

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
GOIÁS - CAMPUS ITUMBIARA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

ERICK NASCIMENTO DE OLIVEIRA

**USO DE REALIDADE VIRTUAL APLICADA NO TREINAMENTO DE
MANUTENÇÃO EM UMA SUBESTAÇÃO ABRIGADA**

ITUMBIARA - GO
2024



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
SISTEMA INTEGRADO DE BIBLIOTECAS

TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| ☐ Tese | ☐ Artigo Científico |
| ☐ Dissertação | ☐ Capítulo de Livro |
| ☐ Monografia – Especialização | ☐ Livro |
| ☒ TCC - Graduação | ☐ Trabalho Apresentado em Evento |
| ☐ Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor: Erick Nascimento de Oliveira.

Matrícula: 20181040070150.

Título do Trabalho: Uso de realidade virtual aplicada no treinamento de manutenção em uma subestação abrigada.

Autorização - Marque uma das opções

1. (☒) Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso aberto);
2. (☐) Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG somente após a data ____/____/____ (Embargo);
3. (☐) Não autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso restrito).

Ao indicar a opção **2 ou 3**, marque a justificativa:

- (☐) O documento está sujeito a registro de patente.
(☐) O documento pode vir a ser publicado como livro, capítulo de livro ou artigo.
(☐) Outra justificativa: _____

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

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

Itumbiara-GO, 21/11/2024.

Local Data



Documento assinado digitalmente

ERICK NASCIMENTO DE OLIVEIRA

Data: 22/11/2024 14:31:29-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

ERICK NASCIMENTO DE OLIVEIRA

**USO DE REALIDADE VIRTUAL APLICADA NO TREINAMENTO DE
MANUTENÇÃO EM UMA SUBESTAÇÃO ABRIGADA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à banca examinadora do curso de Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás - Campus Itumbiara, como parte dos requisitos necessários para obtenção do diploma de graduação.

Orientador: Prof. Marcelo Escobar de Oliveira.

ITUMBIARA - GO
2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

O48u Oliveira, Erick Nascimento de
 Uso de realidade virtual aplicada no treinamento de
 manutenção em uma subestação abrigada. / Erick Nascimento de
 Oliveira -- Itumbiara, 2024.
 89p. : il.

 Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Elétrica) -
 Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás,
 Câmpus Itumbiara, 2024.

 Orientador: Prof. Dr. Marcelo Escobar de Oliveira.

 1. Subestações elétricas 2. Realidade virtual. 3.
 Treinamento. I. Título. II. Oliveira, Marcelo Escobar de. IV.
 Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

CDD 621.3191

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
Biblioteca Maria Gabriela Pacheco Pardey / Câmpus Itumbiara
Bibliotecário: Rosiane Gonçalves de Lima CRB1/1684



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CÂMPUS ITUMBIARA

TERMO DE APROVAÇÃO

ERICK NASCIMENTO DE OLIVEIRA

USO DE REALIDADE VIRTUAL APLICADA NO TREINAMENTO DE MANUTENÇÃO EM UMA SUBESTAÇÃO ABRIGADA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás – Câmpus Itumbiara, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado, em 15 de Julho de 2024, pela banca examinadora constituída pelos seguintes membros:

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Marcelo Escobar de Oliveira - Orientador
Instituto Federal de Goiás, Câmpus Itumbiara

Prof. Dr. Josemar Alves dos Santos Júnior
Instituto Federal de Goiás, Câmpus Itumbiara

Dr. Leonardo Garcia Marques
Instituto Federal de Goiás, Câmpus Itumbiara

Me. Gesmar de Paula Santos Júnior
Instituto Federal de Goiás, Câmpus Itumbiara

Itumbiara – GO
2024

Documento assinado eletronicamente por:

- **Leonardo Garcia Marques, ANALISTA DE TEC DA INFORMACAO**, em 16/07/2024 15:24:26.
- **Gesmar de Paula Santos Junior, TEC DE TECNOLOGIA DA INFORMACAO**, em 16/07/2024 15:01:00.
- **Josemar Alves dos Santos Junior, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 16/07/2024 14:58:24.
- **Marcelo Escobar de Oliveira, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 16/07/2024 14:56:41.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 15/07/2024. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifg.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 543263

Código de Autenticação: c460feb7ae



Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
Avenida Furnas, nº 55, None, Bairro Village Imperial, ITUMBIARA / GO, CEP 75524-010
(64) 2103-5622 (ramal: 5622)

AGRADECIMENTOS

Quando iniciei minha jornada na faculdade, confesso que as dificuldades pareciam intransponíveis. Vindo de uma educação básica fragilizada, sentia que as ferramentas que possuía eram insuficientes para lidar com as exigências acadêmicas que se colocavam diante de mim. Houve momentos em que pensei em desistir, o cansaço me consumia. Parecia que eu precisava estudar o dobro, com metade do tempo disponível devido às responsabilidades do trabalho. No entanto, foi nesse cenário desafiador que encontrei o suporte de amigos que se tornaram verdadeiros mestres, e por isso sou imensamente grato.

Esses amigos, com paciência e generosidade, estenderam a mão nos momentos em que eu mais precisei! Foram mais do que professores; tornaram-se verdadeiras inspirações ao longo dessa jornada. Compartilharam conhecimento, me orientaram e, acima de tudo, acreditaram no meu potencial, transformando o que parecia inalcançável em algo possível. Sem o apoio incondicional de cada um de vocês — Edson Candido, Marcos Paulo e Yuri Rocha — nada disso teria sido concretizado. A vocês, meus mestres e companheiros de caminhada, minha mais profunda e sincera gratidão.

À minha esposa, que esteve ao meu lado em cada passo dessa caminhada, agradeço pela paciência, pelo amor e por ser a minha maior companheira. Não foram poucas as noites em que a exaustão quase me venceu, mas você, com sabedoria e carinho, me ajudou a conectar as ideias e a construir o raciocínio que dá forma a este trabalho. Seu apoio emocional e intelectual foi essencial, e sou eternamente grato por cada conversa, por cada palavra de encorajamento e por seu amor inabalável.

Gostaria de expressar minha profunda gratidão à minha família, que nunca deixou de acreditar em mim e sempre me deu o apoio necessário para continuar. Mesmo diante da minha ausência frequente, enquanto conciliava trabalho e estudos, vocês sempre demonstraram compreensão e paciência. Por todas as vezes em que não pude estar presente, sou imensamente grato. O amor e o suporte de vocês são o alicerce de tudo o que construí até aqui.

Não poderia deixar de expressar minha gratidão ao meu orientador, que, com seu profissionalismo e dedicação, foi muito mais que um guia acadêmico. Juntos, desenvolvemos projetos que me permitiram crescer, não apenas como estudante, mas como ser humano. Sua orientação foi fundamental para que este trabalho pudesse ser concluído com sucesso, e por isso, deixo aqui meu mais sincero agradecimento.

Também quero expressar minha gratidão aos Laboratórios Maker do IFG e ao GRVA da Universidade Federal de Uberlândia, onde dediquei grande parte do meu tempo à realização deste projeto. Esses ambientes foram cruciais para o desenvolvimento das ideias que compõem este trabalho, oferecendo as condições ideais para experimentação, inovação e crescimento. Sou imensamente grato a todos que fazem parte desses laboratórios pelo apoio e pela disponibilidade, que foram essenciais para o êxito desta pesquisa, com menção especial a Eric Dias, Yuri Cirino e Flávio Rosa.

A cada um de vocês que, de alguma forma, contribuiu ao longo dessa trajetória, deixo meu sincero e profundo agradecimento. Sem o suporte de cada um, esse sonho jamais teria se concretizado.

RESUMO

As indústrias energéticas enfrentam desafios significativos no treinamento de profissionais para operar em ambientes perigosos, devido a restrições operacionais, falta de experiência prática e elevados custos associados aos métodos tradicionais de treinamento. A complexidade técnica e os riscos envolvidos frequentemente tornam os treinamentos convencionais inadequados, o que pode resultar em erros e acidentes. No contexto de um aumento nos acidentes elétricos, e observando a necessidade de manter a conformidade com as normas de segurança estabelecidas, a utilização da Realidade Virtual (RV) surge como uma solução promissora. Dessa forma, o presente trabalho tem como objetivo desenvolver um ambiente imersivo em Realidade Virtual para a capacitação de profissionais em subestações elétricas abrigadas, oferecendo um treinamento seguro e realista sem os riscos e custos associados atrelados às práticas tradicionais. A justificativa para o uso da RV reside na sua capacidade de simular com precisão situações de trabalho, permitindo a realização de ensaios elétricos e a visualização de equipamentos sem a necessidade de desenergizar sistemas reais ou interromper o fornecimento de energia. A metodologia empregada envolveu a modelagem 3D de uma subestação elétrica utilizando o *software Blender*, e a criação do ambiente virtual com a *engine Unity*. O desenvolvimento seguiu o padrão Modelo-Visão-Controlador (MVC) para organizar e gerenciar as interações dentro da simulação. A simulação foi configurada para permitir que os usuários realizem os testes de resistência de isolamento, relação de transformação, resistência de contato e resistência ôhmica nos seguintes equipamentos: transformador de força, transformador de corrente, transformador de potencial, disjuntor e chave seccionadora, seguindo instruções detalhadas e recebendo *feedback* imediato sobre suas medições. Os resultados descrevem o desenvolvimento da simulação de maneira precisa e em conformidade com as normas técnicas do mercado, permitindo o treinamento de diversos procedimentos de manutenção. Sendo assim, o produto apresentado pode futuramente contribuir para a redução de acidentes de trabalho, melhora da eficiência operacional e promoção de uma formação profissional contínua e de qualidade no setor energético.

Palavras-chave: Treinamento. Subestação elétrica. Ambientes perigosos. Realidade virtual. Simulação.

ABSTRACT

The energy industries face significant challenges in training professionals to operate in hazardous environments due to operational restrictions, lack of practical experience, and high costs associated with traditional training methods. The technical complexity and associated risks often make conventional training inadequate, which can result in errors and accidents. In light of the increase in electrical accidents and the need to comply with established safety standards, the use of Virtual Reality (VR) emerges as a promising solution. Therefore, this work aims to develop an immersive Virtual Reality environment for training professionals in Enclosed Electrical Substations, providing safe and realistic training without the risks and costs associated with traditional practices. The justification for using VR lies in its ability to accurately simulate work situations, allowing for electrical tests and equipment visualization without the need to de-energize real systems or interrupt power supply. The methodology employed involved 3D modeling of an electrical substation using Blender software and creating the virtual environment with the Unity engine. The development followed the Model-View-Controller (MVC) pattern to organize and manage interactions within the simulation. The simulation was configured to allow users to perform insulation resistance tests, transformation ratio tests, contact resistance tests, and ohmic resistance tests on the following equipment: power transformer, current transformer, potential transformer, circuit breaker, and disconnect switch, following detailed instructions and receiving immediate feedback on their measurements. The results describe the development of the simulation accurately and in compliance with market technical standards, enabling the training of various maintenance procedures. Therefore, the presented product may contribute in the future to reducing workplace accidents, improving operational efficiency, and promoting continuous and high-quality professional training in the energy sector.

Keywords: Training. Electrical substation. Hazardous environments. Virtual reality. Simulation.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	9
2. JUSTIFICATIVA.....	10
3. OBJETIVOS.....	12
3.1. Objetivo Geral.....	12
3.2. Objetivos Específicos.....	12
4. TRABALHOS RELACIONADOS.....	13
5. REALIDADE VIRTUAL.....	17
5.1. Unity.....	18
5.2. Oculus Quest 2.....	19
6. SUBESTAÇÃO ELÉTRICA.....	21
6.1. Classificação das SE's.....	21
6.2. Equipamentos da Subestação.....	24
6.3. Equipamentos de Medição.....	29
7. SUBESTAÇÃO MODELO.....	33
8. MODELAGEM.....	38
8.1. Busca de referências.....	39
8.2. Modelo de baixa resolução.....	40
8.3. Abertura da malha.....	41
8.4. Modelo de alta resolução.....	42
8.5. Transferência de detalhes.....	43
8.6. Pintura.....	44
8.7. Modelos desenvolvidos.....	46
9. ENSAIOS.....	50
9.1. Ensaios no transformador de força.....	54
9.2. Ensaios na chave seccionadora.....	61
9.3. Ensaios no disjuntor.....	64
9.4. Ensaios no transformador de potencial e no transformador de corrente.....	68
10. ARQUITETURA DE SOFTWARE.....	73
11. SOFTWARE DESENVOLVIDO.....	75
11.1. Construção do ambiente 3D.....	75
11.2. Fluxo de trabalho.....	80
11.3. Comportamento do software.....	84
12. CONCLUSÃO.....	86
12.1. Considerações finais.....	86
12.2. Trabalhos futuros.....	86
REFERÊNCIAS.....	88

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, as indústrias energéticas enfrentam desafios na capacitação de profissionais para ambientes perigosos ou de difícil acesso, decorrentes de restrições, falta de experiência e riscos iminentes. De acordo com Gomes (2017), essas dificuldades são agravadas pela necessidade de equipamentos especializados e trabalhadores qualificados, além de elevados custos para possibilitar treinamento adequado. O autor ainda destaca a insuficiência do treinamento tradicional para preparar profissionais em ambientes perigosos.

Conforme explicitado por Brown (1995), a percepção correta dos riscos em ambientes perigosos é crítica para a garantia da segurança, especialmente em setores como o elétrico, o de mineração e os de extração de petróleo e gás.

A falta de vivência prática durante o treinamento em subestações elétricas pode resultar em erros graves (Liao; Niu; Wang, 2017). No entanto, os avanços tecnológicos das últimas décadas oferecem soluções inovadoras para esses desafios (Fidelis; Oliveira, 2013).

Nesse contexto, a Realidade Virtual (RV) emerge como uma solução pertinente e promissora para treinamento em ambientes perigosos, proporcionando exposição a situações de risco sem perigos reais e sem a necessidade de equipamentos dispendiosos (Cardoso *et al.*, 2013).

Na engenharia, a RV é aplicada com sucesso em simulações industriais e para diversos tipos de treinamento (Checa e Bustillo, 2020). Sendo assim, destaca-se sua relevância nas subestações elétricas, onde a presença de equipamentos de alta tensão exige manuseamento com precisão.

Dessa forma, capacitar profissionais que atuam em subestações elétricas é essencial para garantir a segurança das operações, sendo demasiadamente importante considerar o uso de tecnologias de Realidade Virtual para a implementação de treinamentos imersivos, que simulam de modo preciso e seguro os ambientes e condições de trabalho, eliminando a exposição desnecessária a inúmeros riscos durante o processo de capacitação.

2. JUSTIFICATIVA

A Norma Técnica Brasileira - NBR 5410 (2004) define a periodicidade para a realização de manutenções em instalações elétricas, visando garantir a segurança e a conformidade das instalações, como especificado no item 8 da norma. As empresas devem possuir um documento técnico que ateste a conformidade das suas instalações elétricas com as normas de segurança vigentes. Esse documento faz parte do Prontuário de Instalações Elétricas (PIE), que reúne todas as informações necessárias para a gestão da segurança elétrica nas instalações.

De acordo com a Associação Brasileira de Conscientização para os Perigos da Eletricidade - ABRACOPEL (2023), ocorreram 458 acidentes envolvendo choques elétricos no ano de 2022, e em 2023 esse número subiu para 521, com aumento do número de mortes de 330, em 2022, para 350, em 2023.

Outra notícia marcante foi publicada no Portal da Cidade (2022): “Técnico de subestação elétrica morre durante atividade de recomposição de carga [...] A empresa confirma que houve interrupção no fornecimento de energia à distribuidora local, em razão de uma falha em um disjuntor”.

Nesse cenário, a capacitação de profissionais para operar em subestações é urgente e preocupante. A realização de manutenção preventiva em subestações deve seguir diretrizes de segurança rigorosas, como as estabelecidas pela NBR 14039 (2004) e pela NR-10 (2004).

Apesar da indiscutível importância da capacitação profissional, o treinamento para atuação no setor elétrico enfrenta desafios. Um deles é a complexidade técnica envolvida, que exige não apenas conhecimentos teóricos, mas também habilidades práticas específicas.

Para treinamentos práticos, os profissionais podem escolher entre duas alternativas. A primeira é realizar o treinamento no próprio ambiente de trabalho, desenergizando os equipamentos, e a segunda é frequentar escolas especializadas em treinamento.

Na primeira opção, desligar o setor pode não ser ideal, pois o desligamento de uma subestação para fins de treinamento implica um custo elevado para a concessionária. Em 2022, as concessionárias brasileiras pagaram 783 milhões de reais em compensações aos consumidores devido a interrupções no fornecimento de energia (Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, 2023).

Quanto à segunda opção, os campos de treinamento especializados também exigem investimento inicial elevado, já que é necessário ter uma variedade de dispositivos específicos para simular com precisão as diversas situações e condições que os técnicos enfrentam em

campo. Além disso, a manutenção contínua desses dispositivos gera custos adicionais com peças de reposição, atualizações tecnológicas e instrutores especializados.

Dessa maneira, o uso da Realidade Virtual se destaca, pois permite simular uma ampla gama de situações que os profissionais enfrentarão em campo, eliminando a necessidade de altos investimentos em equipamentos físicos e espaços exclusivos, facilitando ainda a atualização dos cenários de treinamento, que podem acompanhar possíveis mudanças nas normas de segurança e frequentes inovações tecnológicas.

Ademais, a RV possibilita o desenvolvimento de ambientes controlados e seguros para o treinamento, evitando interrupções no fornecimento de energia e, principalmente, perdas humanas.

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo Geral

Partindo-se da argumentação apresentada, o presente trabalho tem por objetivo a criação de um ambiente imersivo em Realidade Virtual, para ser usado na capacitação segura de profissionais que operam em subestações elétricas abrigadas.

3.2. Objetivos Específicos

- Pesquisar trabalhos relacionados, que abordam o tema de simulações em subestações elétricas;
- Pesquisar e escolher um modelo de subestação elétrica abrigada, atentando-se às normas que regem o funcionamento e medição dos equipamentos;
- Modelar os seguintes equipamentos em 3D, utilizando o *software Blender*: transformador de força, transformador de corrente, transformador de potencial, disjuntor e chave seccionadora;
- Estudar boas práticas de programação, a fim de alinhar o projeto às normas básicas de desenvolvimento;
- Importar os equipamentos modelados para o *software Unity*, criando um ambiente virtual;
- Programar as funcionalidades de cada equipamento na *Unity* utilizando a linguagem C#;
- Simular a utilização do megômetro para medir a resistência de isolamento dos componentes: transformador de força, de potencial e de corrente, disjuntor e chaves seccionadoras;
- Simular a utilização do microhmímetro para medir baixas resistências de contato em conexões e barramentos;
- Simular a utilização do ratiômetro para medir a relação de transformação entre as bobinas dos transformadores;
- Criar uma interface didática para guiar o usuário quanto à utilização adequada da simulação.

4. TRABALHOS RELACIONADOS

Diversos estudos investigam o uso da RV na simulação de cenários reais de operação e manutenção. Esses estudos oferecem uma base teórica e prática fundamental para o desenvolvimento desta pesquisa. Tanaka et al. (2023), apresenta um ambiente colaborativo em RV para o treinamento de eletricitistas da Companhia Paranaense de Energia (COPEL), como ilustrado na Figura 1.

Figura 1: Simulação de Atividades Diárias de um Eletricista da COPEL

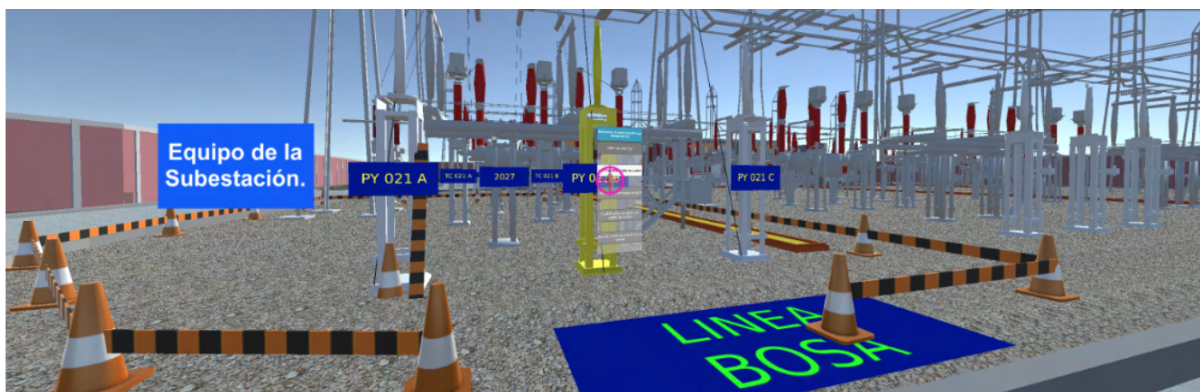


Fonte: Tanaka *et al.*, 2023.

Esse ambiente permite aos aprendizes a prática realista e segura, minimizando a eminente carência de treinamentos que simulem as situações diárias enfrentadas pelos eletricitistas. O trabalho também destaca a importância da segurança no trabalho, incluindo o uso correto de Equipamentos de Proteção Individual (EPI) e Equipamentos de Proteção Coletiva (EPC), além de implementar um sistema de penalidades baseado no Programa de Proteção à Vida (LPP).

Os pesquisadores Lerner *et al.* (2020) examinaram um simulador focado no treinamento de operadores para a execução de tarefas de alto risco, como em redes elétricas de alta voltagem, mostrado na Figura 2.

Figura 2: Simulação de Operação e Manutenção em Subestação Elétrica aberta.

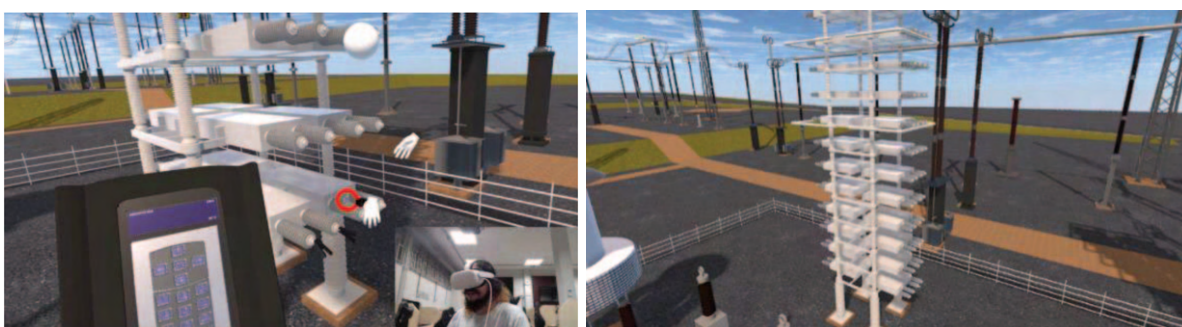


Fonte: Lerner *et al.*, 2020.

O objetivo da simulação analisada era minimizar riscos, despesas e interrupções no sistema, e os resultados indicaram usabilidade aceitável, imersão satisfatória e boa média na pontuação dos participantes, evidenciando, apesar da necessidade de aprimoramentos adicionais, a adequação do sistema para a capacitação profissional em ambientes com perigo de acidente elétrico.

Em Neto *et al.* (2024), apresenta-se o desenvolvimento de um sistema de treinamento para operadores de subestações elétricas utilizando técnicas de Realidade Virtual com suporte a multiusuários. O sistema foi testado em um cenário de treinamento de manutenção de banco de capacitores, destacando a importância da colaboração e segurança no treinamento em equipe.

Figura 3: Simulação de operações na subestação CEMIG



Fonte: Neto *et al.*, 2024.

Este sistema foi projetado para replicar as condições reais de operação e manutenção de subestações elétricas, que são atividades de alto risco devido aos elevados níveis de potência e voltagem envolvidos. O uso de VR permite que os treinandos interajam de forma

colaborativa em um ambiente virtual que simula as dinâmicas de trabalho em subestações, utilizando dispositivos como o Quest Pro para criar uma experiência imersiva.

O artigo “A Natural and Intuitive Virtual Environment for Monitoring and Control of Electric Power Substations” apresenta um sistema de monitoramento e controle de subestações elétricas utilizando Realidade Virtual. Este sistema oferece uma interface tridimensional intuitiva que supera as limitações das interfaces bidimensionais tradicionais, proporcionando uma imersão física e cognitiva mais alinhada com as operações de campo.

O ambiente virtual desenvolvido permite que engenheiros e operadores visualizem e interajam com plantas de processos de maneira segura, simulando operações e situações perigosas sem riscos reais para equipamentos e pessoal. Além de ser uma ferramenta eficaz para o treinamento de operadores, o sistema possibilita a realização de experimentos e simulações que vão além do escopo das aulas tradicionais, como mostrado na Figura 4.

Figura 4: Sistema de controle e monitoramento em Realidade Virtual.



Fonte: Cyrino *et al.*, 2022.

O desenvolvimento do sistema inclui a modelagem tridimensional dos objetos reais que compõem as subestações e a integração com o Sistema de Supervisão e Aquisição de Dados (SCADA), o que permite a leitura e o processamento em tempo real do status dos equipamentos. O sistema oferece diversos modos de navegação, incluindo terceira pessoa, primeira pessoa, visão superior e visão livre.

A Virtual Engenharia se especializa na criação de soluções de Realidade Virtual voltadas para treinamento e ensino, com um enfoque particular no setor elétrico. A solução principal da empresa é o GTD Virtual, uma plataforma que possibilita a simulação de operações e situações de risco em subestações elétricas, como mostrado na Figura 5. Este sistema é empregado na personalização de treinamentos, permitindo a modelagem virtual das

instalações e a gamificação das atividades para melhorar o engajamento e a retenção de conhecimento de operadores e técnicos.

Figura 5: GTD Virtual



Fonte: Cyrino *et al.*, 2022.

O GTD Virtual oferece uma ampla gama de operações de manutenção em subestações, alinhando-se estreitamente com o trabalho desenvolvido neste projeto. Através dessa plataforma, os usuários podem realizar treinamentos de manutenção de forma segura e eficiente, replicando condições reais e mitigando riscos associados a operações de campo.

Uma revisão de Checa e Bustillo (2020) catalogou de maneira abrangente jogos sérios em Realidade Virtual, com foco na avaliação das metodologias de aprendizado e treinamento, como mostrado na Tabela 1.

Tabela 1: Impacto dos jogos analisados para a educação e treinamento

	Conclusão	Educação	Treinamento
1	A realidade virtual melhora demonstravelmente o aprendizado	30%	29%
2	Perspectivas positivas da pesquisa (estudo preliminar)	12%	21%
3	Potencial de aprendizado confirmado (não comparado com outros métodos de aprendizado)	33%	36%
4	A realidade virtual é equivalente ao método tradicional em sala de aula	6%	0%
5	A realidade virtual não é aceitável para melhorar o aprendizado	6%	5%
6	Nenhuma conclusão significativa inferida	3%	0%
7	Nenhuma medição de aprendizado aprimorado ou melhoria de habilidades	10%	9%

Fonte: Adaptado Checa e Bustillo, 2020.

Foram analisadas 135 propostas de jogos sérios, validadas por usuários finais. Dentre elas, 86% dos estudos voltados para treinamentos apresentaram resultados favoráveis, demonstrando a eficácia dos jogos sérios na formação profissional e educacional. Esse elevado índice de aprovação por parte dos usuários destaca o potencial dessa metodologia para melhorar os processos de ensino e capacitação, oferecendo uma abordagem mais interativa e envolvente para o desenvolvimento de competências.

5. REALIDADE VIRTUAL

A Realidade Virtual (RV) é um campo emergente de estudos, que se destaca pela capacidade de criar experiências imersivas e interativas através de ambientes digitais tridimensionais. Diversas definições sobre o que constitui a RV podem ser encontradas na literatura, enfatizando aspectos diferentes da tecnologia e da experiência do usuário.

Conforme Tori e Kirner (2006), a Realidade Virtual é uma interface de usuário sofisticada que permite o acesso a aplicações executadas no computador. Suas principais características são a visualização e a navegação em ambientes tridimensionais em tempo real, além da interação com elementos dentro desse ambiente. Ademais, a experiência do usuário pode ser aprimorada pelo estímulo de outros sentidos, como o tato e a audição.

De outro modo, a Realidade Virtual pode ser descrita de forma mais simples, destacando a experiência do usuário. Segundo Jerald (2015), RV é um ambiente digital gerado por computador que o usuário pode explorar de maneira interativa, reproduzindo aspectos do mundo real.

A realidade virtual se apoia em três pilares fundamentais, conforme Lanier (2017): imersão, interatividade e sensação de presença. A Imersão refere-se à capacidade de envolver os sentidos do usuário, criando a impressão de estar em um ambiente distinto. Isso é alcançado por meio de dispositivos como headsets de realidade virtual, que empregam elementos visuais e sonoros tridimensionais para simular um ambiente realista.

Interatividade é a capacidade do usuário de agir de forma natural no ambiente virtual, podendo manipular objetos e se deslocar pelo espaço. Tecnologias como controladores de movimento e rastreamento corporal aumentam essa capacidade, proporcionando uma experiência mais dinâmica e envolvente.

A sensação de presença diz respeito à percepção de estar efetivamente "dentro" do ambiente virtual, sendo resultado da combinação bem-sucedida de imersão e interatividade.

Ela depende de fatores como qualidade gráfica, sonora, baixa latência e precisão dos dispositivos de controle.

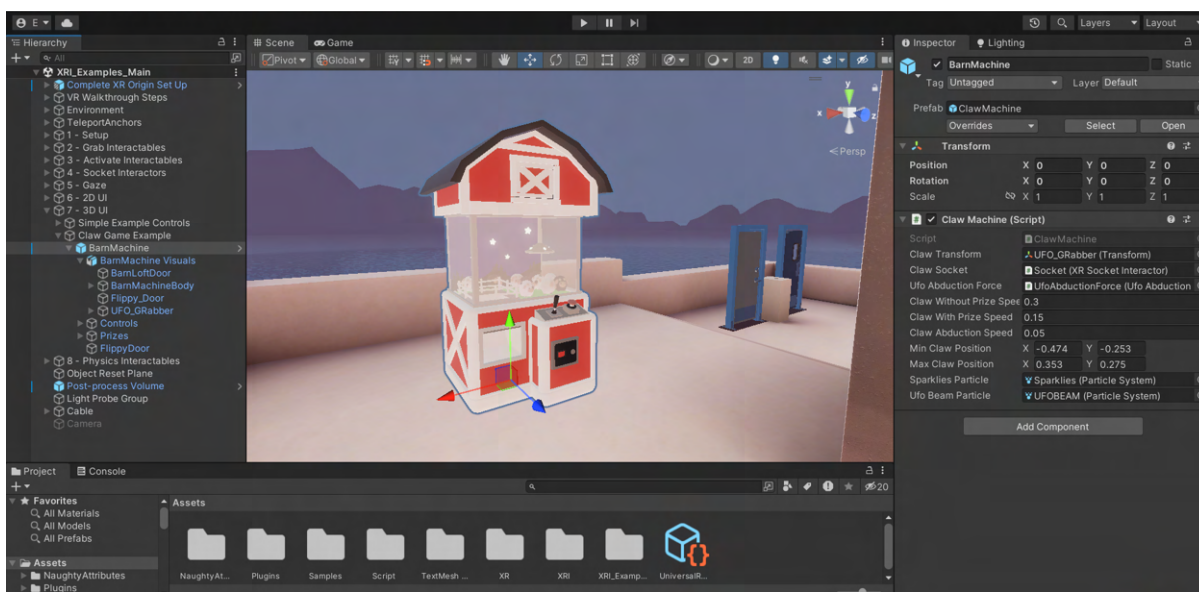
Esses três pilares se complementam e, juntos, formam a base para experiências de realidade virtual que são não apenas tecnicamente avançadas, mas também altamente imersivas e emocionalmente impactantes. O avanço contínuo dessas tecnologias abre portas para que a realidade virtual se torne uma ferramenta ainda mais poderosa e acessível, com aplicações em áreas como entretenimento, educação, treinamento profissional e terapia.

Assim, para criar um ambiente de realidade virtual com essas características, foi utilizada a plataforma Unity para desenvolver o cenário, e o Oculus Quest 2 como equipamento de reprodução para o usuário. O objetivo foi projetar e implementar um ambiente de Realidade Virtual que simula o funcionamento de uma subestação elétrica abrigada.

5.1. Unity

A *Unity* é uma das plataformas de desenvolvimento de jogos e simulações, amplamente utilizada para criar experiências de Realidade Virtual. Desenvolvida pela *Unity Technologies* (2024), a *Unity* oferece um ambiente de desenvolvimento integrado (IDE) e um poderoso motor gráfico que suportam a criação de conteúdos 2D, 3D, RV e RA (Realidade Aumentada), como mostrado na Figura 6.

Figura 6: *Unity*



Fonte: *Unity Technologies*, 2024.

Entre as principais vantagens da Unity estão sua flexibilidade e acessibilidade, sendo compatível com uma ampla variedade de dispositivos. Segundo Checa e Bustillo (2020), a Unity tem se consolidado como o motor de jogos mais utilizado nas áreas de educação e treinamentos.

A linguagem de programação usada na *Unity* é o C#, uma linguagem orientada a objetos robusta e moderna. Ela permite que o desenvolvedor crie *scripts* para controlar o comportamento de objetos e eventos, oferecendo diversas facilidades para implementação de interface, mecânica e física de objetos.

5.2. *Oculus Quest 2*

O Oculus Quest 2, desenvolvido pela Meta (2024), é um dispositivo de Realidade Virtual que inclui um headset e controles manuais, como mostrado na Figura 7. O headset conta com um par de lentes e diversos sensores que rastreiam os movimentos da cabeça do usuário, projetando uma cena virtual que se ajusta conforme esses movimentos.

Figura 7: *Oculus Quest 2*



Fonte: Meta, 2024.

Um aspecto que contribui fortemente na imersão proporcionada pelo *Oculus Quest 2* são as suas lentes, que projetam imagens ligeiramente diferentes em cada olho para criar uma sensação de profundidade semelhante à visão binocular humana. Além disso, o *headset* cobre todo o campo de visão do usuário, de forma que ele visualize apenas o ambiente virtual gerado pelo dispositivo, bloqueando qualquer interferência do seu ambiente real.

O *Oculus Quest 2* utiliza uma combinação de sensores e tecnologia de rastreamento que permitem mapear o ambiente ao redor do usuário, permitindo que ele se mova livremente dentro do espaço virtual. Para mais, os controladores manuais do dispositivo são ergonômicos e viabilizam interações precisas com os objetos do ambiente virtual.

6. SUBESTAÇÃO ELÉTRICA

Uma Subestação Elétrica (SE) é um conjunto de equipamentos e sistemas projetados para ajustar diferentes níveis de tensão e corrente elétrica. Seu propósito é assegurar a distribuição de energia elétrica gerada em usinas para níveis adequados aos consumidores finais. Para isso, além dos transformadores, a subestação inclui os elementos necessários para a comutação, proteção, monitoramento e controle do fluxo de energia.

6.1. Classificação das SE's

Conforme apontado por Souza (2023) e Gebran (2013), a subestação elétrica pode ser classificada de acordo com sua função, seu nível de tensão, o tipo de instalação que possui, e a forma que opera, como mostrado nas Tabelas 2, 3, 4 e 5.

Tabela 2: Classificação por função

Subestação Elevadora	Localizadas na saída das usinas geradoras. Sua função é elevar a tensão para níveis adequados de transmissão, sendo fundamental para o transporte econômico da energia elétrica, pois as altas tensões reduzem as perdas por efeito <i>Joule</i> .
Subestação Abaixadora	Localizadas nas adjacências das cidades, as subestações abaixadoras reduzem os níveis de tensão para valores adequados ao consumo urbano. Essa redução é importante para garantir a segurança da população.
Subestação de Distribuição	Localizadas em bairros urbanos, áreas industriais, hospitais e grandes edifícios. Elas reduzem a tensão elétrica para níveis adequados ao fornecimento direto para os consumidores finais.
Subestação de Manobra	Responsáveis pelo chaveamento de linhas de transmissão, as subestações de manobra possibilitam a conexão e o controle dos circuitos de suprimento. Elas permitem seccionar trechos de menor comprimento, facilitando a manutenção e a operação do sistema de transmissão elétrica.
Subestação Conversora	Realizam a conversão de corrente alternada para corrente contínua e vice-versa, permitindo a transmissão de energia em longas distâncias com menores perdas, devido à ausência da histerese. Essas subestações são especialmente importantes em projetos que envolvam a transmissão de energia entre regiões ou países diferentes, com sistemas elétricos distintos.

Fonte: Adaptado de Souza, 2023 e Gebran, 2013.

Tabela 3: Classificação por nível de tensão

Subestação de Baixa Tensão	até 1 kV
Subestação de Média Tensão	de 1 a 66 kV
Subestação de Alta Tensão	de 69 a 230 kV
Subestação de Extra-Alta Tensão	de 230 a 800 kV
Subestação de Ultra-Alta Tensão	mais que 800 kV

Fonte: Adaptado de Souza, 2023 e Gebran, 2013.

Tabela 4: Classificação por forma de operação

Subestação com operador	Demanda uma equipe com alto nível de treinamento para sua operação, sendo viável a utilização de sistemas computacionais para supervisão e controle local apenas em instalações de grande escala.
Subestação Semi-Automática	Equipadas com computadores locais ou intertravamentos eletromecânicos, essas subestações previnem operações incorretas por parte dos operadores, garantindo maior segurança.
Subestação Automatizada	São monitoradas e controladas remotamente através de sistemas computacionais, eliminando a necessidade de operadores no local.

Fonte: Adaptado de Souza, 2023 e Gebran, 2013.

Tabela 5: Classificação por tipo de instalação

Subestação ao Tempo ou Externa	São instaladas ao ar livre, diretamente expostas às condições climáticas locais. Exigem equipamentos robustos para resistir a intempéries como chuva, sol, vento, raios e poluição (Figura 8 - a).
Subestação Abrigada	São instaladas dentro de construções em alvenaria ou abrigos metálicos, protegendo os equipamentos de intempéries. Com identificação e acesso restrito, essas subestações são comuns em ambientes industriais, empresas e edifícios comerciais ou residenciais (Figura 8 - b).
Subestação Blindada	Todos os componentes são encapsulados em invólucros isolantes, protegendo-os de condições ambientais adversas como poeira e umidade. Ocupam menos espaço, oferecem maior segurança e requerem menos manutenção que as demais, devido à proteção dos equipamentos. Porém, sua implementação tem maior custo (Figura 8 - c).
Subestação Aérea	Conhecidas como subestações simplificadas, são comuns em edificações de pequeno porte, atendidas por concessionárias locais. Possuem transformadores montados em postes e são ideais para fornecer energia em áreas onde a instalação de grandes subestações não é viável (Figura 8 - d).

Fonte: Adaptado de Souza, 2023 e Gebran, 2013.

Figura 8: Exemplo de subestação (a) ao tempo, (b) abrigada em alvenaria, (c) blindada a gás e (d) aérea

(a)



(b)



(c)



(d)



Fonte: (a) Serra Dourada News, 2020; (b) Energiza, 2015; (c) TS Infraestrutura, 2020 e (d) Mesh Engenharia, 2022.

A classificação detalhada dessas subestações, com base em função, tensão, operação e instalação, reflete a complexidade e a diversidade de aplicações que elas possuem no sistema elétrico. Isso garante que diferentes demandas energéticas sejam atendidas de maneira adequada, com soluções específicas para cada tipo de ambiente e necessidade operacional.

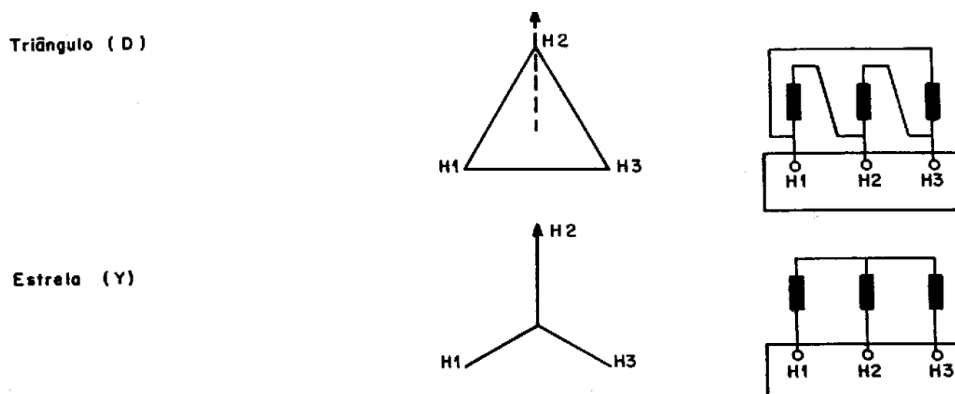
6.2. Equipamentos da Subestação

- Transformador de força

O transformador de força, é uma máquina estática que transfere energia elétrica entre dois ou mais circuitos através de indução eletromagnética, podendo alterar os níveis de tensão e corrente elétrica. Seu funcionamento se baseia na Lei de Faraday (Lei da Indução Eletromagnética), que descreve como uma mudança no fluxo magnético pode induzir corrente em um fio. Sua estrutura é composta por enrolamentos em torno de um núcleo de material ferromagnético.

Em vista disso, é possível encontrar diferentes conexões nas bobinas dos transformadores, como delta (Δ) e estrela (Y) conforme a Figura 9. A configuração delta permite equilíbrios de carga, maior capacidade de potência, sendo ideal para sistemas de transmissão de alta potência. Já a configuração estrela facilita o aterramento do neutro, oferece uma tensão fase-neutro para alimentação de cargas monofásicas, e resulta em menores correntes de linha, sendo preferida em sistemas de distribuição.

Figura 9: Ligações delta e estrela no transformador



Fonte: NBR 5356-1, 2010.

Os transformadores são os componentes de maior valor monetário na subestação abrigada, e podem ser classificados conforme o meio isolante utilizado: líquidos ou a seco (Lucena, 2023). Na Figura 10, é mostrado um transformador a seco com isolamento de resina epóxi, utilizando uma conexão em Delta no lado de alta tensão, e uma estrela aterrada no lado de baixa tensão.

Figura 10: Transformador de força a seco



Fonte: WEG, 2024.

Os transformadores a seco costumam ser mais econômicos, pois utilizam o próprio ar para fazer o resfriamento, dissipando o calor gerado durante a operação. Por outro lado, transformadores com líquidos isolantes geralmente utilizam óleo mineral, atuando em duas

funções essenciais: evitar a formação de arcos elétricos entre os condutores e resfriar o equipamento, sendo assim mais eficientes.

- Transformador de corrente (TCs)

Os transformadores de corrente, como mostrado na Figura 11, são utilizados para reduzir altas correntes para valores adequados para medição e proteção, permitindo que equipamentos como amperímetros, relés, medidores de energia e potência funcionem corretamente sem a necessidade de serem dimensionados para correntes nominais elevadas (Mamede Filho, 2024).

Figura 11: Transformador de corrente



Fonte: Zilmer, 2024.D

Na sua estrutura fundamental, um Transformador de Corrente (TC) consiste em um enrolamento primário e um enrolamento secundário. O enrolamento primário tem poucas espiras e conduz a corrente elevada do circuito. Em contraste, o enrolamento secundário possui muitas espiras. Dessa forma, a corrente no secundário é limitada a, no máximo, 5 Amperes, de acordo com a norma NBR 6856 (2021).

- Transformador de potencial (TPs)

Os transformadores de potencial, como mostrado na Figura 12, são utilizados para reduzir os níveis de tensão do sistema elétrico a valores padronizados, que podem ser facilmente lidos e processados por multímetros, relés de tensão, bobinas de tensão e

medidores de energia. Assim como TCs, os TPs têm um enrolamento primário conectado ao sistema de alta tensão, e um enrolamento secundário com o qual se obtém a tensão reduzida (Mamede Filho, 2024).

Figura 12: Transformador de potencial



Fonte: Zilmer, 2024.

Os TPs e os TCs operam com base nos mesmos princípios de indução eletromagnética: a tensão no enrolamento primário gera um fluxo magnético que induz uma tensão proporcional no enrolamento secundário. Os valores nominais de tensão nos enrolamentos primário e secundário dos TPs são padronizados, sendo comum o uso de TPs com tensões secundárias de 115 V no Brasil. Conforme a NBR 6855 (2018), sua classe de exatidão deve ser de 0.3 V.

- Disjuntor

Os disjuntores são os equipamentos responsáveis por interromper e restabelecer correntes elétricas em pontos específicos de um circuito. Disjuntores de média tensão funcionam em conjunto com equipamentos de medição, interrompendo o fornecimento de energia ao detectar qualquer falha significativa na sua área de proteção, sendo, dessa forma, a principal defesa contra falhas elétricas.

Na Figura 13, é apresentado um disjuntor de média tensão da fabricante ABB, de um modelo específico classificado para 36 kV, do tipo fixo.

Figura 13: Disjuntor de média tensão



Fonte: ABB, 2024.

No interior do disjuntor, existe uma câmara de extinção de arco elétrico que permite seu acionamento sob carga de maneira segura. Ele possui um sistema de molas que, quando comprimidas, mantém os contatos do disjuntor unidos. Em caso de falha elétrica, o sistema de proteção detecta a anomalia e envia um sinal para abrir o disjuntor, descomprimindo as molas. Essa liberação força a separação dos contatos, interrompendo o fluxo de corrente e protegendo o sistema contra danos maiores.

- Chave seccionadora

A chave seccionadora é um dispositivo utilizado para isolar seções específicas de um circuito elétrico. Sua principal função é permitir a interrupção ou restabelecimento do fluxo de corrente, garantindo a segurança durante atividades de manutenção, reparo ou inspeção. Diferentemente de um disjuntor, que pode interromper correntes de curto-circuito e sobrecargas, a chave seccionadora não possui essa capacidade de proteção, sendo utilizada exclusivamente para isolar partes sem carga do circuito.

Na Figura 14, exibe uma chave seccionadora tripolar com acionamento simultâneo e elo fusível:

Figura 14: Chave seccionadora



Fonte: Sarel, 2013.

O acionamento simultâneo das três fases garante que todas sejam conectadas ou desconectadas ao mesmo tempo, evitando desbalanceamentos e possíveis falhas. O elo fusível integrado fornece uma camada adicional de proteção, atuando em caso de sobrecorrente para proteger os equipamentos conectados contra danos por curto-circuito ou sobrecarga.

6.3. Equipamentos de Medição

- Megômetro

No ambiente de uma subestação, o megômetro é frequentemente usado durante testes de rotina para identificar possíveis pontos fracos no isolamento, que poderiam causar falhas elétricas ou choque. A medição é realizada aplicando uma alta tensão no componente em teste, para em seguida aferir a corrente resultante, possibilitando o cálculo da resistência de isolamento.

Um megômetro típico, como mostrado na Figura 15, possui três conexões principais: ponto de tensão (T), retorno (R) e *guard* (G). A garra de tensão (T) é conectada ao condutor ativo ou circuito do equipamento a ser testado, enquanto a garra de terra (E) é conectada ao ponto de referência potencial zero. A garra de *guard* (G) é usada para eliminar a influência de correntes parasitas.

Figura 15: Megômetro



Fonte: Instrum do Brasil Indústria Eletrônica, entre 2005 e 2024.

- *Transformer Turn Ratio (TTR)*

O *Transformer Turn Ratio* (TTR), ou Medidor de Relação de Espiras de Transformador, é usado para medir a relação de espiras em transformadores, como mostrado na Figura 16. A relação de espiras, ou relação de transformação, é a proporção entre o número de voltas no enrolamento primário e no enrolamento secundário de um transformador.

Figura 16: *Transformer Turn Ratio* (TTR)



Fonte: Tequipment, 2024.

O TTR é composto por quatro cabos: dois destinados ao enrolamento primário e dois ao enrolamento secundário do transformador. Os cabos H1 e H2 são utilizados para aplicar

tensão no enrolamento primário, enquanto os cabos X1 e X2 são conectados ao enrolamento secundário.

A funcionalidade dessa medição é identificar problemas de fabricação, desgastes ou danos internos no transformador, e o teste consiste em aplicar uma tensão conhecida ao enrolamento primário, para então medi-la no enrolamento secundário. Com esse valor, é calculada a relação de transformação.

Considerando um transformador com o fechamento de alta tensão em triângulo e o enrolamento de baixa tensão em estrela, o cálculo da relação de transformação é feito por:

$$R_n = \frac{U_1}{U_2} \cdot \sqrt{3},$$

onde U_1 = Tensão primária (V); U_2 = Tensão secundária (V) e R_n = Relação de transformação.

- Microhmímetro

Resistências de contato elevadas podem causar pontos quentes e acelerar a deterioração de componentes metálicos, resultando em danos ao equipamento. O microhmímetro, como mostrado na Figura 17, é capaz de medir resistências extremamente baixas, na ordem de micro ohms ($\mu\Omega$).

Figura 17: Microhmímetro



Fonte: Megabras, 2023.

Ademais, o microhmímetro também pode ser usado para medir a resistência das bobinas, possibilitando identificar divergências nos valores de resistência ôhmica propostos pelo fabricante, a fim de prevenir o início de curtos ou desgaste do isolamento.

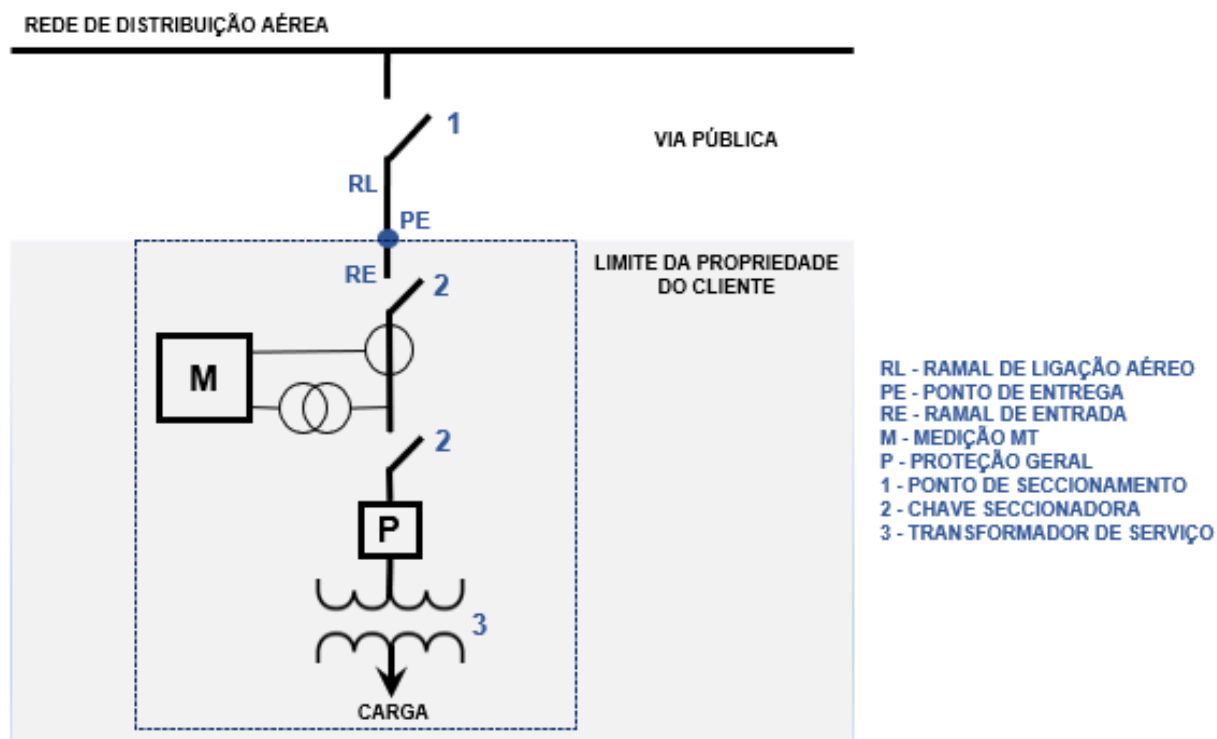
7. SUBESTAÇÃO MODELO

Diversos tipos de subestação foram anteriormente apresentados. Dentre eles, a subestação abrigada foi escolhida como modelo para a realização do presente trabalho, servindo como referência prática a uma subestação que o usuário encontrará na sua realidade.

O modelo apresentado é uma subestação de distribuição, abrigada em alvenaria, com operação manual, e equipada com um transformador trifásico que converte tensões de 13.8 kV para 380/220 V. Essa subestação não possui limite de potência especificado, e se baseia no documento “Fornecimento de Energia Elétrica em Tensão Primária de Distribuição até 34.5 kV”, disponibilizado pela Enel (2021). Esse documento estabelece diretrizes e especificações para o fornecimento de energia elétrica nesse nível específico de tensão, podendo haver pequenas variações entre diferentes concessionárias.

O diagrama unifilar, mostrado na Figura 18, ilustra a configuração e os principais componentes da subestação:

Figura 18: Diagrama unifilar



Fonte: Enel, 2021.

O diagrama unifilar mostra o fluxo de potência, que vem da rede de distribuição aérea, passa pelo ponto de seccionamento, pelo ramal de ligação aéreo, em seguida pelo ponto de entrega, e então pelo ramal de entrada. É interessante ressaltar que o ponto de seccionamento é de acesso restrito da concessionária, por isso, seu desligamento deve ser agendado previamente.

Na parte interna da subestação, a energia chega então à primeira chave seccionadora, que dá acesso ao cubículo de medição. Esse cubículo, como mostrado nas Figuras 19 e 20, é equipado com transformador de potencial e transformador de corrente, equipamentos de medição identificados na Tabela 6. O ambiente deve ser delimitado por paredes de concreto até o teto, e o portão deve ter o selo da concessionária.

Em seguida, a energia chega à segunda chave seccionadora, e então é direcionada para o cubículo de proteção (Figuras 19 e 20), que é delimitado por paredes de alvenaria e possui uma grade de proteção na parte frontal. Esse setor abriga os equipamentos de média tensão responsáveis pela proteção geral do sistema: disjuntor principal, transformador de corrente da proteção e transformador de potencial, usado para iluminação da subestação. É importante acrescentar que nesse espaço, a chave seccionadora deve ter o acionamento manual com bloqueio do tipo kirk.

Finalmente, a energia chega ao cubículo do transformador (Figuras 19 e 20), delimitado por paredes de alvenaria e equipado com grades de proteção na parte frontal. Esse cubículo é destinado exclusivamente à instalação do transformador de serviço e seus acessórios.

A Tabela 6 apresenta a legenda de todos os componentes construtivos da subestação modelo:

Tabela 6: Identificação e legenda dos elementos na subestação modelo

item	Descrição
1	Isolador de suspensão tipo bastão
2	Bucha de passagem
3	Suporte para bucha de passagem
4	Barramento de cobre
5	Chave seccionadora tripolar com acionamento simultâneo
6	Transformador de corrente da medição
7	Transformador de potencial da medição
8	Suporte metálico para instalação dos TCs e TPs da medição
9	Eletrodutos de ferro galvanizado para os condutores de medição
10	Transformador de corrente da proteção
11	Transformador de potencial da proteção
12	Disjuntor Geral
13	Caixa de medição
14	Isolador tipo pedestal
15	Haste de aterramento
16	Janela de ventilação permanente do tipo chicana, com grade metálica, no lado externo
17	Janela com vidraça fixa para iluminação, com grade metálica, no lado externo
18	Suporte para isolador pedestal
19	Iluminação de emergência
20	Porta de chapa metálica de acesso a subestação de entrada de energia
21	Porta de tela metálica de acesso ao cubículo de medição
22	Anteparo de tela metálica, articulável e removível, dotado de trinco e batente.
23	Placa de advertência com os dizeres “Perigo de Morte” e o respectivo símbolo (Indicar na porta de acesso a SEE, na porta de acesso ao cubículo de medição, na grade de acesso ao disjuntor e transformador)
24	Placa de advertência com os dizeres "Atenção - Esta chave não deve ser manobrada em carga" (Indicar na chave seccionadora)
25	Painel do sistema de proteção da subestação de entrada de energia

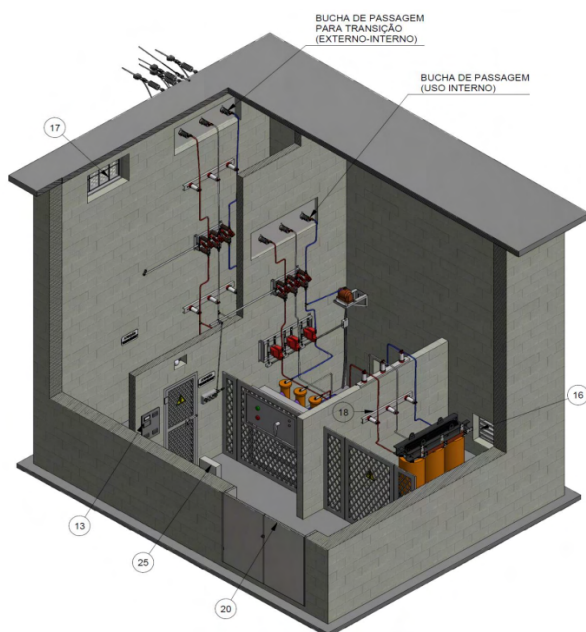
Fonte: Adaptado de Enel, 2021.

Conforme explicitado na NBR 14.039 (2004), os barramentos devem ser fixados sobre isoladores, e deve ser seguida a seguinte convenção de cores para identificação:

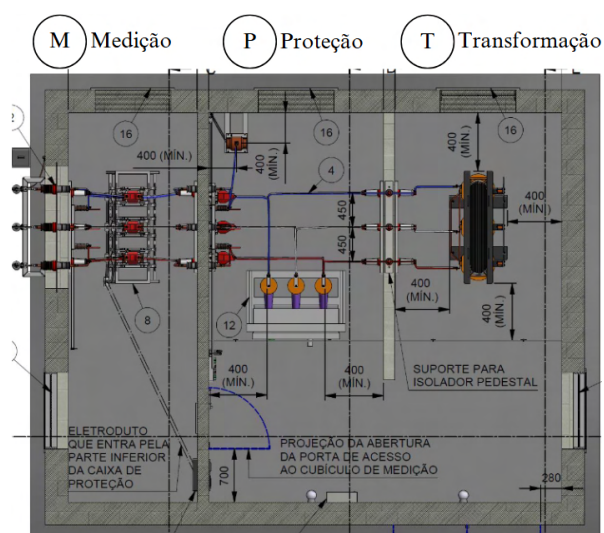
- Fase A – Vermelho;
- Fase B – Branco;
- Fase C – Marrom;
- PEN – Azul Claro;
- Terra – Verde ou Amarelo.

Figura 19: (a) vista ortogonal e (b) vista superior

(a)



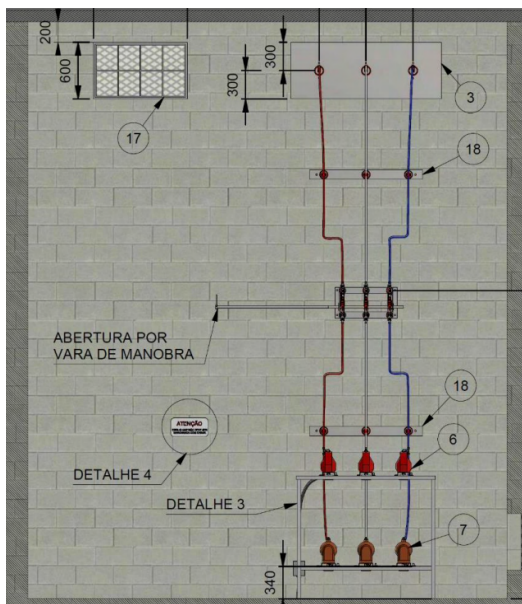
(b)



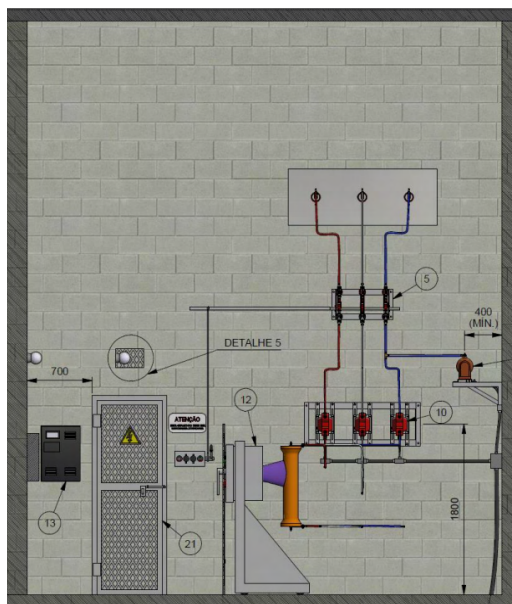
Fonte: Enel, 2021.

Figura 20: (a) cubículo de medição, (b) cubículo de proteção e (c) cubículo de transformação

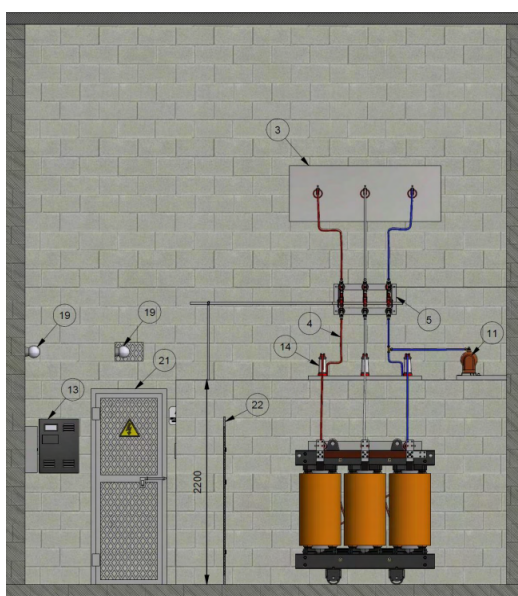
(a)



(b)



(c)



Fonte: Enel, 2021.

Em suma, optou-se por utilizar uma subestação abrigada como modelo neste estudo devido à maior facilidade de simular um ambiente fechado em relação a um ambiente aberto. Contudo, as discussões e os procedimentos apresentados ao longo deste trabalho abrangem, em sua maior parte, práticas aplicáveis à maioria das subestações.

8. MODELAGEM

Um modelo 3D é uma representação digital tridimensional de um objeto. Estes modelos são construídos a partir de pontos no espaço conectados por várias entidades geométricas, como arestas e faces. Essas entidades formam uma malha (ou “*mesh*”) que define a forma do objeto.

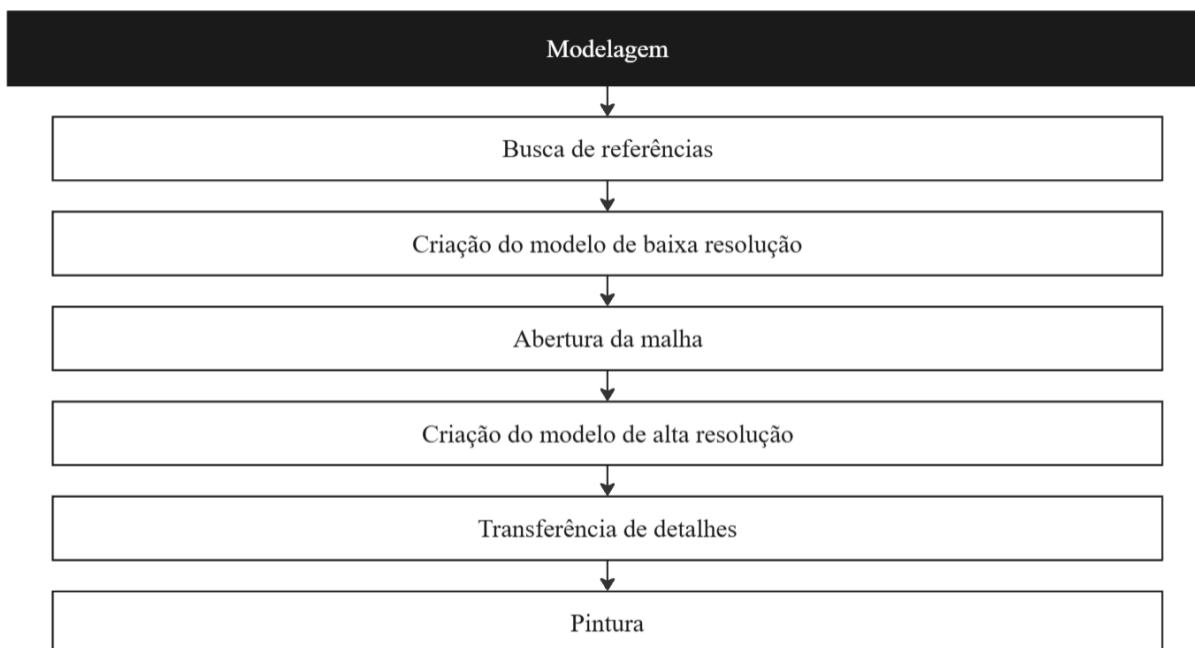
Neste trabalho, foi utilizado o *Blender* (2024), um *software* de modelagem 3D, de código aberto, que oferece uma ampla gama de ferramentas para criação, animação, texturização e renderização. Ele é amplamente utilizado na indústria de animação, jogos, simulação e, mais recentemente, na engenharia e arquitetura.

O *Blender* possibilita uma forma de modelagem chamada modelagem por vértices, permitindo total controle sobre a quantidade e a disposição dos polígonos que compõem a malha do modelo 3D. Essa configuração é crucial para otimizar o desempenho do objeto modelado em *hardwares* com capacidade de processamento limitada, como o *Oculus Quest 2*, pois a quantidade de polígonos está diretamente relacionada à demanda por processamento.

Outros *softwares* de modelagem 3D, em contrapartida, frequentemente geram modelos com uma quantidade fixa ou automática de polígonos, limitando o controle do usuário sobre a densidade da malha e, conseqüentemente, sobre o desempenho e a otimização do modelo para diferentes aplicações. Isso acontece com a maior parte dos *softwares* voltados para CAD e engenharia, como *Revit*, *SolidWorks*, *SketchUp* e *Fusion 360*.

A Figura 21 descreve as diversas etapas do processo de modelagem 3D. Inicialmente, a fase de "Busca de referências" é crucial, pois envolve a coleta de materiais visuais e informações relevantes que servirão de base para a criação do modelo. Em seguida, passa-se para a "Criação do modelo de baixa resolução", onde um modelo inicial com menor quantidade de detalhes e uma malha mais simples é desenvolvido. .

Após a criação do modelo de baixa resolução, ocorre a "Abertura da malha", que é o processo de preparar a superfície do modelo para a aplicação de texturas. A seguir, entra-se na fase de "Criação do modelo de alta resolução", onde detalhes mais finos e precisos são adicionados, aumentando a qualidade visual do modelo. A "Transferência de detalhes" então assegura que as características do modelo de alta resolução sejam aplicadas ao de baixa resolução, otimizando o desempenho sem perder qualidade. Finalmente, o processo culmina com a "Pintura", onde as texturas e cores são aplicadas, conferindo realismo e finalizando o modelo 3D.

Figura 21: Processo de Modelagem dos Equipamentos.

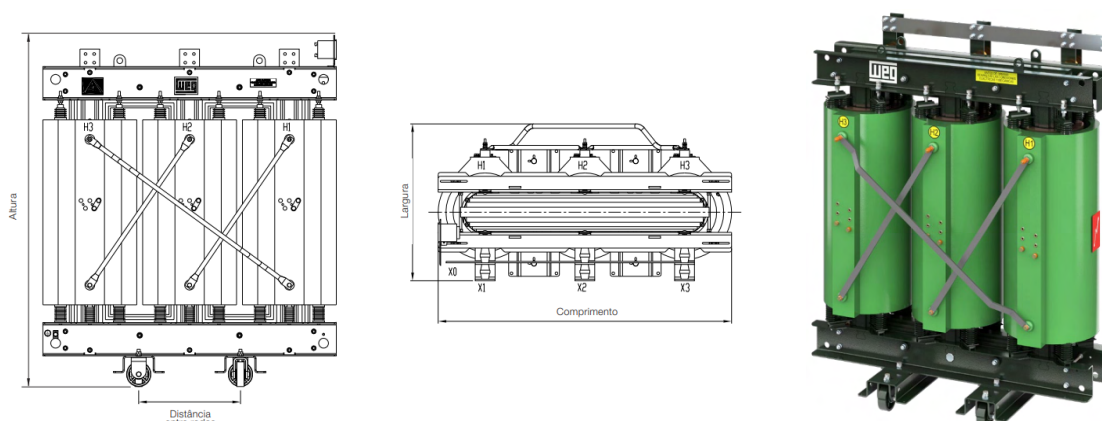
Fonte: Autoria própria, 2024.

8.1. Busca de referências

Para o desenvolvimento do trabalho, a etapa de modelagem se iniciou com a coleta de imagens de referência. Essas referências são utilizadas para construir os equipamentos nas dimensões corretas e com texturização adequada, garantindo maior semelhança com os exemplares encontrados em campo.

A escolha dos equipamentos a serem modelados foi baseada na coerência com o nível de tensão requerido, e na disponibilidade de imagens de referência em qualidade e quantidade satisfatórias, como ilustrado na Figura 22.

Figura 22: Imagens usadas como referência para o transformador a seco

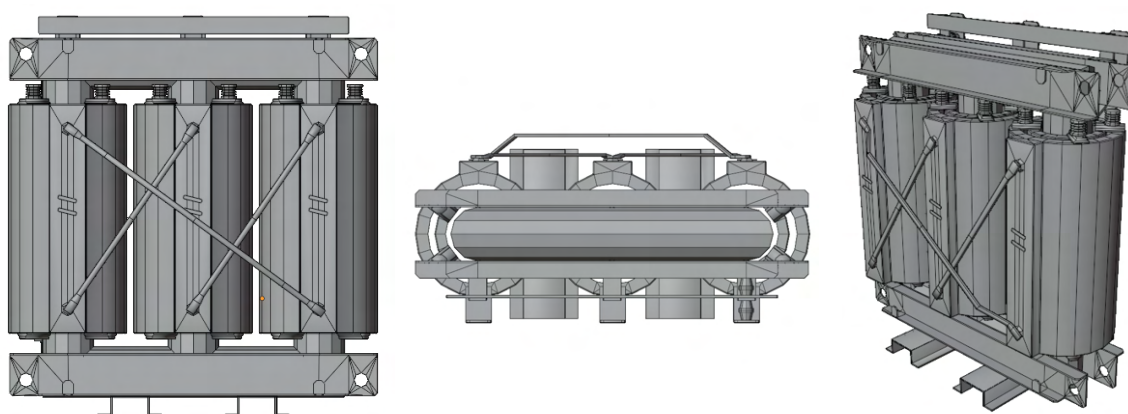


Fonte: WEG, 2024.

8.2. Modelo de baixa resolução

Com as imagens de referência em mãos, o passo seguinte foi desenvolver o modelo no *Blender*, um processo feito com a atenção de se utilizar a menor quantidade possível de polígonos, mantendo a forma do objeto. Esse modelo é chamado de *Low Poly*, como mostrado na Figura 23.

Figura 23: Modelo *Low Poly* do transformador a seco



Fonte: Autoria própria, 2024.

Nos motores de jogos, como a *Unity*, todas as faces do modelo são convertidas em triângulos, pois os computadores renderizam essa geometria de forma mais eficiente. Assim, a quantidade de triângulos é uma métrica útil para avaliar a complexidade de um modelo. Manter um número reduzido de triângulos é essencial para assegurar um bom desempenho,

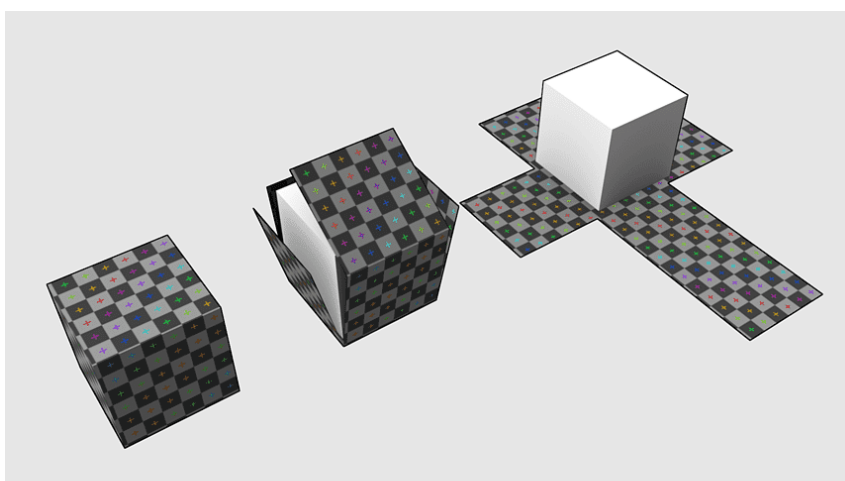
especialmente quando se trata de realidade virtual, onde a exigência por renderização em tempo real é elevada.

8.3. Abertura da malha

Após a modelagem *Low Poly*, mesmo que o modelo não esteja rico em detalhes por conta do baixo número de polígonos e de triângulos, os detalhes ainda podem ser adicionados por meio das técnicas de texturização.

Para aplicar uma textura a um objeto 3D, é primeiramente necessário criar uma planificação do modelo no *Blender*, realizando uma correspondência entre as coordenadas de seus vértices e uma malha 2D. Essa técnica é chamada de mapeamento UV, como mostrado na Figura 24.

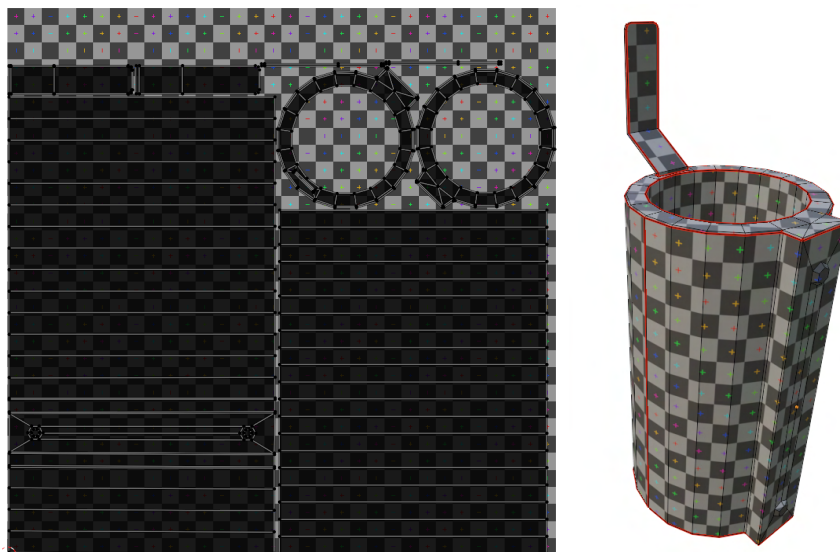
Figura 24: Exemplo de mapeamento UV em um cubo



Fonte: *Blender up*, 2013.

Para abrir e planificar a malha do objeto 3D, é necessário recortá-la manualmente com bastante precisão, caso contrário, a textura resultante poderá apresentar distorções. Na Figura 25, as linhas vermelhas indicam os cortes inseridos para abrir a malha.

Figura 25: Mapeamento UV da bobina do transformador

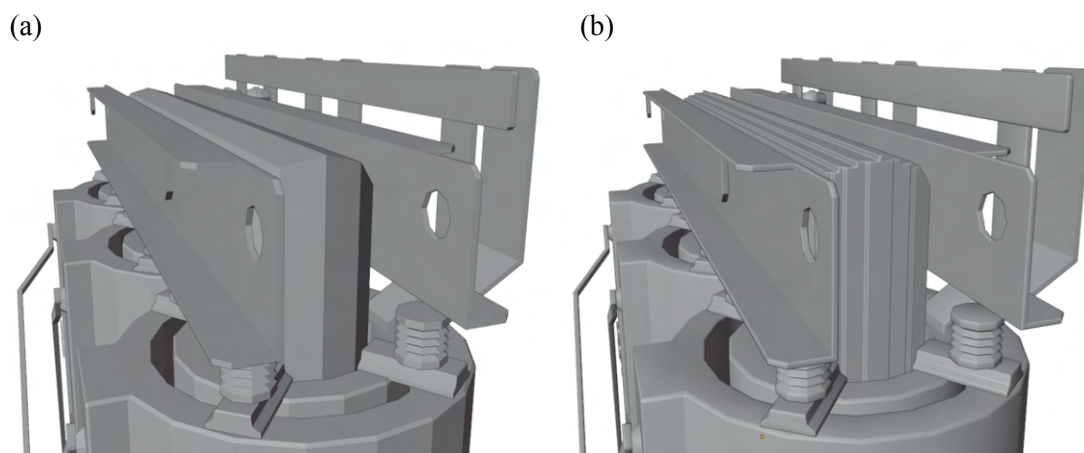


Fonte: Autoria própria, 2024.

8.4. Modelo de alta resolução

Na sequência, com base no modelo *Low Poly*, é construído um modelo *High Poly* do mesmo objeto, com uma alta densidade de polígonos. Diferente da modelagem *Low Poly*, que foca na simplicidade, a *High Poly* prioriza os detalhes e a complexidade visual, capturando minuciosamente as rugosidades, relevos e curvas da superfície do objeto, como ilustrado na Figura 26 (b).

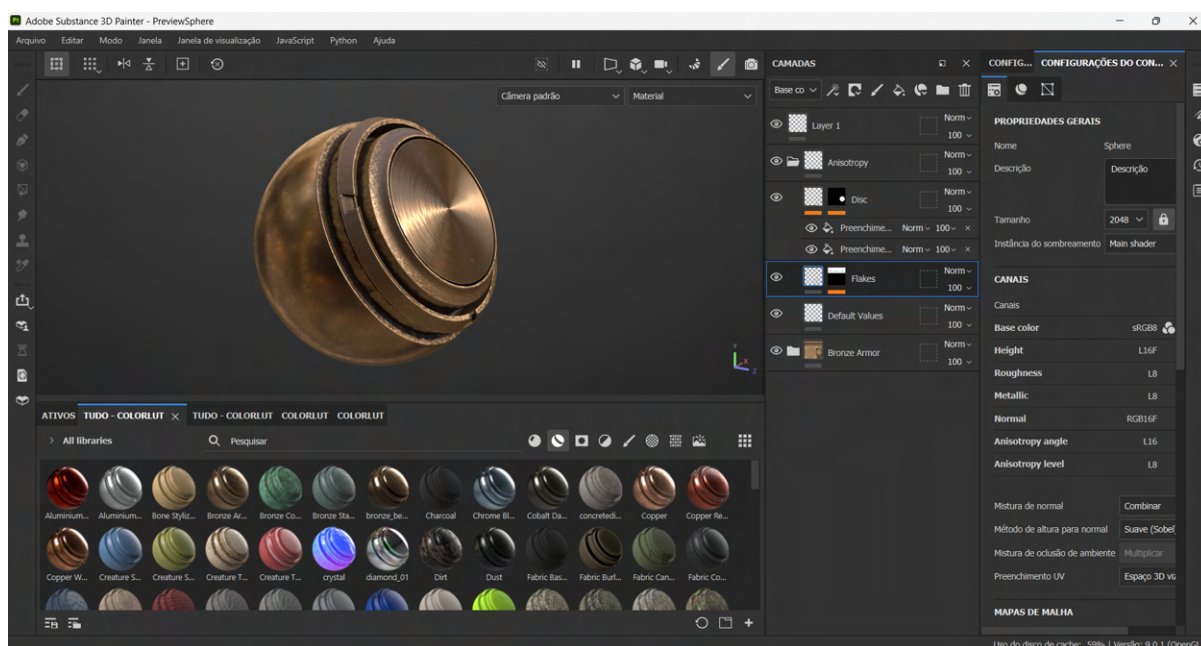
Figura 26: Modelos (a) *Low Poly* e (b) *High Poly* do transformador



Fonte: Autoria própria, 2024.

Feito o mapeamento UV e o modelo *High Poly*, o processo de texturização passa para o *software Substance Painter*, da empresa *Adobe* (2024). O *Substance Painter*, como mostrado na Figura 27, possui materiais que se ajustam automaticamente à geometria do modelo 3D, permitindo simular o desgaste nas bordas de um objeto ou adicionar detalhes realistas de sujeira e arranhões.

Figura 27: Substance Painter



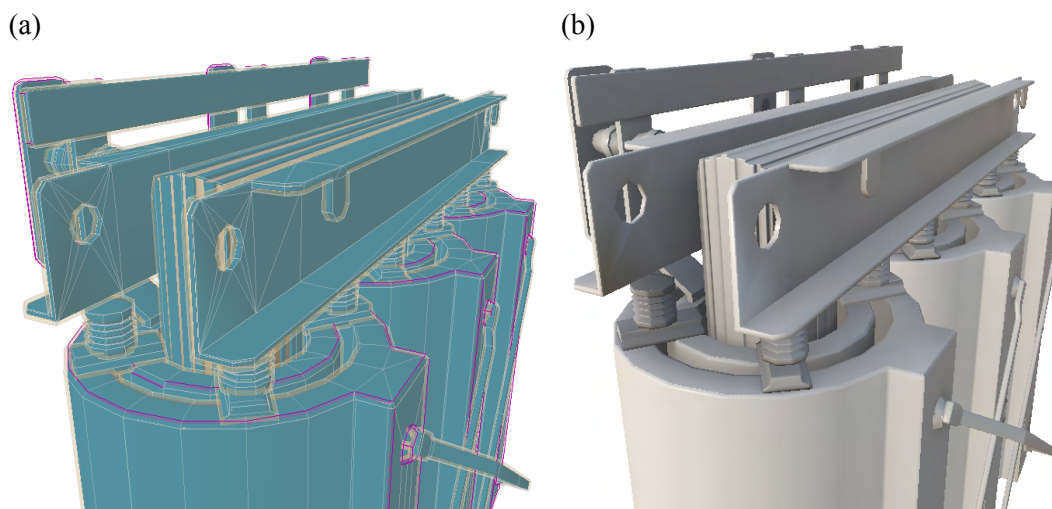
Fonte: *Adobe*, 2024.

8.5. Transferência de detalhes

Com o modelo *High Poly* em mãos, é aplicada a técnica “*Bake*”, utilizada para transferir os detalhes da malha de alta definição (*High Poly*) para a de baixa definição (*Low Poly*), a fim de preservar a qualidade visual do modelo sem pesar no desempenho.

Esse processo envelopa o modelo *Low Poly* com o de *High Poly*, e captura as informações de superfície do modelo ao projetá-las em diferentes mapas de textura, que podem ser aplicados ao modelo *Low Poly*, como mostrado na Figura 28.

Figura 28: Envolvimento com a técnica *Bake* (a) durante o processo e (b) finalizado

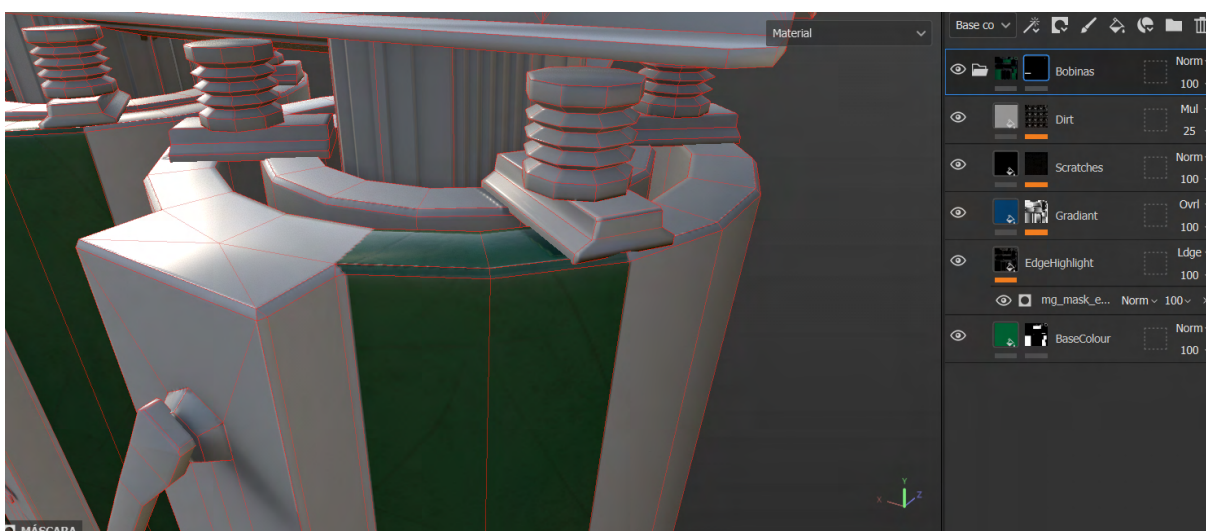


Fonte: Autoria própria, 2024

8.6. Pintura

Após o “*Bake*”, inicia-se o processo de pintura. As ferramentas de pintura incluem pinceis personalizados e máscaras, que são utilizados para criar os materiais, como mostrado na Figura 29. Os materiais criados possuem camadas para a cor base, sujeira, arranhões, gradientes, realce de bordas, entre outros, e podem aplicar efeitos em áreas específicas da malha.

Figura 29: Processo de pintura no *Substance Painter*



Fonte: Autoria própria, 2024

Concluída essa etapa, cria-se, finalmente, uma textura. A textura é um conjunto de quatro mapas aplicados aos modelos para conferir-lhes cor, profundidade, reflexão, rugosidade, desgaste e outros detalhes de superfície, como especificado na Tabela 7.

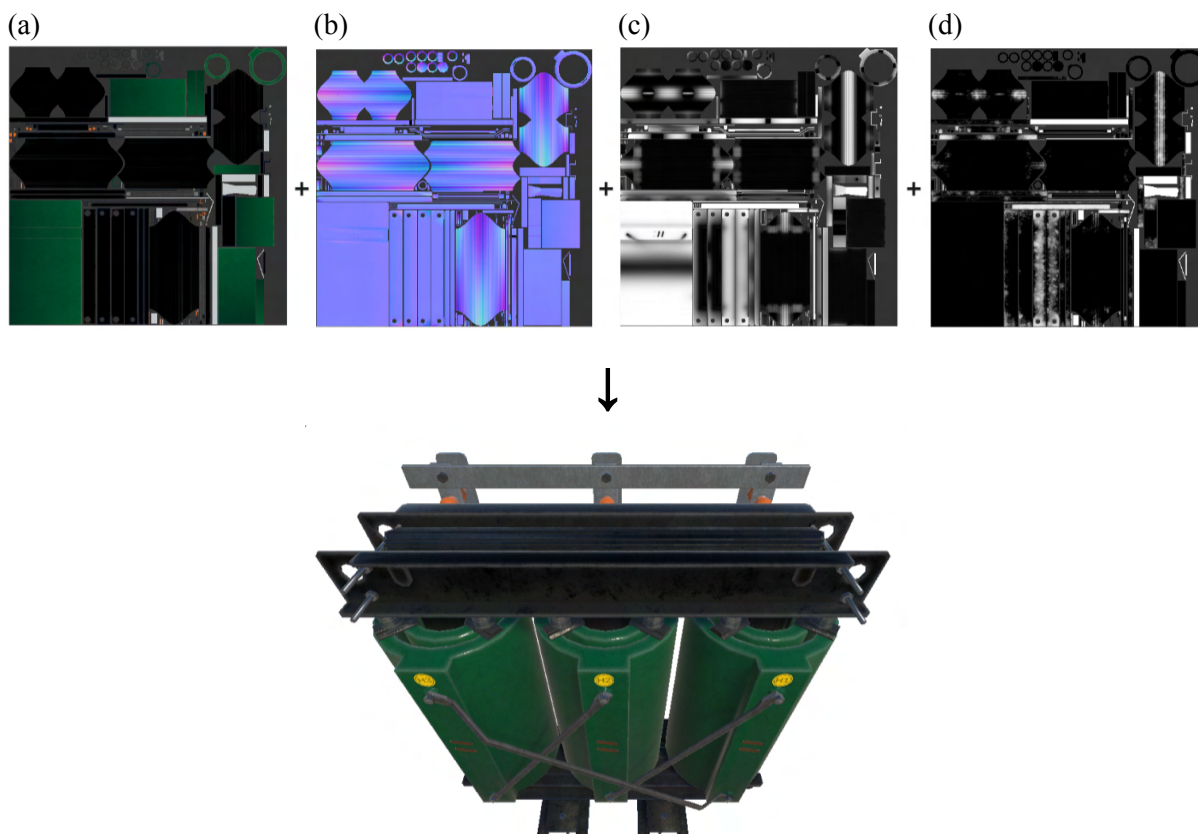
Tabela 7: Mapas de textura

<i>Color Base</i>	Define a cor do material e fornece a aparência geral do objeto, sem considerar os efeitos de iluminação e sombras.
<i>Normal Map</i>	Armazena informações sobre a orientação das superfícies em cada ponto do modelo, simulando detalhes de relevo e rugosidade.
<i>Ambient Occlusion Map</i>	Captura sombras e detalhes suaves de iluminação, considerando as áreas de contato e cavidades do modelo.
<i>Metallic Map</i>	Determina quais partes do modelo possuem propriedades de reflexão metálica.

Fonte: Autoria própria, 2024.

A união dessas texturas, como mostrado na Figura 30, permite que o renderizador compreenda como a cor, a luz, as sombras e os demais elementos de *design* devem interagir com o objeto, proporcionando um aspecto realista para o modelo.

Figura 30: Mapas de textura aplicados ao transformador - (a) *color base*, (b) *normal map*, (c) *ambient occlusion map* e (d) *metallic map*



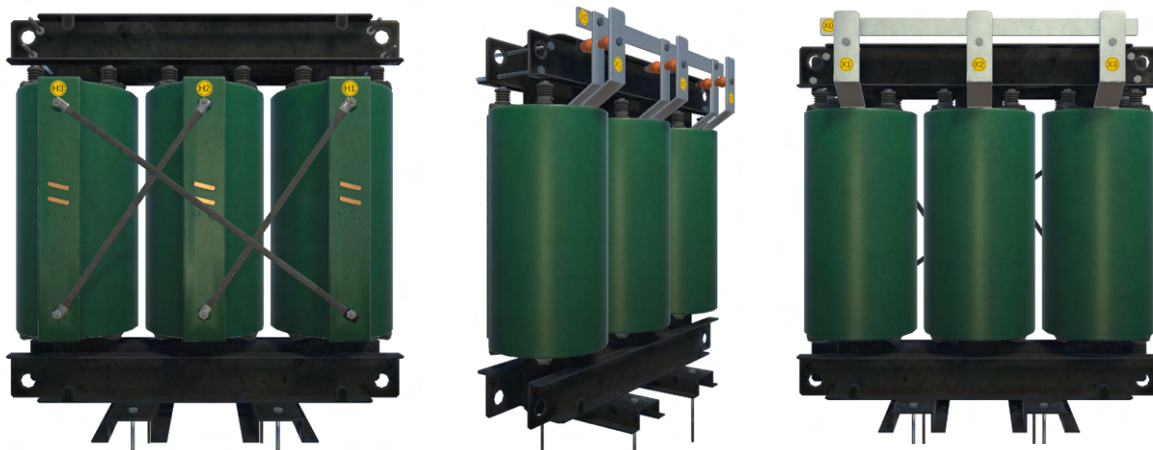
Fonte: Autoria própria, 2024.

8.7. Modelos desenvolvidos

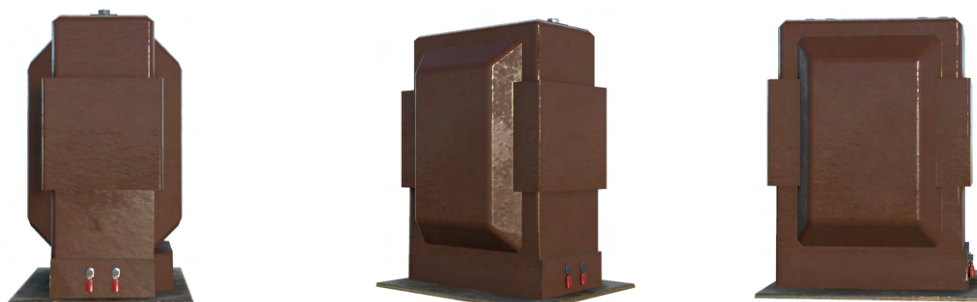
Como resultado do processo de modelagem descrito, foram modelados, além de vários acessórios que fazem parte da subestação, como cabos, portões, isoladores, luminárias, janelas e paredes, os equipamentos descritos no capítulo 6.2. “Equipamentos da subestação”, e no capítulo 6.3. “Equipamentos de medição”, mostrados nas Figuras 31 e 32.

Figura 31: Modelagem dos equipamentos da subestação - (a) transformador de força, (b) transformador de corrente, (c) transformador de potencial, (d) disjuntor e (e) chave seccionadora

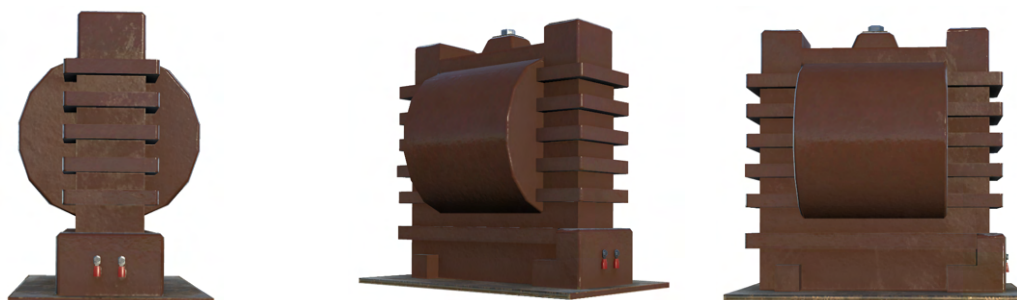
(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



Fonte: Autoria própria, 2024.

Figura 32: Modelagem dos equipamentos de medição - (a) megômetro, (b) TTR e (c) microhmímetro

(a)



(b)



(c)



Fonte: Autoria própria, 2024.

9. ENSAIOS

Ensaaios, ou testes, são conjuntos sistemáticos de procedimentos técnicos projetados para avaliar a condição e o desempenho de um equipamento específico. Esses procedimentos envolvem verificar se o equipamento está em conformidade com as especificações e normas exigidas (Almeida, 2023).

A NBR 14039 (2004) orienta que o processo de manutenção siga as recomendações do fabricante. Contudo, na prática, esses documentos muitas vezes não estão prontamente disponíveis. Portanto, o presente trabalho fundamenta os testes na norma ANSI (2023), que padroniza todos os procedimentos de manutenção em subestações.

Os ensaios visam identificar possíveis defeitos, a fim de proporcionar segurança e eficiência operacional dos equipamentos. Conforme Barros e Gedra (2009), esses ensaios devem obedecer aos seguintes critérios, mostrados na Tabela 8.

Tabela 8: Critérios para realização dos ensaios.

Instruções do fabricante	Normas técnicas	Política da empresa
Instruções e padrões definidos pelo fabricante que garantem que o equipamento funcione conforme projetado.	Conformidade com normas nacionais e internacionais que estabelecem os requisitos mínimos de segurança, qualidade e desempenho.	Procedimentos e políticas internas da empresa que asseguram que a manutenção e operação dos equipamentos atendam às suas necessidades específicas e padrões de qualidade.

Fonte: Adaptado de Barros e Gedra, 2009.

Segundo Mamede Filho (2011), os equipamentos de uma subestação devem ser submetidos a quatro categorias de ensaios: de tipo, de rotina, de recebimento e especiais, como mostrado na Tabela 9. Cada um deles tem objetivos específicos e é realizado em diferentes etapas da trajetória do equipamento.

Tabela 9: Categorias de ensaio

Ensaio de tipo	Ensaio de Recebimento	Ensaio de Rotina	Ensaio especial
Verificar se um determinado tipo ou modelo de equipamento funciona conforme as condições especificadas.	Verificar se o equipamento recebido chegou em boas condições e atende aos requisitos do pedido.	Verificar se o equipamento continua funcionando corretamente, atentando-se a possíveis desgastes.	Verificar se o equipamento atende a requisitos específicos que não são cobertos pelos ensaios de tipo, recebimento ou rotina.

Fonte: Adaptado de Mamede Filho, 2011.

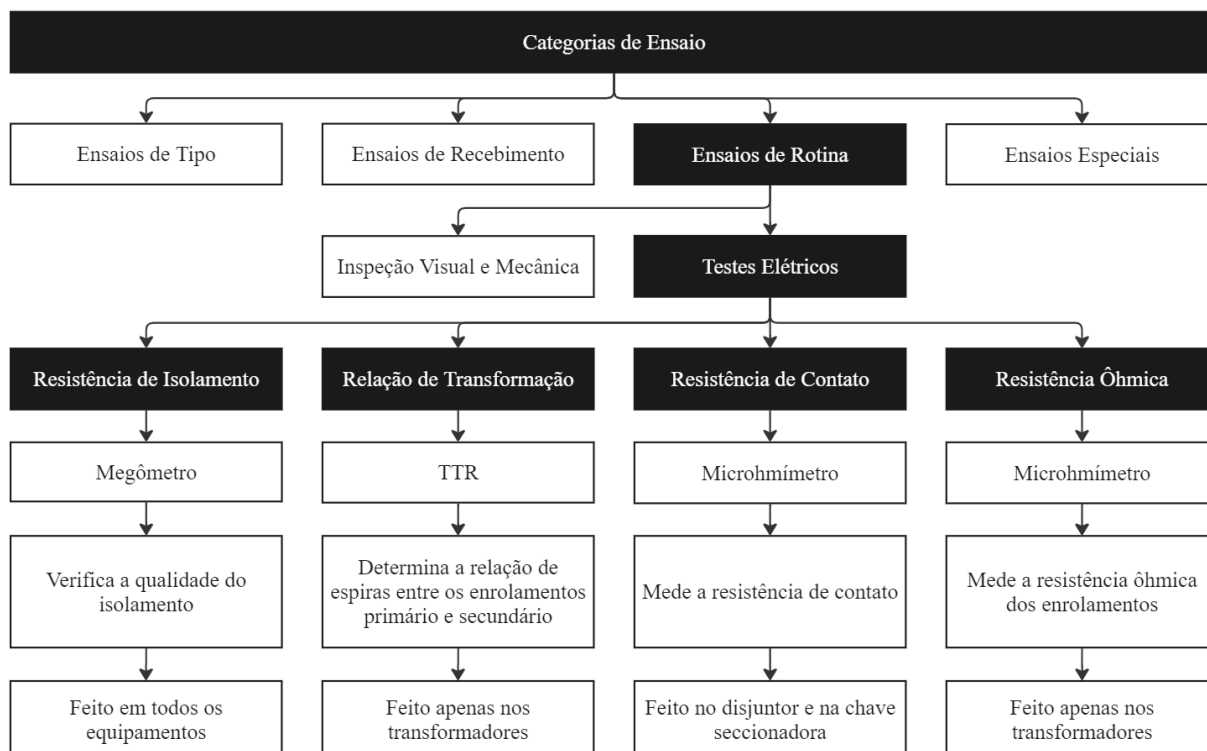
Os ensaios de tipo são executados na fase de fabricação, em protótipos ou amostras representativas de um lote de produção, e visam comprovar que o equipamento pode operar de maneira segura e eficiente sob condições normais e condições de falhas previstas. Entre os principais ensaios de tipo estão os testes de elevação de temperatura, resistência a curto-circuitos, isolamento e desempenho sob condições ambientais extremas.

Já os ensaios de recebimento, também conhecidos como ensaios de aceitação, são realizados no ato da entrega do equipamento, antes que seja instalado. São verificadas a integridade física e as conexões elétricas e mecânicas do equipamento.

Em sequência, os ensaios de rotina são realizados periodicamente em todos os equipamentos instalados, visando identificar desgastes e prevenir falhas no seu funcionamento. São feitos testes de operação mecânica, de isolamento elétrico, resistência ôhmica, entre outros.

Por último, os ensaios especiais são realizados para atender a requisitos específicos, tanto do fabricante quanto do cliente, que não são cobertos pelos outros ensaios. Esses testes devem ser executados com a periodicidade estabelecida pelo manual, e são realizados para atender a quesitos de inovação do material ou tecnologia escolhida.

Dentre as categorias apresentadas, o presente trabalho concentra-se especialmente nos testes elétricos, uma subcategoria dos ensaios de rotina, como mostrado no fluxograma da Figura 33.

Figura 33: Classificação dos ensaios/testes realizados no trabalho

Fonte: Autoria própria, 2024.

De acordo com a norma ANSI (2023), os testes de rotina são divididos em dois grupos distintos: “inspeção visual e mecânica” e “testes elétricos”.

A inspeção visual e mecânica envolve uma série de verificações, como avaliação do alinhamento dos componentes do equipamento, aperto adequado das conexões, funcionamento correto das partes mecânicas (quando presentes) e verificação do nível de umidade do equipamento.

Os testes elétricos, por sua vez, são realizados para avaliar a integridade e o desempenho elétrico do equipamento. São eles os ensaios de “resistência do isolamento”, de “relação de transformação”, de “resistência de contato” e de “resistência ôhmica”.

O teste de resistência de isolamento é feito com o megômetro, em todos os equipamentos de uma subestação elétrica, e avalia a resistência do material isolante que separa os condutores elétricos, prevenindo falhas. Durante o teste, é medida a corrente que passa pelo material isolante, conhecida como corrente de fuga. A detecção de uma baixa corrente de fuga indica um bom isolamento, contudo, uma alta corrente de fuga pode sinalizar problemas. A NBR 14039 (2004) defende que um resultado desfavorável nesse teste não condena o equipamento, mas indica a necessidade de manutenção adicional.

O teste de relação de transformação, por outro lado, utiliza o TTR para verificar a relação entre o número de espiras nos enrolamentos primário e secundário dos transformadores, determinando a tensão de saída em relação à tensão de entrada. Para realizar o teste, uma tensão específica é aplicada ao enrolamento primário, e medida no enrolamento secundário. A relação de espiras é então calculada, comparando essas tensões. Se a relação medida estiver na faixa de 0,5% da relação nominal do transformador, ele é considerado saudável (NBR 5356-1, 2010).

Ademais, o teste de resistência de contato é feito com o microhmímetro, e mede a resistência elétrica nas conexões, como juntas e terminais, para garantir que não haja resistência excessiva causando superaquecimento, perda de energia ou falhas no sistema. O cálculo da resistência é feito ao exercer uma corrente elevada pela conexão, aferindo a queda de tensão resultante. Resistências de contato elevadas indicam defeitos na conexão. Pode ser necessário apertar as conexões, limpar os contatos ou substituir componentes danificados.

Por fim, o teste de resistência ôhmica utiliza também o microhmímetro, e sua função é determinar a resistência elétrica dos enrolamentos nos transformadores. O teste consiste na aplicação de uma corrente contínua (DC) através dos enrolamentos, para medir a queda de tensão resultante. Conforme a NBR 5356-1 (2010), valores de resistência ôhmica que variam mais de 10% das especificações podem indicar anomalias, como enrolamento danificado (resistência muito alta) e curto-circuito parcial nos enrolamentos (resistência muito baixa).

Dessa maneira, observa-se a relevância dos testes elétricos, cujos resultados devem ser comparados aos valores de referência disponibilizados pelo fabricante ou obtidos a partir de um número confiável de testes anteriores. Este estudo, no entanto, não avalia os valores obtidos, pois não foi possível acessar os documentos do fabricante para comparação, nem contar com testes anteriores.

Para que os valores de medição encontrados fossem coerentes com a realidade os valores obtidos nos testes do transformador de força, chave seccionadora e disjuntores são reais e foram fornecidos pela ITS Engenharia (2024) durante seus ensaios de rotina. Entretanto, não foram encontrados valores para os transformadores de potencial e de corrente. Em seguida, serão apresentadas as especificações dos testes elétricos em cada equipamento da subestação, assim como as medições esperadas.

9.1. Ensaios no transformador de força

O transformador de força utilizado no trabalho apresenta as seguintes especificações técnicas:

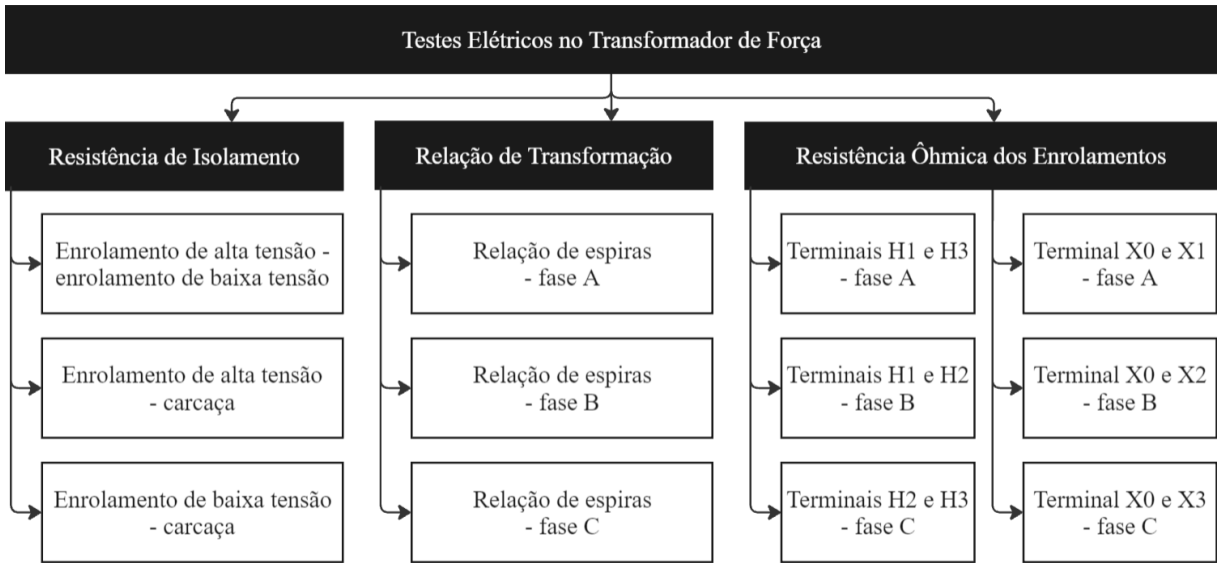
Tabela 10: Características do transformador

Transformador de força	
Tensão primária	13.8 kV
Tensão secundária	220/127 V
Potência	1500 kVA
Ligação	Δ/Y
Corrente nominal	2280 A
Tipo de isolamento	à seco

Fonte: ITS Engenharia, 2024.

Nos transformadores a seco, são exigidos os testes: “resistência de isolamento”, “relação de espiras” e “resistência ôhmica”, como mostrado na Figura 34.

Figura 34: Testes no transformador de força

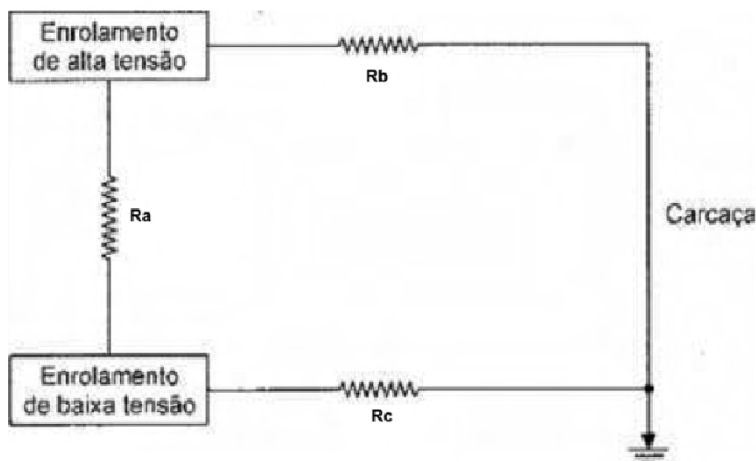


Fonte: Autoria própria, 2024.

- **Teste de resistência de isolamento**

No teste de resistência de isolamento, utiliza-se o megômetro para realizar 3 medições distintas, como ilustrado na Figura 35:

Figura 35: Diagrama das resistências de isolamento no transformador



Fonte: Barros e Gedra, 2009.

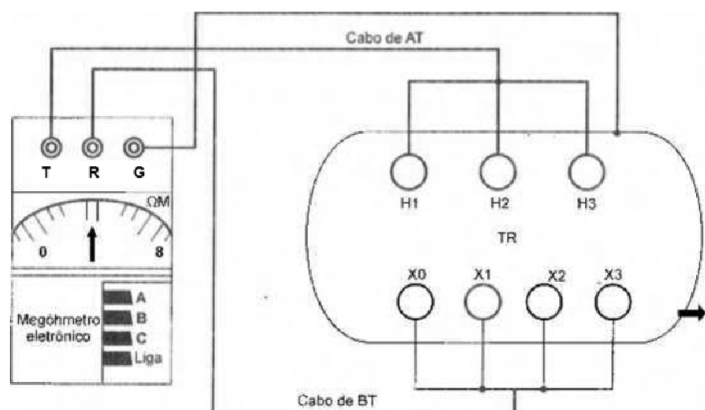
Sendo:

- Ra : Resistência de isolação entre o enrolamento de alta e baixa tensão;
- Rb : Resistência de isolação entre o enrolamento de alta tensão e carcaça;
- Rc : Resistência de isolação entre o enrolamento de baixa tensão e carcaça.

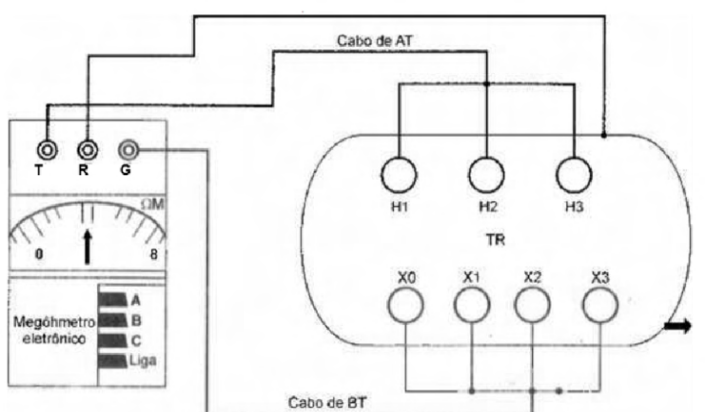
Na Figura 36 (a) são mostradas as conexões necessárias para o cálculo de “Ra”, enquanto a Figura 36 (b) mostra as conexões para o cálculo de “Rb”, e a Figura 36 (c) para o cálculo de “Rc”.

Figura 36: Ensaios de resistência de isolamento no transformador de força (a) de alta tensão para baixa tensão, (b) de alta tensão para a carcaça e (c) de baixa tensão para a carcaça

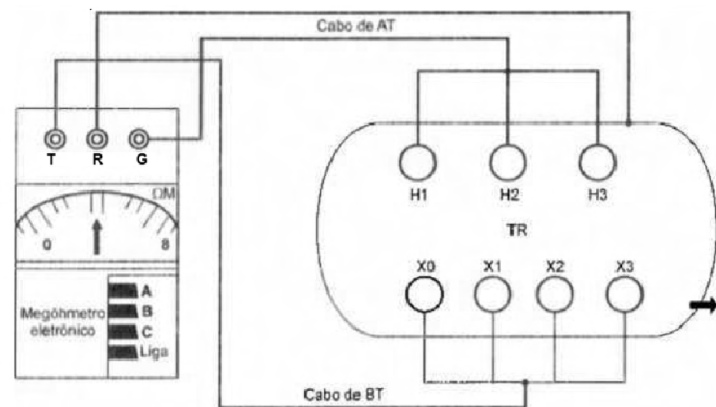
(a)



(b)



(c)



Fonte: Barros e Gedra, 2009.

(a) Conexões do isolamento de baixa tensão para alta tensão (Ra):

- Ajustar a tensão no equipamento para 2500 V;
- Conectar a garra (T) do TTR nos terminais H1, H2 e H3 do transformador de força;
- Conectar a garra (R) do TTR nos terminais X0, X1, X2 e X3 do transformador;
- Conectar a garra (G) do TTR na carcaça do transformador.

(b) Conexões do isolamento da alta tensão para a carcaça (Rb):

- Ajustar a tensão no equipamento para 2500 V;
- Conectar a garra (T) do TTR nos terminais H1, H2 e H3 do transformador;
- Conectar a garra (R) do TTR na carcaça do transformador;
- Conectar a garra (G) do TTR nos terminais X0, X1, X2 e X3 do transformador.

(c) Conexões do isolamento da baixa Tensão para a carcaça (Rc):

- Ajustar a tensão no equipamento para 500 V;
- Conectar a garra (T) do TTR nos terminais X0, X1, X2 e X3 do transformador
- Conectar a garra (R) do TTR na carcaça do transformador;
- Conectar a garra (G) do TTR nos terminais H1, H2 e H3 do transformador.

Dessa forma, os resultados de medição esperados são mostrados na Tabela 11:

Tabela 11: Resultados esperados para o teste de resistência de isolamento

	Tensão aplicada	Resistência medida
Alta tensão - baixa tensão	5 kV	41.0 GΩ
Alta tensão - carcaça	5 kV	17.0 GΩ
Baixa tensão - carcaça	1 kV	41.0 GΩ

Fonte: ITS Engenharia, 2024.

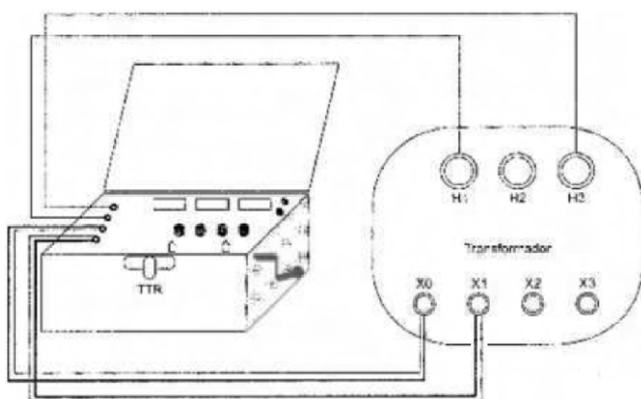
Nesse teste, a empresa ITS Manutenções optou por realizar o teste individualmente para cada par de bobinas, em vez de curto-circuitar os barramentos. Para garantir a coerência dos resultados, foi selecionado o valor de menor resistência entre as medições, pois este valor seria o mais próximo ao que seria obtido se o teste fosse realizado conforme descrito nos ensaios.

- **Teste de relação de transformação**

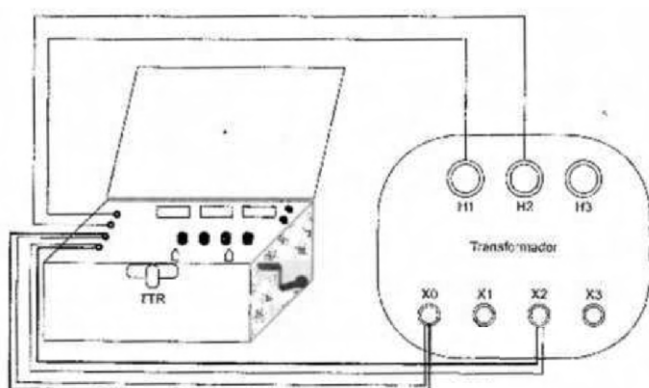
Para a realizar o teste de relação de espiras, o TTR é usado no cálculo de cada fase do transformador individualmente, como mostrado na Figura 37:

Figura 37: Ensaios de relação de espiras para a (a) fase A, (b) fase B e (c) fase C

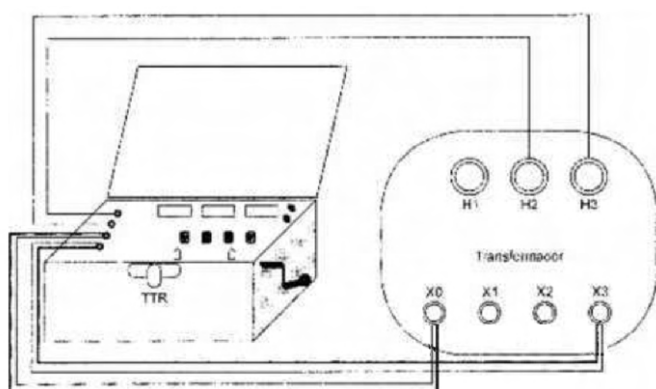
(a)



(b)



(c)



Fonte: Barros e Gedra, 2009.

(a) Conexões para a fase A:

- Conectar as garras H1 e H2 do TTR aos terminais H1 e H3 do transformador;
- Conectar as garras X1 e X2 do TTR aos terminais X0 e X1 do transformador.

(b) Conexões para a fase B:

- Conectar as garras H1 e H2 do TTR aos terminais H1 e H2 do transformador;
- Conectar as garras X1 e X2 do TTR aos terminais X0 e X2 do transformador.

(c) Conexões para a fase C:

- Conectar as garras H1 e H2 do TTR aos terminais H2 e H3 do transformador;
- Conectar as garras X1 e X2 do TTR aos terminais X0 e X3 do transformador.

Sendo assim, os resultados de medição esperados são mostrados na Tabela 12:

Tabela 12: Resultados esperados para o teste de relação de espiras

	Relação do fabricante	Relação medida	Variação aceita
Fase A	108.64	108.46	0.16 %
Fase B	108.64	108.28	0.33 %
Fase C	108.64	104.11	4.16 %

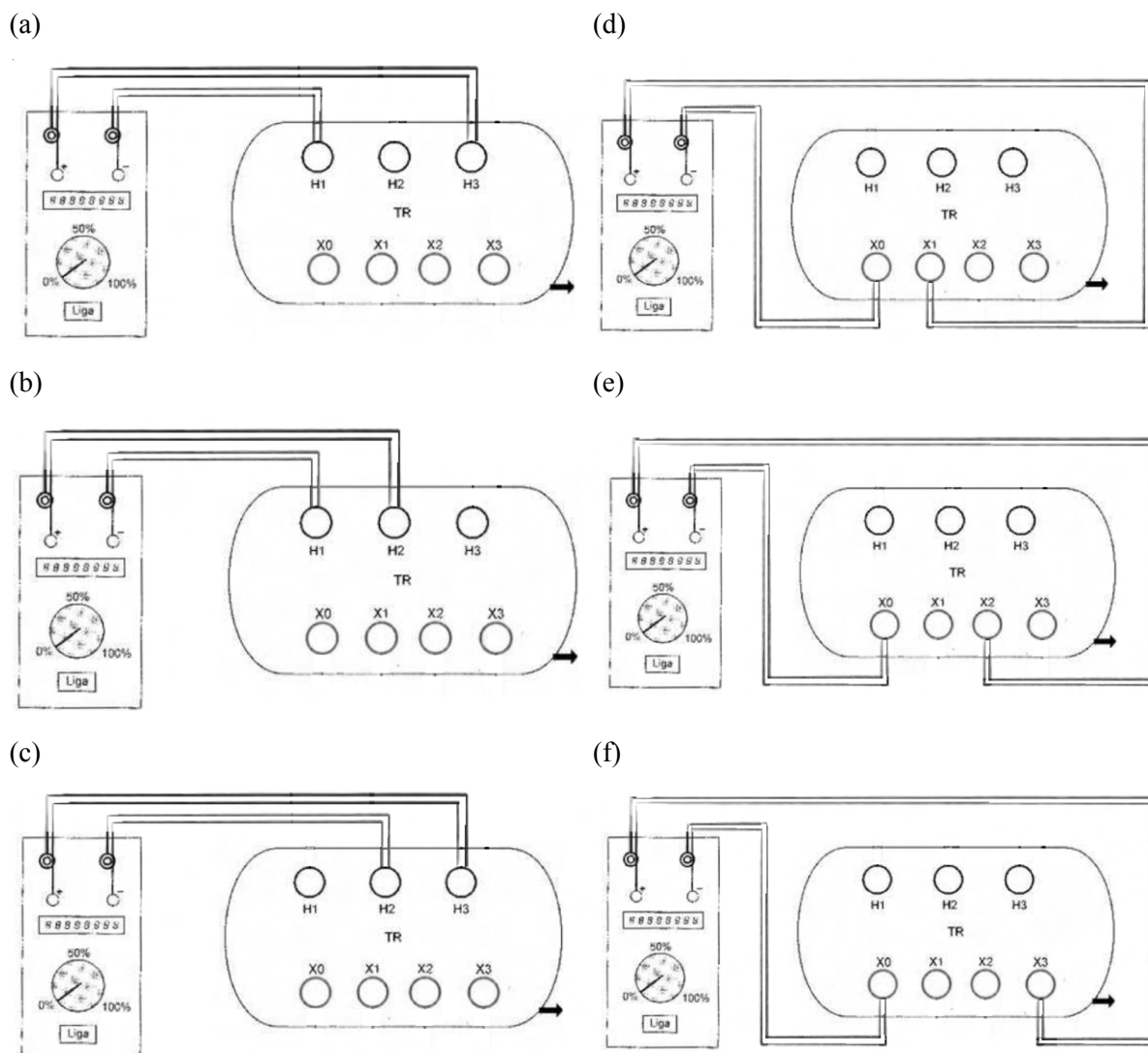
Fonte: ITS Engenharia, 2024.

A Fase C na Tabela 12 ultrapassa o limite de 0.5% definido pela NBR 5356-1 (2010), apontando para um defeito na bobina.

- **Teste de resistência ôhmica dos enrolamentos**

Finalizando os testes no transformador de força, o microhmímetro é utilizado para medir a resistência ôhmica das bobinas A, B e C, por meio das conexões mostradas na Figura 38.

Figura 38: Ensaios de resistência ôhmica para a (a) fase A - alta tensão, (b) fase B - alta tensão, (c) fase C - alta tensão, (d) fase A - baixa tensão, (e) fase B - baixa tensão e (f) fase C - baixa tensão



Fonte: Barros e Gedra, 2009.

(a, b, c) Testes nos conectores de alta tensão:

- ➔ Fase A - conectar as garras 1 e 2 do microhmímetro aos terminais H1 e H3 do transformador;
- ➔ Fase B - conectar as garras 1 e 2 do microhmímetro aos terminais H1 e H3 do transformador;
- ➔ Fase C - conectar as garras 1 e 2 do microhmímetro aos terminais H3 e H2 do transformador.

(d, e, f) Testes nos conectores de baixa tensão:

- Fase A - conectar as garras 1 e 2 do microhmímetro aos terminais X0 e X1 do transformador;
- Fase B - conectar as garras 1 e 2 do microhmímetro aos terminais X0 e X2 do transformador;
- Fase C - conectar as garras 1 e 2 do microhmímetro aos terminais X0 e X3 do transformador.

Portanto, os resultados de medição esperados são mostrados na Tabela 13:

Tabela 13: Resultados esperados para o teste de resistência ôhmica

	Resistência medida
Fase A - alta tensão	4.54 Ω
Fase B - alta tensão	4.33 Ω
Fase C - alta tensão	4.37 Ω
Fase A - baixa tensão	1.59 Ω
Fase B - baixa tensão	2.82 Ω
Fase C - baixa tensão	1.95 Ω

Fonte: ITS Engenharia, 2024.

9.2. Ensaio na chave seccionadora

O modelo de chave seccionadora utilizado no trabalho possui as seguintes características:

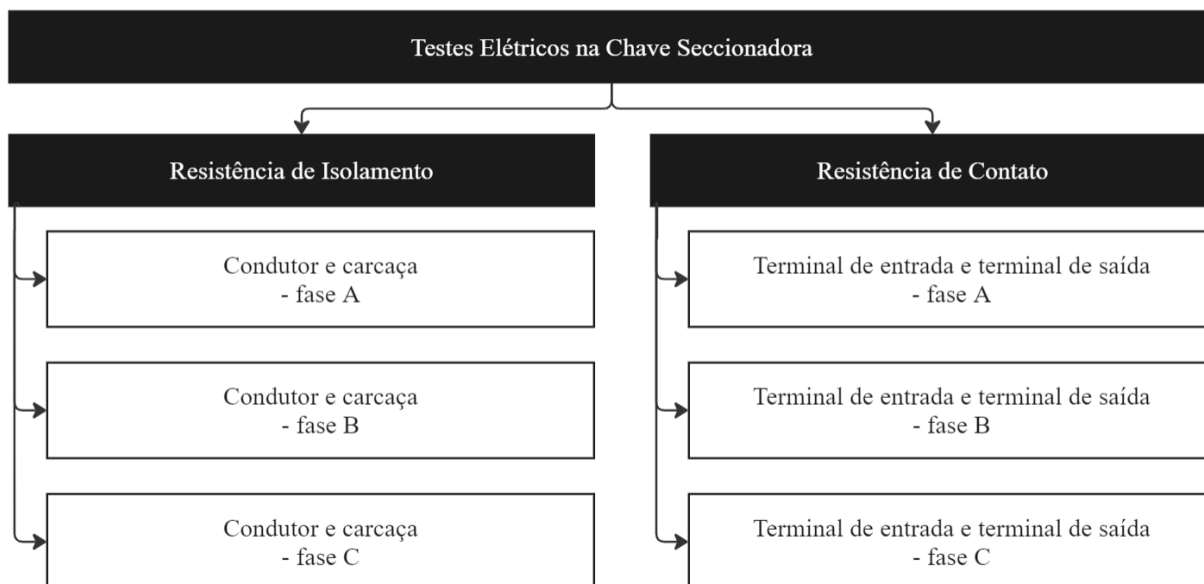
Tabela 14: Características da chave seccionadora

Chave seccionadora	
Tipo de seccionadora	Tripolar do tipo faca + Fusível
Corrente nominal	400 A
Tensão nominal	17.5 kV

Fonte: ITS Engenharia, 2024.

Para a chave seccionadora, são exigidos os testes: “resistência de isolamento” e “resistência de contato”, como mostrado na Figura 39. Ambos devem ser realizados com a chave seccionadora fechada.

Figura 39: Testes na chave seccionadora

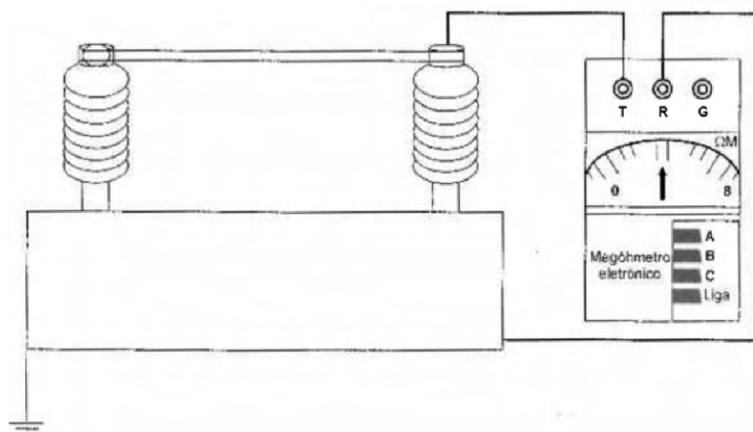


Fonte: Autoria própria, 2024.

- **Teste de resistência de isolamento**

O teste de resistência de isolamento deve ser realizado com o megômetro, em todas as fases da chave seccionadora, como mostrado na Figura 40.

Figura 40: Ensaio de resistência de isolamento nas fases A, B e C



Fonte: Barros e Gedra, 2009.

(a) Conexões para as fases A, B e C:

- Com a chave fechada.
- Conectar a garra (T) do megômetro no terminal de entrada da chave seccionadora;
- Conectar a garra (R) do megômetro no terminal de saída da chave seccionadora;
- A garra (G) não é utilizada nesse teste.

Em cada fase do equipamento, os resultados esperados são mostrados na Tabela 15:

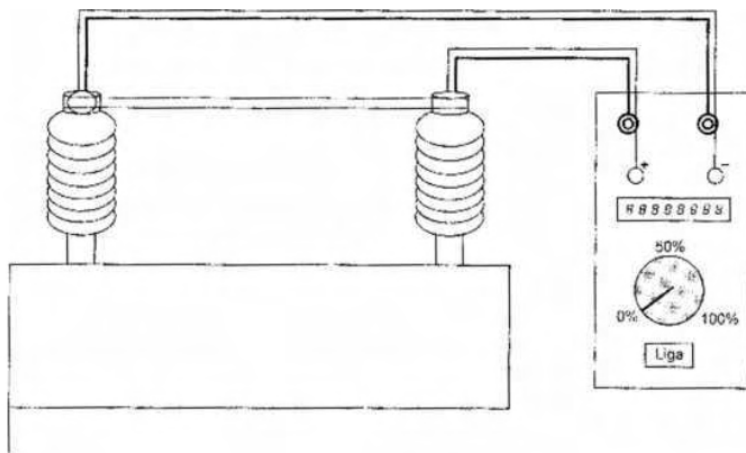
Tabela 15: Resultados esperados para o teste de resistência de isolamento

	Relação medida
Fase A - carcaça	9.0 GΩ
Fase B - carcaça	11.0 GΩ
Fase C - carcaça	12.0 GΩ

Fonte: ITS Engenharia, 2024.

- **Teste de resistência de contato**

Para a realizar o teste de resistência de contato, usa-se o microhmímetro também em todas as fases da chave seccionadora, como mostrado na Figura 41.

Figura 41: Ensaio de resistência de contato

Fonte: Barros e Gedra, 2009.

(a) Conexões para as fases A, B e C:

- Com a chave fechada.
- Conectar a garra (1) do microhmímetro no terminal de entrada da chave seccionadora;
- Conectar a garra (2) do microhmímetro no terminal de saída da chave seccionadora.

Assim, os resultados esperados para cada medição são mostrados na Tabela 16:

Tabela 16: Resultados esperados para o teste de resistência de contato

	Relação medida
Fase A	0.39 $\mu\Omega$
Fase B	0.40 $\mu\Omega$
Fase C	0.52 $\mu\Omega$

Fonte: ITS Engenharia, 2024.

9.3. Ensaio no disjuntor

O disjuntor utilizado no trabalho possui as seguintes características:

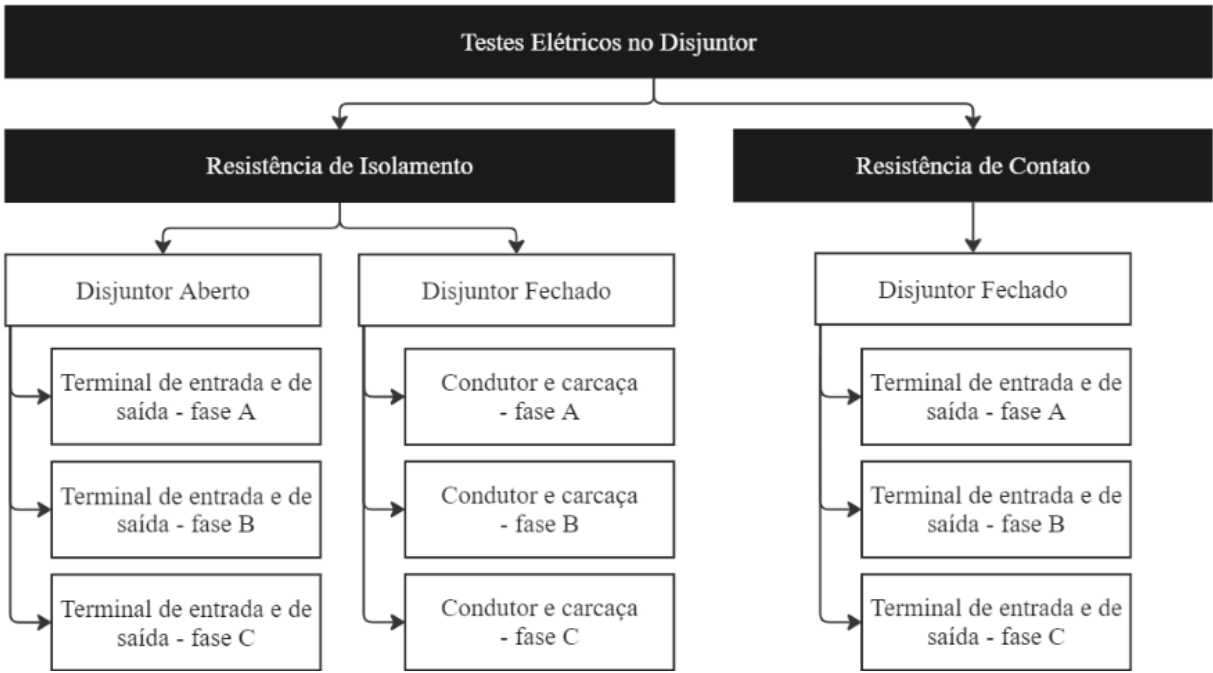
Tabela 17: Características do disjuntor

Disjuntor	
Tensão Nominal	17.5 kV
Capacidade de interrupção	12.5 kA
Corrente Nominal	1250 A
Tipo	Vácuo

Fonte: ITS Engenharia, 2024.

De modo semelhante à chave seccionadora, no disjuntor, são feitos os testes: “resistência de isolamento” e “resistência de contato”, como mostrado na Figura 42.

Figura 42: Testes no disjuntor



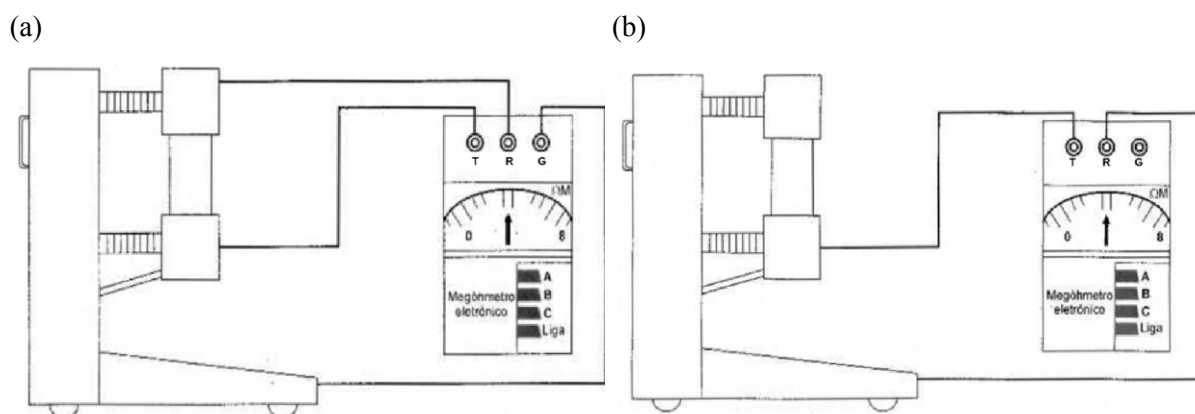
Fonte: Autoria própria, 2024.

● **Teste de resistência de isolamento**

O teste de resistência de isolamento no disjuntor é dividido em duas partes: a primeira é feita com o equipamento aberto, e a segunda com ele fechado. O objetivo do teste com o

disjuntor aberto é avaliar a condição da câmara interna, que separa o terminal de entrada do terminal de saída, enquanto o teste com o disjuntor fechado procura examinar a resistência de isolamento entre os conectores e a carcaça, como mostrado na Figura 43.

Figura 43: Ensaio de resistência de isolamento (a) do terminal de entrada para o de saída da câmara interna e (b) do condutor para a carcaça



Fonte: Barros e Gedra, 2009.

(a) Conexões na câmara interna para as fases A, B e C:

- Com o disjuntor aberto;
- Conectar a garra (T) do megômetro no terminal de entrada do disjuntor;
- Conectar a garra (R) do megômetro no terminal de saída do disjuntor;
- Conectar a garra (G) do megômetro na carcaça do disjuntor.

(b) Conexões do condutor para a carcaça nas fases A, B e C:

- Com o disjuntor fechado;
- Conectar a garra (T) do megômetro no terminal condutor do disjuntor;
- Conectar a garra (R) do megômetro na carcaça do disjuntor;
- A garra (G) não é utilizada nesse teste.

Os resultados esperados, em cada uma das fases, são mostrados nas Tabelas 18 e 19:

Tabela 18: Resultados esperados para o teste de resistência de isolamento na câmara interna com disjuntor aberto

	Relação medida
Fase A: Entrada-Saída	7.8 GΩ
Fase B: Entrada-Saída	7.5 GΩ
Fase C: Entrada-Saída	7.5 GΩ

Fonte: ITS Engenharia, 2024.

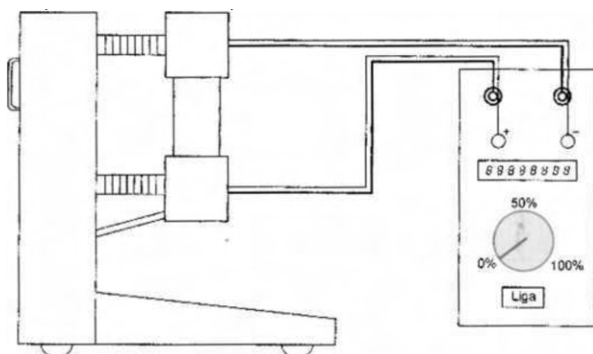
Tabela 19: Resultados esperados para o teste de resistência de isolamento do condutor para carcaça com disjuntor fechado

	Relação medida
Fase A - Carcaça	3.0 GΩ
Fase B - Carcaça	3.3 GΩ
Fase C - Carcaça	3.0 GΩ

Fonte: ITS Engenharia, 2024.

- **Teste de resistência de contato**

O teste de resistência de contato verifica a condição dos contatos móveis do disjuntor, e deve ser realizado com o equipamento fechado, como mostrado na Figura 44.

Figura 44: Ensaio de resistência de contato

Fonte: Barros e Gedra, 2009.

(a) Conexões câmara interna nas fases A, B e C:

- Com o disjuntor fechado;
- Conectar a garra (-) do microhmímetro no terminal de entrada do disjuntor;
- Conectar a garra (+) do microhmímetro no terminal de saída do disjuntor.

Portanto, os resultados esperados são mostrados na Tabela 20:

Tabela 20: Resultados esperados para o teste de resistência de contato

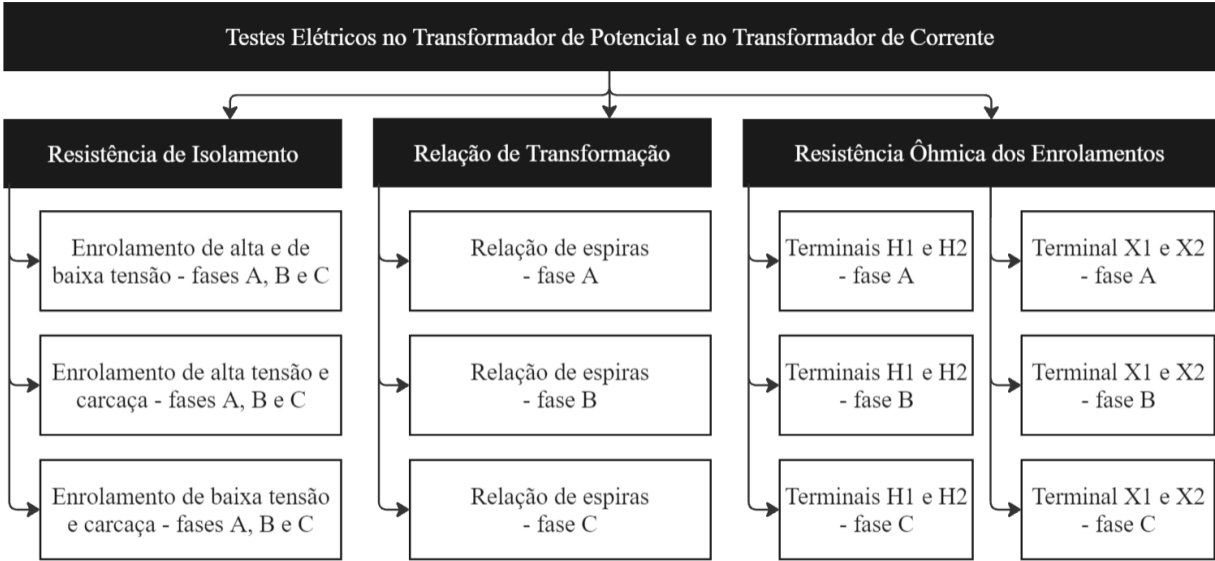
	Relação medida
Fase A	37 $\mu\Omega$
Fase B	37 $\mu\Omega$
Fase C	35 $\mu\Omega$

Fonte: ITS Engenharia, 2024.

9.4. Ensaaios no transformador de potencial e no transformador de corrente

Para ambos os equipamentos, os testes feitos são: “resistência de isolamento”, “relação de transformação” e “resistência ôhmica”, seguindo os mesmos princípios abordados nos testes do transformador de força, como mostrado na Figura 45.

Figura 45: Testes no transformador de potencial e no transformador de corrente



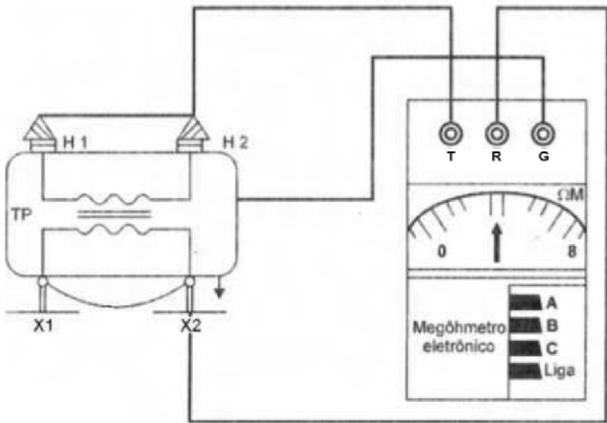
Fonte: Autoria própria, 2024.

• **Teste de resistência de isolamento**

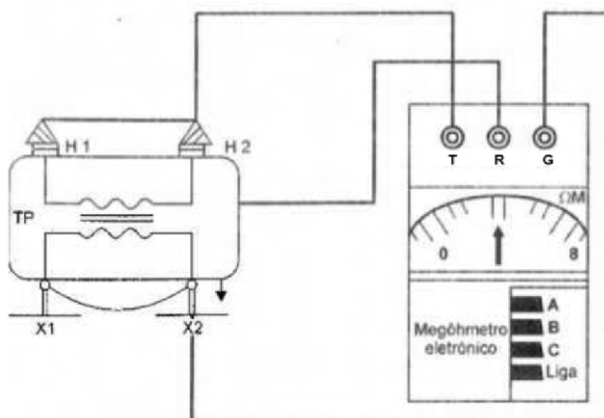
Na Figura 46 (a), são mostradas as conexões necessárias para o cálculo de “Ra” - de alta tensão para baixa tensão, enquanto a Figura 46 (b) mostra as conexões para o cálculo de “Rb” - alta tensão para a carcaça, e a Figura 46 (c) para o cálculo de “Rc” - baixa tensão para a carcaça.

Figura 46: Ensaios de resistência de isolamento no transformador de força (a) de alta tensão para baixa tensão, (b) de alta tensão para a carcaça e (c) de baixa tensão para a carcaça

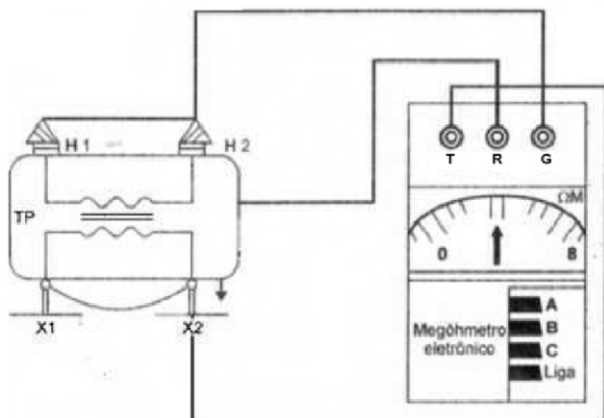
(a)



(b)



(c)



Fonte: Barros e Gedra, 2009.

(a) Conexões do isolamento de baixa tensão para alta tensão (Ra):

- Ajustar a tensão no equipamento para 5000 V;
- Conectar a garra (T) do TTR nos terminais H1 e H2 do transformador;
- Conectar a garra (R) do TTR nos terminais X1 e X2 do transformador;
- Conectar a garra (G) do TTR na carcaça do transformador.

(b) Conexões do isolamento da alta tensão para a carcaça (Rb):

- Ajustar a tensão no equipamento para 5000 V;
- Conectar a garra (T) do TTR nos terminais H1 e H2 do transformador;
- Conectar a garra (R) do TTR na carcaça do transformador;
- Conectar a garra (G) do TTR nos terminais X1 e X2 do transformador.

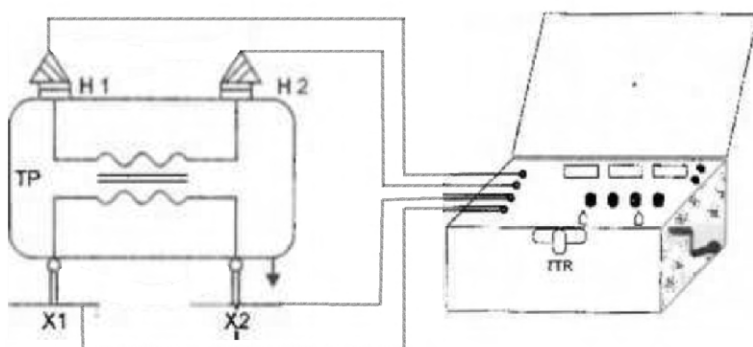
(c) Conexões do isolamento da baixa Tensão para a carcaça (Rc):

- Ajustar a tensão no equipamento para 500V;
- Conectar a garra (T) do TTR nos terminais X0, X1 do transformador
- Conectar a garra (R) do TTR na carcaça do transformador;
- Conectar a garra (G) do TTR nos terminais H1 e H2 do transformador.

• **Teste de relação de transformação**

Para a realizar o teste de relação de espiras, o TTR é usado de forma muito semelhante no cálculo de todas as fases do transformador, como mostrado na Figura 47:

Figura 47: Ensaios de relação de espiras para as fases A, B e C



Fonte: Barros e Gedra, 2009.

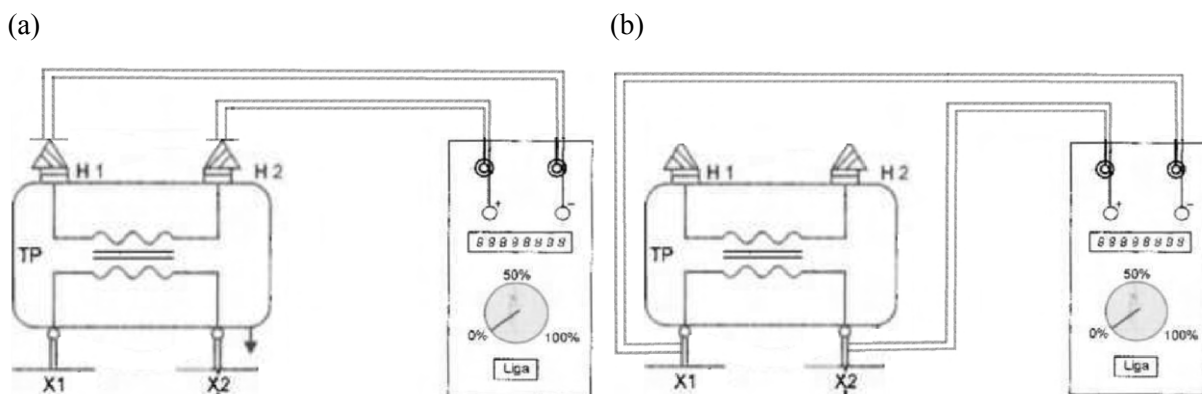
(a) Conexões para a fase A, B e C:

- Conectar as garras H1 e H2 do TTR aos terminais H1 e H2 do transformador;
- Conectar as garras X1 e X2 do TTR aos terminais X1 e X2 do transformador.

• **Teste de resistência ôhmica dos enrolamentos**

Finalizando os testes nos transformadores de potencial e de corrente, o microhmímetro é utilizado para medir a resistência ôhmica das bobinas A, B e C, por meio das conexões mostradas na Figura 48:

Figura 48: Ensaio de resistência ôhmica para os conectores de (a) alta tensão e (b) baixa tensão



Fonte: Barros e Gedra, 2009.

(a) Testes nos conectores de alta tensão:

- Conectar a garra 1 do microhmímetro ao terminal H1 do transformador;
- Conectar a garra 2 do microhmímetro ao terminal H2 do transformador.

(b) Testes nos conectores de baixa tensão:

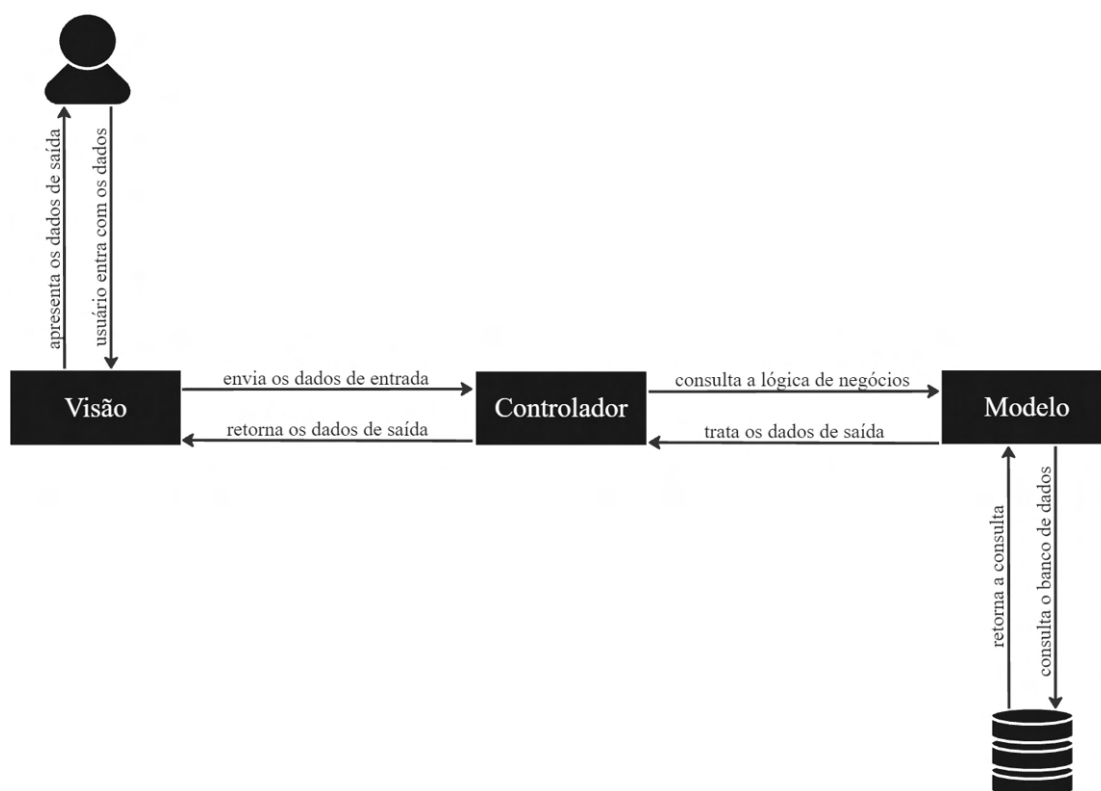
- Conectar a garra 1 do microhmímetro ao terminal X1 do transformador;
- Conectar a garra 2 do microhmímetro ao terminal X2 do transformador.

10. ARQUITETURA DE *SOFTWARE*

No processo de criação de software, um passo fundamental para garantir um desenvolvimento sustentável é a definição da arquitetura do sistema. Isso envolve não apenas planejar como os diferentes componentes irão funcionar individualmente, mas também como eles se integram e se comunicam para formar um sistema coeso. Como destaca Martin Fowler (2020, p. 31), "Qualquer tolo pode escrever código que um computador entende. Bons programadores escrevem código que humanos conseguem entender".

Neste trabalho, optou-se pela adoção da arquitetura Modelo-Visão-Controlador (MVC), um padrão amplamente utilizado que promove a separação de responsabilidades no sistema. Essa abordagem facilita não apenas a organização do desenvolvimento, mas também a manutenção futura e a expansão do código, permitindo que novas funcionalidades sejam implementadas de maneira modular (Valente, 2022). A Figura 49 ilustra essa divisão clara de responsabilidades proporcionada pelo padrão MVC.

Figura 49: Modelo-Visão-Controlador



Fonte: Adaptado de Valente, 2022.

- **Visão:** A Visão é a camada que estabelece o ponto de contato direto entre o usuário e o sistema, permitindo que este interaja com a aplicação de forma intuitiva. As ações realizadas pelo usuário são enviadas ao Controlador, que funciona como um intermediário, processando essas ações conforme as regras de negócio e devolvendo os resultados para serem apresentados na Visão. Além de exibir as informações, a Visão se concentra exclusivamente na apresentação, sem precisar compreender ou manipular a lógica interna ou a complexidade do sistema.

No contexto do desenvolvimento com o *framework Unity*, essas interações são realizadas por meio de diversos componentes, como botões, detectores de colisão, caixas de texto e outros elementos da interface gráfica, que facilitam a comunicação entre o usuário e o sistema.

- **Controlador:** O Controlador desempenha o papel de mediador entre o Modelo e a Visão, sendo responsável por gerenciar o fluxo de dados e interações no sistema. Ele captura as ações realizadas pelo usuário na interface (Visão) e as processa, determinando quais mudanças ou consultas precisam ser feitas no Modelo. Sempre que uma alteração nos dados é necessária ou uma solicitação de informação é realizada, o Controlador comunica-se com o Modelo para efetuar essas operações. Após receber os resultados ou respostas do Modelo, o Controlador organiza as informações de forma adequada e as envia para a Visão, garantindo que o usuário visualize as informações atualizadas.

- **Modelo:** O Modelo é o cerne da aplicação, encarregado de toda a lógica de negócios e da interação direta com os dados. Sua responsabilidade inclui gerenciar as operações, como armazenamento, atualização e recuperação, garantindo que as regras de negócios sejam sempre respeitadas e aplicadas de forma correta.

O Modelo opera de maneira completamente independente da Visão (interface do usuário) e do Controlador, sem ter conhecimento da existência desses componentes. Além disso, ele não tem qualquer ligação com os elementos do *framework Unity*, sendo implementado exclusivamente em C#. Isso assegura que o Modelo permaneça puramente focado nas regras de negócios e manipulação de dados, sem ser afetado pelos detalhes da interface ou das interações do usuário.

Assim, o padrão MVC facilita significativamente a manutenção do sistema ao promover o desacoplamento entre suas partes. Essa separação garante que modificações feitas em um componente, como o Modelo, não afetem diretamente outros componentes, como a Visão.

11. SOFTWARE DESENVOLVIDO

A subestação abrigada foi selecionada como o modelo ideal para este trabalho por refletir a realidade operacional de diversas instalações industriais e urbanas. Esse tipo de subestação é protegido por edificações de alvenaria ou metálicas, o que garante maior controle das condições ambientais. Além disso, a subestação abrigada proporciona um ambiente mais facilmente replicável em simulações de Realidade Virtual (RV), já que é delimitado por barreiras físicas, tornando a modelagem mais precisa e facilitando a interação do usuário com os componentes.

O modelo da subestação utilizado para esta simulação segue as diretrizes estabelecidas pela Enel (2021), baseadas no documento "Fornecimento de Energia Elétrica em Tensão Primária de Distribuição até 34.5 kV", que estabelece critérios técnicos e construtivos para subestações. A partir dessas especificações, foi possível construir um ambiente virtual que não apenas reproduz os componentes da subestação, mas também simula as condições operacionais encontradas em campo.

11.1. Construção do ambiente 3D

Com base na subestação modelo apresentada no capítulo 7, foi desenvolvido um ambiente virtual de uma subestação abrigada, seguindo rigorosamente as diretrizes construtivas estabelecidas pela Enel (2021). Para a criação e montagem dos modelos 3D dessa subestação, utilizou-se o software Unity, que permitiu a simulação e visualização precisa dos componentes e do ambiente, garantindo que as especificações técnicas fossem devidamente respeitadas no ambiente virtual.

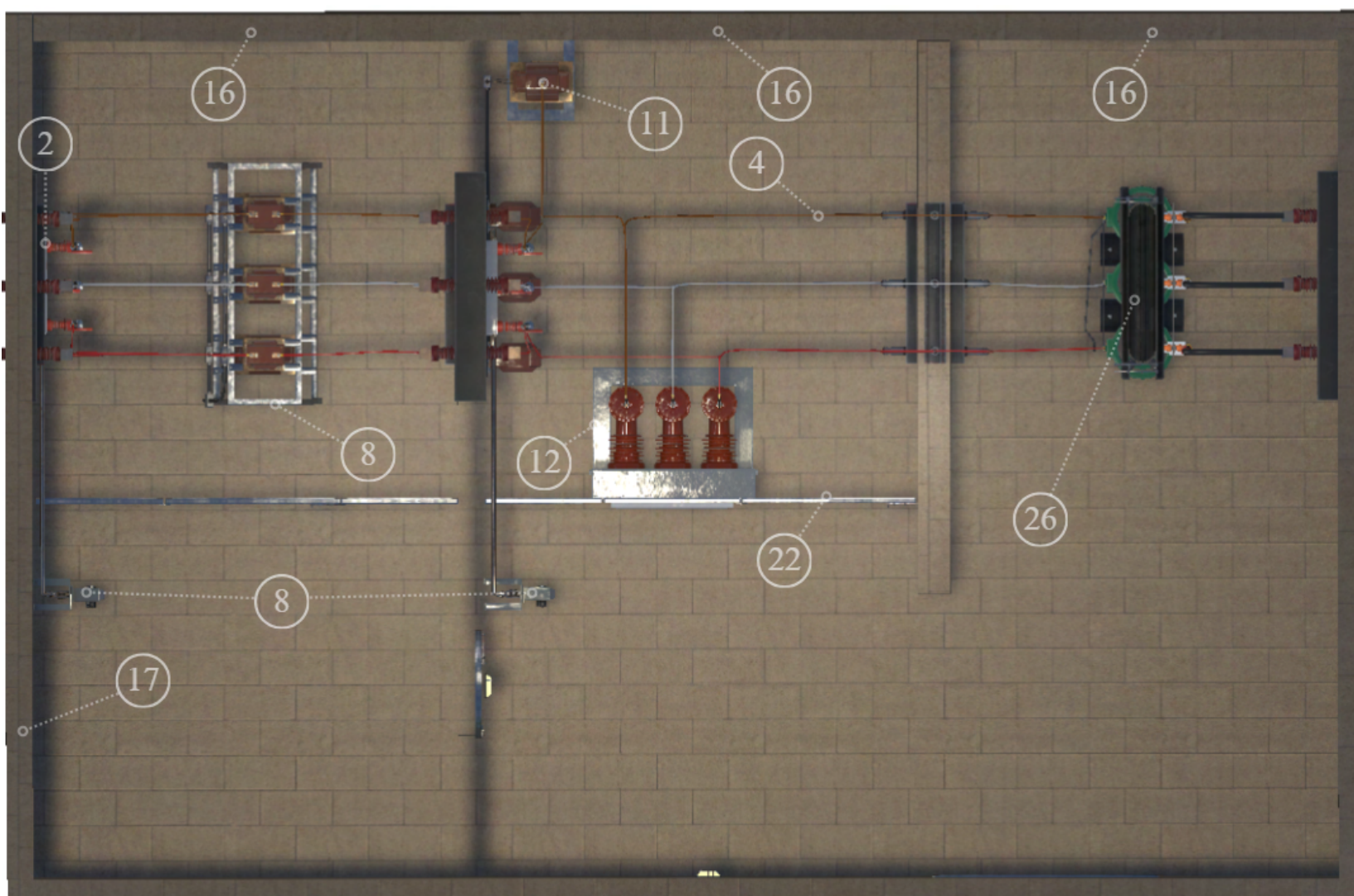
Na Figura 50 (a), é apresentada a vista isométrica da subestação construída, proporcionando uma visão geral da sua estrutura. Já nas Figuras 50 (b, c, d, e), são destacadas as divisões internas da subestação, separadas por áreas específicas, como medição, proteção e transformação. Essas figuras também fornecem descrições detalhadas de cada equipamento, conforme listado na Tabela 20, facilitando a compreensão da organização e das funções dos componentes presentes em cada uma dessas áreas.

Figura 50: Vistas da subestação simulada (a) isométrica, (b) superior, (c) corte A, (d) corte B e (e) corte C

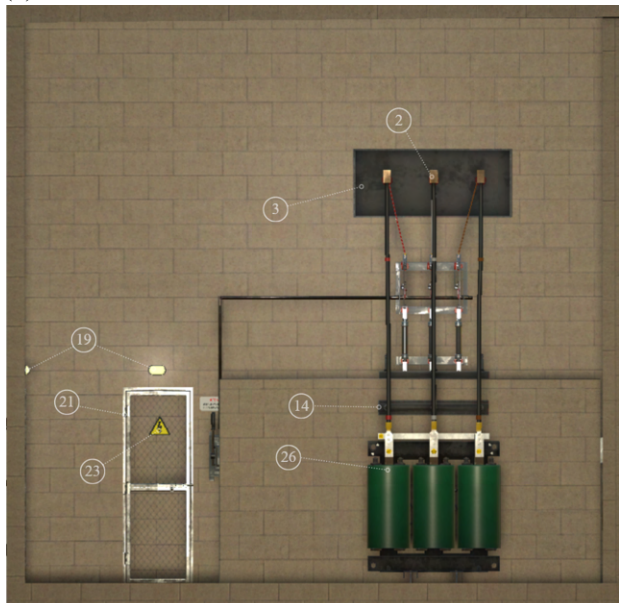
(a)



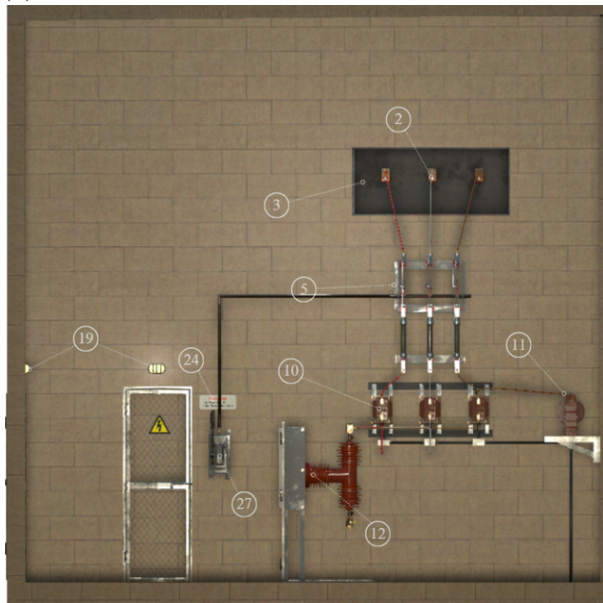
(b)



(c)



(d)



(e)



Fonte: Autoria própria, 2020.

Tabela 20: Identificação e legenda dos elementos na subestação modelo

item	Descrição
1	Isolador de suspensão tipo bastão
2	Bucha de passagem
3	Suporte para bucha de passagem
4	Barramento de cobre
5	Chave seccionadora tripolar com acionamento simultâneo
6	Transformador de corrente da medição
7	Transformador de potencial da medição
8	Suporte metálico para instalação dos TCs e TPs da medição
9	Eletrodutos de ferro galvanizado para os condutores de medição
10	Transformador de corrente da proteção
11	Transformador de potencial da proteção
12	Disjuntor Geral
13	Caixa de medição
14	Isolador tipo pedestal
15	Haste de aterramento
16	Janela de ventilação permanente do tipo chicana, com grade metálica, no lado externo
17	Janela com vidraça fixa para iluminação, com grade metálica, no lado externo
18	Suporte para isolador pedestal
19	Iluminação de emergência
20	Porta de chapa metálica de acesso a subestação de entrada de energia
21	Porta de tela metálica de acesso ao cubículo de medição
22	Anteparo de tela metálica, articulável e removível, dotado de trinco e batente.
23	Placa de advertência com os dizeres “Perigo de Morte” e o respectivo símbolo (Indicar na porta de acesso a SEE, na porta de acesso ao cubículo de medição, na grade de acesso ao disjuntor e transformador)
24	Placa de advertência com os dizeres "Atenção - Esta chave não deve ser manobrada em carga" (Indicar na chave seccionadora)
25	Painel do sistema de proteção da subestação de entrada de energia
26	Transformador de Força
27	Punho de manobra com bloqueio Kirk

Fonte: Adaptado de Enel, 2021.

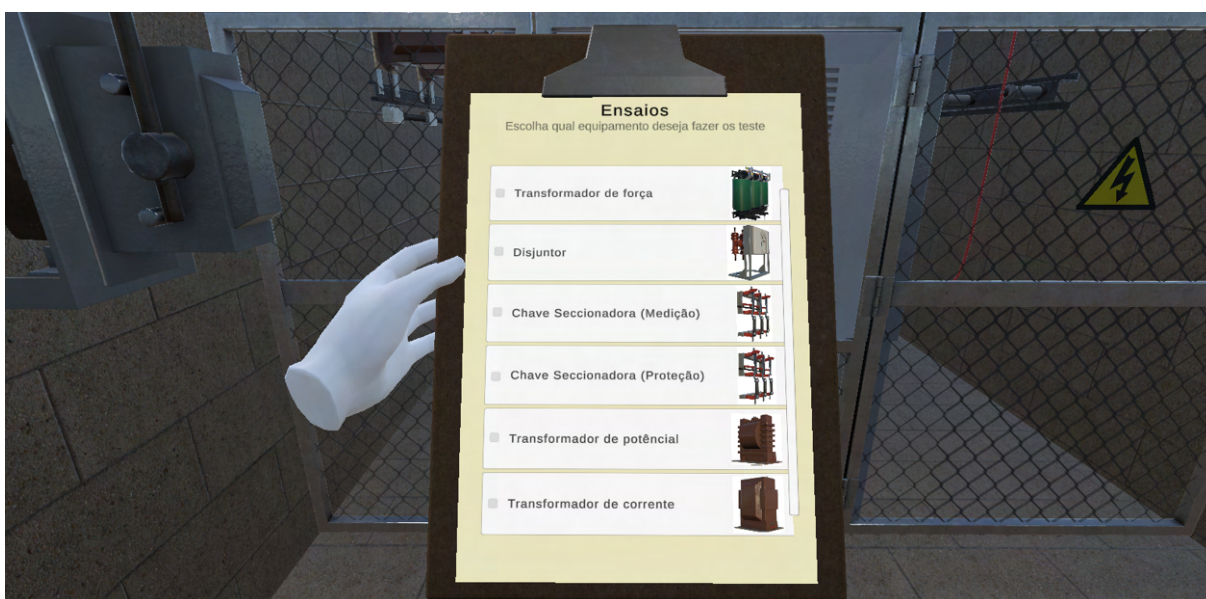
10.2. Fluxo de trabalho

Quando o usuário entra na simulação, ele é imediatamente apresentado à prancheta de missões, que atua como a interface principal para guiar as atividades e registrar o progresso. A prancheta oferece uma visão geral dos ensaios elétricos de rotina que podem ser realizados conforme a Figura 51, funcionando como um eixo central de navegação no ambiente de treinamento. Todos os testes disponíveis são armazenados em estruturas de dados da Unity, onde cada teste inclui instruções detalhadas, dicas e imagens que facilitam a compreensão e execução das tarefas.

O usuário tem total controle sobre o seu processo de aprendizagem e pode escolher por onde começar, sendo livre para decidir a ordem dos testes a serem realizados. Não há uma sequência obrigatória de ensaios, permitindo que o profissional construa seu próprio roteiro de treinamento de acordo com suas necessidades e nível de conhecimento.

O primeiro passo no fluxo de trabalho é a seleção do equipamento a ser testado, como ilustrado na Figura 51. O usuário pode optar por testar transformador de força, transformadores de corrente, transformadores de potencial, disjuntor, chaves seccionadoras. Cada equipamento está devidamente representado em 3D, com modelos realistas que simulam suas versões reais. Isso proporciona uma experiência imersiva e permite que o usuário se familiarize com os componentes que encontrará no campo.

Figura 51: Seleção do equipamento a ser testado



Fonte: Autoria própria, 2024.

Após escolher o equipamento, o próximo passo é a seleção do teste que deseja realizar. O sistema oferece uma variedade de ensaios de medição, como testes de resistência de isolamento, relação de transformação e resistência ôhmica. Na Figura 52, é possível observar a interface que permite ao usuário escolher qual teste deseja realizar.

Figura 52: Seleção do teste a ser realizado

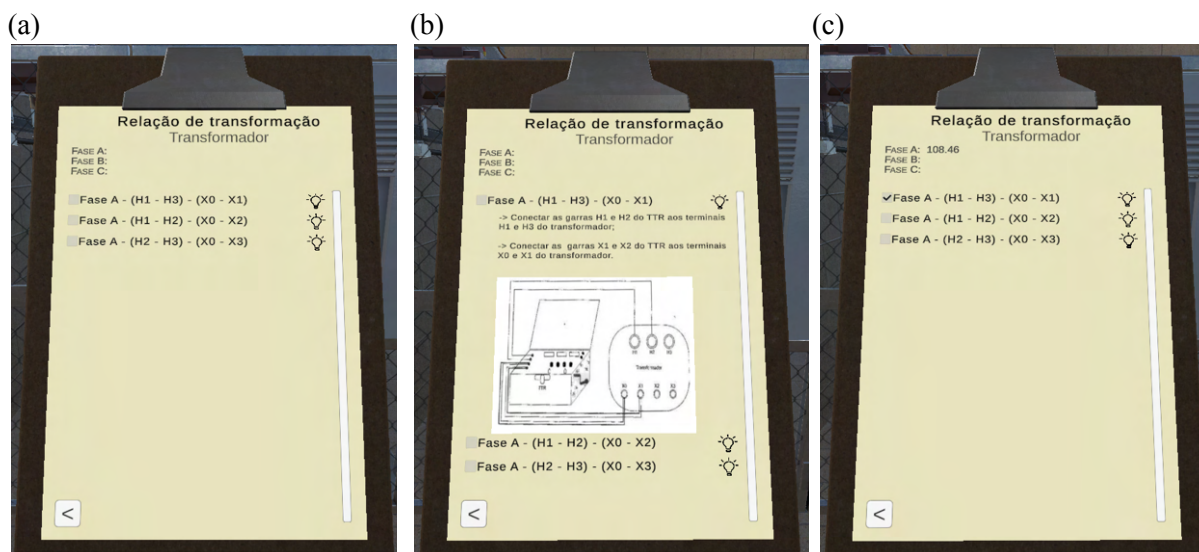


Fonte: Autoria própria, 2024.

Assim que o teste é selecionado, o sistema exibe uma sequência de passos detalhados para orientar o usuário na execução da atividade. O passo a passo abrange as conexões que devem ser feitas entre as garras dos equipamentos de medição e os terminais dos equipamentos da subestação, como ilustrado na Figura 53. Cada passo é apresentado de forma clara, com instruções objetivas e imagens complementares que mostram exatamente onde cada conexão deve ser feita.

Este processo é altamente adaptável às necessidades do usuário. Se o profissional já conhece os procedimentos e se sente confiante, pode optar por realizar as conexões diretamente, sem auxílio. Para aqueles que necessitam de suporte adicional, o sistema oferece dicas visuais acessíveis por meio do ícone de lâmpada, como mostrado na Figura 53. Ao clicar no ícone, o usuário tem acesso a um guia com descrições textuais e imagens que detalham cada conexão, garantindo que ele siga os procedimentos corretamente.

Figura 53: Passo a passo para a execução do teste escolhido



Fonte: Autoria própria, 2024.

Durante a execução dos testes, o progresso é continuamente monitorado e registrado na prancheta digital. A cada medição concluída, o sistema atualiza o progresso, marcando uma caixa de seleção correspondente ao teste realizado e armazenando o valor obtido. Esse registro permite que o usuário acompanhe seu avanço em tempo real, além de proporcionar uma visão geral dos ensaios ainda pendentes.

Além disso, o resultado de cada medição é imediatamente exibido no visor do dispositivo de medição virtual, replicando as funcionalidades dos equipamentos reais de campo, como o TTR, microhmímetro e megômetro, conforme ilustrado na Figura 54. Isso oferece um feedback instantâneo, permitindo que o usuário veja o impacto de suas ações no momento em que realiza o teste. Esse tipo de feedback é crucial para o processo de aprendizado, pois permite a correção de erros e o ajuste de estratégias durante a execução do teste.

Figura 54: Visor do (a) TTR, (b) microhmímetro e (c) megômetro durante o ensaio no transformador de força

(a)



(b)



(c)

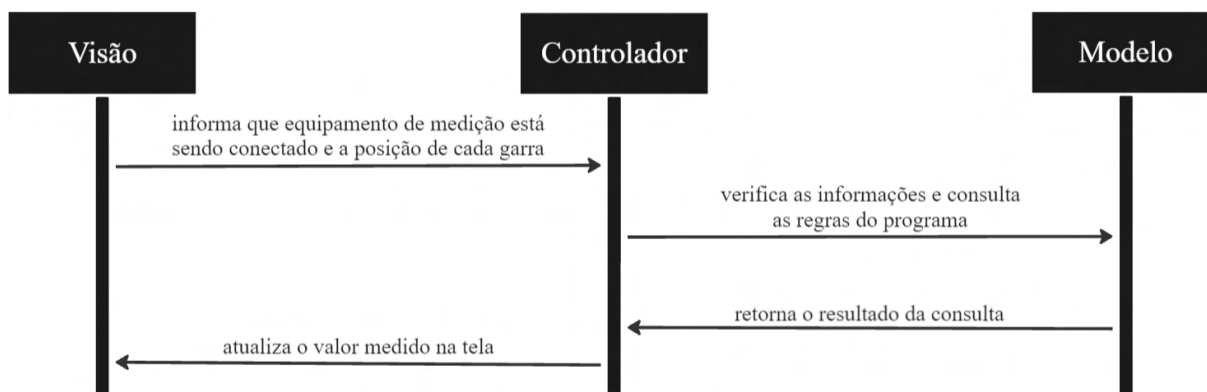


Fonte: Autoria própria, 2024.

Dessa forma, o fluxo de trabalho desenvolvido garante que o treinamento seja eficiente, adaptável e altamente interativo, permitindo que o usuário aprenda de forma prática e personalizada, enquanto explora o ambiente simulado e realiza os ensaios elétricos de rotina de maneira intuitiva e detalhada.

11.3. Comportamento do *software*

Este tópico explora a aplicação prática da arquitetura Modelo-Visão-Controlador (MVC), descrita no capítulo anterior, no desenvolvimento do sistema de simulação de manutenção em subestações elétricas abrigadas. A Figura 55 ilustra a interação entre os três componentes do sistema, destacando o fluxo de dados e as responsabilidades de cada um. O diagrama mostra como a Visão se conecta ao Controlador, que, por sua vez, consulta o Modelo para validar as medições e aplicar as regras de negócio.

Figura 55: Aplicação do Modelo-Visão-Controlador

Fonte: Autoria própria, 2024.

Nesse sistema, o componente da Visão está incorporado nas garras dos aparelhos de medição, como o megômetro, TTR ou microhmímetro, atuando como sensores que enviam sinais para o Controlador quando conectadas a um equipamento da subestação. Esses sinais transmitem informações cruciais, como a identificação do equipamento ao qual a garra está conectada e os pontos exatos de conexão no equipamento.

O Controlador, por sua vez, está localizado no equipamento que está sendo medido, como o transformador de força, transformador de corrente, transformador de potencial, disjuntor ou chave seccionadora. Ele recebe os sinais da Visão e tem a função de verificar se as garras estão conectadas corretamente e se outros pré-requisitos específicos do equipamento foram atendidos, como a abertura dos disjuntores e a configuração adequada das garras de tensão. Após essas verificações, o Controlador envia as informações coletadas para o Modelo a fim de realizar a validação dos dados e, em seguida, retorna com os resultados das medições realizadas.

Finalmente, o Modelo acessa o banco de dados para confirmar se a configuração da conexão segue os padrões estabelecidos, descritos detalhadamente no capítulo dedicado aos ensaios. Caso a conexão esteja correta, o Modelo retorna o valor esperado ao Controlador, que então repassa o resultado à interface do usuário. Essa interface engloba tanto a tela do dispositivo de medição quanto a prancheta de fluxo de trabalho.

12. CONCLUSÃO

12.1. Considerações finais

Ao longo do estudo desenvolvido, a pesquisa sobre trabalhos relacionados proporcionou uma sólida base teórica que destacou a carência de treinamentos seguros em ambientes como subestações elétricas, apontando a implementação de treinamentos em Realidade Virtual como uma possibilidade para preencher essa lacuna. A comparação com outras metodologias demonstrou que a RV não só complementa, mas em muitos casos pode superar as abordagens tradicionais em eficácia e segurança.

Por meio da metodologia descrita, com a integração de modelos feitos no *Blender* e das funcionalidades programadas na *Unity*, foi criada uma simulação precisa e em conformidade com as normas técnicas da Enel, resultando em um ambiente onde é possível interagir diretamente com os equipamentos de uma subestação e treinar diferentes procedimentos de manutenção.

Dessa forma, é mostrado que a Realidade Virtual constitui uma ferramenta poderosa no treinamento para manutenção de subestações elétricas abrigadas, permitindo que os profissionais se familiarizem com procedimentos críticos de manutenção sem os riscos inerentes ao treinamento em um ambiente real. Portanto, a aplicação de tecnologias de RV no treinamento de operadores de subestações elétricas pode representar um avanço significativo na formação profissional.

12.2. Trabalhos futuros

Para o avanço e aperfeiçoamento deste trabalho, diversas direções para estudos e desenvolvimentos futuros podem ser consideradas. Primeiramente, sugere-se a criação de módulos didáticos interativos para acompanhar o treinamento prático na realidade virtual. Esses módulos podem incluir vídeos explicativos, narrações das ações, exercícios e materiais de referência, ajudando na consolidação do conhecimento teórico e prático.

Além disso, uma abordagem adicional seria focar na segurança, o que envolve não apenas o treinamento para o uso correto dos equipamentos de proteção individual, como capacetes, luvas, botas isolantes e óculos de proteção, mas também os equipamentos de proteção coletiva, tais como sinalização de áreas de risco, barreiras físicas e sistemas de

aterramento temporário. Garantindo que os profissionais estejam sempre bem equipados e preparados para minimizar riscos durante suas atividades.

Sugere-se também a ampliação do ambiente de realidade virtual para incluir uma variedade de treinamentos, como a inspeção visual e mecânica, além de capacitação em equipamentos adicionais, como a coordenação de relés de proteção e bancos de capacitores, entre outros. Integrando esses novos tipos de treinamento, o ambiente virtual oferecerá uma formação mais abrangente e ajustada às necessidades práticas.

De forma semelhante, recomenda-se a implementação de funcionalidades de multijogador, permitindo que vários profissionais treinem simultaneamente no mesmo ambiente virtual, sendo outra proposta importante, visto que a NBR 5410 (2004) exige que os ensaios sejam feitos por no mínimo duas pessoas.

Finalmente, é igualmente importante realizar estudos de caso e avaliações quantitativas para medir o impacto da realidade virtual na capacitação profissional. Comparar a eficácia do treinamento em realidade virtual com métodos tradicionais em termos de retenção de conhecimento, desempenho em situações reais e redução de acidentes é fundamental para validar a eficácia do método.

REFERÊNCIAS

ABNT. NBR 14039. **Instalações elétricas de média tensão de 1,0 kV a 36,2 kV** . Rio de Janeiro, 2004.

ABNT. NBR 17094-3. **Máquinas elétricas girantes: Parte 3** : Motores de indução trifásicos - Métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2018.

ABNT. NBR 5356-1. **Transformadores de potência: Parte 1** - Generalidades . Rio de Janeiro, 2010.

ABNT. NBR 5410. **Instalações elétricas de baixa tensão**. Rio de Janeiro, 2004.

ABNT. NBR 6855. **transformador de potencial indutivo** : Requisitos e ensaios. Rio de Janeiro, 2018.

ABNT. NBR 6856. **Transformador de corrente com isolação sólida para tensão máxima ou inferior a 52 kV**. Requisitos e ensaios: Rio de Janeiro, 2021.

ADOBE. **Pinte texturas 3D em tempo real**. [s. l.], 2024. Disponível em: <https://www.adobe.com/br/products/substance3d-painter.html#>. Acesso em: 13 jun 2024.

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. **ANEEL divulga os resultados do desempenho das distribuidoras na continuidade do fornecimento de energia elétrica em 2022**. [s. l.], 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/2023/aneel-divulga-os-resultados-do-desempenho-das-distribuidoras-na-continuidade-do-fornecimento-de-energia-eletrica-em-2022>. Acesso em: 16 maio 2024.

ANSI. *International Electrical Testing Association. ANSI/NETA MTS-2023. Standard for Maintenance Testing Specifications for Electrical Power Equipment and Systems*, [s. l.], 2023.

ALMEIDA, Juliana Santana de. **Análise de dados referente à manutenção elétrica preditiva**. 2023. Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Uberlândia, [s. l.], 2023.

BARROS, Benjamim Ferreira de; GEDRA, Ricardo Luís. **Cabine primária: Subestações de**

alta tensão de consumidor. ed. 4, [s. l.]: Editora Érica, 2009.

BLENDER. *The Freedom to Create*. [s. l.], 2024. Disponível em:

<https://www.blender.org/about/>. Acesso em: 15 jun 2024.

BLENDER UP. **Como fazer mapeamento e texturização UV nos seus modelos 3D**. [s. l.], 2013. Disponível em: <https://www.blenderup.com.br/mapeamento-e-texturizacao-uv>. Acesso em: 15 jun 2024.

BROWN, Karen A. *Workplace safety: a call for research*. **Journal of Operations Management**, Seattle, USA, 1995.

CARDOSO, Alexandre et al. VRCEMIG: *A virtual reality system for real time control of electric substations*. **IEEE Virtual Reality**, Orlando, USA, 2013. Disponível em: <https://sci-hub.se/https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/654941>. Acesso em: 2023.

CHECA, D.; BUSTILLO, A. *A review of immersive virtual reality serious games to enhance learning and training*. **Multimedia Tools and Applications**, [s. l.], 2020.

CYRINO, Gabriel F; BARRETO, Camilo L.; MATTIOLI, Leandro R.; CARDOSO, Alexandre; LAMOUNIER, Edgard A.; LIMA, , Gerson F. M.; RAMOS, Daniel S. *A Natural and Intuitive Virtual Environment for Monitoring and Control of Electric Power Substations*. **2022 17th Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI)**, Madrid, Spain, 2022.

ENEL, Ente nazionale per l'energia elettrica. **Especificação técnica nº 942**: Fornecimento de Energia Elétrica em Tensão Primária de Distribuição até 34,5 kV. [s. l.], 2021. Disponível em: <https://www.eneldistribuicao.com.br>. Acesso em: 26 maio 2024.

ENERGIZA, Engenharia LTDA. **Sistema elétrico de alta tensão**. [s. l.], 2015. Disponível em: <https://www.energizaengenharia.com.br/desc-servicos.php?id-servico=18>. Acesso em: 18 maio 2024.

FIDELIS, Ricardo Tirone; OLIVEIRA, Marcelo Escobar de. Desenvolvimento e uso de ferramentas de simulação no processo de ensino-aprendizagem na engenharia elétrica.

FOWLER, Martin. **Refatoração: Aperfeiçoando o Design de Códigos Existentes**. 2ª edição. [S. l.]: Novatec Editora, 2020. 456 p.

COBENGE 2013, Gramado, 2013. Disponível em:

https://turing.pro.br/anais/COBENGE-2013/pdf/118463_1.pdf. Acesso em: 17 fev. 2023.

GEBRAN, Amaury Pessoa. **Manutenção E Operação De Equipamentos de Subestações**. 1. ed. [s. l.]: Bookman, 2013. 246 p.

GOMES, Marcelo Coelho. **Análise preventiva de riscos de acidente de trabalho em subestações elétricas**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Engenharia e Segurança do Trabalho) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2017. Disponível em: <https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/23366/>. Acesso em: 15 abr. 2023.

INSTRUM DO BRASIL INDÚSTRIA ELETRÔNICA. **Megômetro digital 5kV: DMG 5KI**. São Paulo - SP, [entre 2005 e 2024]. Disponível em: <https://www.instrumbrasil.com.br/>. Acesso em: 22 maio 2024.

ITS ENGENHARIA. **Relatório de inspeção anual de manutenção de subestação de energia**. Uberlândia: [s. n.], 2024.

JERALD, Jason. **The VR Book: Human-Centered Design for Virtual Reality**. [S. l.]: ACM Books, 2015. 523 p.

LANIER, Jaron. ***Dawn of the New Everything: Encounters with Reality and Virtual Reality***. [S. l.]: Henry Holt and Co., 2017.

LERNER, Dieter; MOHR, Stefan; SCHILD, Jonas; GORING, Martins; LUIZ, Thomas. An Immersive Multi-User Virtual Reality for Emergency Simulation Training: Usability Study. **JMIR Serious Games**, v. 8, n. 3, 2020.

LIAO, Xiaohui; NIU, Jinliang; WANG Hao. ***Research on virtual reality simulation training system of substation***. **2017 International Conference on Virtual Reality and Visualization**, [s. l.], 2017. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8719160>. Acesso em: 13 fev. 2023.

LUCENA, ANTONIO FELLIPHE CHIANCA. **A importância da manutenção preventiva em subestações abrigadas de média tensão**. 2023. Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Instituto Federal da Paraíba, João Pessoa - PB, 2023.

MAMEDE FILHO, João. **Manual de Equipamentos Elétricos**. 6. ed. [s. l.]: LTC, 2024. 2011 p.

MEGABRAS. **Microhmímetro digital portátil até 200 A**. [s. l.], 2023. Disponível em: <https://www.megabras.com/>. Acesso em: 25 maio 2024.

MESH ENGENHARIA, **Tipos de Subestação de Média Tensão**. [s. l.], 2022. Disponível em: <https://meshengenharia.com/2022/11/30/tipos-de-subestacao-de-media-tensao/>. Acesso em: 18 maio 2024.

META. **Meta Quest 2**. [s. l.], 2024. Disponível em: <https://www.meta.com/quest>. Acesso em: 15 jun 2024.

MINIPA. **Manual de instruções megômetro digital: MI-2710**. [S. l.: s. n.], 2006. Disponível em: <https://www.minipa.com.br/>. Acesso em: 22 maio 2024.

NETO, Jair de Oliveira Pereira; MORAIS, Lucas Pinheiro; MELO, Bruno G. R. Vaz de; LIMA, Gerson F. M. de; CARDOSO, Alexandre; LAMOUNIER, Edgard; SANTOS, Luis C. F. dos; OLIVEIRA, Jader; CAMPOS, Davidson P. *An Immersive Multi-User VR-based System for the Training of Electrical Substation Maintenance. 2024 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces Abstracts and Workshops (VRW)*, Orlando, FL, USA, 2024.

PAULINO, Marcelo. Ensaio de resistência de isolamento e de rigidez dielétrica. **Manutenção de transformadores**, [s. l.], n. VII, p. 56-61, 25 maio 2014.

POTENCIAL. [s. l.], 2024. Disponível em: <https://www.zilmer.com.br>. Acesso em: 19 maio 2024.

SAREL. Seccionadores. Diadema - SP, 2013. Disponível em: <http://www.sarel.com.br>. Acesso em: 21 maio 2024.

SERRA DOURADA NEWS, Portal. **Enel amplia e moderniza subestação Itumbiara Nova**. [S. l.], 2020. Disponível em: <https://sdnews.com.br>. Acesso em: 18 maio 2024.

SOARES, Lucas Lima. **Manutenção de subestações classe 15 kv, procedimentos e ensaios segundo normas aplicáveis da ABNT e MTE. 2013**. Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Instituto Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.

SOUZA, Carinne Ariane Brito Nery De. **Comparativo de subestações com diferentes tipos de isolamento**. 2023. Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Pernambuco, [s. l.], 2023.

TANAKA, E. H. et al. A collaborative, immersive, virtual reality environment for training electricians. **Journal on Interactive Systems**, v. 14, n. 1, p. 59-71, 2023.

TEQUIPMENT. **AEMC 8510 - Digital Transformer Turns Ratiometer**. [s. l.], 2024. Disponível em: <https://www.tequipment.net/>. Acesso em: 25 maio 2024.

TORI, Romero; KIRNER, Claudio; SISCOUTTO, Robson Augusto. **Fundamentos e tecnologia de realidade virtual e aumentada**. Editora SBC, 2006.

TSINFRA, **Subestações Isoladas a Gás: Subestação Gis Olímpica**. [s. l.], 2020. Disponível em: <https://www.tsinfra.com.br/full-turnkey/subestacoes-isoladas-a-gas-gis/>. Acesso em: 18 maio 2024.

UNITY TECHNOLOGIES. **Unity Student**. [s. l.], 2024. Disponível em: <https://unity.com/pt/products/unity-student>. Acesso em: 15 jun 2024.

VALENTE, Marco Tulio. **Engenharia de Software Moderna**. 1ª edição. ed. [s. l.]: Independente, 2022. 408 p.

VIRTUAL ENGENHARIA.[s. l.], 2024. Disponível em: <https://www.virtualenge.com>. Acesso em: 20 jul. 2024.

WEG. **Subestação Convencional**. [s. l.], 2024. Disponível em: <https://www.weg.net/catalog/weg>. Acesso em: 17 maio 2024.

ZILMER. **Corrente**. São Paulo, 2024. Disponível em: <https://www.zilmer.com.br/corrente-pt>. Acesso em: 19 maio 2024.

ZILMER. **Potencial**. São Paulo, 2024. Disponível em: <https://www.zilmer.com.br/potencial-pt>. Acesso em: 19 maio 2024.