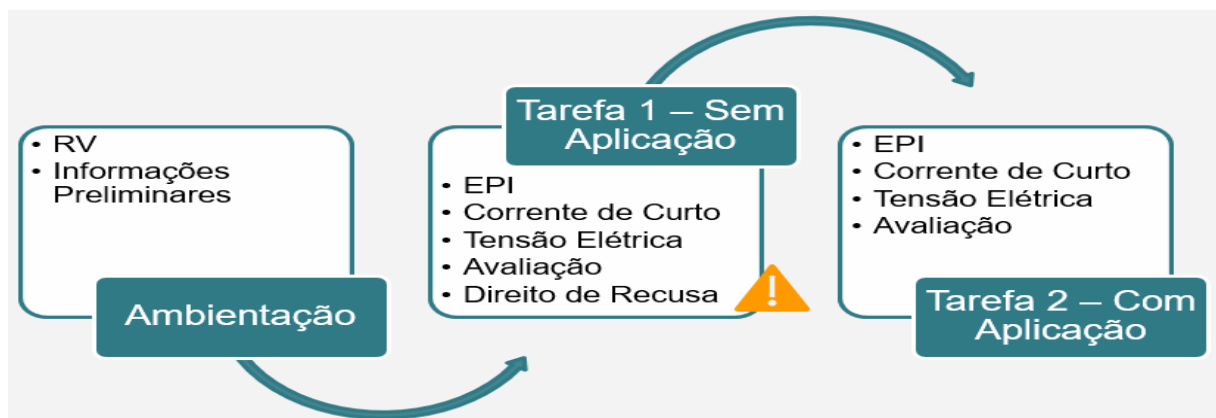


Figura 3-2: Etapas do experimento realizado.

Fonte: Autor.

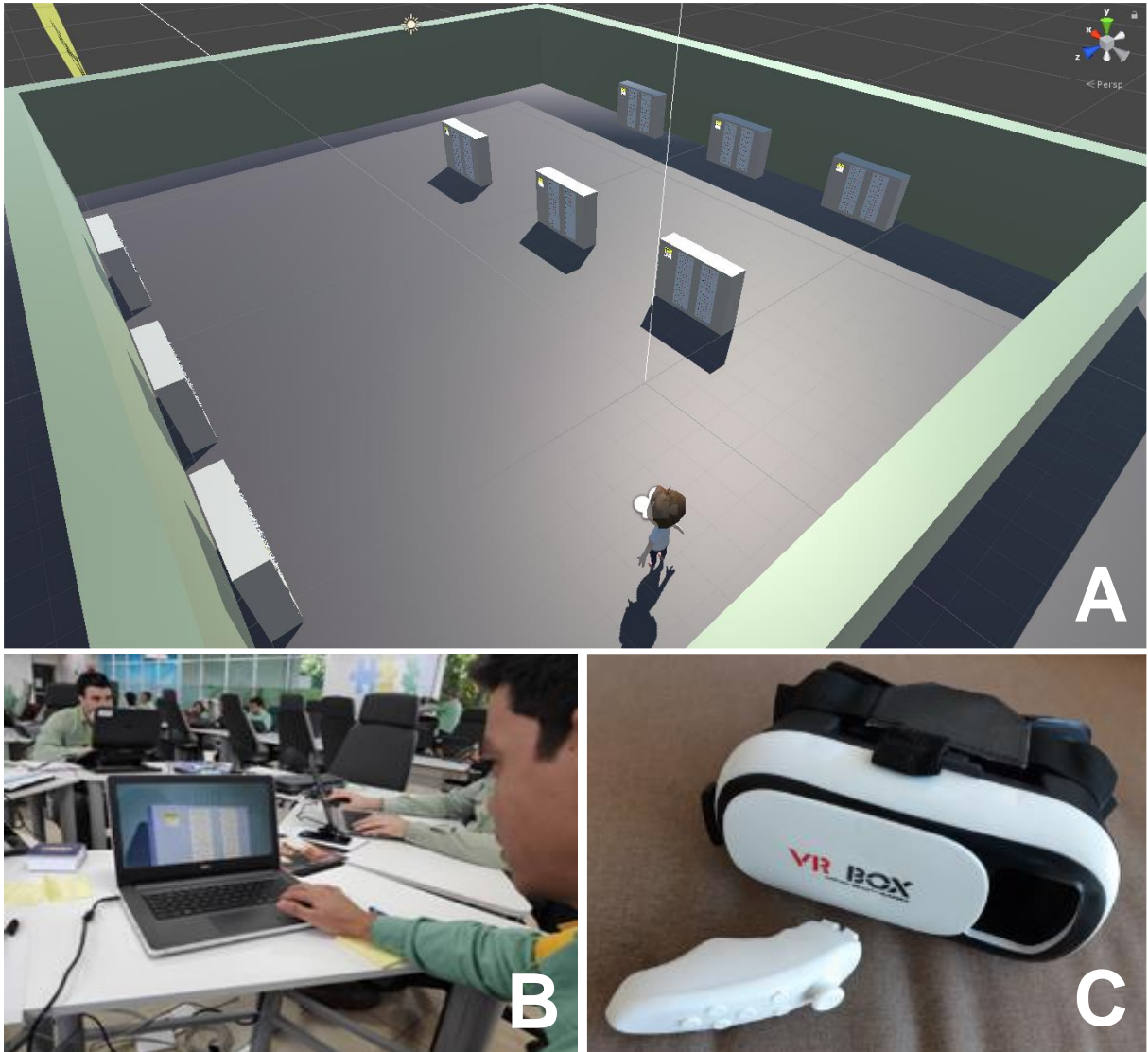


Figura 3-3: (A) Visão geral da subestação modelada; (B) Reprodução Prática do Experimento em São Luís; (C) Óculos VR Box e *Bluetooth Remote Controller* utilizados para o experimento.
Fonte: Autor.

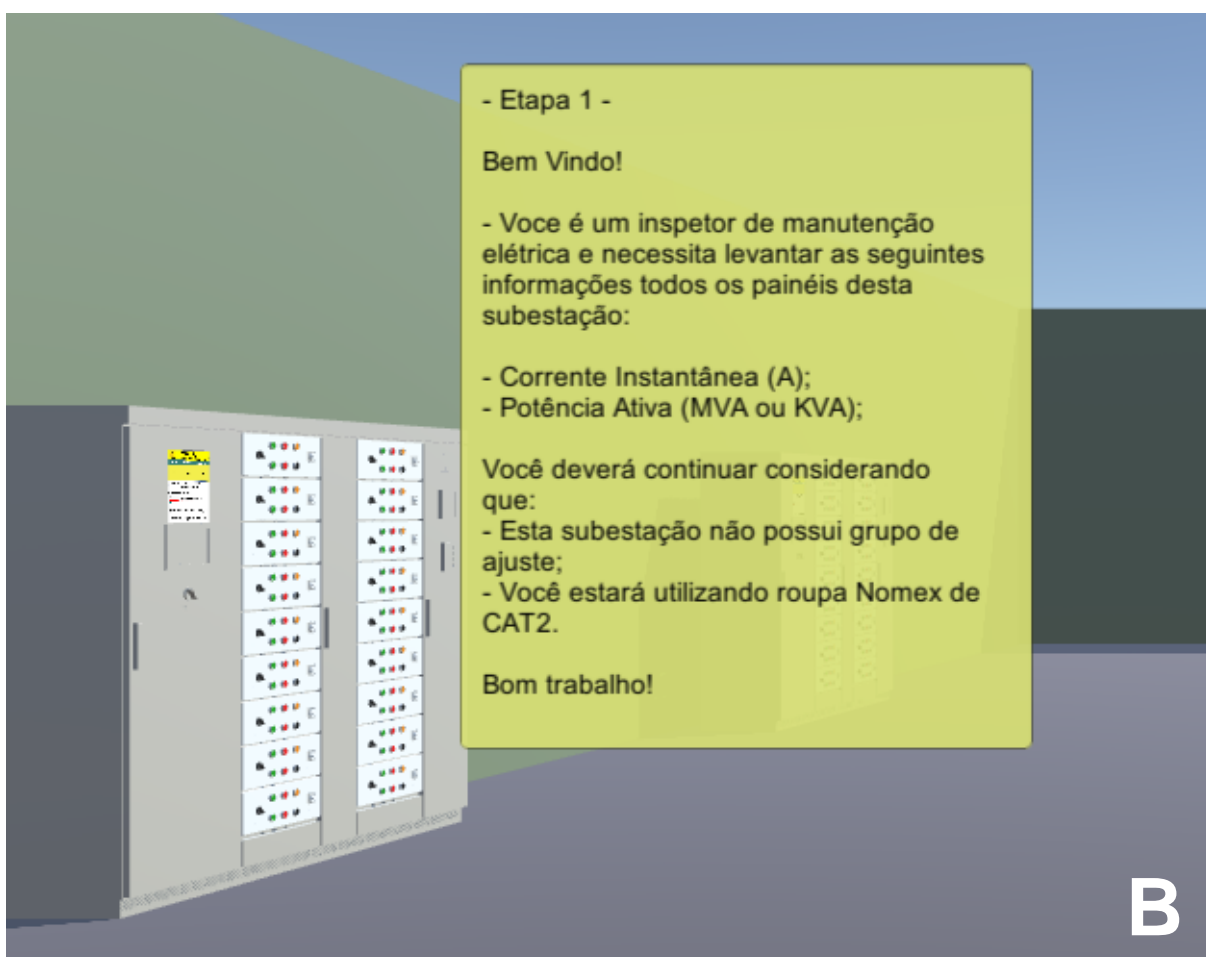
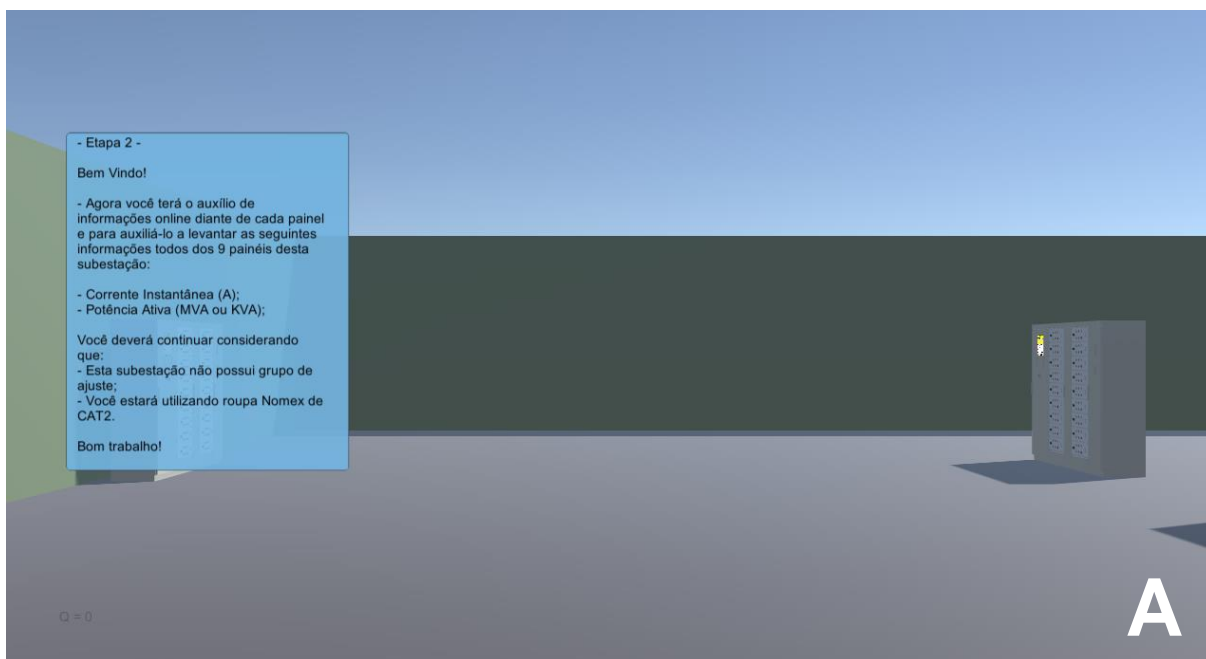


Figura 3-4: (A) Tela inicial do aplicativo com as instruções a ser seguidas; (B) Mensagem inicial de boas-vindas, com as orientações do que deve ser realizado e pré-requisitos já estabelecidos.

Fonte: Autor.

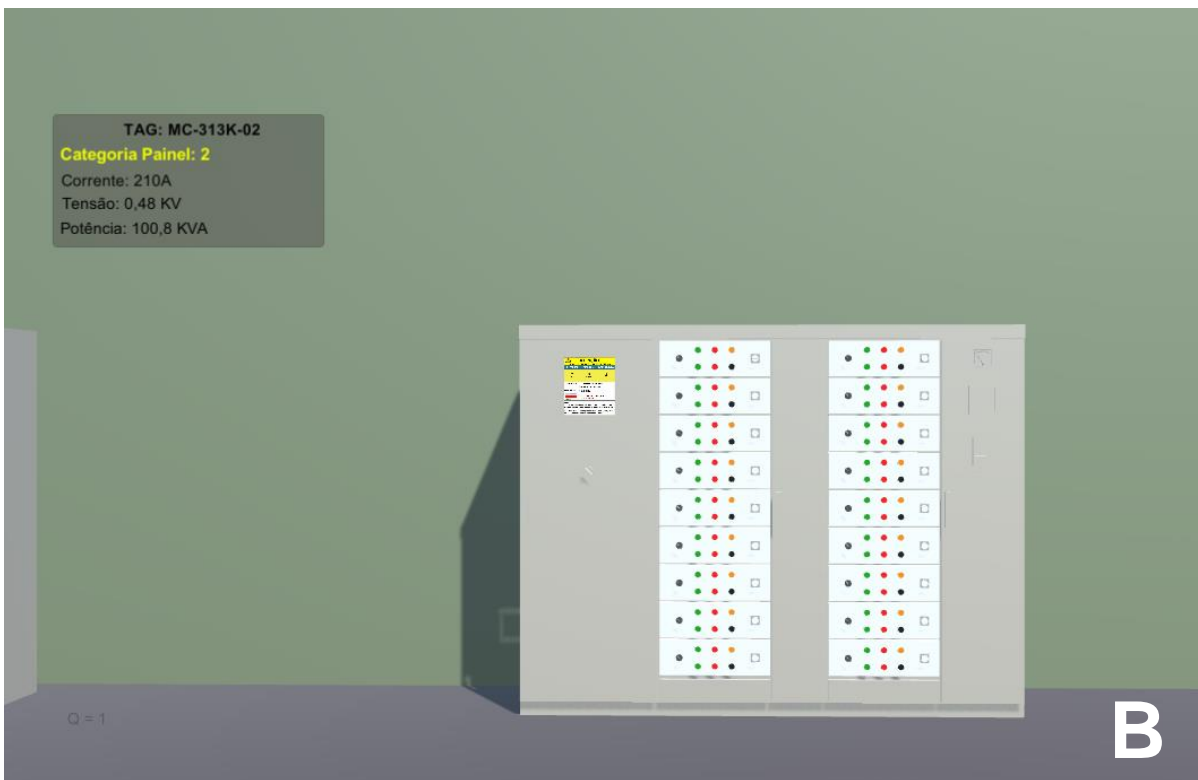
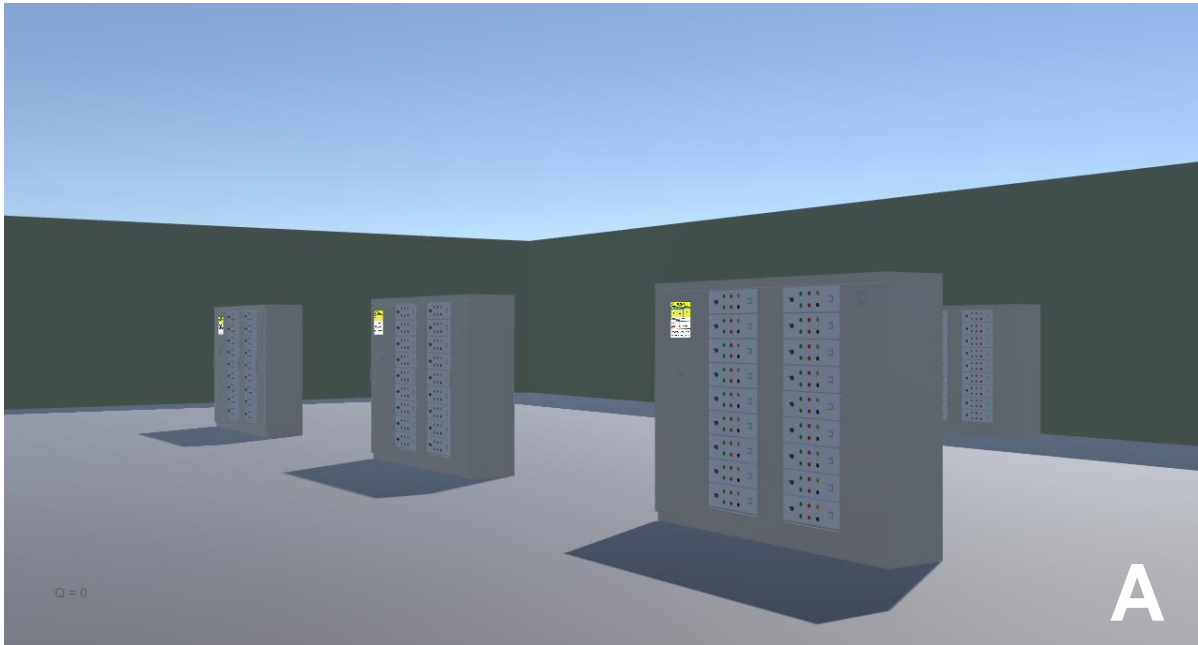


Figura 3-5: (A) Vista dos painéis elétricos pelo usuário. (B) Visão frontal de um painel e tag com suas respectivas informações.

Fonte: Autor.



Figura 3-6: Imagem com a tag de aviso de entrada na área de risco e indicação do painel. Em destaque dentro do quadrado vermelho sem preenchimento encontra-se a contabilização dos erros cometidos pelo usuário no momento da aplicação dos testes.

Fonte: Autor.

3.2 Construção do Sistema em Realidade Aumentada

Esta seção, faz as conexões entre as lições aprendidas do estudo preliminar descritos na seção 3.1 e o desenvolvimento da aplicação em realidade aumentada aplicada em uma subestação elétrica da VALE. Também serão apresentadas as principais etapas que foram consideradas para esse desenvolvimento.

3.2.1 Definição do Estudo de Caso

Para o desenvolvimento desse projeto foi selecionada uma subestação elétrica que é responsável por alimentar a Empilhadeira EP-313K-06 do Terminal Marítimo Ponta da Madeira (TMPM), porto privado pertencente à Vale S/A e localizado na cidade de São Luís, Maranhão. O Porto Norte, como é conhecido o TMPM, é o ponto final do sistema logístico e transporta o

minério de ferro retirado das minas da Vale no Pará e a Estrada de Ferro Carajás, para o carregamento dos navios. Suas instalações possuem oito carregadores de navios, oito viradores de vagões, sete recuperadoras, seis empilhadeiras/recuperadoras, cinco empilhadeiras e 149 transportadores de correias. Todos esses ativos funcionam por eletricidade e de forma a atender toda essa capacidade instalada, o TPPM conta com um total de 45 subestações elétricas, sendo duas subestações principais em 230 e 69 kV, 28 subestações de máquinas de pátio e carregadores de navios alimentadas em 4,16 kV e 15 subestações de distribuição em 13,8 kV (Figura 3-7 e Figura 3-8).



Figura 3-7: Exemplo de equipamentos dentro de uma subestação elétrica do TPPM. Em destaque, conjuntos de manobra de 34,5 kV e 4,16 kV, respectivamente.

Fonte: Autor.

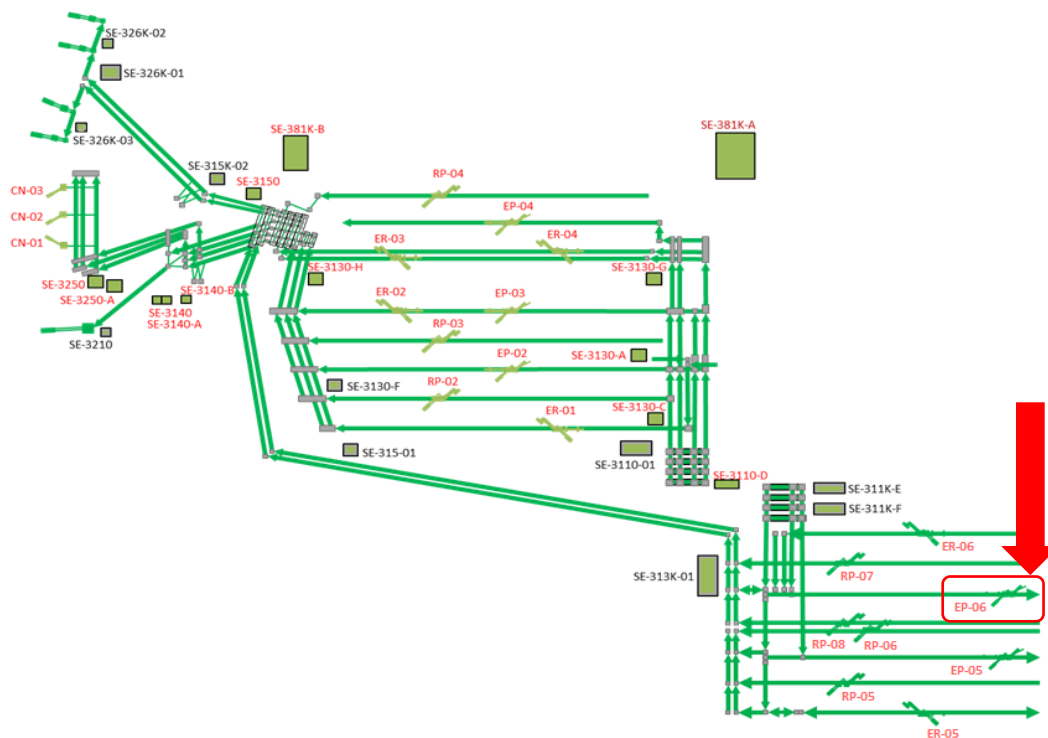


Figura 3-8: Layout dos Equipamentos e Subestações do TPM. Em destaque a sala escolhida, a EP-313K-06.

Fonte: compilação do autor.

O TPM possui um total de cinco empilhadeira, a EP-313K-06 (Figura 3-9) foi escolhida para fazer parte desse estudo dado o alto grau de relevância que a mesma tem para o processo de descarregamento de minério nas operações portuárias. Ela é a responsável por 30 % do volume descarregado no terminal.



Figura 3-9: EP-313K-06.

Fonte: Autor.

Além da relevância que EP-313K-06 possui como citado acima, ela foi escolhida por apresentar baixa qualidade na disposição dos seus painéis elétricos dentro do eletrocentro, levando em consideração a distância segura de trabalho e a alta frequência de manutenções preventivas programadas, dessa forma expondo acentuadamente o mantenedor ao risco de arco elétrico. Outra característica é que em seu eletrocentro encontramos os principais níveis de tensão elétrica disponíveis no TPM disposto em um total de cinco principais painéis elétricos, sendo eles:

- QD-313K-347 – Quadro de distribuição de 4,16 kV, responsável pelo acionamento do transportador de correia da lança;
- MC-313K-247 – Centro de controle de motores de 0,48 kV, responsável pela distribuição para os painéis de inversores de frequência e cargas auxiliares;
- FC-313K-213 – Painel de acionamento com inversores de 0,48 kV, responsável pelo acionamento da translação da máquina;
- FC-313K-214 – Painel de acionamento com inversores de 0,48 kV, responsável pelo acionamento do enrolador de cabos da máquina;

- FC-313K-215 – Painel de acionamento com inversores de 0,48 kV, responsável pelo acionamento do giro da lança da máquina.

Na Figura 3-10 pode-se observar o arranjo geral do eletrocentro da EP-313K-06 e como os painéis elétricos estão distribuídos fisicamente.

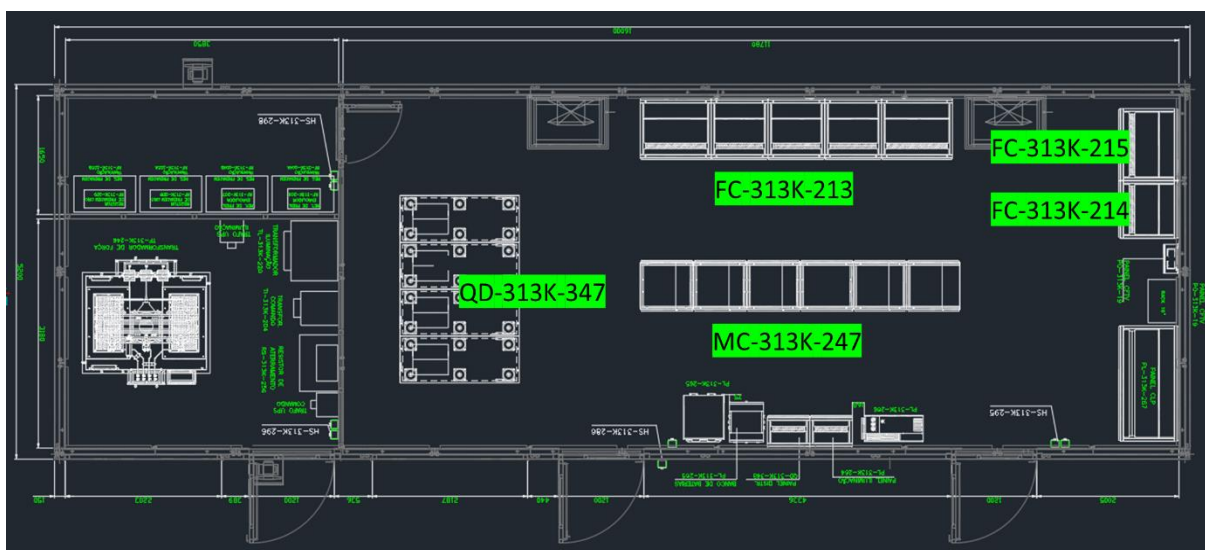


Figura 3-10: Planta baixa da sala elétrica da EP-313K-06 em Autocad 2D.
Fonte: Arquivo técnico VALE.

Com base nos estudos de curto circuito, seletividade e energia incidente disponíveis no prantuário elétrico para a sala elétrica da EP-313K-06, tem-se cenários de risco e modos de operação que expõe os eletricitistas a energia incidente variando entre 11,2 a 0.79 cal/cm² e limite de proteção contra arco entre 1829 a 495 mm.

ATENÇÃO	ATENÇÃO
RISCO DE CHOQUE E ARCO ELÉTRICO	RISCO DE CHOQUE E ARCO ELÉTRICO
UTILIZE EPI RECOMENDADO	UTILIZE EPI RECOMENDADO
PROTEÇÃO CONTRA ARCO ELÉTRICO	PROTEÇÃO CONTRA ARCO ELÉTRICO
Distância de Risco de Arco: 610 mm Energia Incidente: Limite de Proteção contra Arco: 1829 mm	Distância de Risco de Arco: 610 mm Energia Incidente: Limite de Proteção contra Arco: 495 mm
11.2 cal/cm²	0.79 cal/cm²
PROTEÇÃO CONTRA CHOQUES	PROTEÇÃO CONTRA CHOQUES
Risco de Choque se portas removidas ou abertas: 480 VAC Distância - zona controlada: 300 mm Distância - zona de risco: 25 mm	Risco de Choque se portas removidas ou abertas: 480 VAC Distância - zona controlada: 300 mm Distância - zona de risco: 25 mm
Descrição do EPI: Vestimentas de proteção apropriadas para a energia incidente (cal/cm ²) deste painel: Macacão ou camisa de manga comprida e calça; luva multicamada; balaclava; capacete com visor acoplado; abafador e botina de segurança com biqueira de composite. Abaixo da luva multicamada deverá ser utilizada uma luva de isolamento de tensão de classe 00, conforme NBR 16295.	Descrição do EPI: Vestimentas de proteção apropriadas para a energia incidente (cal/cm ²) deste painel: Macacão ou camisa de manga comprida e calça; luva multicamada; balaclava; capacete com visor acoplado; abafador e botina de segurança com biqueira de composite. Abaixo da luva multicamada deverá ser utilizada uma luva de isolamento de tensão de classe 00, conforme NBR 16295.
Localização: EP-313K-06	Localização: EP-313K-06
Painel: B_MC-313K-247-PROC	Painel: FC-313K-215

Figura 3-11: Etiquetas de identificação de segurança.
Fonte: Estudos de energia incidente RL-3000KP-E-70078, VALE.

3.2.2 Modelagem do Ambiente Virtual

Na base de documentação técnica (arquivo técnico) da Vale S/A, os documentos das disciplinas elétrica e estrutura metálica foram obtidos de forma a subsidiar a modelagem do ambiente virtual dos equipamentos e do arranjo físico da sala elétrica da EP-313K-06. Fotos, vídeos, catálogos dos equipamentos e da subestação foram adquiridos de forma a complementar as informações contidas nos arquivos CAD e permitir a criação dos modelos virtuais de forma mais realista. Também foi disponibilizado pelo setor de engenharia da VALE, modelos 3D de cada um dos principais painéis existentes na EP-313K-06 esses modelos na verdade são documentos de montagem do Solidworks (.SLDASM), para que esses arquivos fossem introduzidos na cena do Unity 3D foi necessário a instalação de um plugin Pixyz, cuja função é importar, preparar e otimizar modelos de CAD, malha e nuvem de pontos, ou seja, dados 3D para o Unity.

Então, foi importado para a cena do Unity 3D um total 12 equipamentos, sendo esses os principais ativos da sala elétrica da EP-313K-06 e que ocorrem manutenções rotineiramente, dessa forma os mantenedores estão em constante acesso.

Por fim, como exemplo, a Figura 3-12 ilustra todas as etapas que normalmente devem ser seguidas para a criação dos ambientes virtuais.

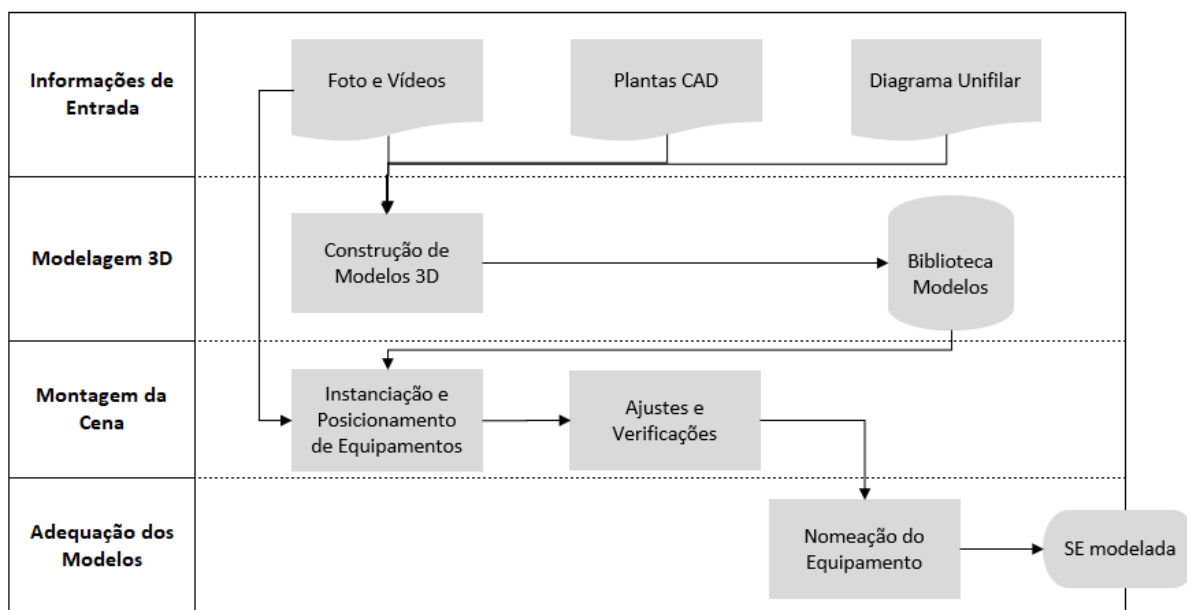


Figura 3-12: Arquitetura do processo de montagem de cenas.

Fonte: Adaptado de Mattioli, 2015.

3.2.3 Criação do Protótipo de Realidade Aumentada

Inicialmente, para a determinação de quais variáveis adotar no protótipo, levou-se em consideração a sua importância nos casos de acidentes elétricos e/ou disponibilidade de informações no banco de dados dos sistemas de controle, operação e monitoramento do TPM. Assim, foram selecionadas:

- a) EPIs recomendados para acesso a sala elétrica;
- b) Distância segura permitida de acesso aos equipamentos;
- c) Energia incidente de cada painel;
- d) Parâmetros elétricos dos painéis - medições de tensão e corrente elétrica.

A obtenção dos dados referentes às três primeiras variáveis foi realizada a partir dos estudos de energia incidente do TPM. Por sua vez, os parâmetros elétricos foram extraídos de maneira *offline* do historiador de dados de processo da Vale (PIMS - *Plant Information Management Systems*) através do software Aspen Infoplus. A leitura dos dados *online* ficou restrita no escopo deste projeto devido às limitações de segurança e políticas internas da empresa.

Para a construção do aplicativo de realidade aumentada foi utilizada a plataforma SDK Vuforia integrada ao Unity 3D. O Vuforia é um conjunto de desenvolvimento de software (*Software Development Kit – SKD*) que quando associado ao Unity se torna uma ferramenta eficaz para o desenvolvimento de RA. Por sua vez, O Unity é fundamentalmente uma *engine* de criação de jogos em 2D e 3D. A sua principal vantagem é a possibilidade de um único desenvolvimento para o uso do protótipo em diversas plataformas, como Windows, MacOS, Linux, Android e IOS, com preservação da qualidade visual e performance (Bergamaschi *et al.*, 2019; PTC, 2020). além de possuir um *background* de suporte a desenvolvimento bem amplo, difundido, podendo tirar dúvidas de itens específicos com outros programadores e entusiastas, esses ambientes contribuíram de maneira significativa no desenvolvimento desse estudo.

O primeiro passo para o desenvolvimento da aplicação em RA, foi a definição de que cada painel elétrico seria representado por somente 1 TAG, que é o menor grau de segregação estabelecido nos estudos de energia incidente, desta forma, foi desenvolvida uma aplicação no Vuforia para uso de múltiplas TAGs mas de maneira não simultânea. Na Figura 3-13 podemos

ver a sala elétrica da EP-313K-06 modelada no Unity e setas em vermelho indicando o posicionamento das TAGs no ambiente.

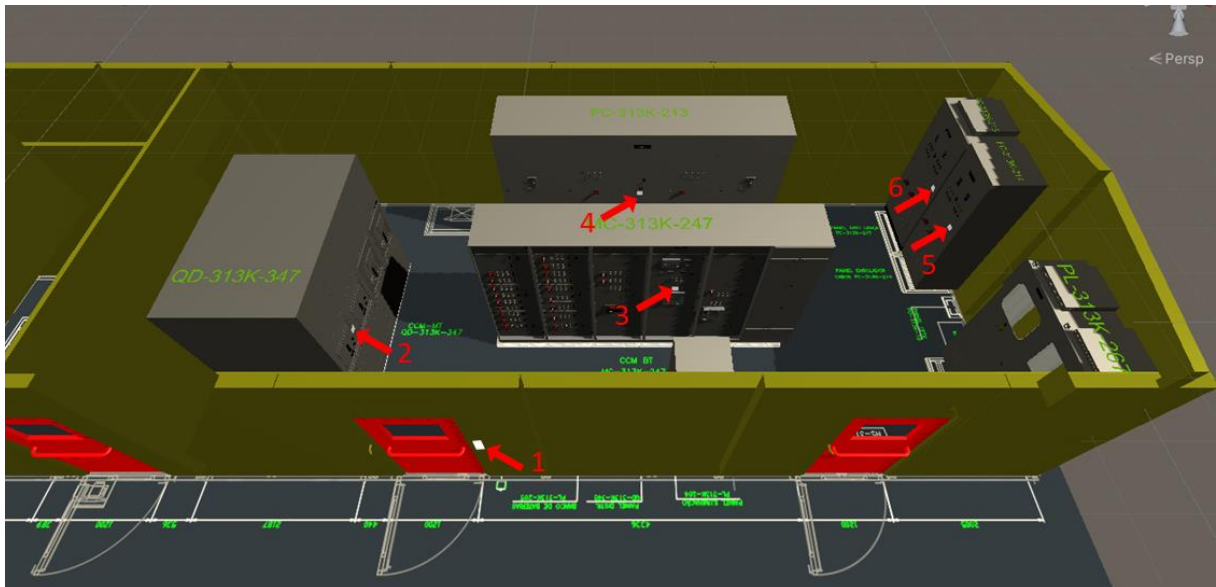


Figura 3-13: Localização de TAGs na EP-313K-06.

Fonte: Autor.

Na Figura 3-14, pode-se observar o arranjo geral do eletrocentro da EP-313K-06 com a sobreposição da área com escala devidamente ajustada, em frente aos painéis, conforme os estudos de energia incidente propõem com “Limite de proteção contra arco elétrico”. Também foi feita a pintura dessa área virtual com a mesma tonalidade das cores das etiquetas dos estudos de energia incidente para facilitar a compreensão e associação.



Figura 3-14: Sobreposição das áreas definidas com “Limite de proteção contra arco elétrico” indicadas nos estudos de energia incidente da EP-313K-06 no Unity.
 Fonte: Autor.

Com a vinculação do TAG ao painel, foi possível a elaboração de telas com informações de destaque personalizadas exibindo o grau de risco, distância segura, EPI recomendados, corrente elétrica instantânea, como pode se ver na Figura 3-15.



Figura 3-15: Distribuição dos componentes para visualização do operador após a leitura de uma TAG.
 Fonte: Autor.

Nos extremos do topo da tela temos o botão home onde o usuário pode voltar para a tela inicial e o botão encerrar a aplicação. Na região central do topo da tela temos o banner central é nele onde a aplicação informará para o usuário em qual sala elétrica ele está.

No lado esquerdo temos a etiqueta de energia incidente que foi retirada integralmente dos estudos elétricos. Essa etiqueta possui a funcionalidade de zoom predefinido, sem ativado com um toque na tela e retornando para as dimensões originais ao tirar o dedo.

Na região central temos uma área bem ampla, pois, é nela que será visualizada a sobreposição do limite de proteção contra o arco elétrico e a zona segura. Temos também o banner central, onde são disponibilizados os valores de tensão e corrente elétrica de maneira *off-line*.

Na lateral direita temos dois ícones e dois botões. Os ícones representando movimento com os dedos, sugerem para o usuário o toque na tela do dispositivo móvel. O primeiro botão é o menu da aplicação (Figura 3-16), nele é possível habilitar três funcionalidades: 1) “Rastreador de TAG” - função que permite manter visível o ambiente da RA mesmo após a saída da TAG do campo de visão da câmera, 2) “Autofoco” – habilita o autofoco da câmera do dispositivo móvel, 3) “Flash” – Habilita o flash/led se disponível da câmera do dispositivo móvel e 4) “Rotas de fuga” - Visualização das rotas de fuga disponíveis na sala elétrica. Nesse último recurso foi levado em consideração o local onde o mantenedor se encontra e a porta de emergência mais próxima, como pode ser visto em maiores detalhes na Figura 3-17.

E finalmente na região inferior foi disponibilizado um banner onde temos um memorial descritivo funcional do respectivo painel.

aplicação é possível ajustar o zoom interno ao diagrama/desenho e maximizar a tela de modo a facilitar a visualização e leitura das informações.

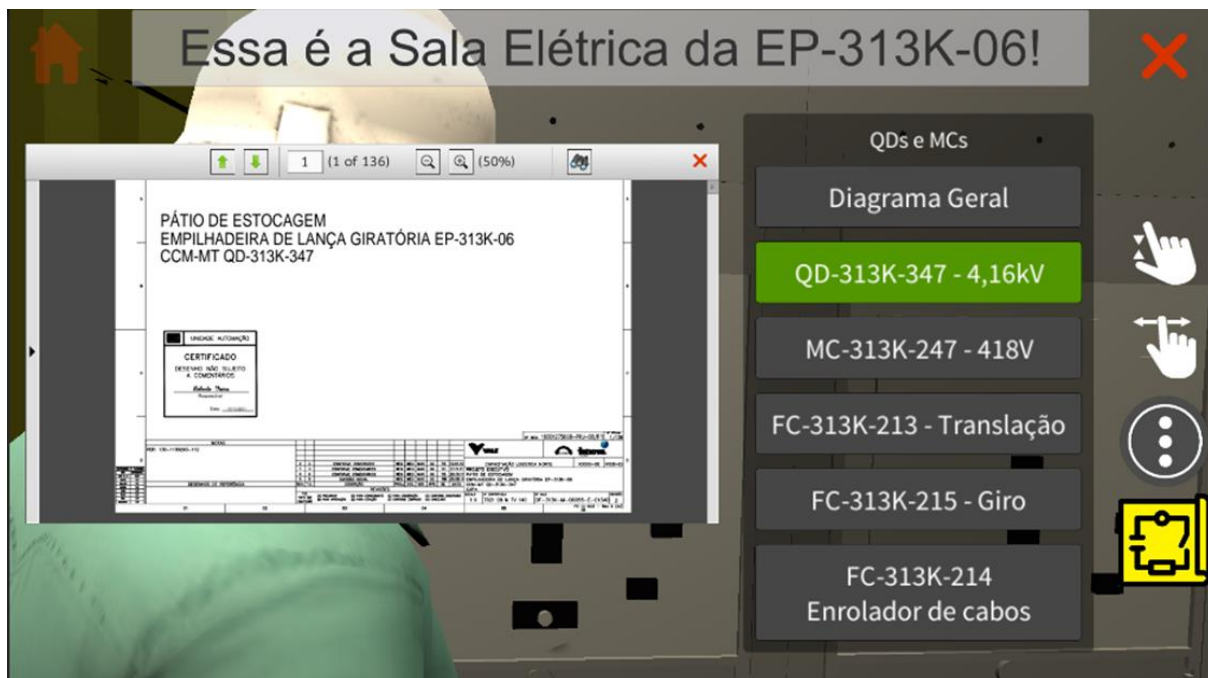


Figura 3-18: Menu dos diagramas unifilares.

Fonte: Autor.

Em seguida, com a subestação modelada dentro do Unity 3D e o desenvolvimento dos scripts (Códigos de Programação) para implementação das funcionalidades do aplicativo, foi utilizado o Android Studio integrado ao Unity no momento da exportação do aplicativo, possibilitando o uso do protótipo em celulares smartphones.

Um vídeo exibindo as funcionalidades do aplicativo usando RA pode ser acessado através do endereço: <https://youtu.be/BPSUWKLO2B8>.

4 Resultados e Discussão

O capítulo 3 apresentou como foram desenvolvidos os estudos preliminares e a aplicação em realidade aumenta para sala elétrica da EP-313K-06. A seguir serão apresentados e discutidos uma série de pontos importantes levantados com base nos resultados obtidos.

Viabilidade do Estudo de Caso: O ambiente da sala elétrica foi configurado para teste piloto e poderá ser expandida para as demais subestações da VALE. O custo é relativamente baixo e exige pouca interferência nas instalações já existentes. Desta forma, o trabalho se limitará basicamente ao modelamento em 3D das demais subestações.

4.1 Estudo Preliminar - Aplicação em Realidade Virtual

Esta seção apresenta os resultados obtidos do experimento descrito na subseção 3.1. Após a execução dos testes, com o auxílio da metodologia NASA TLX, foi pedido que os usuários avaliassem a carga de trabalho em ambos os cenários em termos de demanda mental, demanda física, demanda temporal, desempenho, esforço e frustração. Assim, após a compilação dos resultados, constatou-se que o cenário sem RA apresentou uma nota final de 54,81, enquanto que o cenário com RA apresentou nota final de 48,59. Para esta metodologia, quanto menor a nota, melhor o desempenho da tecnologia, uma vez que exige menores demandas de trabalho, indicando uma propensão da equipe quanto à necessidade de uso da solução proposta. Uma análise por média aritmética das notas também foi realizada, confirmado os dados obtidos anteriormente (Tabela 4-1; Figura 4-1).

Tabela 4-1: Notas das Etapas 1 e 2, segundo metodologia NASA TLX e Média Aritmética. Legenda: NP – nota ponderada; MA – média aritmética; DP – desvio padrão.

Item	Contag em Peso		ETAPA 1 (sem RA)					ETAPA 2 (com RA)				
			Soma (notas)	NP	MA	DP	Variância	Soma (notas)	NP	MA	DP	Variância
Mental	27	20%	63	12,60	7,00	1,12	1,25	44	8,80	4,89	2,71	7,36
Física	13	10%	48	4,62	5,33	2,50	6,25	26	2,50	2,89	1,69	2,86
Temporal	27	20%	57	11,40	6,33	2,65	7,00	34	6,80	3,78	2,49	6,19
Desempenho	33	24%	58	14,18	6,44	3,57	12,78	82	20,04	9,11	0,93	0,86
Esforço	19	14%	55	7,74	6,11	3,26	10,61	54	7,60	6,00	3,50	12,25
Frustração	16	12%	36	4,27	4,00	3,28	10,75	24	2,84	2,67	1,66	2,75
	135			54,81	35,22			48,59	29,33			

Fonte: Autor.

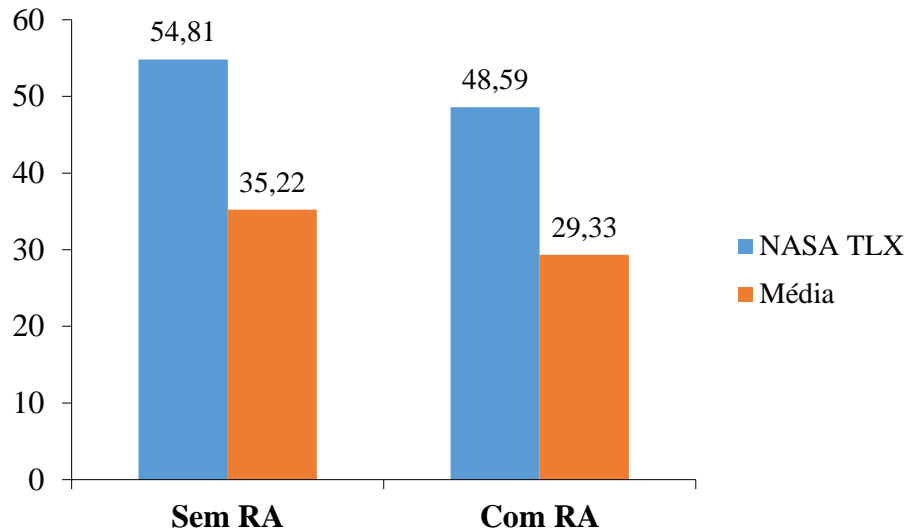


Figura 4-1: Comparação de notas finais dos usuários (NASA TLX e média aritmética) em relação as demandas exigidas durante a execução do experimento sem e com o uso de realidade aumentada.

Fonte: Autor.

Por fim, o cenário com realidade aumentada apresentou redução aproximada de 90% em erros de tomada de decisão quanto ao acesso indevido em áreas de risco (39 erros cometidos no cenário sem RA e quatro com RA). Isso pode indicar que o sistema desenvolvido foi testado com sucesso, confirmando que a partir do seu melhoramento, a sua aplicação em ambientes reais de subestações de energia elétrica seria uma solução eficaz para mitigação dos riscos associados às atividades nela realizadas. Porém, duas limitações foram identificadas, devendo ser solucionadas em projetos futuros: a baixa resolução do vídeo que dificultou a leitura das informações com o uso do celular; e a dificuldade de reconhecimento pelo usuário do modelo utilizado para representar os painéis elétricos, sendo recomendado a adoção de padrões de design de mercado e/ou da subestação a ser implantada a tecnologia, de forma que os usuários se sintam familiarizados com as interfaces.

4.2 Aplicação em Realidade Aumentada

Esta seção apresenta os resultados obtidos do experimento descrito na subseção 3.2. Ao final do seu desenvolvimento, a aplicação de RA desenvolvido foi instalada no smartphone Galaxy S20 FE e realizada a avaliação em campo no eletrocentro da EP-313K-06.

Em cumprimento as normas de segurança da empresa e a NR-10, o acesso a EP-313K-06 foi realizado em conjunto com dois engenheiros, uma vez que a mesma não pode ser acessada sozinha.

Após a leitura do TAG na posição 1 como pode ser observado nas Figura 4-2 e Figura 4-3, o usuário nesta posição já tem através da RA uma visão geral da sala elétrica, nessa tela ele já pode acessar os diagramas unifilares, os descritivos de cada um dos painéis, os EPI recomendados e as rotas de fuga.



Figura 4-2: Posicionamento do usuário, realizando a leitura do TAG 01.
Fonte: Autor.



Figura 4-3: Resultados obtidos realizando a leitura do TAG 01.
Fonte: Autor.

Na Figura 4-4, é possível observar o posicionamento do usuário para a leitura do TAG na posição 2, TAG do QD-313K-347, nessa posição já é possível ver através da aplicação em RA a sobreposição na tela da zona de risco correlacionada aos estudos de energia incidente (Figura 4-5).



Figura 4-4: Ponto de vista do usuário, realizando a leitura do TAG 02.
 Fonte: Autor.



Figura 4-5: Resultados obtidos realizando a leitura do TAG 02.
 Fonte: Autor.

Na Figura 4-6, é possível observar o posicionamento do usuário para a leitura do TAG na posição 3, TAG do MC-313K-247, nessa posição já é possível ver através da aplicação em RA a sobreposição na tela da zona de risco correlacionada aos estudos de energia incidente (Figura 4-7).



Figura 4-6: Posicionamento do usuário, realizando a leitura do TAG 03.
Fonte: Autor.

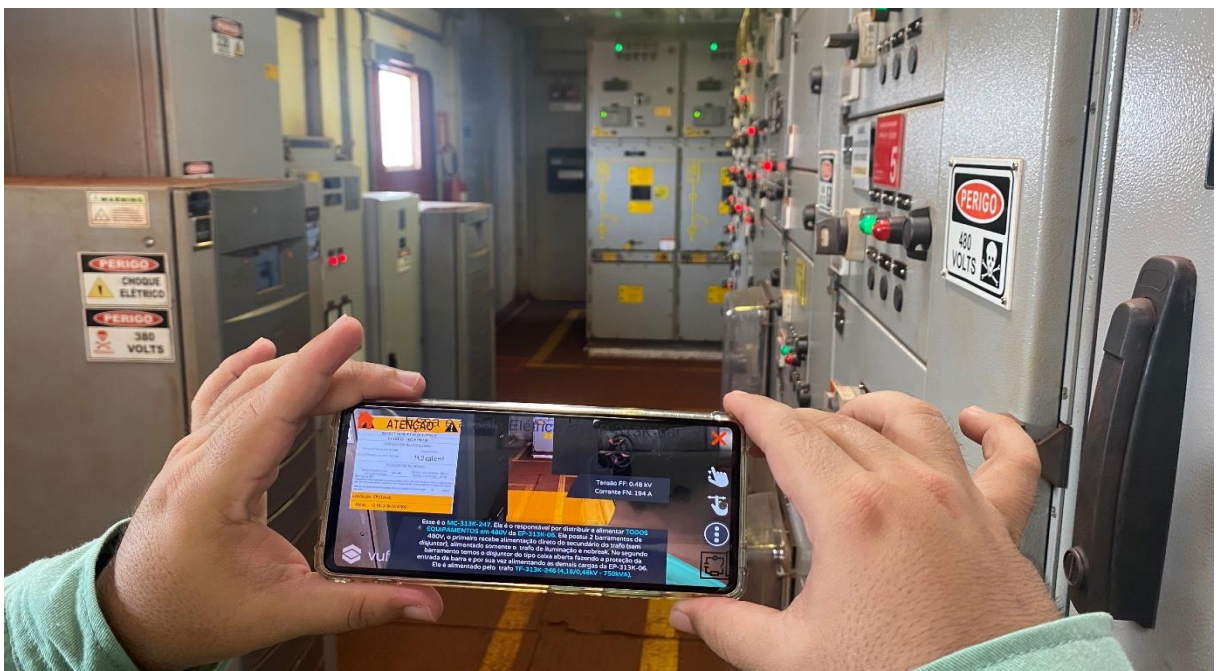


Figura 4-7: Resultados obtidos realizando a leitura do TAG 03.
Fonte: Autor.

Na Figura 4-8, é possível observar o posicionamento do usuário para a leitura do TAG na posição 4, TAG do FC-313K-213, nessa posição já é possível ver através da aplicação em RA a sobreposição na tela da zona de risco correlacionada aos estudos de energia incidente (Figura 4-9).



Figura 4-8: Posicionamento do usuário, realizando a leitura do TAG 04.

Fonte: Autor.



Figura 4-9: Resultados obtidos realizando a leitura do TAG 04.
Fonte: Autor.

Na Figura 4-10, é possível observar o posicionamento do usuário para a leitura do TAG na posição 5, TAG do painel FC-313K-214, nessa posição já é possível ver através da aplicação em RA a sobreposição na tela da zona de risco correlacionada aos estudos de energia incidente (Figura 4-11).



Figura 4-10: Posicionamento do usuário, realizando a leitura dos TAGs 05.
Fonte: Autor.



Figura 4-11: Resultados obtidos realizando a leitura dos TAGs 05.
Fonte: Autor.

Na Figura 4-12, é possível observar o posicionamento do usuário para a leitura do TAG na posição 6, TAG dos painel FC-313K-215, nessa posição já é possível ver através da aplicação em RA a sobreposição na tela da zona de risco correlacionada aos estudos de energia incidente (Figura 4-13 e Figura 4-14).



Figura 4-12: Posicionamento do usuário, realizando a leitura do TAG 06.
Fonte: Autor.

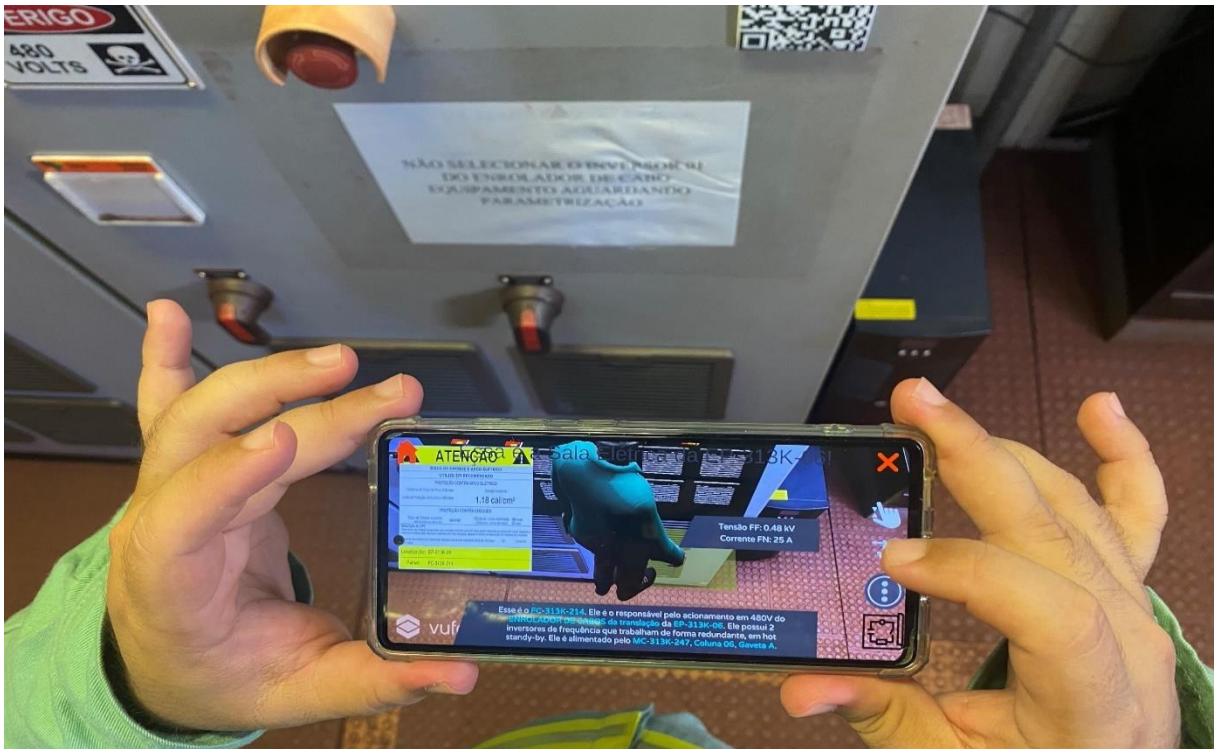


Figura 4-13: Resultados obtidos realizando a leitura do TAG 06.
 Fonte: Autor.



Figura 4-14: Sobreposição dos objetos em RA ao ambiente real, após a leitura do TAG 06.
 Fonte: Autor.

4.2.1 Calibração da Aplicação em Realidade Aumentada

Para que se fosse obtidos os resultados visualizados nas Figura 4-2 a Figura 4-10 durante a execução dos testes em campo, foram necessários calibrações da aplicação (Figura 4-15) que consiste em:

- 1) A definição das dimensões do TAG, de modo a viabilizar a leitura em uma distância segura;
- 2) O posicionamento do TAG no ambiente real deve ser refletido identicamente no ambiente de desenvolvimento Unity;
- 3) A posição em que o usuário fará a leitura do TAG no ambiente real deve ser refletida identicamente no ambiente de desenvolvimento Unity.

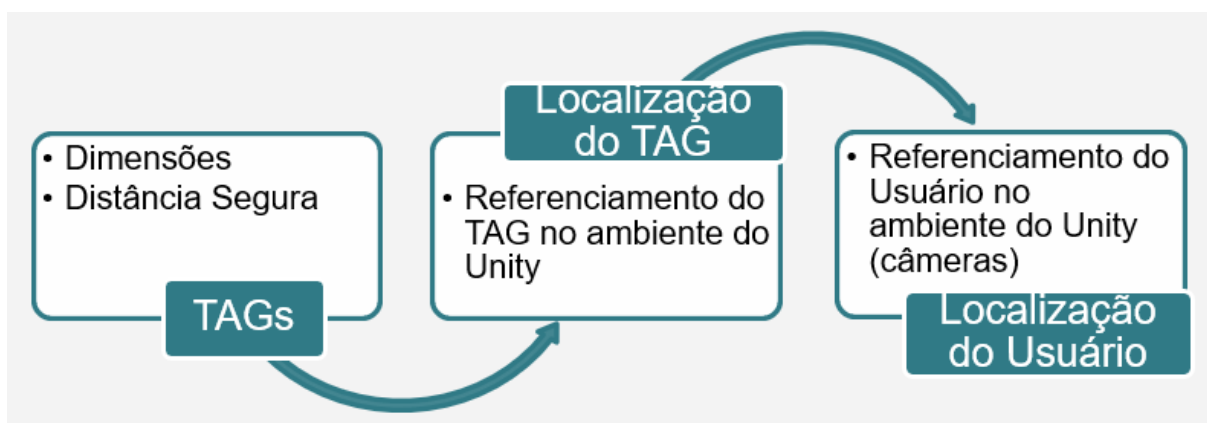


Figura 4-15: Calibração da aplicação.
Fonte: Autor.

É importante ressaltar que uma etapa fundamental para a correta implantação de aplicação em realidade aumenta no Unity é a preocupação com a escala em que os modelos 3D foram importados no ambiente do Unity. De tal forma para que se obtenha sucesso, é necessário que tudo esteja referenciado na base/escala do Unity, ou seja, quando se cria um objeto virtual como por exemplo um cubo com arresta 1, significa que esse objeto projetado no ambiente real pela aplicação em realidade aumenta terá dimensões de 1 x 1 x 1 metros. Sabendo disso, após a importação dos objetos usando o Pixyz, se fez necessário o ajuste de maneira individualizada nas escalas de cada objeto importado para cena em sua escala definitiva.

Ainda nas Figura 4-2 a Figura 4-10, vemos a implementação dos requisitos apresentados nos objetivos específicos, que são (Figura 4-16):

- 1) Informa os valores de energia incidente e os EPIs mínimo necessários;
- 2) Permite visualizar as rotas de fuga e saídas de emergências disponíveis;
- 3) Permite uma visão geral da subestação antes de acessá-la;
- 4) Permite a visualização da área de risco de cada painel elétrico;
- 5) Fornece informações sobre as especificações de cada painel elétrico;
- 6) Exibi medições de tensão e corrente elétrica para leitura pelo usuário;
- 7) Representa o arranjo da EP-313K-06 com fácil visualização dos seus principais componentes;
- 8) Realiza a leitura das TAGs em uma distância segura.



Figura 4-16: Requisitos da aplicação em realidade aumentada.

Fonte: Autor.

4.2.2 Limitações da Aplicação em Realidade Aumentada

Devido a restrições de integração com rede TI da empresa a exibição dos valores de tensão e corrente elétrica no banner central foi implementada de maneira *offline*, simulando valores médios históricos exportados do PIMS Vale para cada respectivo painel.

5 Considerações Finais

5.1 Conclusão

Este trabalho tem por objetivo o desenvolvimento de aplicação móvel para solução de um problema de saúde e segurança nas subestações elétricas de uma unidade portuária de minério de ferro.

O referencial teórico estudado nesse caso faz a exposição das principais normas regulatórias brasileiras e internacionais sobre a execução de atividades em eletricidade e as medidas de prevenção para controle dos riscos elétricos, também foi feita uma discussão sobre o uso das tecnologias de realidade virtual e aumentada, mostrando suas diversas aplicações e o seu uso no contexto das subestações elétricas.

O trabalho teve início com o um experimento preliminar utilizando a tecnologia de realidade virtual simulando o uso da realidade aumenta, esse experimento propôs uma solução para mitigação dos riscos associados a atividades em sistemas elétricos, através da identificação de parâmetros elétricos com o uso de realidade aumentada, permitindo a correta aplicação de sinalizações de distâncias de segurança alertando os riscos de arco e choque elétrico. A aplicação de realidade aumentada foi utilizada como um artefato para levantamento de requisitos para elaboração da aplicação real. Usamos a metodologia NASA TLX como métrica subjetiva para avaliar a carga de trabalho em ambos os cenários. O cenário sem realidade aumentada apresentou uma carga de trabalho superior ao com realidade aumentada, dando evidências de que a aplicação possui potencial de melhoria no processo de inspeção/manutenção das subestações.

A segunda etapa do trabalho corresponde no desenvolvimento da aplicação móvel em realidade aumenta aplicada em uma subestação elétrica da VALE, a sala elétrica da EP-313K-06, baseada nos levantamentos de requisitos feito na etapa anterior. O aplicativo foi desenvolvido utilizando a plataforma SDK Vuforia integrada ao Unity 3D, a aplicação faz a leitura de múltiplas TAGs mas de maneira não simultânea e traz para a tela do smartphone informações de destaque personalizadas para cada TAG/painel a exibição do grau de risco, distância segura, EPI recomendados, tensão e corrente elétrica instantânea, exibição de rotas de fugas e diagramas unifilares.

Diante do exposto, o que se busca nesse trabalho de forma objetiva é a concretização de um sistema de interface que permita tornar visível os riscos, outrora invisíveis, aos trabalhadores, reduzindo o número de acidentes com o menor custo possível para empresa e com a maior eficácia e eficiência frente ao problema existente nas subestações. Suas principais vantagens estão relacionadas ao uso dos EPIs corretos para a atividade a ser desenvolvida, à correta aplicação de sinalizações de distâncias de segurança, alertando os riscos de arco e choque elétrico, e à simplificação da leitura dos parâmetros elétricos sem a necessidade de maior aproximação do equipamento energizado. Por fim, como vantagens indiretas do uso dessa tecnologia, pode-se destacar o aumento na produtividade das equipes, através de um retorno rápido de informação e atuação no processo de manutenção, aumento na percepção de confiabilidade da informação, eliminação de erros humanos na coleta/leitura de dados e redução do nível de stress dos trabalhadores nas tomadas de decisão que envolvem a sua segurança.

5.2 Trabalhos Futuros

Como oportunidade de melhorias em trabalhos futuros são sugeridos:

- Customização da aplicação para o ambiente VALE, de forma a permitir maior integração com os sistemas existente;
- Implementação da aplicação em RA com foco na atividade de bloqueio elétrico;
- Implementação da aplicação em RA que permita a leitura próprio ambiente da sala elétrica, desta forma não sendo necessário ou minimizando a instalação das TAGs nos equipamentos elétricos;
- Integração do sistema de localização dos smartphones com a aplicação de tal forma a sugeri para o usuário qual subestação ele está.

Referências Bibliográficas

- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR IEC 61482-2:2016**: Trabalhos sob tensão - Vestimenta de proteção contra os riscos térmicos de um arco elétrico. Parte 2: Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR IEC 61482-1-1:2017**: Trabalhos em tensão - Vestimenta de proteção contra riscos térmicos de um arco elétrico. Parte 1-1: Métodos de ensaio - Método 1: Determinação da resistência ao arco elétrico (ATPV ou EBT50) de materiais resistentes à chama para vestimenta. Rio de Janeiro: ABNT, 2017a.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR IEC 61482-1-2:2017**: Trabalho em tensão - Vestimenta de proteção contra riscos térmicos de um arco elétrico. Parte 1-2: Métodos de ensaio - Método 2: Determinação de classe de proteção ao arco elétrico de material e vestuário utilizando um arco elétrico direcionado e restringido (box test). Rio de Janeiro: ABNT, 2017b.
- ABRACOPEL. **Anuário estatístico de acidentes de origem elétrica 2020 – ano base 2019**. 2020. Disponível em: <http://mkt.abracopel.org.br/w/jereXjpe7Bymp6sjCShe94-3-125e!uid?egu=o0n9udpuxa0w8pau>. Acesso em: 15 mai. 2020.
- ANTONIJEVIĆ, M.; SUČIĆ, S.; KESERICA, H. Augmented reality for substation automation by utilizing IEC 61850 communication. *In: International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO), 39th, 2016, Opatija. Proceedings [...]. [s. l.]: IEEE, 2016. p. 316-320. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/MIPRO.2016.7522159>*
- ARRUDA, R. V. *et al.* Realidade virtual não-imersiva como tecnologia de apoio no desenvolvimento de protótipos para reconstituição de ambientes históricos para auxílio ao ensino. *In: Workshop de Realidade Virtual e Aumentada – WRVA, 8., 2008, Unesp-Bauru. Anais [...]. [S. l.: s. n.]: 2008.*
- ARRUDA, F.; PALHANO, H.; AROUCHA, W.; ESPINDOLA, L.; ABRAHÃO, D.; PINHEIRO, M. Caso: segurança ocupacional em linhas de transmissão–230 KV no Porto de Ponta da Madeira. **Revista de Ciência & Tecnologia**, v. 21, n. 1, p. 47-58, 2018. DOI: <https://doi.org/10.15600/2238-1252/rct.v21n41p45-56>
- AZUMA, R. T. A. Survey of augmented reality. **Presence: Teleoperators and Virtual Environments**, v. 6, n. 4, p. 355-385, 1997. DOI: <https://doi.org/10.1162/pres.1997.6.4.355>
- AZUMA, R. T. Making Augmented Reality a Reality. *In: , 2017, San Francisco, USA. Imaging and Applied Optics*. San Francisco, USA: [s. n.], 2017. p. 26–29. DOI: <https://doi.org/10.1364/3D.2017.JTu1F.1>
- BAHRIN, M. A. K.; OTHMAN, M. F.; AZLI, N. H. N.; TALIB, M. F. Industry 4.0: A review on industrial automation and robotic. **Journal Teknologi**, v. 78, n. 6-13, p.137-143, 2016.

- BARATA, P. N. A.; RIBEIRO FILHO, M.; NUNES, M. V. A. Consolidating learning in power systems: Virtual reality applied to the study of the operation of electric power transformers. **IEEE Transactions on Education**, v. 58, n. 4, p. 255-261, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1109/TE.2015.2393842>
- BARCELOS, M. A.; PERES, I. C. S.; MATTIOLI, L. R.; JÚNIOR, E. L.; CARDOSO, A. Uso de realidade aumentada na visualização de componentes de subestações de energia elétrica. *In: Conferência de Estudos em Engenharia Elétrica, XI, 2013, Santa Mônica. Anais [...]. [S. l.: s. n.], 2016.*
- BERGAMASCHI, M. P. *et al.* O Ensino Básico com o apoio das ferramentas Vuforia e Unity para incentivar os estudos e melhorar o aprendizado. **Revista de Informática Aplicada**, v. 15, n. 1, p. 61-73, 2019.
- BITKOM, e.V.; VDMA, e.V.; ZVEI, e.V. **Implementation strategy industrie 4.0: report on the results of the industrie 4.0 platform**. Frankfurt: BITKOM Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien eV, 2016.
- BLÜMEL, E. Global challenges and innovative technologies geared toward new markets: prospects for virtual and augmented reality. **Procedia Computer Science**, v. 25, p. 4-13, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2013.11.002>
- BRASIL. Exército Brasileiro. **Diretriz para o funcionamento do sistema de simulação do Exército Brasileiro - SSEB**. Brasília, DF: Exército Brasileiro, 2014.
- BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego - MTE. **Manual de orientação para especificação das vestimentas de proteção contra os efeitos térmicos do arco elétrico e do fogo repentino**. Brasília, DF: Ministério do Trabalho e Emprego, 2016.
- BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego - MTE. **Nr6 - Equipamento de Proteção Individual - EPI**. Brasília, DF: Ministério do Trabalho e Emprego, 2018.
- BRASIL. Ministério do Trabalho. **NR-10 - Segurança em instalações e serviços em eletricidade**. Brasília, DF: Ministério do Trabalho, 2019. Disponível em: https://enit.trabalho.gov.br/portal/images/Arquivos_SST/SST_NR/NR-10.pdf. Acesso em: 08 jan. 2020.
- BRUNNER, I. *et al.* Is upper limb virtual reality training more intensive than conventional training for patients in the subacute phase after stroke? An analysis of treatment intensity and content. **BMC Neurology**, v. 16:219, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12883-016-0740-y>
- BURDEA, G.; COIFFET, P. **Virtual Reality Technology**. 2 ed. New York: Wiley-IEEE Press, 2003. 464 p.
- CADICK, J.; CAPELLI-SHELLPFEFFER, M.; NEITZEL, D; WINFIELD, A. **Electrical safety handbook**. 4th ed. USA: McGraw-Hill Education, 2012. 704 p.
- CAMINHA, A. C. **Introdução à proteção dos sistemas elétricos**. São Paulo: Blucher, 1977. 224 p.

- CARDOSO, A.; LAMOUNIER JÚNIOR, E.; KIRNER, C.; KELNER, J. Tecnologias e ferramentas para o desenvolvimento de sistemas de realidade virtual e aumentada. *In*: CARDOSO, A.; KELNER, J.; LAMOUNIER, E.; KIRNER, C. **Tecnologias para o desenvolvimento de sistemas de realidade virtual e aumentada**. Recife: Editora Universitária UFPE, 2007. p. 1-19.
- CARDOSO, A.; LAMOUNIER JÚNIOR, E. A.; BARCELOS, M. A. Ferramentas de apoio ao ensino de componentes de subestações de energia elétrica com uso de realidade virtual e aumentada. **Revista de Iniciação Científica, Tecnológica e Artística**, v. 4, n. 3, p. 1-8, 2014.
- CARDOSO, A.; LAMOUNIER, E.; LIMA, G. Capítulo 14 – Engenharias. *In*: TORI, R.; HOUNSELL, M. S. (ed.). **Introdução a Realidade Virtual e Aumentada**. Porto Alegre: SBC, 2018.
- CARMIGNIANI, J.; FURHT, B.; ANISETTI, M.; CERAVOLO, P.; DAMIANI, E.; IVKOVIC, M. Augmented reality technologies, systems and applications. **Multimedia Tools and Applications**, v. 51, n. 1, p. 341-377, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11042-010-0660-6>
- COPEL. **Norma técnica NTC 903100 – Fornecimento em tensão primária de distribuição**. Curitiba: Companhia Paranaense de Energia (COPEL), 2018. Disponível em: <http://www.copel.com/hpcopel/normas/ntcarquivos.nsf/6ACD0042883FA54D032578DA00606E34/%24FILE/NTC903100.pdf>. Acesso em: 04 set 2020.
- CUPERSCHMID, A. R. M.; AMORIM, J. A.; MATOS, C. E. A. B. Uso de realidade aumentada para treinamento militar. **Revista Militar de Ciência e Tecnologia**, v. XXII, 2º trimestre, p. 5-17, 2015.
- DRASCIC, D.; MILGRAM, P. Perceptual issues in augmented reality. *In*: Conference: SPIE Volume 2653 Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems III, 1996, San Jose. **Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering**. [S. l.: s. n.]: 1996. p. 123-134. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.237425>
- ENGELKE, T.; KEIL, J.; ROJTBERG, P.; WIENTAPPER, F.; SCHMITT, M.; BOCKHOLT, U. Content first - a concept for industrial augmented reality maintenance applications using mobile devices. *In*: IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR), 2013, Adelaide. **Proceedings of the 6th ACM Multimedia Systems Conference**. [s. l.]: IEEE, 2013. p. 251-252. DOI: <https://doi.org/10.1109/ISMAR.2013.6671790>
- FARIA, A.L.; ANDRADE, A.; SOARES, L.; BADIA, S. B. I. Benefits of virtual reality based ceognitive rehabilitation through simulated activities of daily living: a randomized controlled trial with stroke patients. **Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation**, v. 13, n. 1, p. 96, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12984-016-0204-z>
- FERREIRA, A. G. **Uma arquitetura para a visualização distribuída de ambientes virtuais**. 1999. Dissertação (Mestrado em Ciências em Informação) – Pontifícia Universidade Católica do rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1999.

- FIorentino, M.; UVA, A. E.; GATTULLO, M.; DEBERNARDIS, S.; MONNO, G. Augmented reality on large screen for interactive maintenance instructions. *Computers in Industry*. **Computers in Industry**, v. 65, n. 2, p. 270-278, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2013.11.004>
- FLOYD, H. L.; DOAN, D. R.; WU, C. T.; LOVASIC, S. L. Arc flash hazards and electrical safety program implementation. *In: Conference Record of the 2005 Industry Applications Conference, 2005, Kowloon. **Fortieth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2005 Industry Applications Conference***. [s. l.]: IEEE, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1109/IAS.2005.1518709>
- FOLLiOT, D. Efectos fisiológicos de la electricidad. *In: STELLMAN, J. et al. (eds.). **Enciclopedia de Salud y Seguridad en el Trabajo***, 4 ed. Madrid: Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales de España, 1998. p 40.1-40.18.
- GHEISARI, M.; SABZEVAR, M. F.; CHEN, P.; IRIZARRY, J. An augmented panoramic environment to access building information on a construction site. *In: Associated Schools of Construction (ASC) Annual International Conference, 52nd, Provo, 2016. **Proceedings [...]***. [s. l.]: Associated Schools of Construction, 2016.
- GORECKY, D.; SCHMITT, M.; LOSKYLL, M.; ZUHLKE, D. Human-machine-interaction in the industry 4.0 era. *In: International Conference on Industrial Informatics (INDIN), 12th, 2014, Porto Alegre. **Proceedings [...]***. [s. l.]: IEEE, 2014, p.289-294. DOI: <https://doi.org/10.1109/INDIN.2014.6945523>
- GREUTER, S. *et al.* Designing a game for occupational health and safety in the construction industry. *In: Australasian Conference on Interactive Entertainment: Playing the System, 2012, [s. l.]. **Proceedings [...]***. [s. l.]: ACM Digital Library, 2012. p. 1-8. DOI: <https://doi.org/10.1145/2336727.2336740>
- GRILO, L.; MONICE, S.; SANTOS, E. T.; MELHADO, S. Possibilidades de aplicação e limitações da realidade virtual na arquitetura e na construção civil. *In: Simpósio Brasileiro de Gestão da Qualidade do Trabalho no Ambiente Construído (SIBRAGEQ 2001), II, 2001, Fortaleza. **Anais [...]***. CD-ROM, 2001.
- GUANGWEI, Y. A. N.; GUAN, Z. Scene graph organization and rendering in 3D substation simulation system. *In: Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2009, Wuhan. **Proceedings [...]***. [s. l.]: IEEE, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1109/APPEEC.2009.4918731>
- GUYTON, A. C.; HALL, J. E. **Tratado de fisiologia médica**. 10. ed. Rio de Janeiro: Guanabara, 2002.
- HERMANN, M.; PENTEK, T.; OTTO, B. Design principles for industrie 4.0 scenarios: a literature review. *In: Annual Hawaii International Conference on System Sciences, 49th, 2016, Koloa. **Proceedings [...]***. [s. l.]: IEEE, 2016. p. 3928-3937. DOI: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.29269.22248>

- HERNÁNDEZ, Y.; PÉREZ-RAMÍREZ, M. Architecture of an intelligent training system based on virtual environments for electricity distribution substations. **Research in Computing Science**, v. 129, p. 63-70, 2016. DOI: <https://doi.org/10.13053/rcs-129-1-7>
- HOFMANN, E.; RÜSCH, M. Industry 4.0 and the current status as well as future prospects on logistics. **Computers in Industry**, v. 89, p. 23-24, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2017.04.002>
- KILDERMANN, G. **Choque elétrico**. Porto Alegre: Sagra, 1995.
- KIRNER, C.; SISCOOTTO, R. Fundamentos de realidade virtual e aumentada. *In*: KIRNER, C.; SISCOOTTO, R. (eds.). **Symposium on Virtual and Augmented Reality**, IX, 2007, Petrópolis. [S. l.: s. n.], 2007.
- LAVIOLA JÚNIOR, J. J.; KRUIJFF, E.; BOWMAN, D. A.; POUPYREV, I; MCMAHAN, R. P. **3D User Interfaces: Theory and Practice**. 2 ed. [s. l.]: Addison-Wesley Professional, 2017.
- LEE, R. The other electrical hazard: electrical arc blast burns. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 1A-18, n. 3, pp. 246-251, 1982. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIA.1982.4504068>
- LEE J.; BAGHERI, B.; KAO, H. A. Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. **Manufacturing Letters**, v. 3, p. 18-23, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2014.12.001>
- LIN, F.; YE, L.; DUFFY, V.; SU, C. Developing virtual environments for industrial training. **Information Sciences**, v. 140, p. 140. 153-170, 2002. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0020-0255\(01\)00185-2](https://doi.org/10.1016/S0020-0255(01)00185-2)
- LORENSEN, W. E.; CLINE, H. E. Marching cubes: A high resolution 3D surface construction algorithm. *In*: Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, 14th, 1987, Anaheim. **Proceedings** [...]. New York: Association for Computing Machinery, 1987. p. 163-169. DOI: <https://doi.org/10.1145/37401.37422>
- LOURENÇO, S. R.; SILVA, T. A. F.; SILVA FILHO, S. C. Um estudo sobre os efeitos da eletricidade no corpo humano sob a égide da saúde e segurança do trabalho. **Exacta**, v. 5, n. 1, p. 135-143, 2007. DOI: <https://doi.org/10.5585/exacta.v5i1.1043>
- MACHADO, L. S.; MORAES, R. M.; NUNES, F. L. S.; COSTA, R. M. E. M. Serious games baseados em realidade virtual para educação médica. **Revista Brasileira de Educação Médica**, v. 35, n. 2, p. 254-262, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-55022011000200015>
- MACHADO, C G.; WINROTH, M. P.; SILVA, E. H. D. R. Sustainable manufacturing in Industry 4.0: an emerging research agenda. **International Journal of Production Research**, v. 58, n. 5, p. 1462-1484, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1652777>

- MAMEDE FILHO, J. **Manual de equipamentos elétricos**. 3 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2005. 778 p.
- MAMEDE FILHO, J. **Instalações Elétricas Industriais**. 9 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2010. 976 p.
- MARCOLIN, N. Rotas da Eletricidade. **Pesquisa FAPESP**, v. 118, p. 8-9, dez. 2020. Disponível em: <https://revistapesquisa.fapesp.br/wp-content/uploads/2005/12/08-09-memoria.pdf>. Acesso em: 10 fev. 2020.
- MARTINEZ, F.; JIRSAK, P.; LORENC, M. Industry 4.0. The end lean management? *In: International Days of Statistics and Economics*, 10th, 2016, Praga. **Anais [...]**. [S. l.: s. n.], 2016. Disponível em: https://msed.vse.cz/msed_2016/article/118-Martinez-Felipe-paper.pdf. Acesso em: 08 ago. 2020.
- MATTIOLI, L. R. **Uma proposta de um procedimento para a geração semiautomática de ambientes virtuais para subestações de energia elétrica**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2015.
- MEKNI, M.; LEMIEUX, A. Augmented reality: applications, challenges and future trends. *In: ZAHARIM, A.; SOPIAN, K.; PSARRIS, K.; MARGENSTERN, M. (eds.). International Conference on Applied Computer and Applied Computational Science (ACACOS'14)*, 13th, 2014, Kuala Lumpur. **Proceedings [...]**. [s. l.]: WSEAS press, 2014. p. 205-214.
- MNUKWA, S.; SAHA, A. K. SCADA and substation automation systems for the port of durban power supply upgrade. *In: International SAUPEC/RobMech/PRASA Conference*, 2020, Cape Town. **Proceedings [...]**. [s. l.]: IEEE, 2020. p. 1-5. DOI: <https://doi.org/10.1109/SAUPEC/RobMech/PRASA48453.2020.9041078>
- MULLEN, T. **Prototyping augmented reality**. Indianapolis: Sybex, 2011. 280p.
- NEE, A.; ONG, S.; CHRYSSOLOURIS, G.; MOURTZIS, D. Augmented reality applications in design and manufacturing. **CIRP Annals – Manufacturing Technology**, v. 61, n. 2, p. 657-679, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2012.05.010>
- NFPA 70E-2015. **Standard for electrical safety requirements for employee workplaces**. 2015.
- OKAPUU-VON VEH, A.; MARCEAU, R. J.; MALOWANY, A.; DESBIENS, P.; DAIGLE, A.; GARANT, E.; GAUTHIER, R.; SHAIKH, A.; RIZZI, J. C. Design and operation of a virtual reality operator-training system. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 11, n. 3, p. 1585-1591, 1996. DOI: <https://doi.org/10.1109/59.535701>
- OZTEMEL, E.; GURSEV, S. Literature review of Industry 4.0 and related technologies. **Journal of Intelligent Manufacturing**, v. 31, n. 1, p. 127-182, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10845-018-1433-8>
- PENG, Y.; DING, L.; XU, Z.; JIANG, Y.; CHEN, J. Design and development of intelligent operation and maintenance training system for substation based on augmented reality. *In:*

- Chinese Automation Congress (CAC), 2017, Jinan. **Proceedings** [...]. [s. l.]: IEEE, 2018. p. 4765-4769. DOI: <https://doi.org/10.1109/ITNEC.2017.8285087>
- PERES, I. C.; SILVA, A. C.; MATTIOLI, L. R.; CARDOSO, A.; LAMOUNIER, E. A.; LIMA, G. F. M. Modelagem e elaboração de componentes de ambientes virtuais relacionados com subestações de energia elétrica. *In: Workshop de Realidade Virtual e Aumentada, 2013, Jataí. Anais* [...]. [S. l.: s. n.], 2013. DOI: <https://doi.org/10.13140/2.1.3268.9441>
- PERES, F. F. F.; SCHEER, S.; FARIA, E. F. . A taxonomy of tasks in dam cracks surveillance for augmented reality application. **International Journal of Advanced Engineering Research and Science**, v. 5, n. 10, p. 179-184, 2018. DOI: <https://doi.org/10.22161/ijaers.5.10.24>
- PTC. **Vuforia developer library in getting started website**. Disponível em: <https://library.vuforia.com/getting-started/overview.html>. Acesso em: 24 abr. 2020.
- QUEIROZ, A. R. S.; SENGER, E. C. A natureza e os riscos do arco elétrico, EPIs e proteção contra arco elétrico. **O Setor Elétrico**, ed. 72, capítulo I, 2012. p. 46- 51. Disponível em: <http://www.osestoreletrico.com.br/web/a-revista/fasciculos.html#catid72>. Acessado em: 10 jan. 2020.
- RODRIGUES, G. P; PORTO, C.M. Realidade virtual: conceitos, evoluções, dispositivos e aplicações. **Interfaces Científicas – Educação**, v. 1, n. 3, p. 97-109, 2013. DOI: <https://doi.org/10.17564/2316-3828.2013v1n3p97-109>
- RODRIGUES, S. M.; CASTELO, J. S. F. Aplicação de realidade aumentada em um produto: intenção de compra e segmentação psicográfica. *In: Congresso Latino-Americano de Varejo, 12., 2019, [s. l.]. Anais* [...]. [s. l.]: FGV SB, 2019.
- ROMERO, D.; STAHR, J.; WUEST, T.; NORAN, O.; BERNUS, P.; FAST-BERGLUND, A.; GORECKY, D. Towards an operator 4.0 typology: a human-centric perspective on the fourth industrial revolution Technologies. *In: International Conference on Computers & Industrial Engineering (CIE46), 2016, Tianjin. Proceedings* [...]. Nova York: Curran Associates, Inc., 2017. p. 1-11.
- RÜBMAN, M. *et al.* **Industry 4.0: the future of productivity and growth in manufacturing industries**. Alemanha: The Boston Consulting Group (BCG), 2015. 16 p.
- SENAI. **Curso básico de segurança em instalações e serviços em eletricidade: riscos elétricos**. Brasília: SENAI DN, 2005. 158 p.
- SILVA, A. *et al.* Uso da Engine de Jogos Unity3D para Sistemas de Realidade Virtual Aplicado a Monitoramento e Controle de Subestações de Energia Elétrica. *In: Workshop de Realidade Virtual e Aumentada (WRVA), 2013, Jataí. Anais* [...]. 2013. [S. l.: s. n.], 2013. DOI: <https://doi.org/10.13140/2.1.1696.0807>
- SOUZA, S. S.; MICHALOSK, A. O. A norma regulamentadora nº10 e a sua aplicação em instalações elétricas e seus entornos. **Revista Técnico-Científica do CREA-PR**, v. 5, n. 6, 2017. p. 1-8.

- SOUZA-JUNIOR, V. D. *et al.* VIDA-Enfermagem v1.0: realidade virtual imersiva na coleta de sangue a vácuo em adulto. **Revista Latino-Americana de Enfermagem**, Ribeirão Preto, v. 28, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/1518-8345.3685.3263>
- TORRES FILHO, F.; VIEIRA, M. F. Q.; SOARES, W. L. F. Processo para o desenvolvimento de cenários de treinamento para ambientes virtuais 3D. *In: Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente*, XI, 2013, Fortaleza. **Anais [...]**. [S. l.: s. n.], 2013. Disponível em: <http://www.sbai2013.ufc.br/pdfs/5751.pdf>. Acesso em: 26 jun. 2020.
- VASCONCELLOS, A. S.; HERNANDES, L. Aplicação de Metodologia BIM no Projeto e Construção de Grandes Subestações. *In: Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*, 2015, Foz do Iguaçu. **Anais [...]**. [S. l.: s. n.], 2015.
- VIEIRA, S. I. **Manual de saúde e segurança do trabalho** – segurança, higiene e medicina do trabalho. vol. 3. São Paulo: LTr, 2005.
- WEBSTER, A; FEINER, S; MACINTYRE, B; MASSIE, W; KRUEGER, T. Augmented reality in architectural construction, inspection, and renovation. *In: ASCE Congress for Computing in Civil Engineering*, 3th, 1996, [s. l.]. **Proceedings [...]**. [S. l.: s. n.], 1996.
- WEXELBLAT, A. Chapter 2 - The Reality of Cooperation: Virtual Reality and CSCW. **Virtual Reality – Applications and Explorations**, p. 23-44, 1993. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-745045-2.50010-6>
- WIEDERHOLD, B.; BOUCHARD, S. **Advances in virtual reality and anxiety disorders**. New York: Springer, 2014. 287 p.
- YAN, G.; ZHANG, L.; WANG, Y. Research and implementation of the auto-generating system of three-dimensional substation simulation scene. *In: International Conference on Intelligent Computing and Intelligent Systems*, 2010, Xiamen. **Proceedings [...]**. [s. l.]: IEEE, 2020. p. 768-771. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICICISYS.2010.5658335>