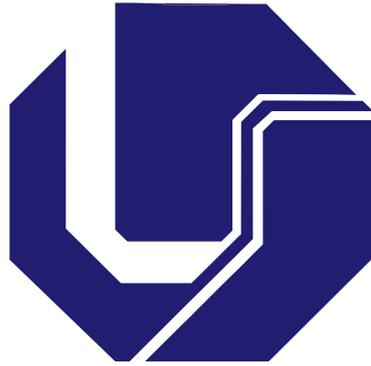


UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



**SISTEMA MULTIUSUÁRIO PARA TREINAMENTO EM  
SUBESTAÇÕES DE ENERGIA ELÉTRICA APOIADO POR  
TÉCNICAS DE REALIDADE VIRTUAL**

**Jair de Oliveira Pereira Neto**

Julho  
2024

**JAIR DE OLIVEIRA PEREIRA NETO**

**SISTEMA MULTIUSUÁRIO PARA TREINAMENTO EM  
SUBESTAÇÕES DE ENERGIA ELÉTRICA APOIADO POR  
TÉCNICAS DE REALIDADE VIRTUAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação da Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

**Banca Examinadora:**

Prof. Edgard Afonso Lamounier Jr, PhD – Orientador (Universidade Federal de Uberlândia)

Prof. Alexandre Gomes Siqueira, PhD (University of Florida)

Prof. Paulo Henrique Oliveira Rezende, Dr. (Universidade Federal de Uberlândia)

Prof. Gerson Flavio Mendes de Lima, Dr. (Computer Graphics Works)

Uberlândia

2024

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU  
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

P436  
2024

Pereira Neto, Jair de Oliveira, 1999-  
Sistema Multiusuário para Treinamento em Subestações  
de Energia Elétrica Apoiado por Técnicas de Realidade  
Virtual [recurso eletrônico] / Jair de Oliveira Pereira  
Neto. - 2024.

Orientador: Edgard Afonso Lamounier Junior.  
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de  
Uberlândia, Pós-graduação em Engenharia Elétrica.  
Modo de acesso: Internet.  
Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2024.500>  
Inclui bibliografia.  
Inclui ilustrações.

1. Engenharia elétrica. I. Lamounier Junior, Edgard  
Afonso, 1964-, (Orient.). II. Universidade Federal de  
Uberlândia. Pós-graduação em Engenharia Elétrica. III.  
Título.

CDU: 621.3

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:

Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091  
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074

# Agradecimentos

A minha mãe pelo exemplo, pelo incentivo e pelo apoio proporcionado em todas as etapas de minha vida.

Ao Professor Edgard Lamounier, pelas sábias orientações, oportunidades e ensinamentos, sendo um grande instrutor, companheiro e amigo.

Aos Professores Alexandre Cardoso e Gerson Flavio, pela confiança, apoio e conselhos durante todo o decorrer do mestrado.

Agradeço aos meus amigos Gabriel Cyrino, Lucas Pinheiro e aos demais amigos pela grande contribuição durante o desenvolvimento deste trabalho.

Aos demais colegas do Grupo de Realidade Virtual e Aumentada (GRVA) pelo companheirismo, apoio e profissionalismo.

À Eletrobras (Centrais Elétricas Brasileiras) por todo suporte e apoio financeiro, além da oportunidade para realização da pesquisa.

À FAPEMIG (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais), pelo apoio financeiro concedido no âmbito do projeto.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia, pelo excelente serviço prestado.

E a todos aqueles que contribuíram para a realização deste trabalho, meus sinceros agradecimentos.

# Resumo

NETO, Jair O. **Sistema Multiusuário para Treinamento em Subestações de Energia Elétrica Apoiado por Técnicas de Realidade Virtual**. Dissertação de Mestrado – Faculdade de Engenharia Elétrica – UFU. Uberlândia, 2024.

Subestações elétricas são componentes cruciais no sistema de energia, responsáveis pela transmissão eficiente e segura de eletricidade. Devido aos altos níveis de tensão e potência, a operação e manutenção dessas instalações envolvem riscos significativos, tornando o treinamento uma necessidade. Tradicionalmente, esses treinamentos são conduzidos em espaços geograficamente separados das subestações reais, baseando-se em documentos e demonstrações teóricas, o que cria uma lacuna significativa entre o ambiente de treinamento e o cenário operacional real. A fim de reduzir essas limitações, este trabalho tem como objetivo principal desenvolver uma plataforma de treinamento baseada em Realidade Virtual (RV) imersiva, com suporte a multiusuários, para simular operações em subestações elétricas. A metodologia empregada incluiu a revisão de literatura relevante, definição de requisitos e desenvolvimento de um sistema de RV imersiva. A arquitetura proposta foi dividida em três fases principais: solicitação de treinamento, modelagem de ativos e concepção do treinamento. O sistema integra dados em tempo real com o SAGE, um sistema de supervisão da subestação da Eletrobras uma empresa estatal brasileira do setor de energia elétrica, proporcionando um ambiente de treinamento mais próximo das condições reais de trabalho. A plataforma foi avaliada com base no System Usability Scale (SUS), por meio de testes práticos com operadores. Os testes indicaram uma alta aceitação do sistema, destacando a eficácia da RV imersiva no treinamento de operações em subestações elétricas. A aplicação multiusuário permitiu uma experiência de treinamento colaborativa, simulando as dinâmicas de trabalho em grupo. A análise dos dados do SUS revelou que os usuários acharam o sistema fácil de usar e integraram as funcionalidades oferecidas. Concluiu-se que a aplicação de RV imersiva, aliada ao suporte multiusuário, enriqueceu significativamente a experiência de treinamento, tornando-a mais acessível, seguro e interessante. A aceitação positiva sugere que esta abordagem pode ser adotada como um processo contínuo e integrado aos métodos de treinamento existentes.

**Palavras-chave:** Multiusuário, Realidade Virtual, Subestação Elétrica.

# Abstract

NETO, Jair O. **Multi-User System for Training in Electrical Substations Supported by Virtual Reality Techniques**. Masters Dissertation – Faculty of Electrical Engineering – UFU. Uberlândia, 2024.

Electrical substations are crucial components in the power supply system, responsible for the efficient and safe transmission of electricity. Due to the high levels of voltage and power, the operation and maintenance of these facilities involve significant risks, making training a necessity. Traditionally, this training is conducted in locations geographically separate from the actual substations, relying on documents and theoretical demonstrations, which creates a significant gap between the training environment and the real operational scenario. To reduce these limitations, the primary objective of this work is to develop an immersive Virtual Reality (VR) training platform with multi-user support to simulate operations in electrical substations. The methodology employed included a review of relevant literature, requirement definition, and the development of an immersive VR system. The proposed architecture was divided into three main phases: training request, asset modeling, and training design. The system integrates real-time data with SAGE, Eletrobras' substation supervision system, providing a training environment that closely mirrors real working conditions. The platform was evaluated based on the System Usability Scale (SUS) through practical tests with operators. The tests indicated a high acceptance of the system, highlighting the effectiveness of immersive VR in training for operations in electrical substations. The multi-user application allowed for a collaborative training experience, adequately simulating the dynamics of group work. The analysis of the SUS data revealed that users found the system easy to use and well-integrated with the functionalities offered. It was concluded that the application of immersive VR, combined with multi-user support, significantly enriched the training experience, making it more accessible, safe, and engaging. The positive acceptance suggests that this approach can be adopted as a continuous process and integrated with existing training methods.

**Keywords:** Multi-user, Virtual Reality, Training, Electrical substation.

# Publicações

As publicações resultantes deste trabalho são apresentadas a seguir:

1. NETO, Jair et al. Enhancing Electrical Substation Training through Multi-User Virtual Reality Techniques. In: PROCEEDINGS of the 25th Symposium on Virtual and Augmented Reality. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, jan. 2024. (SVR '23), p. 105–111. ISBN 9798400709432. DOI: 10.1145/3625008.3625025.
2. NETO, Jair de Oliveira Pereira et al. An Immersive Multi-User VR-based System for the Training of Electrical Substation Maintenance. English. In: p. 1216–1217. ISBN 9798350374490. DOI: 10.1109/VRW62533.2024.00402.

# Lista de Figuras

2.1	Esquema em uma subestação contendo uma banca de capacitor. . . . .	5
3.1	Estrutura do Treinamento Desenvolvido. . . . .	11
3.2	Jogo Serio para Treinamento em Áreas Urbanas. . . . .	11
3.3	Demostrações da Aplicação do Treinamento. . . . .	13
3.4	Apresentação do sistema de treinamento. . . . .	14
3.5	Demonstração do sistema de treinamento com vários usuários. . . . .	15
3.6	Sistema de treinamento desenvolvido. . . . .	17
4.1	Diagrama de construção de cena. . . . .	20
4.2	Diagrama do sistema de treinamento. . . . .	24
4.3	Sistema de Requerimento de movimento online. . . . .	26
4.4	Funcionalidade da camada de interação do sistema. . . . .	30
4.5	Funcionalidade da camada de controle do sistema. . . . .	31
5.1	Script responsável pelo controle das mãos . . . . .	36
5.2	Script responsável pelo controle das mãos . . . . .	37
5.3	Script de entrada nos elementos . . . . .	37
5.4	Sistema de uso de Socket Interactor. . . . .	38
5.5	Script de Criação da copia . . . . .	38
5.6	Script de correção ao soltar um objeto na cena . . . . .	39
5.7	Script de conexão Inicial . . . . .	40
5.8	Script de Entrada de demais usuários . . . . .	41
6.1	Movimentação de Teletransporte. . . . .	43

6.2	Movimentação de rotação. . . . .	43
6.3	Movimento de segurar. . . . .	44
6.4	Utilização dos Equipamentos do CB-2000. . . . .	44
6.5	Sistema de uso de Socket Interactor. . . . .	45
6.6	Uso do sistema de treinamento na Banca de capacitor. . . . .	45
6.7	Utilização dos Equipamentos do CB-2000. . . . .	46
6.8	Utilização dos macacos. . . . .	47
6.9	Carrinho em frente ao transformador. . . . .	47
6.10	Uso do sistema para puxar o transformador. . . . .	47
6.11	Desafios Superados. . . . .	51

# Lista de Tabelas

3.1	Comparação entre os trabalhos relacionados. . . . .	18
6.1	Grupo de controle. . . . .	49
6.2	Resultados tratados do Grupo de controle. . . . .	50
6.3	Grupo de controle. . . . .	51
6.4	Resultados tratados do Grupo de controle. . . . .	52

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Contextualização e Motivação . . . . .	1
1.2	Objetivos . . . . .	2
1.2.1	Objetivo Principal . . . . .	2
1.2.2	Objetivos Específicos . . . . .	2
1.3	Organização da Dissertação . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Fundamentação Teórica</b>	<b>4</b>
2.1	Introdução . . . . .	4
2.2	Subestações de Energia Elétrica . . . . .	4
2.3	Realidade Virtual (RV) . . . . .	6
2.3.1	Realidade Virtual e Treinamento com Multiusuários . . . . .	6
2.4	Considerações Finais . . . . .	7
<b>3</b>	<b>Trabalhos Relacionados</b>	<b>9</b>
3.1	Introdução . . . . .	9
3.2	Treinamento Colaborativo em RV para Eletricistas . . . . .	10
3.3	Treinamento em RV para Linhas Energizadas . . . . .	12
3.4	Treinamento em Subestação Elétrica: Usabilidade . . . . .	13
3.5	Treinamento com Multiusuário: Um Estudo de Caso . . . . .	15
3.6	Treinamento em subestações Fotovoltaicas . . . . .	16
3.7	Considerações Finais . . . . .	17

<b>4</b>	<b>Metodologia e Arquitetura do Sistema</b>	<b>19</b>
4.1	Introdução . . . . .	19
4.2	Arquitetura de Construção . . . . .	19
4.2.1	Solicitações de Treinamento . . . . .	21
4.2.2	Modelagem de Ativos . . . . .	21
4.2.3	Concepção do Treinamento . . . . .	22
4.3	Arquitetura do Sistema . . . . .	23
4.3.1	Recebimento de dados no servidor . . . . .	24
4.3.2	Servidor em Nuvem . . . . .	25
4.3.3	Uso da aplicação . . . . .	25
4.4	Requisitos e Casos de Uso . . . . .	26
4.4.1	Requisitos Funcionais . . . . .	26
4.4.2	Requisitos Não Funcionais . . . . .	29
4.4.3	Casos de Uso . . . . .	29
4.5	Considerações finais . . . . .	34
<b>5</b>	<b>Detalhes de Implementação</b>	<b>35</b>
5.1	Introdução . . . . .	35
5.2	Sistema de Reconhecimento de Mãos . . . . .	35
5.3	Sistema de conexão com equipamentos (Sockets) . . . . .	36
5.4	Multiusuário . . . . .	39
5.5	Considerações finais . . . . .	41
<b>6</b>	<b>Resultados e Discussão</b>	<b>42</b>
6.1	Introdução . . . . .	42
6.2	Descrição das Funcionalidades . . . . .	42
6.2.1	Banca de capacitores . . . . .	42
6.2.2	Movimentação do Transformador . . . . .	46
6.3	Avaliação do Treinamento . . . . .	48
6.4	Considerações finais . . . . .	53
<b>7</b>	<b>Conclusões e Trabalhos Futuros</b>	<b>54</b>
7.1	Conclusões . . . . .	54
7.2	Trabalhos Futuros . . . . .	55

# Introdução

## 1.1 Contextualização e Motivação

Subestações elétricas são a base e a estrutura mais simples de um sistema elétrico (MONDRAGÓN BERNAL et al., 2022). Devido à sua importância, essas estruturas necessitam de manutenção e cuidados contínuos ao longo de sua vida útil. No entanto, devido à alta potência e tensão, os perigos associados à reparação e operação dentro dessas subestações são significativos (ZUYDAM; S; F, 2016). Consequentemente, o treinamento para operar dentro de subestações é necessário e obrigatório (MORENO et al., 2020). Contudo, esses treinamentos, geralmente, são realizados em ambientes afastados das subestações reais, principalmente, devido aos riscos envolvidos. Isso cria uma discrepância substancial entre o cenário real e o ambiente de treinamento. Em muitos casos, as abordagens tradicionais ainda dependem do estudo de documentos e fornecem apenas demonstrações indiretas de operações de alto risco, podendo dificultar na hora da prática devido a distância do real. (PASCULESCU et al., 2022; LAMBERT-TORRES et al., 1997).

Apesar da utilização de simuladores para imitar condições do mundo real em subestações (MONDRAGÓN BERNAL et al., 2022), suas limitações atuais impedem uma replicação precisa das dinâmicas complexas e do trabalho em grupo dos ambientes reais. O que podem ter acatado no número significativo de acidentes em subestações (MARCIA L., 2022; ARROYO; ARCOS, 1999). De fato, subestações elétricas experimentam uma frequência notável de acidentes de trabalho (PASCULESCU et al., 2022), apesar da existência de leis e requisitos. Isso destaca a importância de programas de treinamento eficazes e realistas, visando reduzir a frequência desses acidentes e a chance de sua ocorrência.

A Realidade Virtual (RV) representa um avanço significativo da aplicação e estudo de tecnologias imersivas em diversos campos (ZAMBRANO et al., 2020). Entre essas tecnologias, um método prevalente é a utilização de objetos 3D para facilitar a imersão em ambientes virtuais. Dada sua notável capacidade de imersão e interação, o uso de RV no treinamento se tornou uma realidade (MONDRAGÓN BERNAL et al., 2022; TANAKA et al., 2023; GONZALEZ LOPEZ et al., 2019; MORENO et al., 2020).

A RV é empregada para aumentar a eficiência do treinamento e criar um ambiente mais realista e prático que busca simular fielmente tarefas diárias dos trabalhadores (CHANG et al., 2010; FANQI; YUNQI, 2010; MONDRAGÓN BERNAL et al., 2022; WANG; LI, 2010). Dessa forma o ambiente é muito mais seguro, visto que, consegue simular o real sem os perigos, além de redução de custos, pois não são necessárias grandes manobras no campo para simular e ensinar os operadores. Além disso, como uma solução proposta para reduzir os riscos nas subestações, o treinamento em RV surge como uma ferramenta potencial. No entanto, permanece um desafio na abordagem atual desse tipo de treinamento em RV, pois, geralmente, envolve apenas um usuário por vez (ARROYO; ARCOS, 1999; FANQI; YUNQI, 2010; LAMBERT-TORRES et al., 1997; MONDRAGÓN BERNAL et al., 2022; WANG; MAO et al., 2010). Essas limitações podem dificultar o usuário de identificar e resolver problemas que ocorrem, afastando ainda mais a experiência de treinamento das situações da vida real, que frequentemente envolvem trabalho em equipe e preparação intensa (ZAMBRANO et al., 2020). Consequentemente, treinar operadores para trabalhar isoladamente desvia-se do contexto operacional real.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo Principal**

Esse trabalho tem como objetivo principal desenvolver uma plataforma para o uso de tecnologias, baseado em RV, com intuito treinamento em uma subestação elétrica usando um método de multiusuário.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

Para alcançar o objetivo desta pesquisa, as seguintes objetivos específicos foram propostos:

- Fazer uma revisão da literatura sobre treinamento em RV em subestações.

- Identificar os requisitos funcionais e não-funcionais para o desenvolvimento do sistema;
- Avaliar os métodos de treinamento utilizados em abordagens tradicionais, para replicá-las em um ambiente de RV;
- Propor e implementar uma arquitetura para a interação entre os usuários e a aplicação em RV;
- Desenvolver um ambiente virtual baseado em técnicas de paramétricas;
- Identificar estudos de casos para demonstrar o potencial da arquitetura proposta;
- Realizar testes com operadores e engenheiros eletricitista , para verificar efetividade;
- Analisar os resultados obtidos na avaliação do sistema, com o intuito de validar as técnicas computacionais desenvolvidas.

### 1.3 Organização da Dissertação

Nestas dissertação, o Capítulo 2 apresenta os fundamentos teóricos dos principais temas associados ao trabalho e sua aplicação.

O Capítulo 3 apresenta o estado da arte referente às principais pesquisas e aplicações desenvolvidas que fazem o uso de Realidade Virtual no processo de treinamento em subestações elétricas com multiusuários.

No Capítulo 4, a modelagem e a arquitetura da solução implementada é detalhada, apresentando os estágios seguidos no desenvolvimento do sistema.

No Capítulo 5, são apresentados os detalhes de implementação sendo diversos códigos principais responsáveis pelo funcionamento do sistema.

No Capítulo 6, é apresentada a metodologia adotada na avaliação do sistema, compondo os testes e o protocolo de treinamento e os resultados provenientes desses dados de modo avaliativo.

Finalmente, o Capítulo 6 apresenta as conclusões e perspectivas de trabalhos futuros, dessa pesquisa.

## Fundamentação Teórica

### **2.1 Introdução**

Este capítulo tem o intuito de apresentar conceitos abordados ao longo da dissertação. Em sua essência, o texto trata de tópicos relacionados a subestações elétricas e suas necessidades de treinamento. Logo após, são abordados conceitos de Realidade Virtual, Multiusuários e Interface Humano-Computador, contextualizando o impacto da utilização dessas tecnologias no âmbito da treinamento em subestações de energia.

### **2.2 Subestações de Energia Elétrica**

Subestações de energia são o componente chave de um sistema de energia (MONDRAGÓN BERNAL et al., 2022). Subestações são responsáveis pela transmissão de energia de sistemas elétricos, sendo o componente responsável por transportar a energia gerada pelas usinas hidrelétricas (CARVALHO; PEREIRA; OLIVEIRA, 2023; CREDER, 2016).

Figura 2.1: Esquema em uma subestação contendo uma banca de capacitor.



Fonte: Zhaojiankang, 2021.

Uma subestação elétrica é uma instalação que contém equipamentos como transformadores, disjuntores, seccionadores e sistemas de proteção e controle como pode ser observado na Figura 2.1. Esses componentes trabalham em conjunto para modificar os níveis de tensão da energia elétrica, facilitando sua distribuição de maneira eficiente e segura para diferentes regiões. Tipicamente, a energia chega em corrente contínua é transformada em corrente alternada (DAISY et al., 2023).

Dessa forma, observa-se que a funcionalidade das subestações elétricas é de extrema importância e envolve um alto nível de perigo. Portanto, longos treinamentos e operações cuidadosas são necessários para sua manutenção e operação. Trabalhos de alta periculosidade, como os que envolvem subestações de energia, requerem esses treinamentos rigorosos para evitar riscos e acidentes. Apesar desses treinamentos serem realizados de forma individual, muitas vezes, a operação em campo é feita em pares, conforme destacado por Tanaka et al. (2023).

Devido à importância desses sistemas, a monitoração é realizada de maneira contínua e própria (OLIVEIRA et al., 2021). Esse sistema de monitoramento é projetado para regular e estudar qualquer variação inesperada na rede, que pode causar grandes perdas ou falta de energia em várias regiões.

O treinamento para todas essas operações segue um esquema tradicional, no qual o ope-

radador é submetido a diversas palestras e reuniões online, sem ter contato direto com o campo. Isso pode gerar desafios de engajamento e dificuldades no aprendizado (FREIFELD, 2023; WEBEL et al., 2013). A forma como esse treinamento é aplicado pode criar uma grande distância entre o aprendizado teórico e a prática no campo, resultando em dificuldades para o operador assimilar e aplicar o conhecimento adquirido, o que pode complicar as operações.

## 2.3 Realidade Virtual (RV)

Realidade Virtual (RV) é um processo que utiliza diversas tecnologias para criar um ambiente imersivo ou não-imersivo também para o usuário, permitindo uma ampla gama de interações e aplicações (CAO; NG; YE, 2023). De uma forma mais geral, a RV pode ser definida como uma interface Humano-Computador cujo foco principal é a imersão e o uso de interações naturais. Para alcançar esses resultados, os equipamentos de RV estão em constante evolução, sempre incorporando novas ferramentas para aprimorar a experiência no ambiente virtual (JAVVAJI et al., 2024).

Para a criação desses ambientes, existem duas grandes áreas do RV, a grande diferença entre as duas é a sensação de estar dentro do ambiente (VENTURA et al., 2019; KOBER; KURZMANN; NEUPER, 2012), visto que, o imersivo é quando um ou mais sentidos estão totalmente imersos dentro daquele ambiente, como o óculos do Meta . Já realidade não-imersiva é que essa obrigatoriedade não existe, obtendo a imersão apenas por uma tela ou diversas, como jogo ou aplicações de simulações.

Com esses avanços tecnológicos, a RV tem sido explorada em vários contextos, incluindo ambientes de treinamento e simulação de situações de perigo para operadores. Essa abordagem se justifica pela capacidade de inserir o usuário em um ambiente de risco sem expô-lo a perigo real, o que simplifica significativamente o processo. No treinamento, o uso da RV é semelhante, sendo aplicada em diversos contextos, como em subestações de energia (NETO et al., 2024).

### 2.3.1 Realidade Virtual e Treinamento com Multiusuários

O treinamento é realizado em diversas áreas de trabalho de diferentes formas. Há um crescente número de artigos e pesquisas nessa área, focados na construção de ambientes imersivos em que os operadores possam aprender sobre os sistemas com segurança e testar diferentes possibilidades (TANAKA et al., 2023; XIAO et al., 2023; MONDRAGÓN BERNAL et al., 2022).

A tecnologia de multiusuários é utilizada em casos onde vários intermediários estão no mesmo ambiente, mesmo que não estejam fisicamente no mesmo local. Exemplos incluem jogos online, treinamentos e reuniões virtuais. Essa tecnologia, aplicada em sistemas de treinamento, oferece grandes vantagens (ZAMBRANO et al., 2020). Entre essas vantagens estão a capacidade de usuários interagirem e se comunicarem entre si, aumentando a imersão e a eficácia do treinamento, especialmente em simulações de emergência (LERNER et al., 2020).

Ao combinar RV com tecnologia de multiusuários, é possível criar sistemas de prática realistas para diversos treinamentos, como os realizados em subestações elétricas, que geralmente são feitos em pares (ZAMBRANO et al., 2020). Diversos treinamentos já foram desenvolvidos nesse contexto, utilizando RV e multiusuários, como os trabalhos de (TANAKA et al., 2023; LERNER et al., 2020; MORENO et al., 2020). Esses trabalhos focam em temas específicos de treinamento, sem sobreposição, demonstrando a alta aceitação e eficácia dos treinamentos multiusuários entre o público-alvo.

Esses sistemas precisam de algumas ferramentas para suportar um ambiente de multiusuário, como diversos computadores ou aparelhos de RV, além de uma rede estável para a conexão entre os equipamentos. É essencial que o sistema suporte múltiplos usuários interagindo simultaneamente com o ambiente e entre si, ou não. Por último, é necessária uma capacidade robusta de sincronização de todos os dados e informações entre todos os usuários presentes e o servidor, que pode ser dedicado ou não.

## 2.4 Considerações Finais

A RV, com seu potencial de criar ambientes imersivos e seguros, surge como uma ferramenta possível para treinamento, especialmente em áreas de alta periculosidade, como subestações de energia. A capacidade de simular situações de risco sem expor os operadores ao perigo real facilita o aprendizado e a preparação para situações emergenciais.

A tecnologia de multiusuários, ao ser integrada com RV, oferece ainda mais vantagens, permitindo interações colaborativas e comunicação entre os participantes, independentemente de sua localização geográfica. Isso não só aumenta a imersão e a eficácia do treinamento, mas também prepara melhor os operadores para a realidade do trabalho em equipe no campo.

Entre as tecnologias existentes elas apontam para uma aceitação crescente e resultados dentro do esperado. Assim, a combinação de RV e sistemas multiusuários se apresenta como

uma solução inovadora e eficiente para a formação de profissionais capacitados e preparados para enfrentar os desafios do setor elétrico.

## Trabalhos Relacionados

### 3.1 Introdução

Este capítulo apresenta uma análise e um estudo comparativo dos trabalhos relacionados a essa pesquisa. A análise foi feita sobre treinamento em subestações elétricas com foco em multiusuários em RV. Para uma revisão bibliográfica foi realizada uma busca em diversas bases de dados, como *IEEE Xplore Digital Library*, *Applied Sciences*, *ACM Digital Library*, *Springer*, *Journal on Interactive Systems*, *BioMedCentral*, *Wiley Online Library* e bibliotecas digitais como o banco de teses e Dissertações da UFU, dentre outras. A string usada para a pesquisa nesses repositórios foi ((“Multi User”) AND (“Training”) AND (“Virtual Reality”) AND (“Electrical Substation”)) OR ((“Electrical Substation”) AND (“Virtual Reality”) AND (“Training”) AND (“Multi User”)).

No total foram encontrados 906 trabalhos correlacionados com as palavras-chave. O principal motivo para avaliação da relevância deste trabalho foi o uso de multiusuário no seu desenvolvimento ou treinamentos para subestações elétricas. Para essa classificação foram feitos os seguintes tópicos para a inclusão/exclusão e avaliação:

1. **Interação Multiusuário:** A aplicação suporta mais de um usuário interagindo com o ambiente. Essas entradas podem ser feitas em uma mesma localização ou não, permitindo que várias pessoas geograficamente separadas possam interagir e realizar o treinamento em conjunto a qualquer momento.
2. **Aplicação em Subestações Elétricas:** Se o trabalho e o treinamento são feitos para subestações elétricas.

3. **Interface e Aplicação de RV imersiva:** Suporta técnicas de RV imersiva, de modo a recriar ao máximo a sensação natural para o operador, permitindo visualizar, interagir e manipular objetos presentes no ambiente de forma imersiva.
4. **Foco em Treinamento:** A finalidade do sistema se restringe ao treinamento de operadores no sistema de energia, podendo ainda ser aplicado em outros tipos de operações dentro de uma subestação elétrica.
5. **Modelos Parametrizados:** Para treinamentos em subestações elétricas, o uso de equipamentos parametrizados detalhados são mais relevantes, devido a necessidade de mostrar dados para leitura de maneira mais simples para o usuário. Por exemplo: no treinamento de leitura de uma banca de capacitor um modelo parametrizado permite o operador colocar os conectores em diferentes pontos do banco de capacitores, conseguindo acessar mais facilmente o resultado dessa medida.

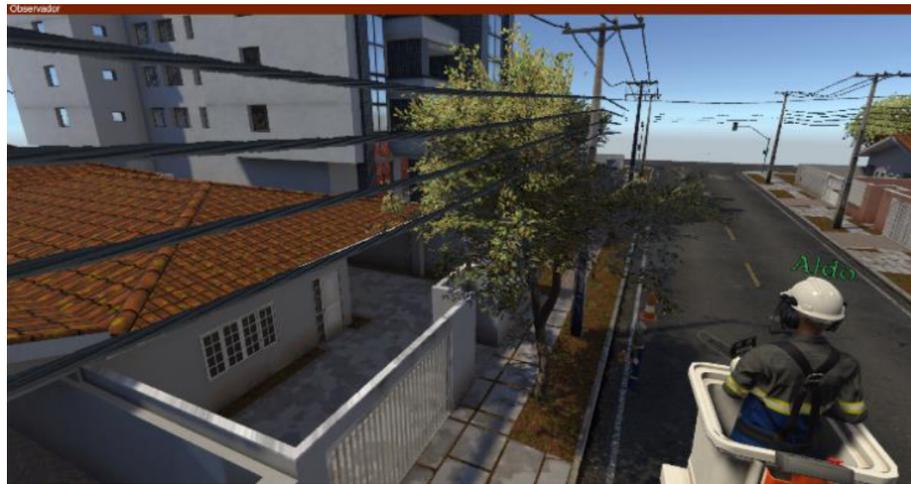
Dentre os trabalhos selecionados após a aplicar os critérios de inclusão, os trabalhos que apresentaram maior relevância e similaridade com relação à pesquisa são discutidos a seguir.

## 3.2 Treinamento Colaborativo em RV para Eletricistas

Esse trabalho, desenvolvido por Tanaka et al. (2023), aborda um treinamento realizado com eletricistas para operações de segurança em ambiente urbano, como a operação de cortes de árvores ou mudança de disjuntores em postes de energia. Dessa forma, consegue-se treinar os operadores para situações de emergência e segurança, sem expô-los a riscos.

O sistema é composto por vários sistemas de treinamento e operações diferentes, utilizando um sistema de RV imersiva, como mostrado na Figura 3.1. Esse *framework* consiste na análise dos comandos do usuário para construir uma narrativa interativa e realista para os operadores, com o uso dos controles do *Meta Quest 2* (TANAKA et al., 2023). Devido a isso, o trabalho tem a capacidade de simular os movimentos do operador dentro do sistema, aumentando uma imersão.

Figura 3.1: Estrutura do Treinamento Desenvolvido.

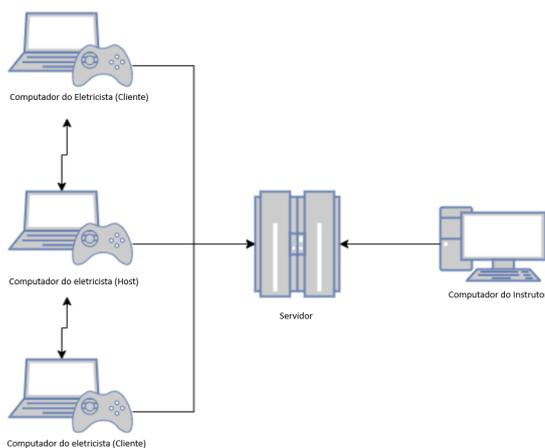


Fonte: (TANAKA et al., 2023)

Os autores desenvolveram uma colaboração de multiusuários, com uma arquitetura que pode ser observado na Figura 3.2, com a capacidade de ter diversos usuários em conjunto trabalhando em uma mesma operação. Além disso, durante o artigo discute a forma de trabalho dos operadores e a importância de suas observações para o desenvolvimento.

Esse trabalho traz treinamento com modelos mais realistas e parametrizados, como pode ser visto na Figura 3.2. Então, a criação de um ambiente virtual seguro para testes se torna possível dentro dessa arquitetura.

Figura 3.2: Jogo Serio para Treinamento em Áreas Urbanas.



(a) Arquitetura Usada no trabalho.



(b) Ambiente virtual de jogo em execução.

Fonte: Adaptado de (TANAKA et al., 2023)

O trabalho traz uma metodologia eficiente para o uso de RV e treinamento dentro de um

ambiente perigoso, além de introduzir o multiusuário, que é importante para um sistema dessa forma, visto que, operações em redes de energia são feitas com mais pessoas (TANAKA et al., 2023).

Entretanto, esse trabalho não se faz dentro de subestações elétricas ficando apenas com os postes em regiões urbanas, não atendendo todos os tópicos.

### **3.3 Treinamento em RV para Linhas Energizadas**

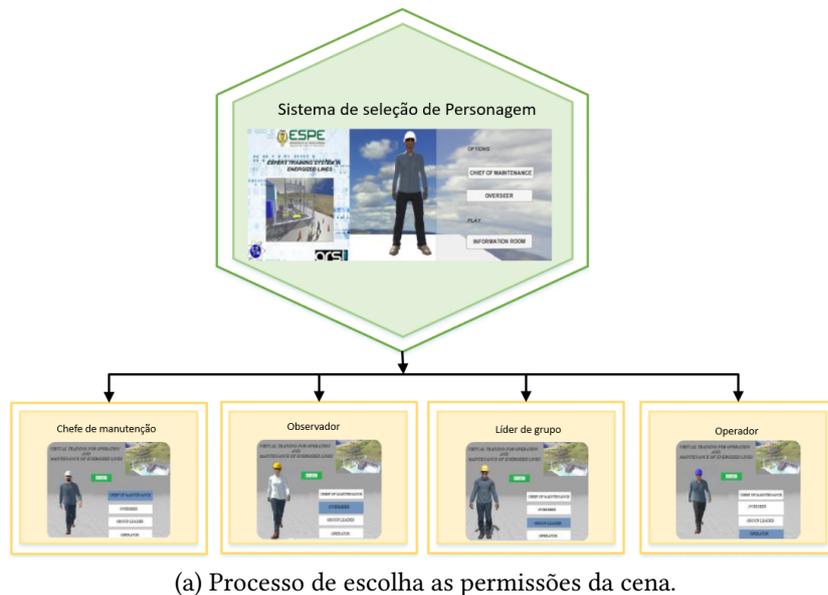
O foco deste trabalho é a construção de um treinamento específico em linhas energizadas que entram em contato com subestações elétricas (MORENO et al., 2020), onde é apresentado um treinamento em RV com capacidade multiusuários. Porém, ainda, não se trabalha com foco em de subestações elétricas . A aplicação permite que o operador interaja com o ambiente virtual dentro de operações fechadas e específicas, como a manutenção de energia ou casas de transmissão.

No treinamento, os usuários podem escolher diferentes tipos de permissões que podem aparecer na operação, como pode ser observado na Figura 3.3. O ambiente é construído com base em uma parte de uma subestação elétrica, com um ambiente para reuniões e planejamento das operações.

De acordo com os autores, o projeto traz uma aplicação próxima da realidade dos eletricitistas (MORENO et al., 2020). Nessa pesquisa, os autores chegaram a resultados positivos de usabilidade e aceitação dos operadores ao usar um sistema de RV imersiva.

Porém, o trabalho traz uma arquitetura não parametrizada, o que pode dificultar para medições específicas ou em cabos específicos, distanciado da realidade. Além disso, o sistema não oferece uma visão completa de uma subestação elétrica, apenas a parte de transmissão de energia.

Figura 3.3: Demonstrações da Aplicação do Treinamento.



Fonte: Adaptado de (MORENO et al., 2020)

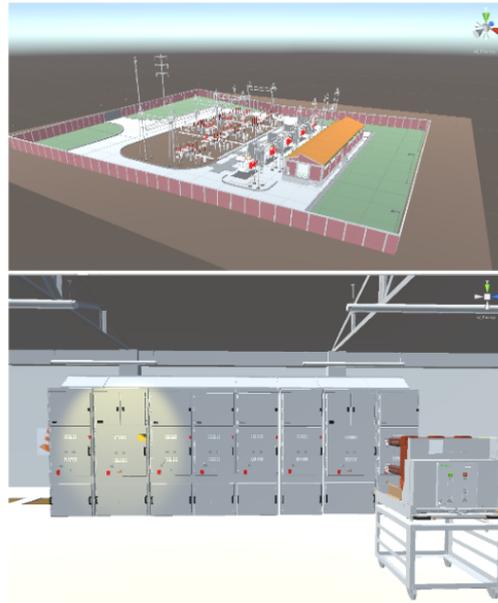
### 3.4 Treinamento em Subestação Elétrica: Usabilidade

A pesquisa de Mondragón Bernal et al. (2022) apresenta o desenvolvimento de um treinamento por meio de uma subestação elétrica, em um ambiente de RV imersiva. Além disso, faz uma análise profunda da usabilidade com operadores visando as manutenções que são feitas dentro do planejado.

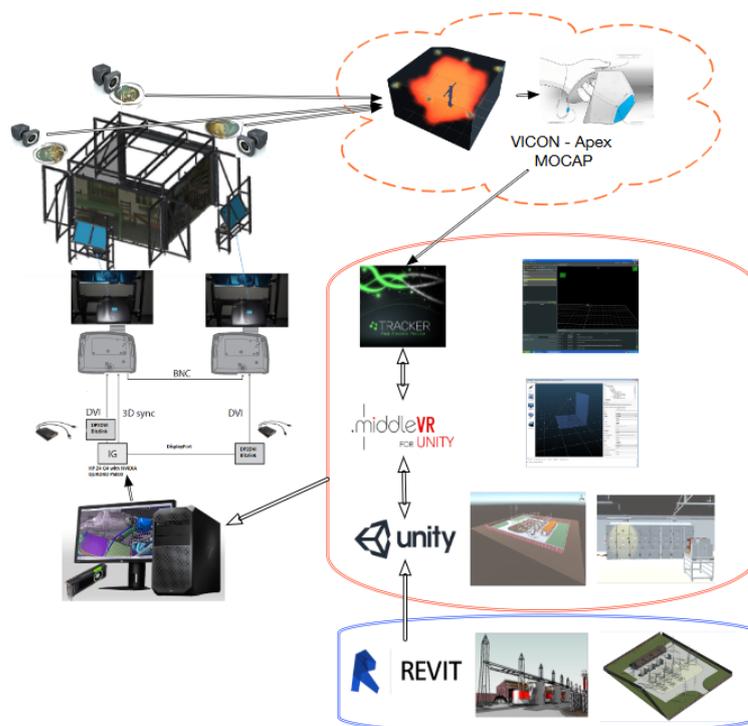
A Figura 3.4 mostra um exemplo do resultado obtido no ambiente final e um esquema mostrando como o sistema foi desenvolvido, desde a construção dos modelos até a sua estratégia

de projeção em paredes para permitir que usuários que não estejam usando os óculos possam saber o que está acontecendo dentro do ambiente.

Figura 3.4: Apresentação do sistema de treinamento.



(a) Ambiente do jogo em execução.



(b) Arquitetura do projeto.

Fonte: (MONDRAGÓN BERNAL et al., 2022)

Com a arquitetura proposta, é possível criar um ambiente virtual com capacidade de ser projetado nas paredes de uma sala, facilitando para quem estiver de fora poder reconhecer e fazer as instruções para o treinando, tornando o treinamento muito dinâmico.

Além disso, traz uma análise relevante sobre o uso do treinamento em subestações elétricas, chegando ao final a um resultado de maior aceitação e um treinamento eficiente, visto que, os operadores podiam ver o campo em 360, sendo esses modelos parametrizados. Os operadores e os treinadores observaram que a ferramenta é eficiente, além de ter grande capacidade de aumentar e melhorar os treinamentos que já acontecem, além de permitir planejamento para futuras operações. Entretanto, o sistema criado pelo autor não suporta multi usuários.

### 3.5 Treinamento com Multiusuário: Um Estudo de Caso

Lerner et al. (2020) propõem uma estrutura baseada em RV para situações de emergência de saúde para médicos e enfermeiros. Apesar do trabalho trazer uma perspectiva diferente da parte elétrica, ele traz um estudo aprofundado em como realizar operações e interações entre diversos usuários, podendo ou não estar no mesmo ambiente, como exemplificado Figura 3.5.

Figura 3.5: Demonstração do sistema de treinamento com vários usuários.



Fonte: (LERNER et al., 2020)

O sistema é extremamente eficiente no quesito trabalho em conjunto, pois consegue reconhecer individualmente cada usuário e atribuir funções para que possam realizar operações diferentes dentro de um mesmo ambiente. Além disso, tem a capacidade de ver as mãos dos outros usuários, permitindo saber onde cada pessoa está e em que região está sendo trabalhada. Apesar do próprio trabalho relatar limitações com diversos usos do aplicativo, devido ao tipo do treinamento ser específico e fechado, obteve-se uma visão positiva dos operadores dentro da capacidade de ter diversas pessoas interagindo dentro de um ambiente controlado e voltado para representação da realidade.

O trabalho apensar de não estar presente dentro de uma subestação elétrica e não usar modelos parametrizados, ainda esta muito presente dentro dos pontos escolhidos nesse capítulo. Então o trabalho traz uma ideia de multiusuário com uma arquitetura de varias pessoas dentro de um mesmo espaço físico, ou seja, como pode ser observado na Figura 3.5, se diferenciando de um sistema de não necessidade de estar no mesmo local.

### **3.6 Treinamento em subestações Fotovoltaicas**

No trabalho de Gonzalez Lopez et al. (2019), foi proposto um método para treinamento e demonstração das funcionalidades dentro de uma subestação fotovoltaica, desde o processo de conexão dos painéis até o tipo de equipamentos de segurança que devem ser usados. Todo esse processo é acompanhado por vídeos e áudios descrevendo o procedimento para o usuário, tornando-o muito mais simples e intuitivo.

Esse sistema também traz técnicas de RV imersiva, com o uso de diversos equipamentos para aumentar a imersão do usuário, como pode ser observado na Figura 3.6. Além disso, o aplicativo oferece diversos gráficos e demonstrações do funcionamento interno da subestação, funcionando como uma aula para quem está usando, começando desde como se obtém energia até a sua transmissão. No final, foi aplicado um questionário para dois grupos, um que usou a ferramenta e outro grupo que não a utilizou.

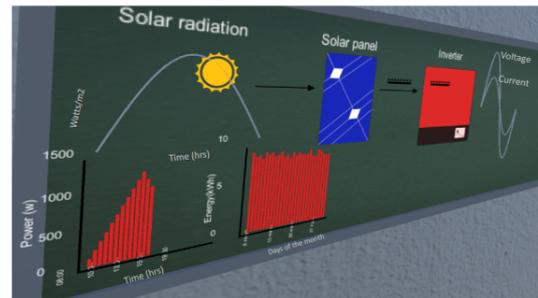
Com essa avaliação feita pelos autores, chegou-se a um resultado dentro do esperado, mostrando maior velocidade e taxas de acertos do grupo de estudantes de engenharia que foi analisado, além de um aumento no entendimento de uma subestação fotovoltaica. Outra vantagem da aplicação é o uso de vídeos e tutoriais para guiar e ensinar os usuários a usar o sistema, criando assim uma ferramenta que não precisa de um treinador ou guia para ser usada, au-

Figura 3.6: Sistema de treinamento desenvolvido.

(a) Visão do usuário e equipamentos usados.



(b) Ambiente virtual do jogo em execução.



Fonte: (GONZALEZ LOPEZ et al., 2019)

mentando a capacidade da ferramenta de ser usada independentemente.

Porém, há falta de multiusuário no processo, o que poderia aumentar ainda mais a capacidade de entendimento dos usuários da ferramenta. Mesmo assim, sendo um aplicação que traz uma inovação no processo de ensino de uma subestação sem oferecer riscos a quem está aprendendo.

### 3.7 Considerações Finais

Como apresentado na Seção 3.1, os principais atributos dos trabalhos encontrados na literatura são apresentados na Tabela 3.1 para um estudo comparativo. Essa tabela contém as cinco características definidas anteriormente para a comparação.

Dentro dos trabalhos analisados, pode ser observado que todos foram bem aceitos pelo público-alvo e trouxeram resultados dentro do esperado em termos de treinamento, mostrando a eficiência e a capacidade do VR no sistema de aumentar o aprendizado do operador sobre o tema estudado.

No entanto, é possível observar que nenhum dos trabalhos abrange todos os parâmetros escolhidos. Por exemplo, o trabalho de Mondragón Bernal et al. (2022) possui uma estrutura em RV, foco em treinamento e modelos parametrizados, mas não inclui interações de multiusuários. Isso é extremamente importante em ambientes de subestações elétricas, onde a maioria dos treinamentos é feita em pares, o que distancia o trabalho da realidade e pode gerar estranhamento com o operador.

Ao observar a Tabela 3.1, nota-se a ausência de um sistema computacional que tenha a interação multiusuário em um ambiente de subestações elétricas, com o uso de interfaces naturais

em RV imersiva, com foco em treinamento. Ao final, é importante que os modelos sejam parametrizados de forma a possibilitar interações mais detalhadas e leituras mais precisas. Com o objetivo de providenciar um ambiente mais natural, intuitivo e atraente para o usuário.

Tabela 3.1: Comparação entre os trabalhos relacionados.

Trabalho / Característica	Interação Multiusuá- rio	Aplicação em Subestações Elétricas	Interface e Aplicação de RV Imersiva	Foco em Treina- mento	Modelos Parametri- zados
(TANAKA et al., 2023)	✓	✗	✓	✓	✗
(MORENO et al., 2020)	✓	✗	✓	✓	✗
(MONDRAGÓN BERNAL et al., 2022)	✗	✓	✓	✓	✓
(LERNER et al., 2020)	✓	✗	✓	✓	✗
(GONZALEZ LOPEZ et al., 2019)	✗	✓	✓	✗	✗

O próximo capítulo apresenta a arquitetura de um sistema proposto para suportar, simultaneamente, todas as características da Tabela 3.1. Acredita-se que tal sistema tem o potencial para suportar o treinamento multiusuário, em RV imersiva de operadores de subestação de energia elétrica.

# Metodologia e Arquitetura do Sistema

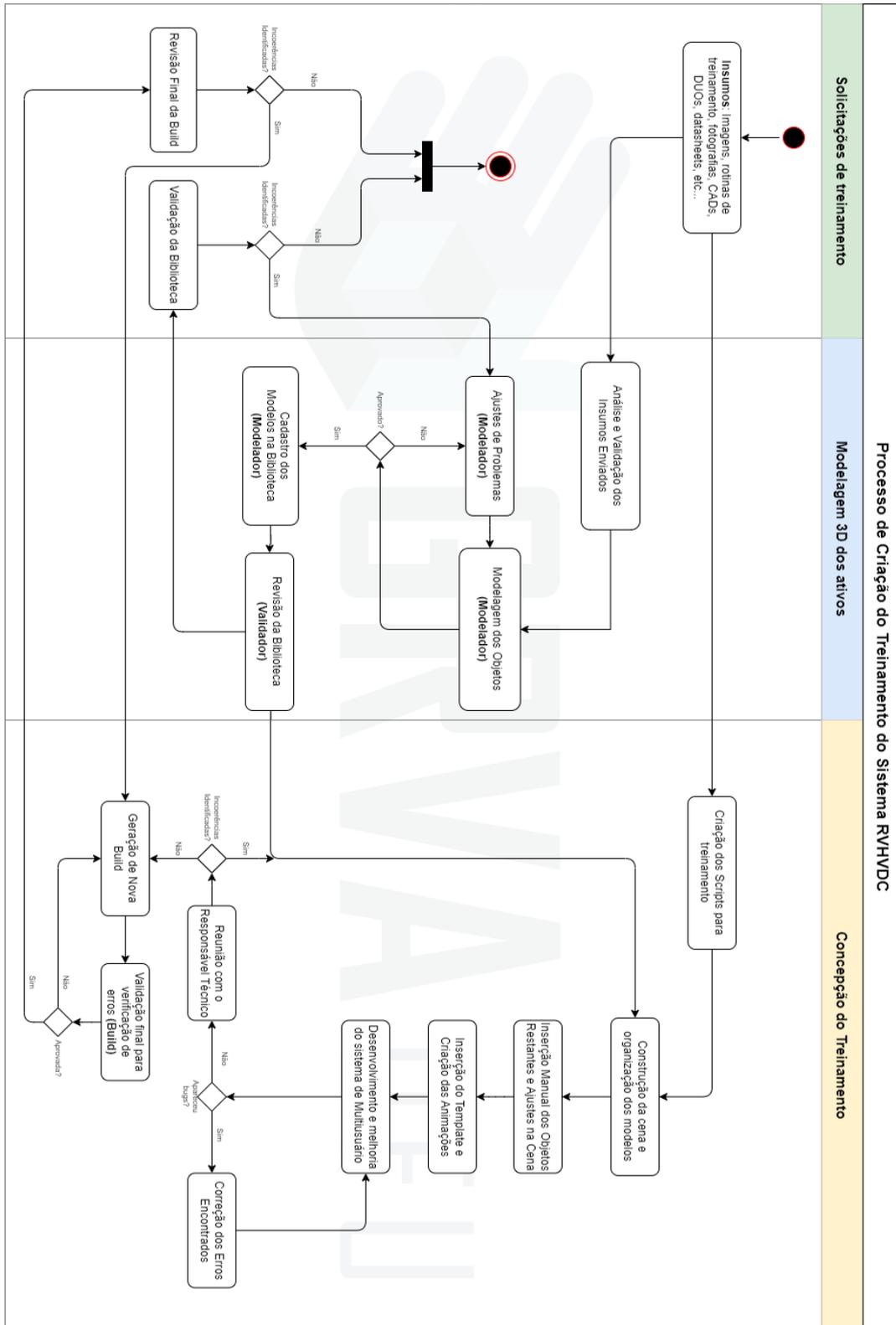
## 4.1 Introdução

Este capítulo apresenta a arquitetura do sistema desenvolvido. A descrição inclui tanto a arquitetura geral do sistema quanto a arquitetura multiusuário. Por fim, é realizada uma análise dos requisitos funcionais e não funcionais que compõem o sistema, além de uma demonstração de funcionalidade que o sistema tem, aplicando todas as tecnologias que foram discutidas.

## 4.2 Arquitetura de Construção

Nesta seção, é descrita a maneira como a cena para o treinamento foi criada e ainda apresenta o fluxo utilizado para a construção, demonstrado no diagrama da Figura 4.1.

Figura 4.1: Diagrama de construção de cena.



Fonte: Autoria própria.

Para o desenvolvimento das atividades, o processo foi dividido em três grandes grupos: Solicitações de treinamento, Modelagem 3D dos ativos e Concepção do Treinamento. A seguir, é feita uma descrição de cada parte.

### 4.2.1 Solicitações de Treinamento

A Eletrobras (concessionária de energia elétrica) tiveram 2 grandes papéis nessa pesquisa, sendo eles a revisão e solicitação de novas atividades, como pode ser observado na discussão a seguir:

#### **Insumos: Imagens, rotinas de treinamento, fotografias.**

Nessa atividade, a Eletrobras solicita um novo treinamento e enviava documentos e insumos para que o treinamento pudesse ser realizado de maneira mais efetiva e próxima da ideia inicial. Reuniões com todas as equipes forem realizadas para transmitir a ideia inicial de forma eficaz, facilitando a consecução do objetivo final.

#### **Validação da Biblioteca.**

Esta atividade envolve a validação dos modelos 3D criados por uma equipe de modelagem, garantindo que estes modelos possuíssem os detalhes necessários para o treinamento. Diferentes validações foram realizadas para assegurar que não houvesse grandes discrepâncias entre os modelos e os objetos reais, evitando estranheza por parte dos usuários.

#### **Revisão Final da Build.**

Este processo é similar ao anterior, mas ocorre na etapa final do desenvolvimento, avaliando a build e a cena do treinamento já implementada. A revisão final envolve a avaliação da reação do operador e da equipe ao treinamento, permitindo ajustes necessários para aproximar o treinamento da realidade do campo.

### 4.2.2 Modelagem de Ativos

A equipe responsável pela criação dos modelos e ferramentas utilizados no treinamento desempenharam diversos papéis durante o projeto, como um suporte a montagem dos treinamentos que foram realizados:

**Análise e Validação dos Insumos Enviados.**

A equipe de modelagem recebia e validava os insumos enviados pela Eletrobras, verificando sua pertinência para a construção dos modelos. Esta verificação foi crucial para evitar problemas entre o pedido e o resultado.

**Modelagem dos Objetos/Ajustes de Problemas.**

A equipe de modelagem ficou responsável pela criação dos modelos, desde a concepção aos materiais que seriam usados. Toda essa modelagem é feita utilizando os insumos corrigidos e revisados. Além disso, as modelagens podem ter diferentes níveis. Por exemplo, modelos em que não existem nenhuma operação ou atividade neles, considerados como um nível primário, não sendo necessário um detalhamento fino de modelagem. Em um segundo nível, mais refinado, detalhes são tratados pela equipe de modelagem. Após a criação dos modelos, um colaborador validador apresenta um parecer sobre o nível de fotorrealismo da modelagem. Caso apresente algumas inconsistências, o modelo era enviado para a equipe de modelagem para correções. Caso contrário, o modelo continuava na linha de produção.

**Cadastro dos Modelos na Biblioteca e Revisão da Biblioteca.**

Os modelos foram cadastrados em uma biblioteca para facilitar o acesso pelas equipes. Um sistema de gerenciamento de projetos foi utilizado para armazenar todas as atividades, documentos e arquivos dos modelos. Na revisão da biblioteca, foi verificado se os modelos estavam corretamente posicionados e dentro do prazo estipulado.

**4.2.3 Concepção do Treinamento**

O treinamento é realizado em conjunto com a equipe de modelagem e a Eletrobras, envolvendo várias etapas:

**Criação dos Scripts para treinamento.**

A criação dos scripts de treinamento foi fundamental para definir as interações básicas na cena. Estes scripts são desenvolvidos para otimizar o treinamento, tornando-o mais acessível e simples para o usuário.

**Construção da cena e organização dos modelos com Ajustes na Cena.**

Os modelos fornecidos pela equipe de modelagem forma organizados na estrutura da subes-

tação para facilitar o treinamento. A organização simplifica a ligação dos scripts e a inserção manual de ferramentas, aproximando o treinamento da realidade.

#### **Inserção do Template e Criação das Animações.**

Um template padrão foi criado para a construção e testes do treinamento, permitindo o trabalho simultâneo em diferentes aspectos, como a movimentação do transformador e a medição na banca de capacitores. As animações relevantes aos equipamentos aumentam a imersão no treinamento.

#### **Inserção Desenvolvimento e melhoria do sistema Multiusuário.**

A criação do sistema multiusuário foi uma das últimas etapas, sincronizando todas as variáveis globais e jogadores. Correções e melhorias foram realizadas para resolver problemas.

#### **Reunião com o Responsável Técnico/Correção dos Erros Encontrados.**

Estas atividades visaram corrigir e melhorar o sistema, com reuniões para identificar possíveis problemas antes da geração da versão final.

#### **Geração de Nova Build/Validação final para verificação de erros.**

As últimas atividades envolveram a criação da versão final, garantindo que estejam configurada para funcionar nos dispositivos de entrada e saída que fazem interface com o aplicativo.

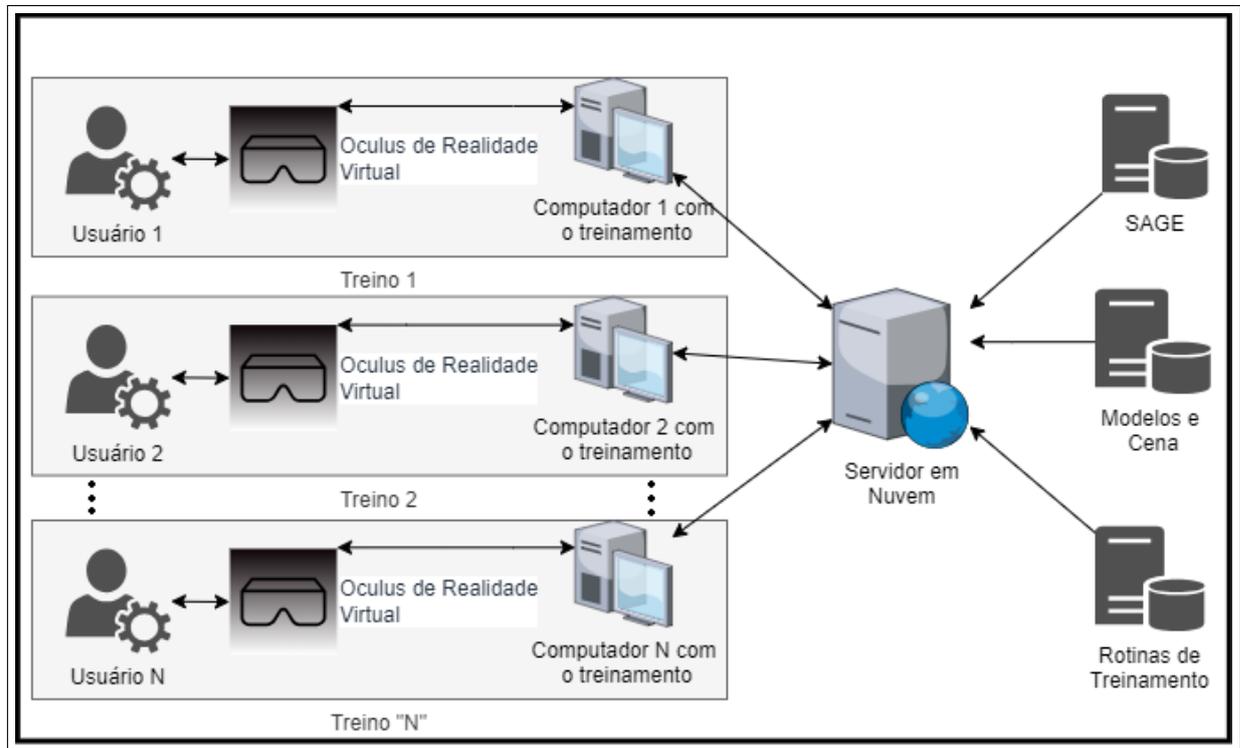
Então como pode ser observado a construção da cena para desenvolvimento e utilização do usuário foi feita em conjunto com o operador e com uma grande equipe, para dessa forma conseguir construir um treinamento mais eficaz e com a maior aceitação do operador.

### **4.3 Arquitetura do Sistema**

Nesta seção, será discutida a arquitetura do sistema suporte ao multiusuário e como ele foi implementado (Figura 4.2).

Esta arquitetura é dividida em três grandes partes: a primeira consiste no recebimento de dados do tipo modelos, rotinas e informações de campo, a segunda na adaptação e construção do servidor, e a terceira na entrega da aplicação ao usuário final utilização.

Figura 4.2: Diagrama do sistema de treinamento.



Fonte: Autoria própria.

### 4.3.1 Recebimento de dados no servidor

Essa etapa refere-se aos dados presentes anteriores à criação da cena do usuário, os dados são recebidos por 3 grandes fontes.

#### 1. Sistema Aberto de Gerenciamento de Energia (SAGE).

SAGE é uma base de dados interna da Eletrobras, responsável pelo monitoramento dos equipamentos da subestação e seus valores corretos. O sistema pode obter esses dados em tempo real e usá-los na cena para mostrar as medições, o que aumenta a imersão, uma vez que os operadores verão exatamente o que observariam em campo.

#### 2. Modelos e Cena.

Esses modelos e rotinas referem-se aos objetos que serão utilizados dentro do esquema para a execução dos treinamentos, ou seja, os ambientes virtuais com os modelos que serão empregados. Um detalhe importante a ser mencionado é que a maioria dos elementos da subestação estão presentes na cena. Dessa forma, o usuário, além de realizar o treinamento, pode caminhar pela cena e visualizar todos os ativos, o que aumenta a imersão do ambiente virtual.

### **3. Rotinas de Treinamento.**

As rotinas de treinamento são operações que podem ser realizadas dentro da cena com os modelos. Dessa forma, todas essas operações já foram aprovadas pelos operadores e treinadores, sendo assim, representam o resultado final da pesquisa.

Esses três grandes conjuntos de dados são armazenados no servidor na Nuvem, que formará a cena na qual os usuários irão se conectar.

#### **4.3.2 Servidor em Nuvem**

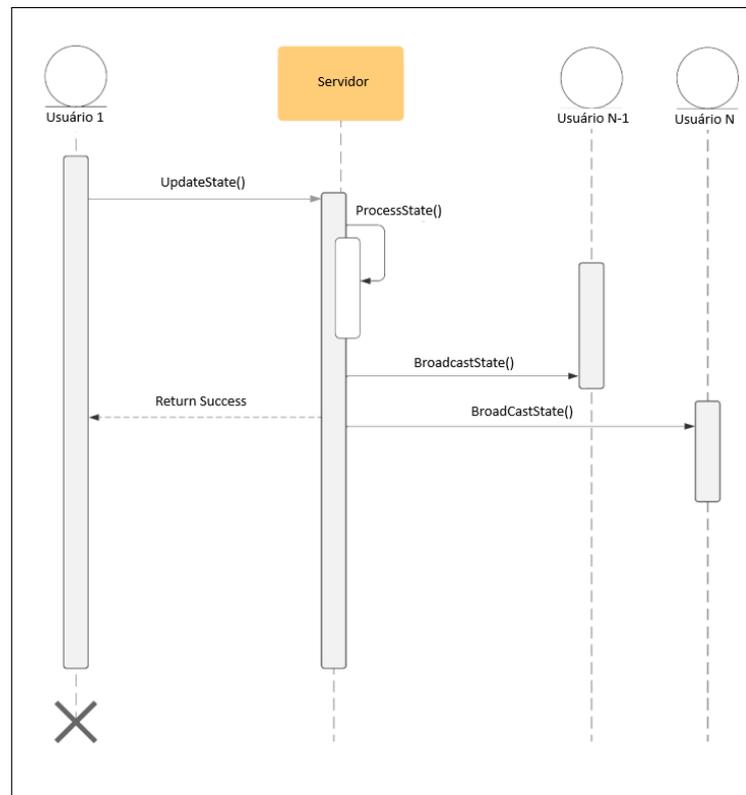
O servidor é a parte mais importante do sistema, pois é responsável pelo acesso do usuário e pelo recebimento e atualização dos dados. Sua estrutura de recepção de informações será descrita de forma detalhada. O sistema opera com base em requisitos, conforme ilustrado na Figura 4.3, onde cada usuário e seus movimentos são atualizados em tempo real. Essa informação é compartilhada com os demais operadores dentro da cena, com o objetivo de manter e aumentar a imersão. Dessa forma, o servidor pode atualizar os movimentos e interações, além de possíveis mudanças nos dados, e enviar essas atualizações para todos os operadores dentro da cena, incluindo alterações nos valores dos equipamentos que estão sendo medidos.

#### **4.3.3 Uso da aplicação**

O Meta Quest faz apenas a projeção da cena para o usuário, ajudando no realismo e no desempenho. Assim, o sistema foi desenvolvido para executar no computador com via cabo no Meta Quest. Dessa forma, se torna possível uma melhor utilização da capacidade de processamento, visto que, o processamento é feito via computador, por meio do chip de vídeo dedicado, e não do aparelho, possibilitando uma maior quantidade de modelos e informações a serem processadas em tempo de execução.

Outra vantagem desse modo de execução da aplicação pode ser para o treinador que está fora da cena conseguir observar o computador do operador dentro do ambiente virtual e avaliar ou dar instruções mais precisas, sem precisar estar diretamente no mesmo ambiente. Além disso, como comentado no tópico anterior todos os movimentos e ações são sincronizadas, assim na Figura 4.2 que todas as ações dos usuários são enviadas para o servidor e sincronizada com todos na cena, mostrando que todas as informações estão sempre sendo acessadas pelos demais operadores.

Figura 4.3: Sistema de Requerimento de movimento online.



Fonte: Autoria própria.

## 4.4 Requisitos e Casos de Uso

Neste tópico serão discutidos os requisitos funcionais e os não funcionais do sistema, além de uma descrição de Casos de Uso atendendo esses requisitos para mostrar a sua funcionalidade.

### 4.4.1 Requisitos Funcionais

Os principais requisitos funcionais identificados para o sistema consistem em:

#### Treinamento

**RF\_RV1** O sistema deve permitir que o usuário do tipo treinador possa criar uma zona isolada para treinamento.

- Através de um menu auxiliar, o usuário do tipo treinador pode criar uma zona de treinamento dentro da subestação. Em seguida, haverá a opção de teleportar os usuários para dentro dessa cena, onde participarão das seções de treinamento. A qualquer momento, pode-se inserir um novo usuário na cena. Ainda é possível

criar um perfil de observador para acompanhar o treinamento sem estar usando o ambiente virtual.

**RF\_RV2** O sistema deve permitir ao usuário dentro da zona isolada usar ferramentas nos equipamentos selecionados.

- Dentro da zona isolada todos os usuários ganham acesso a um menu de ferramentas. Estas ferramentas devem simular o ambiente real de treinamento. Além disso, as ferramentas a serem disponibilizadas serão únicas para cada usuário. Porém, os resultados serão disponibilizados para todos os usuários acompanharem e interajam com o processo.

**RF\_RV3** O sistema deve permitir que o usuário encerre a aplicação.

- O sistema deve oferecer uma opção clara e acessível, seja no menu principal ou em outros menus de navegação, que permita ao usuário encerrar a aplicação de RV a qualquer momento.

### **Multiusuário**

**RF\_RV4** Manter conexão com o usuário.

- Sistema deve atender várias solicitações de conexão feitas pelo usuário. Fora dessas conexões, o treinador poderá ser adicionado à lista de ouvintes da sincronização.

**RF\_RV5** Encerrar conexão com o usuário.

- O usuário deve ser capaz de encerrar sua conexão, mesmo em casos de problemas na rede ou critérios arbitrários de segurança.

**RF\_RV6** Sincronizar eventos.

- Na ocorrência de eventos do sistema, todos os usuários conectados e presentes na cena devem ser notificados da sua ocorrência e resolver as funções dependentes desse evento.

**RF\_RV7** Sincronizar estado de objetos.

- O sistema deve replicar alterações de estado de objetos entre todos os usuários, a fim de manter o sistema funcionando de forma consistente, com animações ocorrendo ao mesmo tempo em todos os clientes.

**RF\_RV8** Sincronizar posição, rotação e tamanho de objetos.

- O sistema deve replicar a posição global de objetos, mas somente aqueles que os usuários consigam controlar diretamente o quanto os usuários conseguem interagir.

**RF\_RV9** Selecionar nível de acesso do usuário.

- O programa deve permitir que o usuário opere o sistema com alguns níveis diferentes de acesso (perfis). Sendo: treinador, operador e visitante. Cada função confere capacidades diferentes aos usuários dentro do sistema.

### **Ambiente de Realidade Virtual**

**RF\_RV10** Cena tutorial para aprendizado do uso da ferramenta.

- Essa cena tutorial terá um exemplo básico de interações e funções que poderão ser usadas dentro do treinamento, de maneira simples e descritiva para facilitar o acesso e entendimento da ferramenta.

**RF\_RV11** Opções de interação direta com as ferramentas da cena.

- Durante o treinamento, os usuários operando o sistema por meio Oculus de RV, poderão interagir diretamente com algumas finalidades, como por exemplo, realizar medidas na cena de forma imersiva. Além da própria interação por cliques dentro da cena para o computador.

**RF\_RV12** Tipos de navegação com o uso de Oculus de RV.

- O usuário terá a opção de trocar entre a opção de andar pelo Joystick do controle ou por método de teletransporte, assim podendo reduzir qualquer enjoo ou desconforto causado pelo Oculus.

### 4.4.2 Requisitos Não Funcionais

Os principais requisitos não funcionais do sistema são:

**RNF\_RV1** O sistema deve suportar a inicialização no Windows e no Oculus Quest 2 e Pro.

- O sistema deve ter dois aplicativos executáveis instaláveis para o Oculus, sendo o primeiro compatível com o sistema Androide. Além disso, a comunicação entre eles deve ser possível de maneira simples.

**RNF\_RV2** O sistema deve suportar uma execução compartilhada com o computador.

- O sistema deve ter um executável que seja capaz de rodar a aplicação pelo computador, para melhorar a qualidade da imersão e quantidade de informação que pode ser adicionada dentro da cena.

### 4.4.3 Casos de Uso

Um Caso de Uso desempenha um papel crucial no desenvolvimento de Sistemas de Realidade Virtual (SRV). Esta ferramenta é essencial para identificar e descrever as interações entre os atores e o sistema, proporcionando uma compreensão clara das funcionalidades e requisitos do sistema.

A criação de Casos de Uso garante que o sistema atenda às expectativas dos usuários, oferecendo uma visão completa do seu funcionamento. No contexto específico da aplicação, o diagrama de Casos de Uso pode incluir atores como treinadores, aprendizes e sistemas externos, como a Ferramenta de Treinamento e o Web Service SAGE. Esses atores interagem com a ferramenta por meio de Casos de Uso, como a gestão de ferramentas, manipulação de dispositivos, navegação pelo ambiente virtual e execução de rotinas de treinamento.

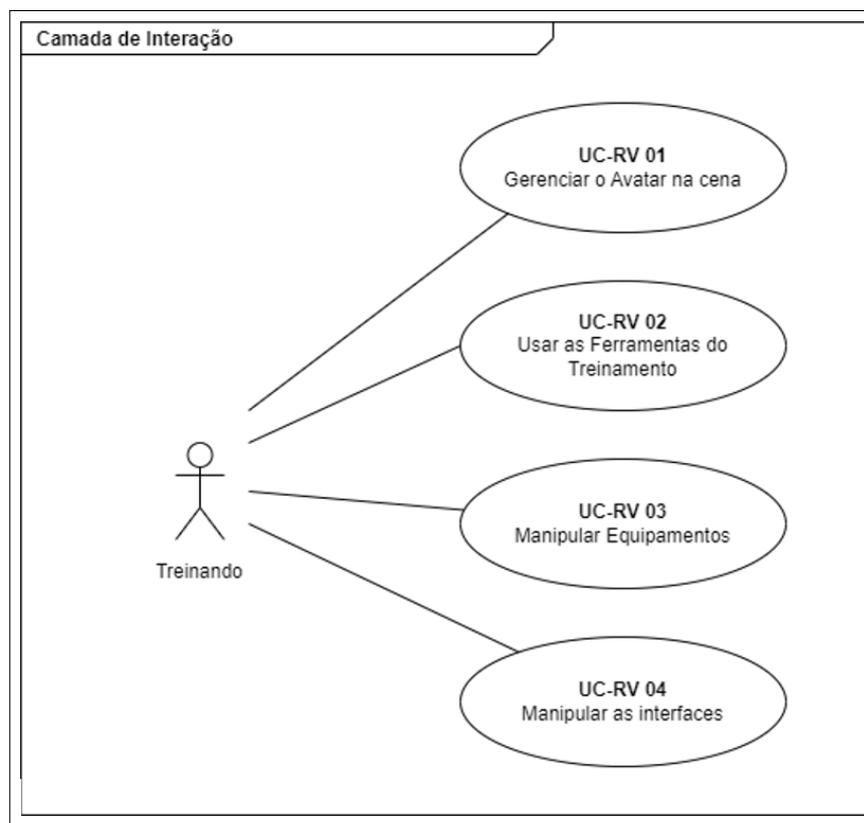
A Figura 4.4 representa o modelo de Casso de Uso que reúnem e organizam as funcionalidades supracitadas na camada de interação.

Além da camada de interação, existe a retirada e obtenção de dados no sistema, que pode ser exemplificado pela Figura 4.5 seguir.

#### Atores

##### AT01 - Treinando

Figura 4.4: Funcionalidade da camada de interação do sistema.



Fonte: Autoria própria.

- É o ator responsável por utilizar o programa. Ele tem permissões para acessar e interagir com os requisitos funcionais apresentados, de acordo com o nível de acesso atribuído ao seu perfil. O Treinando é um usuário que está sendo submetido ao treinamento que vai ser desenvolvido pelo Treinador.

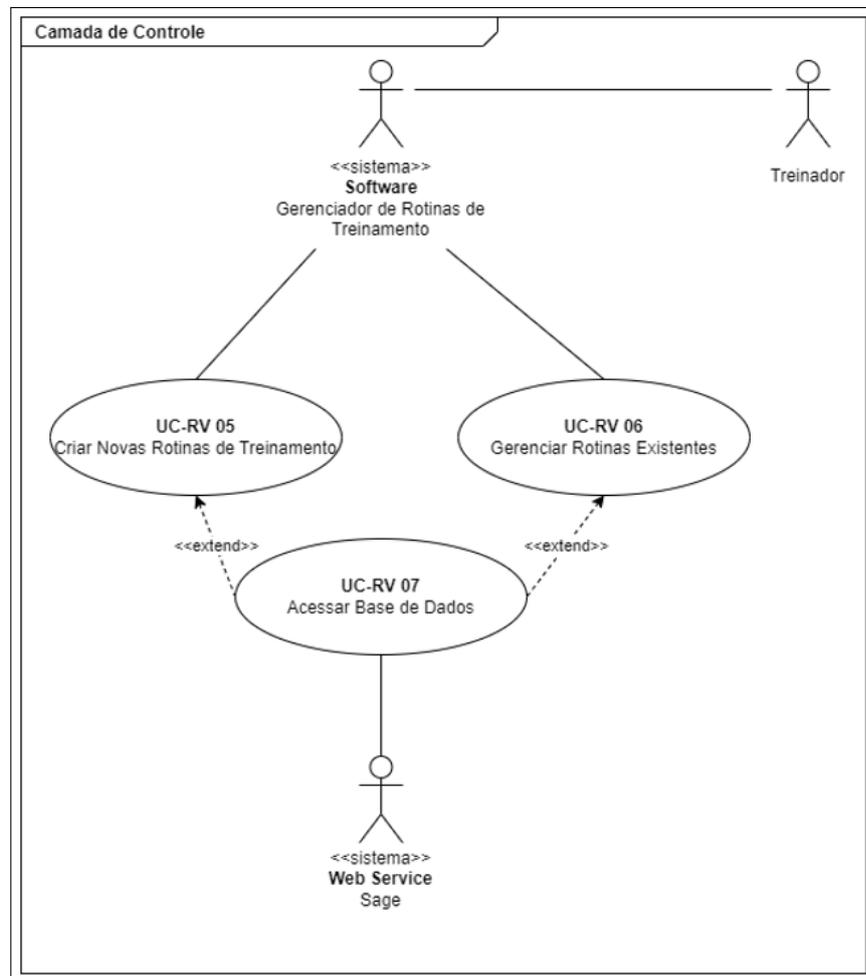
#### **AT02 - Treinador**

- É um ator responsável por planejar, desenvolver e gerenciar as rotinas de treinamento no SRV. Detendo conhecimento aprofundado das operações e manutenções das subestações, o Treinador busca maximizar o ganho de conhecimento dos treinandos, selecionando as melhores práticas e metodologias de ensino. Utilizando a Ferramenta de Treinamento, o Treinador cria cenas de treinamento e gerencia as rotinas já criadas.

#### **AT03 - <<sistema>> Software – Gerenciador de Rotinas de Treinamento**

- Ator externo que representa o sistema responsável por criar rotinas de treinamento

Figura 4.5: Funcionalidade da camada de controle do sistema.



Fonte: Autoria própria.

a serem utilizadas no SRV. Esta ferramenta é destinada ao ator AT02 - Treinador, que elabora e gerencia os treinamentos no ambiente virtual. A Gerenciador de Rotinas de Treinamento permite que o Treinador crie cenários e situações específicas de aprendizado para os Treinandos, proporcionando uma experiência de treinamento personalizada.

#### AT04 – <<sistema>> Web Service – SAGE

- Ator externo que representa o Servidor Web responsável por fornecer formas de acesso aos estados e supervisão (monitoramento e controle) dos equipamentos, tanto no campo quanto no ambiente virtual. Esse ator é fundamental para a integração do SRV com a base de dados e sistemas de controle existentes, garantindo que as informações e operações realizadas no ambiente virtual estejam alinhadas

com a realidade dos equipamentos e subestações.

### **Descrição dos Casos de Uso**

#### **UC-RV1. Gerenciar o Avatar na Cena**

- Ator: AT01 – Treinando, AT02 – Treinador
- Requisitos Funcionais Relacionados: RF\_RV8, RF\_RV11, RF\_RV12
- Descrição: Este Caso de Uso permite que o Usuário, independente de seu acesso, possa controlar seu avatar, podendo se mover pela cena. O Operador pode personalizar sua experiência de locomoção através de várias câmeras ou método de movimento para o Oculus Pro e o 2.

#### **UC-RV2. Usar as Ferramentas do Treinamento**

- Ator: AT01 – Treinando, AT02 – Treinador
- Requisitos Funcionais Relacionados: RF\_RV2, RF\_RV11
- Descrição: Este Caso de Uso permite que o Usuário independente de seu perfil possa controlar as ferramentas. O Operador pode personalizar sua experiência de quais ferramentas vão ser usadas para o Oculus Quest 2 e o Oculus Quest 3. O Usuário do tipo Treinador, pode escolher quais as ferramentas vão ser usadas em equipamentos específicos.

#### **UC-RV3. Manipular Equipamentos**

- Ator: AT01 – Treinando
- Requisitos Funcionais Relacionados: RF\_RV2, RF\_RV8, RF\_RV11
- Descrição: Refere-se ao caso em que o Treinando pode usar as ferramentas nos equipamentos para fazer as medidas ou simular as rotinas de treinamento. Dessa forma, dentro dos limites estabelecidos as medições podem ser feitas e observadas por todos que estão compartilhando a cena ou o treinamento.

#### **UC-RV4. Manipular as interfaces**

- Ator: AT01 – Operador
- Requisitos Funcionais Relacionados: RF\_RV3, RF\_RV9, RF\_RV12

- Descrição: Este Caso de Uso permite que o Usuário gerencie a instância do SRV, encerrando a aplicação quando necessário e controlando o acesso de múltiplos usuários e suas permissões de acesso. Entre essas permissões estão as ferramentas de interface feitas pela equipe de construção de ambiente virtual, pois o sistema compartilha a mesma base de uso para desenvolvimento e aplicação.

#### **UC-RV5. Criar Novas Rotinas de Treinamento**

- Ator: AT02 – Treinador, AT03 – <<sistema>> Software – Ferramenta de Treinamento
- Requisitos Funcionais Relacionados: RF\_RV1, RF\_RV2, RF\_RV9, RF\_RV10, RF\_RV13
- Descrição: Este Caso de Uso permite que o Treinador possa construir novas cenas e relatórios de treinamento para os equipamentos da subestação. Além disso, escolher quais serão os Treinandos que poderão fazer uso dessa região, com o uso da Ferramenta de Treinamento, que por consequência estará conectada online para vários usuários.

#### **UC-RV6. Gerenciar Rotinas de Treinamento existentes**

- Atores: AT02 – Treinador, AT03 – <<sistema>> Software – Ferramenta de Treinamento
- Requisito Funcional Relacionado: RF\_RV1, RF\_RV2, RF\_RV6, RF\_RV9
- Descrição: Este Caso de Uso permite que o Treinador monitore e modifique as rotinas de treinamento utilizando a Gerenciador de Rotinas de Treinamento e as disponibilize para o SRV. O Usuário pode carregar e executar rotinas de treinamento no SRV, seguindo as etapas do treinamento e aprendendo com a experiência imersiva.

#### **UC-RV7. Acessar Base de Dados**

- Ator: AT02 – <<sistema>> Web Service – SAGE
- Requisito Funcional Relacionado: RF\_RV6, RF\_RV7, RF\_RV8
- Descrição: Este Caso de Uso permite que Sistema de RV acesse a base de dados SAGE da Eletrobras/Eletronorte para obter informações e estados dos ativos das

subestações. O sistema replica essas informações em cada ativo e as apresenta ao Usuário.

Como pode ser observado o sistema tem diversas ferramentas e formas de interação. Assim como requisitos para completar, então a seguir será demonstrados uma aplicação do treinamento e quais são os passos para serem desenvolvidos e resultados alcançados.

## 4.5 Considerações finais

Como pode ser observado, o sistema possui uma arquitetura única e a capacidade de fornecer um treinamento realista e imersivo, com suporte a multiusuários. Além disso, sua estrutura modular permite melhorias contínuas e a adição de novas funcionalidades de maneira simples, possibilitando a integração de outros treinamentos de forma eficiente. Essa flexibilidade é essencial para acompanhar as evoluções tecnológicas e as necessidades dinâmicas dos operadores.

Adicionalmente, a arquitetura do sistema suporta a escalabilidade, permitindo que novos módulos e funcionalidades sejam integrados conforme necessário, seja para a inclusão de novos equipamentos, novos cenários de treinamento, ou a adaptação a novas tecnologias de monitoramento e controle. A interoperabilidade com sistemas externos também garante que o sistema permaneça relevante e atualizado com as práticas industriais mais recentes.

## Detalhes de Implementação

### 5.1 Introdução

Neste capítulo, será discutido como o processo de treinamento foi construído, desde os plugins utilizados até as linhas de código responsáveis pelo uso do sistema de treinamento. Essas demonstrações abordarão o sistema de conexão de equipamentos e ferramentas, um dos principais de todo o projeto, pois é responsável pelas medições, além do sistema responsável pelo reconhecimento das mãos dentro da cena. Por último, será explicado como foi implementado o sistema de sincronização inicial do multiusuário.

### 5.2 Sistema de Reconhecimento de Mãos

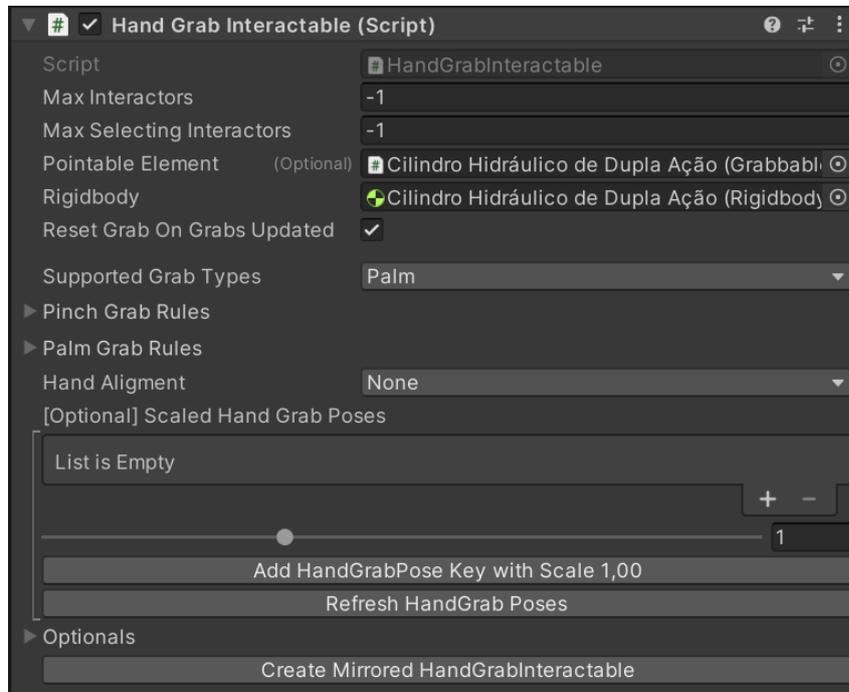
O sistema de reconhecimento de mãos no projeto depende de dois sistemas principais abertos para uso. O primeiro é o próprio sistema Meta Quest Oculus, que possui um reconhecimento de mão embarcado nativamente (META, 2024). Este aplicativo permite que o dispositivo reconheça e interprete os movimentos das mãos do usuário sem a necessidade de hardware adicional.

O segundo componente é um plugin para Unity3D chamado Meta XR Interaction SDK. Este sistema facilita a conexão entre o Oculus e a aplicação, permitindo que o usuário interaja e realize reconhecimentos dentro do ambiente virtual.

Na cena, diversos scripts são utilizados para gerir essas interações, como mostrado na Figura 5.1. Esses scripts dependem de várias variáveis, incluindo como o operador irá interagir com os objetos e até mesmo o peso do material a ser segurado, proporcionando diversas opções

de manipulação dentro do ambiente virtual. Devido à eficiência e funcionalidades oferecidas pelo Meta XR Interaction SDK, ele foi a escolha final para a implementação do sistema de reconhecimento de mãos.

Figura 5.1: Script responsável pelo controle das mãos



Fonte: Autoria própria.

Esse script para controle da mão funciona em sistema de poses e como estão ela, como pode ser visto na Figura 5.2. Nessa figura pode-se observar que funciona baseado em um sistema de poses que são atualizados em todo segundo, como pode ser visto na linha 257. Visto que, ele analisa em como a mão está e quão esta perto de um gesto esperado e fica chamando essa função sempre.

Se uma pose não e encontrada ele entra em um sistema de tentar corrigir ou aumentar a maneira que os dedos estão para tentar aproximar de uma existente, se depois de todos esses passos não for achado uma ele volta ao começo.

### 5.3 Sistema de conexão com equipamentos (Sockets)

Outra ferramenta importante para a funcionalidade do sistema e a ferramenta de conexão de equipamentos dentro do treinamento. Essa operação é usada para conseguir medir dados dos equipamentos e para facilitar ao usuário observar onde cada ferramenta deve ficar dentro

Figura 5.2: Script responsável pelo controle das mãos

```
257 public bool CalculateBestPose(Pose userPose, float handScale, Handedness handedness,  
258 ref HandGrabResult result)  
259 {  
260     CalculateBestPose(userPose, offset.Pose.identity, RelativeTo, handScale, handedness, ref result);  
261     return true;  
262 }  
263  
264 public void CalculateBestPose(in Pose userPose, in Pose offset, Transform relativeTo,  
265 float handScale, Handedness handedness,  
266 ref HandGrabResult result)  
267 {  
268     bool poseFound = _grabPoseFinder.FindBestPose(userPose, offset,  
269 handScale, handedness, _scoringModifier, ref result);  
270  
271     if (!poseFound)  
272     {  
273         Pose targetPose = PoseUtils.Multiply(userPose, offset);  
274         result.HasHandPose = false;  
275         result.Score = GrabPoseHelper.CollidersScore(targetPose.position, Colliders, out Vector3 hit);  
276         Pose worldSnap = new Pose(hit, targetPose.rotation);  
277         result.RelativePose = RelativeTo.Delta(worldSnap);  
278     }  
279 }  
280
```

Fonte: Autoria própria.

do espaço real, no equipamento da subestação elétrica, para cada vez mais simular o real e aproximar do ideal.

Essa conexão foi desenvolvida para a aplicação de treinamento, seu funcionamento é da seguinte forma:

Figura 5.3: Script de entrada nos elementos

```
40 private void OnTriggerEnter(Collider other)  
41 {  
42     for (int i = 0; i < tagsEquipamentos.Count; i++)  
43     {  
44         if (other.CompareTag(tagsEquipamentos[i]))  
45         {  
46             GameObjectWrapper objectWrapper = new GameObjectWrapper();  
47             objectWrapper.originalObject = other.gameObject;  
48             alp = true;  
49             objEntered.Add(objectWrapper);  
50             objetosNoCollider++; // Incrementa a contagem  
51             break;  
52         }  
53     }  
54 }  
55
```

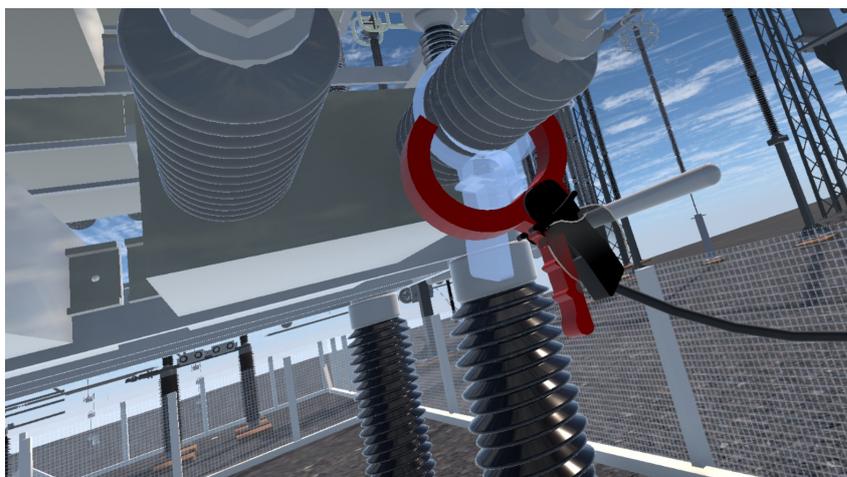
Fonte: Autoria própria.

Ao chegar perto do equipamento, ele é salvo em uma classe específica feita para guardar dois elementos, sendo o objeto original, este que entrou na região para conexão, e uma cópia dele para poder ser alterada se necessário (Figura 5.3). Como pode ser observado na linha 46, é criado um objeto de uma classe (GameObjectWrapper) que suporta dois objetos. O primeiro

é populado na linha 47, sendo uma cópia do elemento que entrou em um *box collider* (região de conexão do treinamento). Este elemento é salvo para ser usado na etapa a seguir, e um incremento é adicionado para saber quantos elementos estão próximos do conector que as ferramentas estão sendo colocadas perto.

Agora com o objeto salvo, podemos criar uma copia dele na cena para ficar mostrando para o operador o local correto de fazer o encaixe como demonstrado na Figura 5.4

Figura 5.4: Sistema de uso de Socket Interactor.



Fonte: Autoria própria.

O código responsável por fazer essa função de demonstrar onde o elemento deve ficar corretamente pode ser observado pela Figura 5.5

Figura 5.5: Script de Criação da copia

```
198 GameObjectWrapper wrapper = objEntered.Find(match(w.gameObjectWrapper => w.originalObject == ferramenta));
199
200 if (wrapper != null && wrapper.instantiatedObject == null)
201 {
202     var nomeString = gameObject.transform.parent.gameObject.name.Split(separator: " ");
203     var Valorposi = Convert.ToInt32(nome[1]);
204     if ((Valorposi - 1) % 4 < 2)
205     {
206         Vector3 pos = new Vector3(x+0.05f, y, z);
207         wrapper.instantiatedObject = Instantiate(ferramenta, position: transform.position + pos, rotation: Quaternion.Euler(x*90, y*180, z*0));
208     }
209     else
210     {
211         Vector3 pos = new Vector3(x-0.05f, y, z);
212         wrapper.instantiatedObject = Instantiate(ferramenta, position: transform.position + pos, rotation: Quaternion.Euler(x*90, y*0, z*0));
213     }
214     ChangeMaterialsRecursively(wrapper.instantiatedObject, new Material Resources.Load<Material>(path: "Materials/FadeSocketSDK"));
215     BoxCollider boxCollider = wrapper.instantiatedObject.GetComponentInChildren<BoxCollider>();
216     if (boxCollider != null)
217     {
218         boxCollider.enabled = false;
219     }
220     return true;
221 }
222
223 return false;
```

Fonte: Autoria própria.

Como pode ser observado nesse código, primeiramente, torna-se o nome do elemento para

separar onde deve-se criar a cópia (linha 190). Rotacionando-se o objeto, dependendo de qual a direção ele deve ficar, (linha 195 até 205) e por último, deixa-se o objeto transparente (linha 206), avisando o sistema que achou um elemento e que ele foi trabalhado.

Depois de criar a cópia, o usuário pode soltar o objeto que ele vai ser colocado na posição em que estava na cena, fazendo as correções necessárias ( Figura 5.6)

Figura 5.6: Script de correção ao soltar um objeto na cena

```
257 foreach (var elemento:GameObject in diferencaList)
258 {
259     var wrapper = objEntered.Find(match:w:GameObjectWrapper => w.originalObject == elemento);
260     if (wrapper != null && wrapper.instantiatedObject != null)
261     {
262         var tempPos:Vector3 = wrapper.instantiatedObject.transform.position;
263         elemento.transform.position = tempPos;
264         if (elemento.CompareTag("ALicateCircular"))
265             {elemento.transform.rotation = Quaternion.Euler(x:90, y:90, z:0);
266              filterScriptControler.HandleObjectDrop(wrapper.originalObject, MasterElement.gameObject.transform.parent.gameObject);}
267         if (elemento.CompareTag("ALicatePadraoD") || elemento.CompareTag("ALicatePadraoE"))
268             {elemento.transform.rotation = Quaternion.Euler(x:90, y:0, z:0);
269              filterScriptControler.HandleObjectDrop(wrapper.originalObject, MasterElement.gameObject.transform.parent.gameObject);}
270         if (elemento.CompareTag("MacacoHidraulico"))
271             {elemento.transform.rotation = Quaternion.Euler(x:0, y:0, z:0);
272              transformerScriptControler.HandleObjectTransformer(wrapper.originalObject, MasterElement.gameObject.transform.parent.gameObject);}
273         Destroy(wrapper.instantiatedObject);
274     }
275 }
```

Fonte: Autoria própria.

Na linha 257, primeiramente, verifica-se o objeto está na lista de elementos que está na mão do usuário. Se eles não estiverem mais, o sistema interpreta que o objeto foi solto pelo usuário. Em seguida, identifica-se o elemento na cena e comparando sua Tag. Depois dessa comparação, pode-se colocar na rotação certa e no lugar certo. Um exemplo seria na linha 264 para um elemento com a Tag “alicateCircular”. Ele seria rotacionado e colocado na posição da copia que foi instanciado na cena anteriormente.

Com essas funções e uma contagem de quantos elementos passaram por esse processo, pode-se realizar diversos treinamentos, como foi comentado: movimento do transformador e medição na banca de capacitor.

## 5.4 Multiusuário

No tópico anterior, foi discutido a principal ferramenta utilizada para medições e demonstração de conexões dos equipamentos na cena. Nesta seção, será abordado como o treinamento é executado via código e os requerimentos necessários, considerando que a arquitetura já foi discutida no capítulo anterior.

Primeiramente, o primeiro usuário a entrar no sistema torna-se o Host e Server, ou seja,

ele se torna o principal meio para a conexão com o restantes dos objetos. Isso é fundamental para estabelecer a comunicação e sincronização entre os diversos usuários e componentes no ambiente virtual. Esta estrutura pode ser visualizada na Figura 5.7.

Figura 5.7: Script de conexão Inicial

```
15 private async void Start()
16 {
17     await UnityServices.InitializeAsync();
18
19     AuthenticationService.Instance.SignedIn += () =>
20     {
21         Debug.Log(message: "Signed in" + AuthenticationService.Instance.PlayerId);
22     };
23
24     await AuthenticationService.Instance.SignInAnonymouslyAsync();
25 }
26
```

Fonte: Autoria própria.

Nessa secção, o código espera pela sua inicialização (linha 15) a fim de sincronizar o servidor com o primeiro usuário. Assim que, o sistema tentar sincronizar com um operador com um Id liberado vai ser liberado pelo sistema de autenticação (linha 19), assim ele pode começar o servidor e conectar com os demais operadores.

Outro ponto importante a ser comentado é o plugin utilizado para facilitar as conexões multiusuário, o NetCode for GameObjects. Esta é uma ferramenta disponibilizada dentro do Unity, que facilita a criação de ambientes, onde vários usuários podem interagir entre si. Este plugin é uma aplicação extremamente rápida, permitindo a sincronia em tempo real entre todos os operadores na cena.

Para a conexão de diversos usuários, foi implementado um sistema de segurança para reconhecer a chave/ID de cada pessoa que estava conectando na cena. Isso evita que indivíduos indesejados acessem o sistema e visualizem o que está acontecendo, como pode ser observado na Figura 5.8.

Nesta parte, para poder fazer a conexão, o usuário precisa ter diversas informações sincronizadas e corretas para poder entrar na cena, como pode ser visto da linha 38 até a linha 43. Entre essas informações está o IPv4 do usuário, por questão de segurança em uma intranet.

O sistema usa NetCode for GameObjects e seu sistema de requerimento para fazer a conexão e sincronização do sistema, permitindo toda a cena acontecer, simultaneamente.

Figura 5.8: Script de Entrada de demais usuários

```
30     try
31     {
32         Allocation allocation = await RelayService.Instance.CreateAllocationAsync(maxConnections: 3);
33
34         string joinCode = await RelayService.Instance.GetJoinCodeAsync(allocation.AllocationId);
35
36         Debug.Log(joinCode);
37
38         NetworkManager.Singleton.GetComponent<UnityTransport>().SetRelayServerData(
39             allocation.RelayServer.IpV4,
40             (ushort) allocation.RelayServer.Port,
41             allocation.AllocationIdBytes,
42             allocation.Key,
43             allocation.ConnectionData);
44
45         NetworkManager.Singleton.StartHost();
46     }
47 }
```

Fonte: Autoria própria.

## 5.5 Considerações finais

Como pode ser observado, o trabalho utiliza diversas ferramentas para serem escalonadas facilmente, conforme necessário. Isso demonstra uma maior aderência dos operadores, uma vez que um novo treinamento pode ser adicionado de maneira simples e sem maiores problemas. Além disso, o uso de plugins deixa o sistema mais limpo e leve, pois utiliza ferramentas oficiais do aparelho, facilitando sua execução e aplicação em campo.

## Resultados e Discussão

### 6.1 Introdução

Nesse capítulo, são apresentados os resultados obtidos na avaliação do sistema, com o intuito de validar a o treinamento que foi desenvolvido. Os métodos avaliativos aplicados no treinamento são discutidos, analisando-os quantitativamente e qualitativamente. Para tantos, será apresentado como cada aplicação do treinamento foi utilizado pelos avaliadores.

### 6.2 Descrição das Funcionalidades

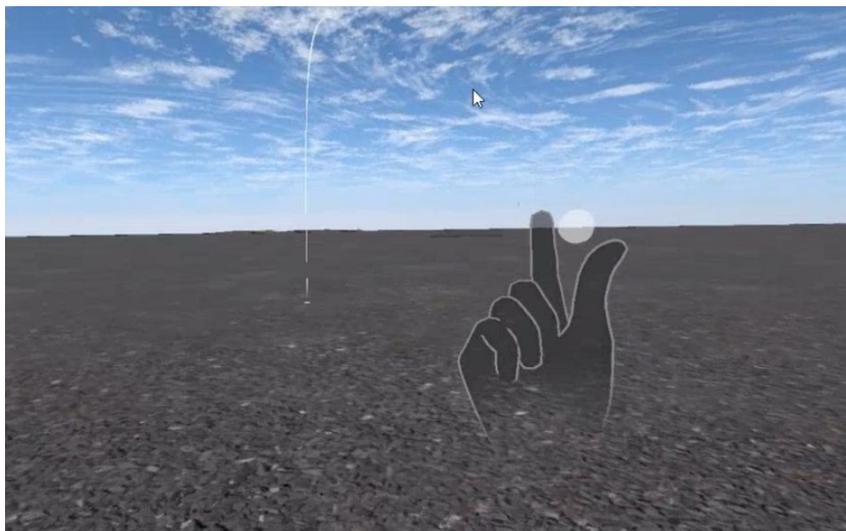
Nesta seção, serão discutidas as funcionalidades do sistema, realizadas na banca de capacitores e na movimentação do transformador.

#### 6.2.1 Banca de capacitores

O treinamento na banca de capacitores é iniciado na cena principal. O primeiro passo é, no ambiente virtual, se movimentar até ela, utilizando o movimento de teletransporte. Este gesto é feito com o fechar dos dedos mínimo, anelar e médio. Junto a esse movimento, um de pinça entre o dedo polegar e o dedo indicador são a confirmação do teletransporte, com a palma da mão voltada para cima conforme ilustrado na Figura 6.1.

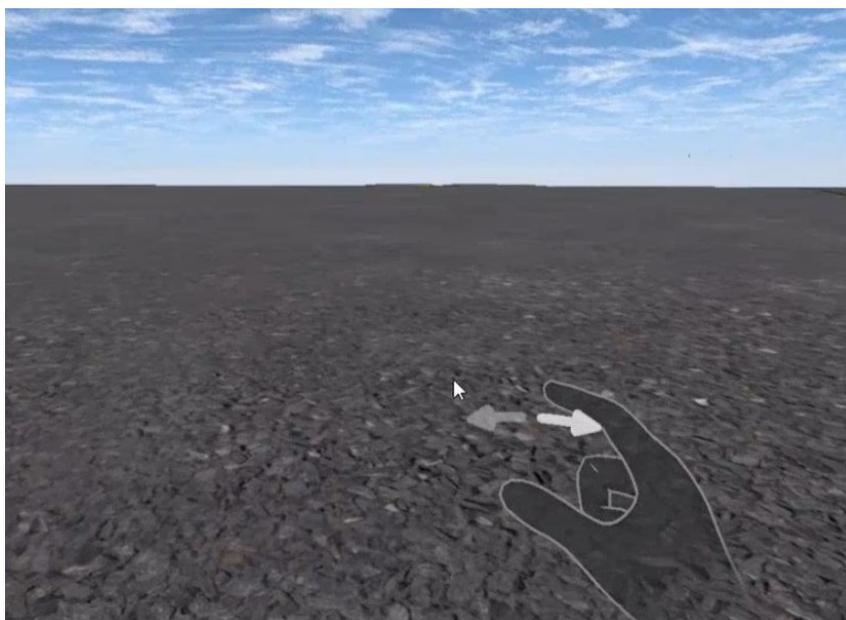
Para realizar a movimentação de rotação, deve-se fazer o gesto de fechar os dedos mínimo, anelar e médio de descrito na Figura 6.2, além de movimento de pinça entre o dedo indicador e o dedo polegar, porém, com uma rotação de antebraço em 90°. Com esses gestos, a movimentação dentro da cena é possível, permitindo que o treinamento seja realizado.

Figura 6.1: Movimentação de Teletransporte.



Fonte: Autoria própria.

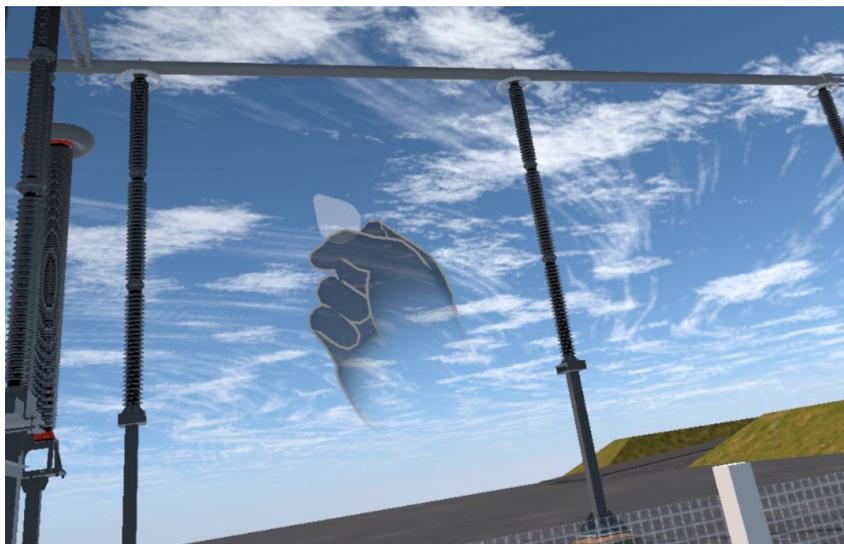
Figura 6.2: Movimentação de rotação.



Fonte: Autoria própria.

Com os princípios básicos de movimentação implementados, apresenta-se a seguir, como são realizadas as interações no sistema. A interação mais básica é o movimento de pegar, conforme ilustrado na Figura 6.3. Para realizar este movimento, basta fechar a mão em torno do objeto escolhido, permitindo que ele seja agarrado. Este processo demonstra o desenvolvimento de ambientes mais naturais e simples para o usuário, facilitando o uso e a imersão no projeto.

Figura 6.3: Movimento de segurar.



Fonte: Autoria própria.

Uma vez compreendida a movimentação, o usuário pode se aproximar da banca de capacitores e realizar o próximo passo. Os equipamentos necessários para essa manobra estarão em uma mesa próxima. Estes equipamentos fazem parte do CB-2000, responsável pela medição de capacitância do banco. Esse equipamento é responsável pela medida da capacitância, composto por três alicates, dois alicates do tipo jacaré e um terceiro alicate amperímetro, com os três conectados na mesma banca, se obtém o valor da capacitância. Ao realizar o gesto de segurar cada um deles e aproximá-los de um conjunto de capacitores, a interação será encerrada, conforme ilustrado na Figura 6.4.

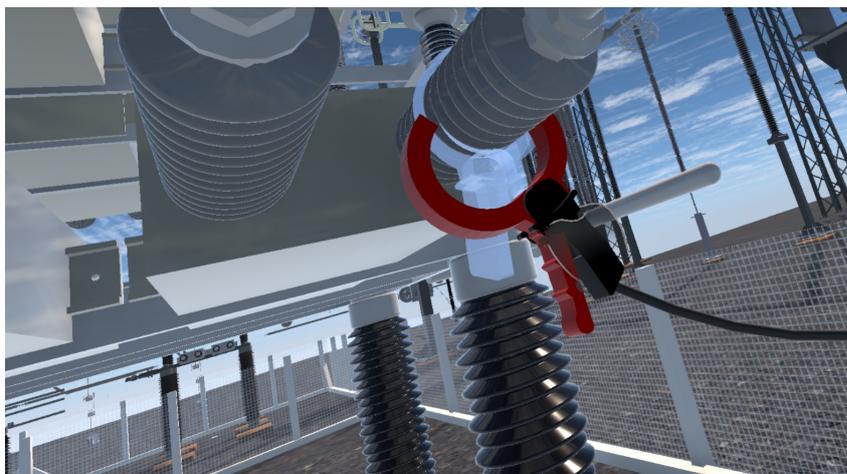
Figura 6.4: Utilização dos Equipamentos do CB-2000.



Fonte: Autoria própria.

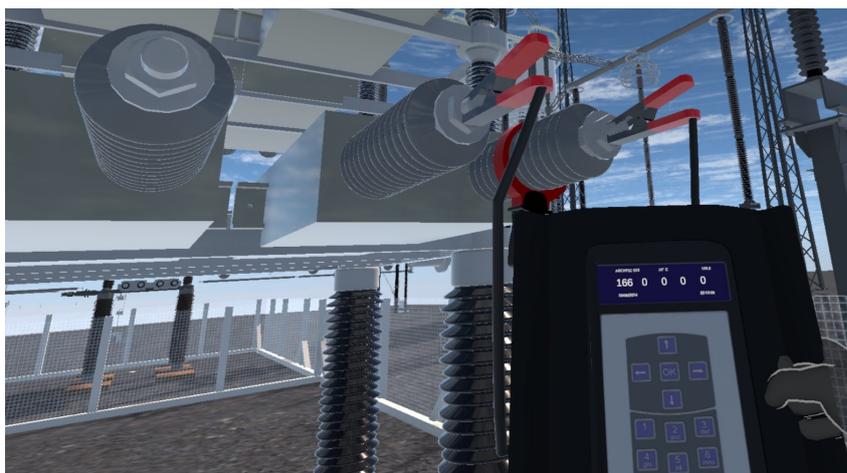
Com os equipamentos em mãos, o usuário pode se aproximar da banca. Uma sombra azul clara do objeto segurado aparecerá, conforme mostrado na Figura 6.5. Ao soltar o objeto na área onde está a sombra, o objeto substituirá a sombra, conectando-se corretamente, como é feito em campo. Se todos os equipamentos do CB-2000 forem conectados a um mesmo capacitor, um resultado aparecerá na tela, conforme ilustrado na Figura 6.6. Após obter o resultado, o processo pode ser repetido em qualquer capacitor da banca, exibindo diferentes resultados.

Figura 6.5: Sistema de uso de Socket Interactor.



Fonte: Autoria própria.

Figura 6.6: Uso do sistema de treinamento na Banca de capacitor.

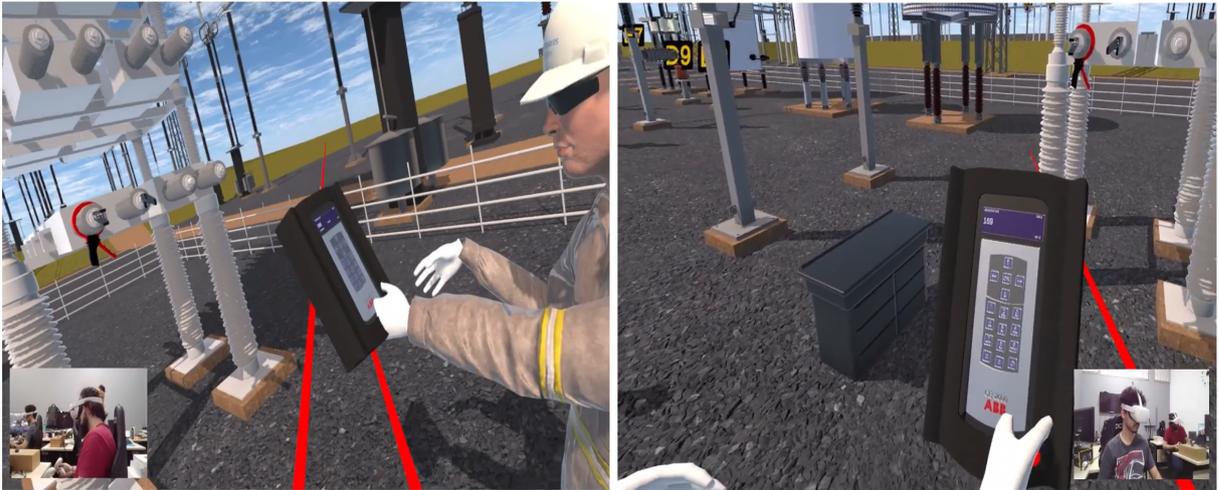


Fonte: Autoria própria.

Assim, a ferramenta pode ser utilizada para o treinamento na banca de capacitores, ensinando o uso do CB-2000 e desenvolvendo o trabalho em equipe para as medições. Esse processo pode ser realizado por mais de uma pessoa, simulando o ambiente real.

Além disso, o sistema suporta um sistema de Multiusuário, como pode ser observado na Figura 6.7. Nesse sistema os operadores podem interagir entre si e podem interagir com os objetos do meio, dessa forma conseguem fazer as manobras do treinamento em conjunto, simulando o real.

Figura 6.7: Utilização dos Equipamentos do CB-2000.



Fonte: Autoria própria.

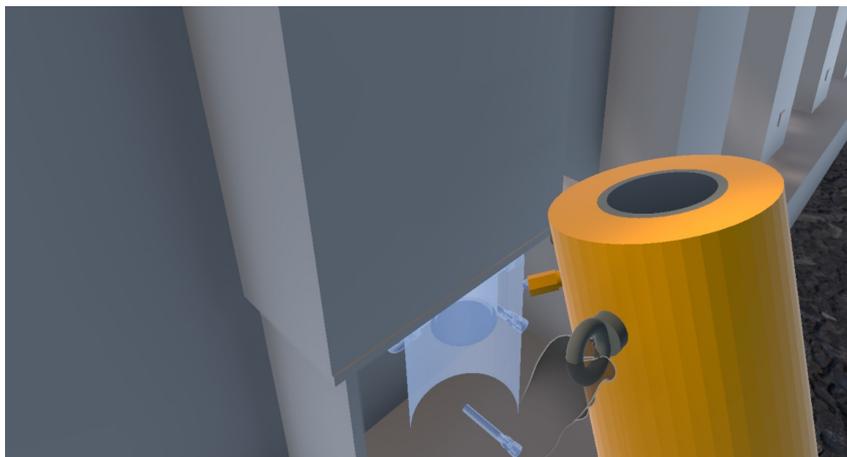
### 6.2.2 Movimentação do Transformador

Antes de iniciar a movimentação do transformador, é importante ressaltar que a movimentação na cena é a mesma que na banca de capacitores. Com essa movimentação, o usuário pode iniciar o treinamento para posicionar o macaco hidráulico, conforme ilustrado na Figura 6.8. Nesse processo, o operador deve segurar o objeto com ambas as mãos devido a sensação de um peso realista do objeto, visando tornar a simulação mais verossímil.

Após posicionar os quatro macacos, o sistema começa a se elevar. Quando atingir a altura máxima, aparecerá uma alavanca e um carrinho em frente ao transformador. Ao puxar a alavanca para frente, o carrinho será ativado e moverá para a frente, posicionando-se sob o transformador, permitindo sua movimentação.

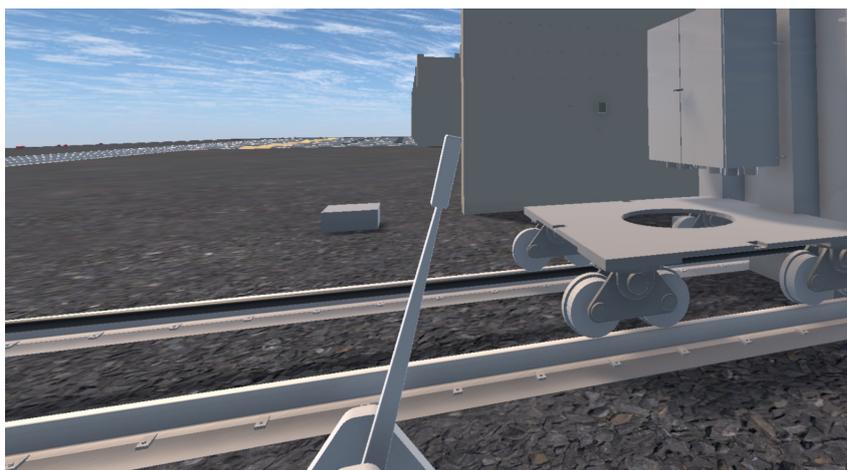
Com o carrinho na posição correta, a alavanca sairá de cena e surgirá o guincho industrial, conforme ilustrado na Figura 6.9. Aproximando-se do guincho e acionando a alavanca, todo o sistema, composto pelo transformador e pelo carrinho, mover-se-á em direção ao guincho. Ao chegar à divisão dos trilhos, o operador poderá escolher a direção para continuar a movimentação, dependendo do transformador que será substituído, o completando.

Figura 6.8: Utilização dos macacos.



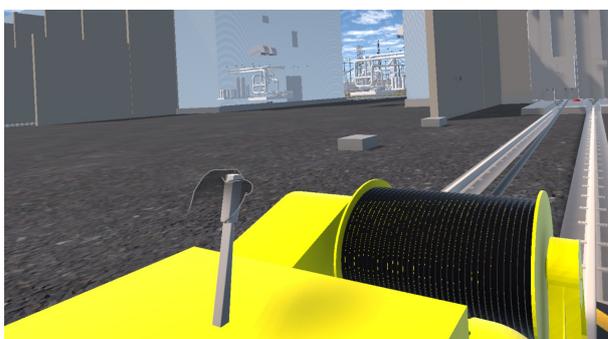
Fonte: Autoria própria.

Figura 6.9: Carrinho em frente ao transformador.

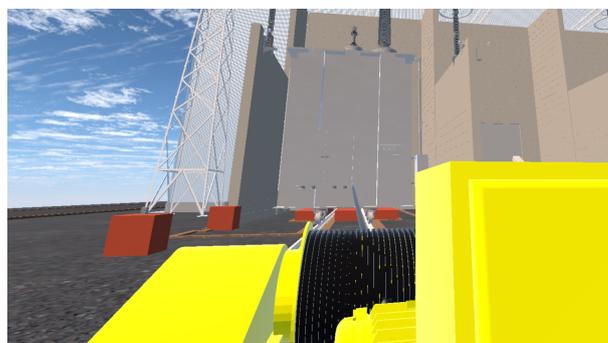


Fonte: Autoria própria.

Figura 6.10: Uso do sistema para puxar o transformador.



(a) Sistema sendo puxado pelo guincho.



(b) Transformador puxado pelo sistema

Fonte: Fonte autor

### 6.3 Avaliação do Treinamento

Para a avaliação, foi utilizado um sistema de ferramentas denominado System Usability Scale (SUS). Trata-se de um método de avaliação da usabilidade de um sistema ou aplicação por meio de uma escala de dez itens que fornece uma visão global da sua utilidade do ponto de vista do usuário (PRABOWO; SUPRAPTO, 2021). O SUS é uma análise que determina a qualidade de um sistema computacional com base na experiência do usuário. É uma técnica rápida e fácil, confiável e pode ser usada para avaliar a usabilidade de uma ampla gama de aplicações (SOEGAARD, 2023).

O questionário SUS consiste em dez afirmações que são avaliadas em uma escala Likert de cinco pontos, variando de "concordo totalmente" a "discordo totalmente". As afirmações são projetadas para avaliar a percepção do usuário sobre a usabilidade do sistema, incluindo sua facilidade de uso, capacidade de aprendizado e satisfação geral (PRABOWO; SUPRAPTO, 2021). O cálculo do SUS segue uma fórmula específica. Para as perguntas ímpares, o valor escolhido é subtraído por 1 e, em seguida, multiplicado por 2,5. Para as perguntas pares, o valor é subtraído de 5 e o resultado também é multiplicado por 2,5. As pontuações de todas as perguntas são somadas, resultando em uma pontuação final que varia de 0 a 100 (FEI LUNG, 2021; LEWIS, 2018).

Em resumo, a System Usability Scale é uma ferramenta útil para avaliar a usabilidade de um sistema ou aplicação do ponto de vista do usuário. Sua escala de dez itens fornece uma visão global da utilidade do sistema, e sua técnica rápida e fácil a torna um método confiável para avaliar a usabilidade. Este trabalho utilizará o questionário para avaliar o alinhamento do uso e desenvolvimento da ferramenta com os objetivos desejados e seu nível de aceitação por operadores de subestações elétricas.

Inicialmente, para avaliar a usabilidade e funcionalidade do sistema utilizando a ferramenta SUS, foi fornecido um questionário, que pode ser visto no apêndice A. Neste questionário, observa-se tanto feedback positivo quanto negativo em relação às experiências dos usuários. As perguntas 1, 2, 3 e 8 inquiriram sobre a facilidade de uso e a complexidade geral da própria ferramenta. As perguntas 5, 6, 8 e 9 visaram avaliar a dificuldade de uso e identificar áreas para melhoria para garantir uma base de usuários mais ampla sem encontrar problemas. As

perguntas 4 e 7 mediram a percepção dos respondentes sobre a confiança e a crença na capacidade de outros utilizarem a ferramenta de forma eficaz. Por fim, a pergunta 10 abordou a relevância do conhecimento prévio para o uso da ferramenta.

Um grupo de 6 indivíduos fora do público-alvo, de engenheiros eletricitistas, foi selecionado para servir como grupo de comparação. Esses indivíduos tinham exposição limitada ao sistema de treinamento. Os seguintes resultados foram obtidos a partir de sua avaliação na Tabela 6.1.

Tabela 6.1: Grupo de controle.

	<b>Pessoa 1</b>	<b>Pessoa 2</b>	<b>Pessoa 3</b>	<b>Pessoa 4</b>	<b>Pessoa 5</b>	<b>Pessoa 6</b>
Q.1	5	5	1	2	1	2
Q.2	2	5	1	1	1	2
Q.3	5	5	4	5	4	4
Q.4	5	1	2	3	1	2
Q.5	5	5	4	3	5	4
Q.6	2	1	2	1	1	4
Q.7	4	5	5	5	5	2
Q.8	1	1	1	1	1	1
Q.9	5	5	4	4	5	5
Q.10	2	3	2	1	1	1
Pontuação	80	85	75	80	87,5	67,5

Usando o sistema de avaliação, uma pontuação média de 79, é considerado um resultado muito bom (FEI LUNG, 2021; LEWIS, 2018). Além disso as respostas obtidas foram favoráveis, indicando uma experiência positiva para o usuário. Pode-se ainda analisar a ponderação de cada pergunta na contribuição para a pontuação final antes de avaliar o grupo-alvo específico. Calculando a média das respostas individuais, diferentes para as respostas pares e ímpares, temos o seguinte calculo para a questão 1

$$\sum_6^1 ((\text{resultado} - 1) * 2.5) / 6 =$$

$$[(5 - 1) * 2.5 + (5 - 1) * 2.5 + (1 - 1) * 2.5 + (2 - 1) * 2.5 + (1 - 1) * 2.5 + (2 - 1) * 2.5] / 6 =$$

$$[10 + 10 + 0 + 2.5 + 0 + 2.5] / 6 =$$

$$25/6 = 4.2$$

Os demais resultados ímpares serão feitos de maneira semelhante. Então dessa forma, pode-se ser feito além disso os resultado para as questões pares usando o SUS, como exemplo será resolvido para a questão 2.

$$\sum_6^1 ((5 - resultado) * 2.5)/6 =$$

$$[(5 - 2) * 2.5 + (5 - 5) * 2.5 + (5 - 1) * 2.5 + (5 - 1) * 2.5 + (5 - 1) * 2.5 + (5 - 2) * 2.5]/6 =$$

$$[7.5 + 0 + 10 + 10 + 10 + 7.5]/6 =$$

$$45/6 = 7.5$$

As demais respostas das perguntas pares foram feitas de maneira análoga. Com base nos resultados, foram obtidos os seguintes valores apresentados na Tabela 6.2:

Tabela 6.2: Resultados tratados do Grupo de controle.

	<b>Q.1</b>	<b>Q.2</b>	<b>Q.3</b>	<b>Q.4</b>	<b>Q.5</b>	<b>Q.6</b>	<b>Q.7</b>	<b>Q.8</b>	<b>Q.9</b>	<b>Q.10</b>
Média	4,2	7,5	8,8	6,7	8,3	7,9	8,3	10	9,2	8,3

Baseado no grupo de controle podemos observar alguns padrões nesse grupo. O primeiro e que a pergunta 8 teve o maior resultado, ou seja, o equipamento e o sistema tiveram uma boa aceitação sobre a facilidade de uso. Em compensação, na pergunta 1, o menor resultado, indica que o grupo de controle não usaria a ferramenta durante grandes períodos de tempo, por não serem da área ou achar que o sistema não responde as suas expectativas.

Agora para o grupo alvo temos a seguinte avaliação:

Novamente usando a media de resultados temos um resultado, obtêm-se uma pontuação significativa (86.8), usando a métrica pontuação já estabelecido para o grupo de controle (FEI

Tabela 6.3: Grupo de controle.

	Pessoa 1	Pessoa 2	Pessoa 3	Pessoa 4	Pessoa 5	Pessoa 6	Pessoa 7	Pessoa 8	Pessoa 9	Pessoa 10	Pessoa 11
Q.1	4	4	4	4	5	5	4	5	4	4	5
Q.2	1	1	4	1	1	3	2	3	2	2	2
Q.3	5	5	5	5	4	4	4	5	5	4	5
Q.4	1	1	1	1	3	2	1	1	2	2	1
Q.5	5	3	5	4	4	5	5	5	4	3	5
Q.6	1	3	2	1	1	1	1	1	2	2	1
Q.7	5	4	5	5	5	4	5	5	4	4	5
Q.8	1	1	1	1	1	2	1	1	2	1	1
Q.9	5	4	5	5	5	5	5	5	5	4	5
Q.10	1	1	1	1	4	1	1	1	3	2	1
Pontuação	97,5	72,5	87,5	95	82,5	82,5	92,5	95	77,5	75	97,5

LUNG, 2021; LEWIS, 2018), esse valor se encaixa no maior grupo de resultados, demonstrando uma satisfação dos usuários sobre alvos da ferramenta. Esse uso foi feito em uma sala onde podia ser observado o que o operador estava realizando, auxiliando em orientações e passos a serem seguidos como pode ser observado pela Figura 6.11.

Figura 6.11: Desafios Superados.



Fonte: Autoria própria.

Agora, com o cálculo das médias individuais, já demonstrados anteriormente, de cada pergunta obtêm-se a seguinte tabela:

Tabela 6.4: Resultados tratados do Grupo de controle.

	Q.1	Q.2	Q.3	Q.4	Q.5	Q.6	Q.7	Q.8	Q.9	Q.10
Média	8,4	7,5	9,1	8,6	8,4	8,9	9,1	9,5	9,5	7,7

Com base nesses dados, diversas observações podem ser feitas. Primeiramente, os valores elevados indicam uma aceitação importante do sistema. Em segundo lugar, a questão 2, que se refere à complexidade da ferramenta, apresentou a menor pontuação. Isso sugere que a ferramenta ainda possui pontos de complexidade elevados, possivelmente devido à falta de controles intuitivos e à necessidade de gestos específicos, mesmo com um curto treinamento anterior ao uso. No entanto, a pontuação ainda está dentro do esperado.

Por outro lado, as questões 8 e 9, que abordam quão complicado e a ferramenta, diferente da questão 2 que analisa diretamente a complexidade da ferramenta (Apêndice A) e o quanto o usuário se sente confiante, obteve a maior pontuação. Isso demonstra que o sistema é fácil de usar para o público-alvo, diferente do grupo de controle, que obteve uma pontuações de 10 e 9,2 respectivamente. Essa diferença evidencia que, apesar das complexidades, ou seja não tem uma difícil compreensão ou entendimento para o publico-alvo.

Esse resultado vem do fato que as operações são semelhantes no campo, facilitando para o operador conseguir fazer as medições ou manobras necessárias nos objetos da cena, tornando o treinamento mais fácil de se usar e dando confiança apara o usuário alvo, servindo seu objetivo inicial.

Outro ponto de grande diferença entre os dois grupos é que, no grupo de controle, a ferramenta não era vista como uma solução que poderia ser utilizada diversas vezes, sendo essa a menor nota. Isso indica uma certa distância ou até mesmo falta de interesse dentro desse grupo. No entanto, no público-alvo, essa nota quase duplica, mostrando novamente que as cenas e as interações são interessantes e imersivas para os usuários, que demonstraram disposição para usá-la mais vezes. Isso destaca uma diferença importante em relação a treinamentos tradicionais, que geralmente não conseguem engajar ou despertar grande interesse nos operadores (JOSHI et al., 2021).

Dessa forma, foi importante a ausência de controles no sistema, o que simplificou muito o processo quando se conhecem os sinais, tornando-o mais acessível para todas as pessoas, independentemente de seu nível de familiaridade com computadores. Esse resultado é refletido na avaliação da complexidade do sistema, dado que os participantes dos testes eram enginhei-

ros de diferentes áreas dentro da subestação e possuíam diferentes níveis de conhecimento técnico.

## **6.4 Considerações finais**

O sistema obteve resultados satisfatórios conforme apontado pelo SUS, demonstrando uma aceitação positiva e qualidade no treinamento realizado. Esse fator pode aumentar o engajamento dos usuários e tornar o treinamento mais acessível. Comentários dos participantes destacaram a familiaridade imediata com o processo e os equipamentos utilizados, diferenciando-se do treinamento tradicional pela proatividade demonstrada e pela facilidade no processo.

## Conclusões e Trabalhos Futuros

### 7.1 Conclusões

A pesquisa realizada possibilitou a criação de uma aplicação, baseada em Realidade Virtual Imersiva, com capacidade de realizar um treinamento multiusuário. Além disso, a incorporação de dados em tempo real do SAGE e a interação multiusuário em um ambiente virtual enriqueceram a experiência de treinamento, tornando-a mais próxima das condições reais de trabalho. Dessa forma, os operadores podem praticar e aperfeiçoar suas habilidades em um ambiente seguro e controlado, sem comprometer a operação da subestação real.

A análise dos dados do SUS mostra que os usuários tiveram uma grande aceitação do sistema, indicando a possibilidade de se tornar um processo contínuo. Assim, com o alto grau de aceitação e a maior imersão apresentada aos operadores, pode-se esperar resultados positivos alinhados ao uso de RV Imersiva no treinamento de operações em subestações elétricas.

Outro ponto importante que foi aplicado foi o uso de multiusuário, pois com essa proximidade do real os operadores deram uma resposta positiva dentro do sistema SUS, mostrando que com essa aplicação se aproximando do real e uma saída para a demonstração das operações em campo.

Portanto, acredita-se que, com as devidas adequações, é possível criar um processo mais interativo e menos repetitivo para o operador, através de um ambiente virtual mais realista, detalhado e próximo ao real.

## 7.2 Trabalhos Futuros

Para a continuidade desse trabalho, o primeiro passo seria a criação de outros casos de treinamento. Isso incluiria a adição de mais equipamentos que possam ser usados e treinados em campo, permitindo a simulação de diversas operações de campo. Dessa forma, seria possível simular qualquer processo que possa ser realizado na subestação.

Em segundo plano, seria necessário realizar um estudo constante da diferença nos resultados das operações utilizando a ferramenta de treinamento em comparação com o método tradicional. O objetivo seria quantificar e qualificar os pontos positivos e negativos de cada abordagem, permitindo o uso mais eficiente de cada método em determinadas operações.

E por último uma melhoria nas qualidades dos modelos e detalhamentos na cena, junto a um processo de otimização, permitindo uma maior variedade de computadores possam usar o sistema, deixando-o mais simples e mais acessível. Sempre com diversas avaliações e a necessidade dos operadores, seguindo o sistema de construção de programa que foi discutido durante o trabalho.

# Referências

ARROYO, E.; ARCOS, J.L.L. SRV: a virtual reality application to electrical substations operation training. In: PROCEEDINGS IEEE International Conference on Multimedia Computing and Systems. [S.l.: s.n.], jun. 1999. v. 1, 835–839 vol.1. DOI: 10.1109/MMCS.1999.779309.

CAO, Ying; NG, Giap-Weng; YE, Sha-Sha. Design and Evaluation for Immersive Virtual Reality Learning Environment: A Systematic Literature Review. en. **Sustainability**, v. 15, n. 3, p. 1964, jan. 2023. Number: 3 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute. ISSN 2071-1050. DOI: 10.3390/su15031964. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2071-1050/15/3/1964>>. Acesso em: 13 jun. 2024.

CARVALHO, Amanda Duarte; PEREIRA, Ana Karla Gomes;  
OLIVEIRA, Weverton Pedro Coelho. METODOLOGIA APIM PARA CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA EM SISTEMAS INDUSTRIAIS DE BAIXA TENSÃO UTILIZANDO BANCOS DE CAPACITORES. por, dez. 2023. Accepted: 2024-01-23T19:20:02Z Publisher: Instituto Federal Goiano. Disponível em: <<https://repositorio.ifgoiano.edu.br/handle/prefix/4162>>. Acesso em: 12 jun. 2024.

CHANG, Zhengwei et al. A Training Simulation System for Substation Equipments Maintenance. In: 2010 International Conference on Machine Vision and Human-machine Interface. [S.l.: s.n.], abr. 2010. P. 572–575. DOI: 10.1109/MVHI.2010.31.

CREDER, Helio. **Instalações Elétricas**. 16ª edição. [S.l.]: LTC, fev. 2016. ISBN 978-85-216-2594-0.

- DAISY, Mohammad et al. Fault location in power grids using substation voltage magnitude differences: A comprehensive technique for transmission lines, distribution networks, and AC/DC microgrids. **Measurement**, v. 220, p. 113403, out. 2023. ISSN 0263-2241. DOI: 10.1016/j.measurement.2023.113403. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224123009673>>. Acesso em: 20 jun. 2024.
- FANQI, Meng; YUNQI, Kan. An improved virtual reality engine for substation simulation. In: 2010 2nd International Conference on Future Computer and Communication. [S.l.: s.n.], mai. 2010. v. 1, p. v1-846-v1-849. DOI: 10.1109/ICFCC.2010.5497308.
- FEI LUNG, Chun. **How to use the System Usability Scale (SUS) in 2021**. en-NL. [S.l.: s.n.], nov. 2021. Disponível em: <<https://chuniversity.nl/papers/sus-past-present-future>>. Acesso em: 17 jun. 2024.
- FREIFELD, Lorri. **November 2023 Archives**. en-US. [S.l.: s.n.], nov. 2023. Disponível em: <<https://trainingmag.com/issue/november-2023/>>. Acesso em: 19 jun. 2024.
- GONZALEZ LOPEZ, Juan Miguel et al. Incorporating Virtual Reality into the Teaching and Training of Grid-Tie Photovoltaic Power Plants Design. en. **Applied Sciences**, v. 9, n. 21, p. 4480, jan. 2019. Number: 21 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute. ISSN 2076-3417. DOI: 10.3390/app9214480. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2076-3417/9/21/4480>>. Acesso em: 2 abr. 2024.
- JAVVAJI, Chaitanya Kumar et al. Immersive Innovations: Exploring the Diverse Applications of Virtual Reality (VR) in Healthcare. **Cureus**, v. 16, n. 3, e56137, abr. 2024. ISSN 2168-8184. DOI: 10.7759/cureus.56137. Disponível em: <<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC11016331/>>. Acesso em: 13 jun. 2024.
- JOSHI, Sayali et al. Implementing Virtual Reality technology for safety training in the precast/ prestressed concrete industry. **Applied Ergonomics**, v. 90, p. 103286, jan. 2021. ISSN 0003-6870. DOI: 10.1016/j.apergo.2020.103286. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0003687020302349>>. Acesso em: 26 jun. 2024.

KOBER, Silvia Erika; KURZMANN, Jürgen; NEUPER, Christa. Cortical correlate of spatial presence in 2D and 3D interactive virtual reality: An EEG study. **International Journal of Psychophysiology**, v. 83, n. 3, p. 365–374, mar. 2012. ISSN 0167-8760. DOI:

10.1016/j.ijpsycho.2011.12.003. Disponível em:

<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167876011003825>>.

Acesso em: 20 jun. 2024.

LAMBERT-TORRES, G. et al. Knowledge engineering tool for training power-substation operators. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 12, n. 2, p. 694–699, abr. 1997.

Conference Name: IEEE Transactions on Power Delivery. ISSN 1937-4208. DOI:

10.1109/61.584348.

LERNER, Dieter et al. An Immersive Multi-User Virtual Reality for Emergency Simulation Training: Usability Study. **JMIR Serious Games**, v. 8, n. 3, e18822, set. 2020. ISSN 2291-9279.

DOI: 10.2196/18822. Disponível em:

<<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7428918/>>. Acesso em: 3 abr.

2024.

LEWIS, James R. The System Usability Scale: Past, Present, and Future. **International Journal of Human-Computer Interaction**, v. 34, n. 7, p. 577–590, jul. 2018. Publisher:

Taylor & Francis \_eprint: <https://doi.org/10.1080/10447318.2018.1455307>. ISSN 1044-7318.

DOI: 10.1080/10447318.2018.1455307. Disponível em:

<<https://doi.org/10.1080/10447318.2018.1455307>>. Acesso em: 17 jun. 2024.

MARCIA L., Eblen. Analysis of Accidents Caused By Induced Current and Voltage on Transmission Lines and Substations Between 1985–2021. en-US, abr. 2022. Disponível em:

<<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9925039>>. Acesso em: 18 jun.

2024.

META. **Getting started with Hand Tracking on Meta Quest headsets | Meta Store.**

[S.l.: s.n.], mar. 2024. Disponível em:

<[https://www.meta.com/pt-br/help/quest/articles/headsets-and-](https://www.meta.com/pt-br/help/quest/articles/headsets-and-accessories/controllers-and-hand-tracking/hand-tracking/)

[accessories/controllers-and-hand-tracking/hand-tracking/](https://www.meta.com/pt-br/help/quest/articles/headsets-and-accessories/controllers-and-hand-tracking/hand-tracking/)>. Acesso em: 25 jun.

2024.

MONDRAGÓN BERNAL, Iván F. et al. An Immersive Virtual Reality Training Game for

Power Substations Evaluated in Terms of Usability and Engagement. en. **Applied Sciences**,

v. 12, n. 2, p. 711, jan. 2022. Number: 2 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute. ISSN 2076-3417. DOI: 10.3390/app12020711. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2076-3417/12/2/711>>. Acesso em: 6 mar. 2023.

MORENO, E.F. et al. Multi-user Expert System for Operation and Maintenance in Energized Lines. English. **Advances in Intelligent Systems and Computing**, 1130 AISC, p. 454–472, 2020. ISBN: 9783030394417. ISSN 2194-5357. DOI: 10.1007/978-3-030-39442-4\_34.

NETO, Jair et al. Enhancing Electrical Substation Training through Multi-User Virtual Reality Techniques. In: PROCEEDINGS of the 25th Symposium on Virtual and Augmented Reality. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, jan. 2024. (SVR '23), p. 105–111. ISBN 9798400709432. DOI: 10.1145/3625008.3625025. Disponível em: <<https://doi.org/10.1145/3625008.3625025>>. Acesso em: 13 jun. 2024.

OLIVEIRA, Bruno Alberto Soares et al. Automated Monitoring of Construction Sites of Electric Power Substations Using Deep Learning. **IEEE Access**, v. 9, p. 19195–19207, 2021. Conference Name: IEEE Access. ISSN 2169-3536. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3054468. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9335576>>. Acesso em: 12 jun. 2024.

PASCULESCU, Dragos et al. Risks Assessment in Terms of Electrical Safety for Power Substation from National Power Grid. In: [s.l.: s.n.], mai. 2022. P. 1–28. ISBN 978-93-5547-668-5. DOI: 10.9734/bpi/rdst/v4/15954D.

PRABOWO, Mei; SUPRAPTO, Agung. Usability Testing pada Sistem Informasi Akademik IAIN Salatiga Menggunakan Metode System Usability Scale. In: JISKA (Jurnal Informatika Sunan Kalijaga). [S.l.: s.n.], jan. 2021. v. 6, p. 38–49. ISSN: 2528-0074, 2527-5836 Issue: 1 Journal Abbreviation: JISKa. DOI: 10.14421/jiska.2021.61-05. Disponível em: <<http://ejournal.uin-suka.ac.id/saintek/JISKA/article/view/61-05>>. Acesso em: 5 jul. 2023.

SOEGAARD, Mads. **System Usability Scale for Data-Driven UX**. en. [S.l.: s.n.], nov. 2023. Disponível em: <<https://www.interaction-design.org/literature/article/system-usability-scale>>. Acesso em: 17 jun. 2024.

TANAKA, Eduardo Hideki et al. A collaborative, immersive, virtual reality environment for training electricians. en. **Journal on Interactive Systems**, v. 14, n. 1, p. 59–71, mar. 2023. Number: 1. ISSN 2763-7719. DOI: 10.5753/jis.2023.2685. Disponível em:

<<https://sol.sbc.org.br/journals/index.php/jis/article/view/2685>>. Acesso em: 3 abr. 2024.

VENTURA, Sara et al. Immersive Versus Non-immersive Experience: Exploring the Feasibility of Memory Assessment Through 360° Technology. English. **Frontiers in Psychology**, v. 10, nov. 2019. Publisher: Frontiers. ISSN 1664-1078. DOI:

10.3389/fpsyg.2019.02509. Disponível em: <<https://www.frontiersin.org/journals/psychology/articles/10.3389/fpsyg.2019.02509/full>>. Acesso em: 20 jun. 2024.

WANG, Sa; MAO, Zhengli et al. A new method of virtual reality based on Unity3D. In: 2010 18th International Conference on Geoinformatics. [S.l.: s.n.], jun. 2010. P. 1–5. ISSN: 2161-0258. DOI: 10.1109/GEOINFORMATICS.2010.5567608.

WANG, Wenju; LI, Guangyao. Virtual reality in the substation training simulator. In: THE 2010 14th International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design. [S.l.: s.n.], abr. 2010. P. 438–443. DOI: 10.1109/CSCWD.2010.5471934.

WEBEL, Sabine et al. An augmented reality training platform for assembly and maintenance skills. **Robotics and Autonomous Systems**, v. 61, n. 4, p. 398–403, abr. 2013. ISSN

0921-8890. DOI: 10.1016/j.robot.2012.09.013. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921889012001674>>. Acesso em: 19 jun. 2024.

XIAO, Qian et al. Electric locomotive electrical control training based on virtual reality technology. en. **Engineering Reports**, v. 5, n. 5, e12638, 2023. \_eprint:

<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/eng2.12638>. ISSN 2577-8196. DOI: 10.1002/eng2.12638. Disponível em:

<<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/eng2.12638>>. Acesso em: 7 mai. 2024.

ZAMBRANO, Juan I. et al. Multi-User Virtual System for Training of the Production and Bottling Process of Soft Drinks. In: 2020 15th Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI). [S.l.: s.n.], jun. 2020. P. 1–7. ISSN: 2166-0727. DOI:

10.23919/CISTI49556.2020.9141140.

---

ZUYDAM, Constance Sthembile Van; S, Moja; F, Mphephu. Hazard and Risk Assessment in Electricity Sector: A Case of Swaziland Electricity Company. en. **Journal of Geography & Natural Disasters**, s6, 2016. ISSN 21670587. DOI: 10.4172/2167-0587.S6-006. Disponível em: <<https://www.omicsgroup.org/journals/hazard-and-risk-assessment-in-electricity-sector-a-case-of-swazilandelectricity-company-2167-0587-S6-006.php?aid=84393>>. Acesso em: 5 jun. 2023.

## ANEXO A – System Usability Scale (SUS), adaptado

	Discordo fortemente					Concordo fortemente
1. Eu acho que gostaria de utilizar essa aplicação com frequência.	<input type="checkbox"/>					
	1	2	3	4	5	
2. Eu achei esse sistema desnecessariamente complexo.	<input type="checkbox"/>					
	1	2	3	4	5	
3. Eu achei esse sistema fácil de usar.	<input type="checkbox"/>					
	1	2	3	4	5	
4. Eu acredito que eu precisaria do auxílio de um especialista.	<input type="checkbox"/>					
	1	2	3	4	5	
5. Eu achei todas as funcionalidades do sistema bem integradas.	<input type="checkbox"/>					
	1	2	3	4	5	
6. Eu acho que o sistema apresenta muitas inconsistências.	<input type="checkbox"/>					
	1	2	3	4	5	
7. Eu acredito que as pessoas aprenderão a utilizar esse sistema rapidamente.	<input type="checkbox"/>					
	1	2	3	4	5	
8. Eu achei o sistema muito complicado/incômodo de usar.	<input type="checkbox"/>					
	1	2	3	4	5	
9. Eu me senti confiante ao usar.	<input type="checkbox"/>					
	1	2	3	4	5	
10. Eu precisei aprender várias coisas novas antes de conseguir sistema.	<input type="checkbox"/>					
	1	2	3	4	5	