



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**  
**MESTRADO ACADÊMICO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**DANIEL REBOUÇAS JAGUARIBE**

**LSRV - LABORATÓRIO DE SUBESTAÇÃO EM REALIDADE VIRTUAL: UMA  
PLATAFORMA DE ENSINO PARA O CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**FORTALEZA**

**2024**

DANIEL REBOUÇAS JAGUARIBE

LSRV - LABORATÓRIO DE SUBESTAÇÃO EM REALIDADE VIRTUAL: UMA  
PLATAFORMA DE ENSINO PARA O CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Acadêmico em Engenharia Elétrica do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia Elétrica. Área de Concentração: Engenharia Elétrica - Sistemas de Energia

Orientador: Prof. Dr. Giovanni Cordeiro Barroso

Coorientador: Prof. Dr. Antônio José Melo Leite Júnior e Prof. Dr. Raimundo Furtado Sampaio

FORTALEZA

2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Sistema de Bibliotecas

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

J231

Jaguaribe, Daniel Reboças.

LSRV - LABORATÓRIO DE SUBESTAÇÃO EM REALIDADE VIRTUAL: UMA PLATAFORMA DE ENSINO PARA O CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA / Daniel Reboças Jaguaribe. – 2024.

133 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2024.

Orientação: Prof. Dr. Giovanni Cordeiro Barroso.

Coorientação: Prof. Dr. Raimundo Furtado Sampaio e Antônio José Melo Leite Júnior.

1. ensino de engenharia. 2. laboratório. 3. realidade virtual. 4. sistema elétrico de potência. 5. subestação.  
I. Título.

CDD 621.3

---

DANIEL REBOUÇAS JAGUARIBE

LSRV - LABORATÓRIO DE SUBESTAÇÃO EM REALIDADE VIRTUAL: UMA  
PLATAFORMA DE ENSINO PARA O CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Acadêmico em Engenharia Elétrica do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia Elétrica. Área de Concentração: Engenharia Elétrica - Sistemas de Energia

Aprovada em:

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Giovanni Cordeiro Barroso (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Raimundo Furtado Sampaio (Coorientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Antônio José Melo Leite Júnior  
(Coorientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. PhD. Ruth Pastôra Saraiva Leão  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Raquel Cristina Filiagi Gregory  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Alexandre Cardoso  
Universidade Federal de Uberlândia (UFU)

À minha família, por acreditar em mim e investir em minha formação humana. Mãe e Pai, seu cuidado e dedicação me deram esperança para seguir. Noiva, sua presença significou segurança e certeza de que não estou sozinho nessa caminhada.

## AGRADECIMENTOS

Aos meus familiares, que acreditaram em mim e me deram o suporte necessário para que eu conseguisse focar em meu desenvolvimento educacional, principalmente minha tia Vicência que me ensinou a ter paixão por estudar.

À minha noiva, que se fez presente prestando o amor e suporte necessários para que eu conseguisse enfrentar os desafios da graduação.

Aos meus professores orientadores deste projeto: Professor Raimundo Furtado, Professor Giovanni Barroso e Professor Melo Júnior, os quais ofereceram um exímio suporte para o desenvolvimento desta dissertação. Agradecimento especial ao Professor Raimundo Furtado, pois quando eu pensei que minha pesquisa nunca seria valorizada, me apoiou até termos sucesso, adquirindo prêmios e reconhecimento da pesquisa pelo CNPq.

A todos os meus amigos que me prestaram suporte para enfrentar os desafios da graduação, principalmente aos bolsistas do GREI, em especial o time de desenvolvimento do software, sendo eles: Richarles Cândido, Gustavo Alves e Rômulo Moura.

Aos professores Átila Girão, Bruno Ricardo, Gabriel Bezerra, Ricardo Thé, Raimundo Furtado, Lucas Melo e Ruth Leão pelos ensinamentos como meus orientadores de monitoria e pesquisa durante a faculdade.

“O sonho é que leva a gente para frente. Se a gente for seguir a razão, fica aquietado, acomodado.”

(Ariano Suassuna)



## RESUMO

Nas últimas décadas, o setor elétrico tem passado por grandes transformações estruturais e tecnológicas, exigindo profissionais com formação multidisciplinar e vivências práticas. Esses fatores, junto à evasão de estudantes e à pandemia COVID-19, têm impulsionado a atualização curricular dos cursos de engenharia, a integração entre academia e indústria e a adoção de novas tecnologias no ensino-aprendizagem. Nesse contexto, o uso de Realidade Virtual (RV) no ensino das engenharias tem crescido devido à sua evolução tecnológica, redução de custos e pela capacidade de criar ambientes customizáveis e de baixo custo. Este trabalho propõe avanços na modelagem, implementação, aplicação e validação de um Laboratório de Subestação em Realidade Virtual (LSRV) no ensino de subestação em disciplinas do curso de engenharia elétrica da Universidade Federal do Ceará (UFC). Baseado nos projetos da Subestação 69-13,8 kV do Campus Universitário Professor Prisco Bezerra da UFC, o LSRV tem sido usado nos últimos três anos em duas disciplinas: Geração, Transmissão e Distribuição e Proteção de Sistemas Elétricos de Potência. Dentre os requisitos do LSRV estão: livre movimentação na subestação, verossimilhança, comparação entre elementos e símbolos do diagrama unifilar real com o ambiente em RV e uso de simulações. Para desenvolvimento do LSRV, foram utilizados dos softwares Blender e Unity, com a linguagem de programação C#. O Blender foi usado para criar modelos tridimensionais dos objetos e a Unity para construir os cenários de interação e física do ambiente. Para validar o LSRV, foram realizados testes em turmas piloto, a fim de verificar a melhor estratégia de ensino, e em turmas definitivas, para atestar a eficácia da metodologia. Mecanismos quantitativos e qualitativos foram usados para avaliar a ferramenta no ensino, constatando que a metodologia proposta, junto ao uso do LSRV, melhoram o desempenho acadêmico, bem como aumentam o interesse e engajamento dos alunos.

**Palavras-chave:** ensino de engenharia; laboratório; realidade virtual; sistema elétrico de potência; subestação.

## ABSTRACT

In recent decades, the electricity sector has undergone major structural and technological changes, requiring professionals with multidisciplinary training and practical experience. These factors, along with student dropout rates and the COVID-19 pandemic, have driven the updating of engineering curricula, integration between academia and industry and the adoption of new technologies in teaching and learning. In this context, the use of Virtual Reality (VR) in engineering education has grown due to its technological evolution, cost reduction and ability to create customizable and low-cost environments. This work proposes advances in the modeling, implementation, application and validation of a Substation Laboratory in Virtual Reality (LSRV) for teaching substations in electrical engineering courses at the Federal University of Ceará (UFC). Based on the 69-13.8 kV substation projects at UFC's Professor Prisco Bezerra University Campus, the VLSI has been used for the last three years in two subjects: Generation, Transmission and Distribution and Protection of Electric Power Systems. Among the LSRV's requirements are: free movement in the substation, verisimilitude, comparison between elements and symbols in the real single-line diagram with the VR environment and the use of simulations. To develop the LSRV, Blender and Unity software were used, with the C# programming language. Blender was used to create three-dimensional models of the objects and Unity to build the interaction scenarios and physics of the environment. To validate LSRV, tests were carried out in pilot classes to check the best teaching strategy and in final classes to confirm the effectiveness of the methodology. Quantitative and qualitative mechanisms were used to evaluate the teaching tool, showing that the proposed methodology, together with the use of VLSI, improves academic performance, as well as increasing student interest and engagement.

**Keywords:** engineering education; electrical power system; laboratory; substation; virtual reality.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Pátio de uma subestação de distribuição de energia. . . . .	40
Figura 2 – Transformador de Corrente de alta tensão. . . . .	41
Figura 3 – Transformador de Potencial. . . . .	42
Figura 4 – Transformador de Potência. . . . .	43
Figura 5 – Chave seccionadora monopolar. . . . .	45
Figura 6 – Diagrama unifilar com barramento em destaque. . . . .	46
Figura 7 – Relé digital utilizado como base para modelagem. . . . .	48
Figura 8 – Componentes de uma Casa de Comando. . . . .	49
Figura 9 – Diagrama Unifilar Operacional da Subestação do Campus do Pici. . . . .	50
Figura 10 – Ambiente da Casa de Comando com os Quadros de Proteção e Automação. . . . .	52
Figura 11 – Processo metodológico para o desenvolvimento do presente trabalho. . . . .	53
Figura 12 – Processo de modelagem dos componentes. . . . .	56
Figura 13 – Modelagem de uma seccionadora via Blender. . . . .	57
Figura 14 – Movimentação do drone dentro da subestação. . . . .	58
Figura 15 – Comparativo Real x Virtual do pátio da subestação. . . . .	59
Figura 16 – Comparativo Real x Virtual da casa de comando. . . . .	59
Figura 17 – Diagrama Unifilar Interativo do LSRV. . . . .	60
Figura 18 – Diagrama de atividades da simulação de religador. . . . .	61
Figura 19 – Simulação de curto-circuito no vão de alimentação. . . . .	62
Figura 20 – Supervisório durante a simulação de curto-circuito no alimentador. . . . .	62
Figura 21 – Ordem cronológica das disciplinas no experimento. . . . .	63
Figura 22 – Fluxograma das turmas piloto em ordem cronológica com suas estratégias de ensino. . . . .	65
Figura 23 – Processo metodológico para turma piloto. . . . .	67
Figura 24 – Ambiente de alta tensão da subestação. . . . .	68
Figura 25 – Vão de transformação da subestação. . . . .	69
Figura 26 – Ambiente de média tensão da subestação. . . . .	69
Figura 27 – Movimentação livre do drone. . . . .	70
Figura 28 – Quadros da casa de comando. . . . .	70
Figura 29 – Processo metodológico para turmas definitivas. . . . .	72
Figura 30 – Esquemático do processo metodológico aplicado nas cinco turmas. . . . .	74

Figura 31 – Relação de desempenho Disciplina 1: Semestre 2021.2. . . . .	76
Figura 32 – Resultado do UES na Disciplina 1: Semestre 2021.2, onde: FA (Atenção Focada), PU (Usabilidade Percebida), AE (Apelo Estético) e RW (Grau de Recompensa). . . . .	77
Figura 33 – Relação de desempenho Disciplina 2: Semestre 2022.1. . . . .	79
Figura 34 – Resultado do UES na Disciplina 2: Semestre 2022.1, onde: FA (Atenção Focada), PU (Usabilidade Percebida), AE (Apelo Estético) e RW (Grau de Recompensa). . . . .	79
Figura 35 – Relação de desempenho Disciplina 1: Semestre 2022.2. . . . .	81
Figura 36 – Resultado do UES na Disciplina 1: Semestre 2022.2, onde: FA (Atenção Focada), PU (Usabilidade Percebida), AE (Apelo Estético) e RW (Grau de Recompensa). . . . .	82
Figura 37 – Comparativo das turmas piloto. . . . .	83
Figura 38 – Comparativo da Atenção Focada (FA) dentre as turmas piloto. . . . .	84
Figura 39 – Comparativo da Usabilidade Percebida (PU) dentre as turmas piloto. . . . .	85
Figura 40 – Comparativo do Apelo Estético (AE) dentre as turmas piloto. . . . .	85
Figura 41 – Comparativo do Fator de Recompensa (RW) dentre as turmas piloto. . . . .	86
Figura 42 – Relação de desempenho Disciplina 2 turma experimental: Semestre 2023.1. . . . .	88
Figura 43 – Relação de desempenho Disciplina 2 turma controle: Semestre 2023.1. . . . .	89
Figura 44 – Comparativo das turmas controle e experimental da turma 2023.1. . . . .	90
Figura 45 – Resultado do UES na Disciplina 2: Semestre 2023.1, onde: FA (Atenção Focada), PU (Usabilidade Percebida), AE (Apelo Estético) e RW (Grau de Recompensa). . . . .	91
Figura 46 – Relação de desempenho Disciplina 1: Semestre 2023.2 turma experimental. . . . .	93
Figura 47 – Relação de desempenho Disciplina 1: Semestre 2023.2 turma controle. . . . .	94
Figura 48 – Comparativo das turmas controle e experimental da turma 2023.2. . . . .	94
Figura 49 – Resultado do UES na Disciplina 1: Semestre 2023.2, onde: FA (Atenção Focada), PU (Usabilidade Percebida), AE (Apelo Estético) e RW (Grau de Recompensa). . . . .	96

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação das plataformas desenvolvidas. . . . .	38
Tabela 2 – Comparação das metodologias de validação. . . . .	39
Tabela 3 – Dados dos principais elementos da subestação. . . . .	51
Tabela 4 – Resultados pré-teste/pós-teste Disciplina 1: Semestre 2021.2. . . . .	75
Tabela 5 – Resultados pré-teste/pós-teste Disciplina 2: Semestre 2022.1. . . . .	78
Tabela 6 – Resultados pré-teste/pós-teste Disciplina 1: Semestre 2022.2. . . . .	80
Tabela 7 – Resultados pré-teste/pós-teste Disciplina 2: Semestre 2023.1. . . . .	88
Tabela 8 – Resultados pré-teste/pós-teste Disciplina 1: Semestre 2023.2. . . . .	93

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

2D	Bidimensional
3D	Três Dimensões
AE	<i>Aesthetic appeal</i> - Apelo Estético
CINASE	Circuito Nacional do Setor Elétrico
CT57	Comitê Técnico 57
EPI	Equipamentos de Proteção Individual
EPRI	<i>Electric Power Research Institute</i>
FA	<i>Focused Attention</i> - Atenção Focada
FINEP	Financiadora de Estudos e Projetos
GD	Geração Distribuída
GREI	Grupo de Redes Elétricas Inteligentes
HMD	<i>Head-Mounted Display</i>
HS	<i>High School</i>
IC	Infraestruturas Críticas
IED	<i>Intelligent Electronic Devices</i>
LSRV	<i>Laboratório de Subestação em Realidade Virtual</i>
NGSS	<i>The Next Generation Science Standards</i>
PHIL	<i>Power hardware-in-the-loop</i>
PU	<i>Perceived Usability</i> - Usabilidade Percebida
QMPCS	Quadros de Medição, Proteção e Controle e Supervisão
QSACA	Quadro de Serviços Auxiliares de Corrente Alternada
QSACC	Quadro de Serviços Auxiliares de Corrente Contínua
RTDS	<i>Real Time Digital Simulator</i>
RV	Realidade Virtual
RW	<i>Reward factor</i> - Fator de Recompensa
SAS	Sistemas de Automação de Subestações
SCADA	<i>Supervisory Control and Data Acquisition</i> - Sistema de Supervisão e Aquisição de Dados
SEE	Subestação de Energia Elétrica
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SUS	<i>System Usability Scale</i>

TC	Transformadores de Corrente
TP	Transformadores de Potencial
TSA	Transformador de Serviços Auxiliares
UES	<i>User Engagement Scale</i>
UFC	Universidade Federal do Ceará

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>19</b>
<b>1.1</b>	<b>Justificativa</b>	<b>19</b>
<b>1.2</b>	<b>Motivação</b>	<b>20</b>
<b>1.3</b>	<b>Objetivos</b>	<b>21</b>
<b>1.3.1</b>	<i>Objetivo Principal</i>	<b>21</b>
<b>1.3.2</b>	<i>Objetivos Específicos</i>	<b>21</b>
<b>1.4</b>	<b>Metodologia</b>	<b>22</b>
<b>1.5</b>	<b>Contribuições</b>	<b>22</b>
<b>1.5.1</b>	<i>Contribuições Científicas</i>	<b>22</b>
<b>1.5.2</b>	<i>Contribuições Acadêmicas</i>	<b>23</b>
<b>1.6</b>	<b>Como baixar e utilizar o LSRV</b>	<b>23</b>
<b>1.7</b>	<b>Estrutura da Dissertação</b>	<b>23</b>
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>25</b>
<b>2.1</b>	<b>Realidade Virtual</b>	<b>25</b>
<b>2.1.1</b>	<i>Plataformas para modelagem e desenvolvimento</i>	<b>26</b>
<b>2.2</b>	<b>Metodologias de Ensino e de Avaliação</b>	<b>27</b>
<b>2.2.1</b>	<i>Ensino</i>	<b>27</b>
<b>2.2.1.1</b>	<i>Metodologia Tradicional</i>	<b>27</b>
<b>2.2.1.2</b>	<i>Metodologias Ativas</i>	<b>28</b>
<b>2.2.2</b>	<i>Procedimentos para Avaliação</i>	<b>29</b>
<b>2.3</b>	<b>Estado da arte de laboratórios e de simuladores no ensino de Engenharia Elétrica</b>	<b>31</b>
<b>2.3.1</b>	<i>Laboratórios físicos e de simulação computacional em Engenharia Elétrica</i>	<b>31</b>
<b>2.3.2</b>	<i>Estado da arte do uso de RV no ensino de Engenharia Elétrica</i>	<b>34</b>
<b>2.3.2.1</b>	<i>Realidade Virtual aplicada ao ensino de diversas áreas da Engenharia Elétrica</i>	<b>35</b>
<b>2.3.2.2</b>	<i>Realidade Virtual aplicada ao ensino e ao treinamento em subestações</i>	<b>36</b>
<b>2.4</b>	<b>Subestações de Energia Elétrica (SEE)</b>	<b>39</b>
<b>2.4.1</b>	<i>Equipamentos de uma subestação</i>	<b>40</b>
<b>2.4.1.1</b>	<i>Transformadores de Corrente</i>	<b>41</b>
<b>2.4.1.2</b>	<i>Transformadores de Potencial</i>	<b>41</b>



2.4.1.3	<i>Transformador de Potência</i>	42
2.4.1.4	<i>Chave Seccionadora</i>	44
2.4.1.5	<i>Barramentos de uma subestação</i>	45
2.4.2	<b><i>Subestação Inteligente</i></b>	46
2.4.3	<b><i>IEC 61850</i></b>	47
2.4.3.1	<i>Intelligent Electronic Devices</i>	47
2.4.4	<b><i>Subestação do Campus Professor Prisco Bezerra</i></b>	49
2.4.4.1	<i>Descrição da subestação</i>	49
2.4.4.2	<i>Diagrama Unifilar Operacional da Subestação Campus do Pici</i>	50
2.4.4.3	<i>Diagrama de Proteção da Subestação Campus do Pici</i>	51
2.4.4.4	<i>Diagrama da Arquitetura de Proteção, Automação e Controle</i>	51
3	<b>METODOLOGIA</b>	53
3.1	<b>Definição de Requisitos</b>	53
3.2	<b>Estabelecimento das Funcionalidades do Sistema</b>	54
3.2.1	<i>Livre Movimentação</i>	54
3.2.2	<i>Verossimilhança</i>	54
3.2.3	<i>Comparação do diagrama unifilar com ambiente em RV</i>	55
3.2.4	<i>Criação de simulações</i>	55
3.3	<b>Desenvolvimento do Laboratório de Subestação em Realidade Virtual</b>	55
3.3.1	<i>Modelagem dos componentes da LSRV via Blender</i>	55
3.3.2	<i>Programação do Laboratório de Subestações em Realidade Virtual via Unity</i>	57
3.4	<b>Aplicação do Laboratório de Subestações em Realidade Virtual</b>	62
3.4.1	<i>Definição das turmas e das estratégias de ensino</i>	63
3.4.1.1	<i>Modelo de estratégias de ensino para turmas piloto</i>	65
3.4.1.2	<i>Modelo de Implementação para turmas definitivas</i>	65
3.5	<b>Aplicação do Laboratório de Subestações em Realidade Virtual nas turmas</b>	66
3.5.1	<i>Aplicação nas turmas piloto</i>	66
3.5.1.1	<i>Teste da 1ª turma piloto no semestre 2021.2</i>	67
3.5.1.2	<i>Teste da 2ª turma piloto no semestre 2022.1</i>	68
3.5.1.3	<i>Teste da 3ª turma piloto no semestre 2022.2</i>	71
3.5.2	<i>Aplicação das turmas definitivas</i>	71
3.5.2.1	<i>Teste da 1ª turma definitiva no semestre 2023.1</i>	72

3.5.2.2	<i>Teste da 2ª turma definitiva no semestre 2023.2</i> . . . . .	73
3.5.3	<b><i>Considerações da aplicação do Laboratório de Subestações em Realidade Virtual</i></b> . . . . .	73
4	<b>RESULTADOS</b> . . . . .	74
4.1	<b>Resultados das turmas piloto</b> . . . . .	74
4.1.1	<b><i>Semestre 2021.2: Geração, Transmissão e Distribuição</i></b> . . . . .	75
4.1.1.1	<i>Resultados Quantitativos</i> . . . . .	75
4.1.1.2	<i>Resultados qualitativos</i> . . . . .	77
4.1.2	<b><i>Semestre 2022.1: Proteção do Sistema Elétrico de Potência</i></b> . . . . .	78
4.1.2.1	<i>Resultados quantitativos</i> . . . . .	78
4.1.2.2	<i>Resultados qualitativos</i> . . . . .	80
4.1.3	<b><i>Semestre 2022.2: Geração, Transmissão e Distribuição</i></b> . . . . .	80
4.1.3.1	<i>Resultados quantitativos</i> . . . . .	80
4.1.3.2	<i>Resultados qualitativos</i> . . . . .	82
4.1.4	<b><i>Análise das turmas piloto</i></b> . . . . .	82
4.1.4.1	<i>Análise das avaliações de aprendizado e opiniões discentes</i> . . . . .	83
4.1.4.2	<i>Análise das avaliações de engajamento e opiniões discentes</i> . . . . .	83
4.2	<b>Resultados das turmas definitivas</b> . . . . .	87
4.2.1	<b><i>Semestre 2023.1: Proteção do Sistema Elétrico de Potência</i></b> . . . . .	87
4.2.1.1	<i>Análise das avaliações de aprendizado e comentários discentes</i> . . . . .	88
4.2.1.2	<i>Análise das avaliações de engajamento e opinião dos discentes</i> . . . . .	90
4.2.2	<b><i>Semestre 2023.2: Geração, Transmissão e Distribuição</i></b> . . . . .	92
4.2.2.1	<i>Análise das avaliações de aprendizado e comentários discentes</i> . . . . .	93
4.2.2.2	<i>Análise das avaliações de engajamento e opinião dos discentes</i> . . . . .	95
5	<b>CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS</b> . . . . .	98
5.1	<b>Trabalhos Futuros</b> . . . . .	99
	<b>REFERÊNCIAS</b> . . . . .	100
	<b>APÊNDICES</b> . . . . .	107
	<b>APÊNDICE A – Lista de Equipamentos modelados no LSRV.</b> . . . . .	107
	<b>APÊNDICE B – Lista de comandos para a utilização do LSRV.</b> . . . . .	108
	<b>APÊNDICE C – Avaliação de aprendizagem: Pré-teste.</b> . . . . .	109
	<b>APÊNDICE D – Avaliação de aprendizagem: Pós-teste</b> . . . . .	120

<b>ANEXOS</b> . . . . .	131
<b>ANEXO A</b> – <i>Diagrama de Proteção e Medição da Subestação do Campus do Pici</i> . . . . .	131
<b>ANEXO B</b> – <i>Diagrama da Arquitetura de Proteção, Automação e Controle da Subestação Campus do Pici.</i> . . . . .	133

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Justificativa

A formação de um engenheiro eletricitista na área de concentração em Sistema Elétrico de Potência (SEP) deve ser apta para fornecer, ao discente, um currículo capaz de trabalhar na concepção e implementação de tecnologias avançadas, como: geração, transmissão, distribuição, comercialização e consumo de energia elétrica (Mohan *et al.*, 2014). Nesse tocante, é necessário ofertar um ambiente de aprendizado facilitado e contínuo por meio da melhoria no processo de ensino-aprendizagem ao se utilizar de simulações ou de ambientes de visualização mais tangíveis à compreensão da dimensão e do funcionamento dos equipamentos (Mohan *et al.*, 2014; Barata *et al.*, 2015).

Nas últimas décadas, houve um aumento substancial do índice de desistência nos cursos de engenharia ao redor do globo ocasionado por diversas razões, dentre elas a baixa performance acadêmica, a pouca motivação para continuidade do curso e os fatores institucionais tais como estrutura e recursos financeiros para manutenção dos cursos (Tayebi *et al.*, 2021; Salas-Morera *et al.*, 2019). Dentre os cursos mais afetados encontra-se a Engenharia Elétrica a qual envolve conceitos complexos inerentes ao campo das ciências exatas (Kamińska *et al.*, 2017).

O caso brasileiro não é diferente, em Silveira *et al.* (2019) é evidenciado um estudo da Universidade de Brasília, cujo propósito é ilustrar os principais motivos para o aumento substancial no índice de desistência nos cursos de Engenharia Elétrica e Engenharia da Computação. No artigo, os autores descrevem que, além das razões mencionadas em Tayebi *et al.* (2021), Kabashi *et al.* (2022), como a metodologia de ensino ultrapassada e pouco uso de novas tecnologias no processo de ensino-aprendizagem, no Brasil há uma diversidade de fatores ao se comparar com estudos semelhantes, tais como pedidos de licença para afastamento do curso por motivos pessoais e como uma grande distância da residência discente ao campus universitário em cidades cujo transporte público é insuficiente.

Nesse tocante, é desejável que o processo de ensino-aprendizagem seja modificado com o intento de se adaptar à realidade dos discentes de engenharia do Século XXI (Cohen *et al.*, 2016; Birchfield *et al.*, 2019). Conforme Kabashi *et al.* (2022), essa adaptação pode ser realizada de diversas formas, como por meio de uma atualização curricular, do emprego da literatura contemporânea, da aplicação de metodologias modernas de ensino, da didática docente

e da melhoria dos laboratórios.

A demanda por um ensino mais prático passa pela utilização de laboratórios didáticos. Por conta de limitações financeiras, nem sempre é possível que cursos de graduação disponham de recursos físicos suficientes para o aprimoramento do aspecto de ensino-aprendizagem. Por consequência, há um crescente processo de diversificação de laboratórios didáticos por meio da utilização de ambientes virtuais (Saha, 2022).

Em Pereira *et al.* (2020), é destacada a importância em inovar, seja recorrendo às novas metodologias de ensino ou ao uso de novas tecnologias para complementar a metodologia tradicional expositiva. Dessa forma, dentre as muitas tecnologias que estão sendo utilizadas para melhorar o ensino de Engenharia Elétrica, a Realidade Virtual (RV) já é uma das principais ferramentas utilizadas para habilitar engenheiros que atuam em ambientes de risco ou elevada complexidade (Xie *et al.*, 2023; Potkonjak *et al.*, 2016).

Para tanto, alguns *softwares* já são utilizados com simulação RV, seja ela imersiva, utilizando capacetes de RV, ou não imersiva, utilizando de projetores, em diversas áreas da Engenharia Elétrica, com aplicações em: transformadores (Barata *et al.*, 2015), distribuição de energia (Araujo *et al.*, 2016), máquinas elétricas (Kamińska *et al.*, 2017; Kamińska *et al.*, 2021), energias renováveis (Abichandani *et al.*, 2019), circuitos elétricos e eletrônicos em (Garcia-Zubia *et al.*, 2016; Callaghan *et al.*, 2017) e subestações (Memik; Nikolic, 2021; Bernal *et al.*, 2022). Importante salientar que o diferencial do presente trabalho para com os mencionados acima está na seção de fundamentação teórica.

## 1.2 Motivação

A motivação para desenvolvimento deste trabalho abrange dois pontos principais: o primeiro consiste no crescente uso de Laboratórios em RV no ensino das engenharias (Lampropoulos *et al.*, 2022) e o segundo consiste em transformar a Rede Elétrica do Campus do Pici da Universidade Federal do Ceará em um Laboratório vivo de Ensino, Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (Santos, 2015). Seguindo esse propósito, em Jaguaribe (2022), foi apresentada a modelagem, desenvolvimento da versão beta do *Laboratório de Subestação em Realidade Virtual* (LSRV), construído a partir da planta da Subestação de 69-13,8 kV real do Campus do Pici da Universidade Federal do Ceará (UFC). Em Jaguaribe (2022), também foram apresentados os resultados preliminares do uso do LSRV no ensino de subestação em duas disciplinas do curso de engenharia elétrica da UFC.

Nesse sentido, este trabalho é uma continuação do trabalho de conclusão de curso defendido em Jaguaribe (2022), no qual explica como foi o processo de modelagem inicial da ferramenta do pátio da subestação, bem como utilizar do *software* em duas turmas diferentes, sendo uma para a disciplina de Geração, Transmissão e Distribuição e outra para disciplina de Proteção do Sistema Elétrico de Potência do curso de Engenharia Elétrica da UFC. Dentre os principais diferenciais desta dissertação e do trabalho de conclusão de curso, destacam-se:

- Maior desenvolvimento dos equipamentos do pátio da subestação virtual;
- Desenvolvimento e implementação dos componentes da casa de comando, como os quadros de proteção e de serviços auxiliares;
- Desenvolvimento e implementação de simulação de eventos, como curto-circuito ou queda de tensão;
- Criação de um diagrama unifilar interativo que permite que o discente compare os equipamentos presentes no diagrama com os equipamentos reais;
- Aplicação do LSRV em três turmas novas, em relação ao trabalho anteriormente citado, por meio de uma metodologia mais aceita no meio científico e que está descrita detalhadamente no Capítulo 3.

## 1.3 Objetivos

### 1.3.1 *Objetivo Principal*

O objetivo geral deste trabalho é propor avanços da modelagem, implementação, aplicação e validação do LSRV para aplicação no ensino de subestação nas disciplinas da unidade de sistema de energia do curso de Engenharia Elétrica da UFC.

### 1.3.2 *Objetivos Específicos*

No desenvolvimento deste trabalho foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Modelar e desenvolver o LSRV prezando pela verossimilhança com a planta da Subestação de 69,13,8 kV do Campus do Pici da UFC;
- Integrar diagramas unifilares da SE real ao LSRV;
- Desenvolver um emulador de sistema *Supervisory Control and Data Acquisition* - Sistema de Supervisão e Aquisição de Dados (SCADA) iterativo no LSRV;

- Implementar cenários de simulação de falta no SCADA-LSRV que contemple a atuação das funções de proteção (50/51) e religamento (79), sequência operacional do religador ilustrada em gráfico e oscilografia;
- Especificar estratégias de ensino de subestação, sem e com uso do LSRV, nas disciplinas da unidade de sistema de energia;
- Apresentar resultados e benefícios do uso do LSRV no ensino-aprendizagem de subestação no curso de engenharia elétrica da UFC, bem como avaliar seu impacto no processo educacional.

## 1.4 Metodologia

A metodologia para desenvolvimento deste trabalho compreende as seguintes etapas:

- Revisão bibliográfica;
- Levantamento das plantas do projeto da subestação e registros fotográficos da subestação 69-13,8 kV real do Campus do Pici;
- Definição dos softwares de modelagem e de desenvolvimento do LSRV;
- Definição das estratégias de ensino de subestação a serem testadas com uso do LSRV e da metodologia de avaliação para teste e validação da plataforma;
- Modelagem e desenvolvimento do LSRV, utilizando as plataformas Blender e Unity, respectivamente;
- Teste e validação do LSRV utilizando as metodologias de avaliação de pré-teste/pós-teste, *User Engagment Scale*, coleta de opiniões e grupos focais.

## 1.5 Contribuições

Nesta seção estão descritas as contribuições para o meio acadêmico e científico oriundas do desenvolvimento do trabalho.

### 1.5.1 Contribuições Científicas

O presente trabalho apresenta aspectos inovativos tanto no software desenvolvido, como na metodologia de avaliação utilizada. Referente ao LSRV, o software apresenta uma réplica, em RV, inédita da subestação que alimenta o Campus do Pici e que possui simulações de faltas elétricas, emulador de sistema SCADA com a representação da mudança de estado dos

equipamentos e tela com os eventos registrados após a falta. Além disso, o LSRV contempla os mecanismos para comparar os componentes do diagrama unifilar com os equipamentos virtualizados em Três Dimensões (3D). Já no que tange à metodologia de avaliação utilizada neste experimento, a mesma consiste na combinação de diversos modelos avaliativos presentes em áreas distintas do conhecimento, tais como o protocolo *User Engagement Scale* (UES)<sup>1</sup> para medição de aspectos de engajamento discente (O'Brien *et al.*, 2018), o qual pode ser observado seu uso na química em Júnior *et al.* (2020). Além disso, para medição quantitativa de desempenho discente, foi utilizado o método de avaliação de aprendizagem presente em Cohen *et al.* (2016) e em Kotsampopoulos *et al.* (2017). Por fim, o presente trabalho contempla, também, resultados qualitativos obtidos por meio da coleta de opiniões dos alunos e da utilização de grupos focais, baseado no trabalho de Júnior *et al.* (2020).

### 1.5.2 Contribuições Acadêmicas

- Prêmio de **Melhor Projeto P&D 2023** e Prêmio **O Setor Elétrico 2023** de melhor projeto geral no evento Circuito Nacional do Setor Elétrico (CINASE) 2023 - Fortaleza;
- Publicação de ambos os prêmios na Revista O Setor Elétrico Edição 198;
- Artigo defendido e apresentado em Jaguaribe *et al.* (2023)

## 1.6 Como baixar e utilizar o LSRV

Com a finalidade de disponibilizar o LSRV para o uso em diversas universidades, um site foi criado contendo a descrição do software, bem como instruções de como utilizar o LSRV para uma aula presencial ou virtual. Além disso, a versão editável do *software* também foi disponibilizada. O link para o Github é: <https://github.com/grei-ufc/vrslab>.

## 1.7 Estrutura da Dissertação

Esta dissertação está estruturada de acordo com os seguintes capítulos:

- No capítulo 2 é apresentado um panorama geral sobre a educação no curso de Engenharia Elétrica, dando ênfase na utilização de RV aplicada a diversos casos e áreas. Além disso, no mesmo capítulo, é descrito o funcionamento de uma subestação, bem como de seus

---

<sup>1</sup> User Engagement Scale (UES) é um protocolo utilizado no meio científico para comparar o engajamento de usuários para o uso de uma ferramenta em determinado período de tempo.



componentes, com a finalidade de embasar o leitor sobre o ambiente desenvolvido;

- No capítulo 3 é apresentada a metodologia da aplicação desenvolvida, ressaltando as ferramentas utilizadas, seu processo de desenvolvimento e seu diferencial, bem como as estratégias de ensino propostas e as metodologias de avaliação utilizadas para validar o experimento;
- No capítulo 4 são apresentados os resultados e discussões;
- No capítulo 5 é apresentada a conclusão do trabalho e os trabalhos futuros.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste Capítulo é apresentada a fundamentação teórica e a revisão bibliográfica dos temas pertinentes ao desenvolvimento do trabalho, como: ferramentas e aplicações da RV, Metodologias de Ensino e de Avaliação, Laboratórios físicos e virtuais para o Ensino de Engenharia e Subestação de Energia Elétrica (SEE).

### 2.1 Realidade Virtual

O conceito de Realidade Virtual proposto em Tori *et al.* (2006) está relacionado com uma tecnologia avançada de interface, cuja finalidade é conectar o usuário às aplicações computacionais de forma imersiva. Dos principais atributos apresentados pelos autores, destacam-se a livre movimentação em ambientes tridimensionais em tempo real e a interação com os componentes presentes na aplicação. Em Sherman and Craig (2003) os autores detalham o conceito de RV, afirmando que o virtual se relaciona ao ser em essência, mas não de fato, e o real se refere ao estado que o ambiente se encontra. Nesse sentido, Jerald (2015) contribui à definição do conceito de RV acrescentando que, independentemente das ideias que lhe dizem respeito, ambientes podem existir em uma realidade imersa em um computador.

Nesse sentido, a RV pode ser utilizada de forma imersiva, com equipamentos tecnológicos que propiciam a imersão como óculos de RV, ou não imersivas, ao se utilizar de telas de computadores ou projetores (Machado *et al.*, 2022). Além disso, existem equipamentos que podem ser utilizados para melhorar a imersão em ambientes não imersivos por fornecerem uma experiência com movimentação, como os periféricos teclado e mouse (Jaguaribe, 2022).

Referente às aplicações imersivas, um dos principais componentes que propiciam o aumento de imersão por parte do usuário no meio da Realidade Aumentada são os *Head-Mounted Display* (HMD) (Agbo *et al.*, 2021), os quais podem ser utilizados em computadores, em videogames e em celulares com adaptações que permitem a utilização de realidade aumentada (Laine, 2018; Lampropoulos *et al.*, 2022). Todavia, as aplicações não imersivas também são muito utilizadas por conta do seu menor custo agregado e por existirem componentes que as aproximam da imersão, como mouse<sup>1</sup> e fones de ouvido<sup>2</sup> (Lanzo *et al.*, 2020).

<sup>1</sup> Mouse: Responsável por inserir um recurso que melhora a imersão do usuário, pois permite que seja possível modificar sua direção por meio de rotações em torno do próprio eixo.

<sup>2</sup> Fone de ouvido: Responsável por inserir um recurso sonoro que melhora a imersão do usuário, pois permite que seja possível escutar a movimentação de personagens no ambiente conforme a distância entre componentes da aplicação.

Nos últimos anos a Realidade Virtual tornou-se uma tecnologia promissora para o ensino nas diversas áreas do conhecimento em função dos seguintes fatores:

- Capacidade de reproduzir plantas reais em realidade virtual para uso como laboratório multidisciplinar de baixo custo nos cursos de engenharia (Abichandani *et al.*, 2019; Barata *et al.*, 2015);
- Crescente uso de simulações de sistemas de energia em RV (Farooq; Wu, 2022);
- Amplo uso como ferramenta de auxílio no processo pedagógico, tanto para as ambientes com foco educacional quanto para treinamento (Proença *et al.*, 2018);
- Comprovações de que o uso de Realidade Virtual não só promove um aumento de conhecimento, como também ajuda os estudantes a retê-lo de forma mais proveitosa (Kamińska *et al.*, 2017);
- Permite o desenvolvimento de um sistema imersivo, personalizável, intuitivo e prático (Kamińska *et al.*, 2021).

### 2.1.1 Plataformas para modelagem e desenvolvimento

Ao longo dos anos, diversos softwares têm sido utilizados para modelagem e desenvolvimento de ambientes em Realidade Virtual (Proença *et al.*, 2017). Modelagem é o processo de criação dos objetivos e o desenvolvimento do ambiente refere-se ao uso de motores gráficos<sup>3</sup> para simular a física em um ambiente em RV. Dentre os softwares para modelagem 3D, destacam-se o Blender<sup>4</sup>, o Autodesk Maya<sup>5</sup>, o Solid Works<sup>6</sup> e o Free CAD<sup>7</sup>.

Já para o desenvolvimento de ambientes em realidade virtual, são utilizados três *softwares* majoritariamente, sendo dois deles motores gráficos cuja função é recriar a física em um mundo virtual (Messaoudi *et al.*, 2015), como Unity<sup>8</sup> e Unreal<sup>8</sup>, e um terceiro *software* sendo próprio para modelagem na qual reproduz o processo criado para gerenciar informações em um projeto de construção em todo seu ciclo de vida, sendo ele o Autodesk Revit<sup>9</sup>.

<sup>3</sup> Motor Gráfico: Grupo de funções disponibilizadas que facilitam o desenvolvimento do jogo, impedindo que tudo tenha que ser criado do zero, o que ajuda os artistas no processo de criação e garante que todas as áreas de um jogo funcionem adequadamente.

<sup>4</sup> Blender: É um programa de computador de código aberto, desenvolvido pela Blender Foundation, para modelagem e escultura digital, mapeamento de textura e mapeamento UV.

<sup>5</sup> Autodesk Maya: É um programa de modelagem 3D, animação e efeitos especiais desenvolvido pela Alias utilizado na indústria de cinema e de televisão.

<sup>6</sup> SolidWorks: É um software de modelagem de componentes em 3D.

<sup>7</sup> FreeCAD: É um modelador CAD paramétrico em 3D, multiplataforma, livre e de código aberto.

<sup>8</sup> Softwares que centralizam muitas funções necessárias para o desenvolvimento de jogos e é programado em C# ou C++.

<sup>9</sup> Revit: É um software BIM para arquitetura, urbanismo, engenharia e design.

Dentre os softwares citados na área de modelagem 3D, a utilização é bem diversificada e não há um destaque claro do melhor software a ser utilizado, ficando o critério de escolha para o desenvolvedor. Já referente ao motor gráfico, há uma clara preferência dos pesquisadores pela plataforma Unity por ser um software gratuito, intuitivo e com uma comunidade on-line bem ativa.

## **2.2 Metodologias de Ensino e de Avaliação**

### **2.2.1 Ensino**

O processo de ensino-aprendizagem está relacionado aos métodos de ensino utilizados por profissionais da área de educação. Nesse sentido, a crescente demanda pela excelência da qualidade do ensino superior tem fomentado, dentre outros fatores, as discussões sobre o desenvolvimento de novas metodologias de ensino que contribuam para o processo de ensino-aprendizagem (Godoi; Ferreira, 2017; Krüger *et al.*, 2013). Por conta disso, muitos trabalhos científicos estão propondo o uso de metodologias tradicionais em conjunto com metodologias ativas (Carvalho, 2021; Hartwig *et al.*, 2019), cujas definições são apresentadas a seguir.

#### **2.2.1.1 Metodologia Tradicional**

A metodologia de ensino tradicional é nomeada desta forma por ser utilizada desde o início dos processos educacionais. O professor exerce o protagonismo do processo de ensino-aprendizagem, sendo um elemento ativo responsável pela transmissão do conhecimento, enquanto o discente exerce a função de receptor do conhecimento, com pouca autonomia no processo (Krüger *et al.*, 2013).

A metodologia tradicional de ensino possui a vantagem do professor, por ser o centro do aprendizado, ditar o ritmo da aula e se preparar para esclarecer dúvidas e questionamentos. Todavia, esta metodologia possui a desvantagem em momentos dedicados à introdução de conceitos complexos, como o funcionamento de máquinas elétricas. Dessa forma, torna-se mais complicado para o aluno pensar na aplicabilidade da teoria exposta pelo docente. É importante, ainda, destacar que a metodologia tradicional é amplamente utilizada atualmente devida sua eficiência (Krüger *et al.*, 2013).

### 2.2.1.2 Metodologias Ativas

As metodologias ativas visam o desenvolvimento da autonomia do discente no processo de ensino aprendizagem por meio do rompimento do modelo tradicional ao colocar o aluno como centro do processo de ensino-aprendizagem. Dentre os meios para tal desenvolvimento, destacam-se o trabalho em equipe, integração entre teoria e prática, o favorecimento de uma avaliação formativa e o desenvolvimento de uma visão crítica da realidade (Paiva *et al.*, 2016).

Além disso, metodologias ativas se destacam pelo fato de promoverem o desenvolvimento da motivação intrínseca do discente, fazendo com que os conhecimentos adquiridos sejam mais proveitosos (Masson *et al.*, 2012). Dentre as metodologias ativas, cinco delas destacam-se no ensino de Engenharia:

- **Sala de aula invertida** - Metodologia na qual é abordado o conteúdo da aula previamente on-line por meio de videoaulas e, depois, aprofundado presencialmente com o auxílio do professor. Além de ser uma metodologia que promove um aprendizado mais focado, respeita o ritmo do aluno e lhe ensina sobre gerenciamento de tempo e de recursos (Martins *et al.*, 2021);
- **Ensino híbrido** - Popularizado após a pandemia do Covid-19, esta metodologia consiste em respeitar o ritmo de aprendizado do aluno por meio da utilização de videoaulas e reuniões periódicas de forma síncrona entre aluno e professor, a fim de esclarecer eventuais dúvidas (Arruda; Siqueira, 2021);
- **Gamificação** - Permite o uso de diversos elementos e técnicas utilizados em jogos com o intuito de promover um cenário desafiador para o aprendizado do discente. Conforme explicado em Sales *et al.* (2017), a gamificação ganhou muita notoriedade a partir do ano de 2010 e tem sido amplamente utilizada em diferentes âmbitos do meio educacional;
- **Aprendizagem baseada em projeto** - Baseia-se em criar desafios para que os discentes possam desenvolver produtos em prol de um objetivo específico no processo de ensino-aprendizagem para que o aluno possa promover habilidades como trabalho em equipe e gerenciamento de tempo (Masson *et al.*, 2012);
- **Aprendizagem baseada em times** - Baseada no construtivismo <sup>10</sup> e na resolução de problemas em grupo. O modelo constitui-se em uma estratégia instrucional que estimula o discente a desenvolver e processar discussões em equipe (CARNEIRO *et al.*, 2018).

---

<sup>10</sup> Construtivismo: O Construtivismo afirma que o conhecimento é resultado da construção pessoal do aluno; o professor é um importante mediador do processo ensino-aprendizagem.

### 2.2.2 Procedimentos para Avaliação

Esta subseção visa condensar os procedimentos para avaliação de maior destaque dentre os evidenciados na subseção 2.3, na qual é ilustrado o estado da arte dos laboratórios e simuladores no ensino de Engenharia Elétrica.

Dentre os modelos quantitativos<sup>11</sup> para aferição de desempenho discente, destacam-se dois. O primeiro deles utiliza pré-teste e pós-teste para determinar o impacto da ferramenta utilizada ao comparar notas entre experiências distintas, como descrito em Ortiz-Rojas *et al.* (2019), Júnior *et al.* (2020). O segundo compara as notas de avaliações programáticas antes e depois do uso da ferramenta, como é retratado em Magnus *et al.* (2020), Shahnia *et al.* (2016).

Nesse tocante, ainda referente aos dados quantitativos, destaca-se a utilização de protocolos que conseguem traduzir insumos qualitativos<sup>12</sup> em quantitativos. Dentre eles, dois merecem ser mencionados. O primeiro deles é o já citado UES descrito em Wiebe *et al.* (2014). No artigo em questão é descrito um protocolo que traduz o engajamento<sup>13</sup> dos usuários em indicadores. O segundo deles é o *System Usability Scale* (SUS) descrito em Brooke (2013). Neste artigo é especificado um protocolo que mede a usabilidade<sup>14</sup> da ferramenta.

Apesar de os dados apresentados pelo UES serem importantes para a medição de engajamento, o protocolo possui 31 perguntas, tornando-se inviável para aplicação em algumas turmas. Por conta disso, em O'Brien *et al.* (2018) foi desenvolvida uma versão simplificada composta por 12 perguntas capazes de medir quatro indicadores diferentes, por meio da escala Likert, com notas de um a cinco, com valores que variam, respectivamente, do discordo totalmente até o concordo totalmente, tornando-o genérico suficiente para ser usado em diversas aplicações. Dessa forma, o questionário UES usado neste trabalho adota a terminologia 'discente' em substituição do termo usuário. Portanto, os indicadores em questão são:

- **Focused Attention - Atenção Focada (FA)** - Quanto o discente se mostrou atento e imerso durante a aplicação. Quanto maior este indicador, melhor é o resultado;

1. FA-S.1: a experiência conseguiu prender minha atenção de forma intensa.

<sup>11</sup> Insumos Quantitativos: O dado quantitativo é aquele que pode ser mensurado, ou seja, ele permite uma análise em que é possível medir a quantidade de algo.

<sup>12</sup> Insumos qualitativos: Um dado qualitativo é aquele que se refere à qualificação ou a qualidade de determinada coisa ou situação. Na prática, é uma informação que representa uma característica em que é possível compreender melhor quando é expressa por meio de palavras, em vez de números.

<sup>13</sup> Engajamento: Insumo qualitativo que diz respeito ao envolvimento e entusiasmo dos usuários para com o uso de alguma ferramenta.

<sup>14</sup> Usabilidade: Insumo qualitativo que significa aquilo que promove o uso mais fácil das coisas sejam ferramentas ou produtos.

2. FA-S.2: fiquei tão envolvido na experiência que perdi a noção do tempo (a aula costumou passar mais rápido do que é de costume).
  3. FA-S.3: fiquei tão imerso na aula que esqueci das coisas ao meu redor durante a aplicação da experiência.
- ***Perceived Usability - Usabilidade Percebida (PU)*** - Efeito negativo oriundo do esforço despendido para usar a aplicação. Quanto menor este indicador, melhor é o resultado;
    1. PU-S.1: fiquei frustrado durante a aplicação da experiência.
    2. PU-S.2: achei a aplicação virtual confusa de usar.
    3. PU-S.3: foi muito cansativa a experiência de utilizar a aplicação virtual.
  - ***Aesthetic appeal - Apelo Estético (AE)*** - Quanto a aplicação se mostrou atrativa esteticamente para o discente. Quanto maior este indicador, melhor é o resultado;
    1. AE-S.1: a aplicação virtual se mostrou esteticamente agradável.
    2. AE-S.2: gostei dos elementos gráficos recriados pela aplicação virtual.
    3. AE-S.3: a aplicação atraiu minha atenção pelo visual.
  - ***Reward factor - Fator de Recompensa (RW)*** - Quanto a experiência foi recompensadora para o usuário. Quanto maior este indicador, melhor é o resultado.
    1. RW-S.1: valeu a pena o investimento de energia para criar a aplicação virtual (usuário julgou que valeu a pena criar a ferramenta e continuar investindo nela para melhorar o aprendizado dos alunos).
    2. RW-S.2: minha experiência foi gratificante.
    3. RW-S.3: a utilização da aplicação virtual despertou minha curiosidade.

É importante salientar que os textos acima, retirados do protocolo UES, são uma adequação dos questionamentos originais, haja vista que as perguntas foram escritas na língua inglesa e traduzidas para o português para uso neste trabalho pelo autor. Por fim, um ponto comum dentre os artigos apresentados na subseção 2.3 é a coleta de opiniões para compreender, de forma mais lúdica e não baseada em experiências, pontos fortes, fracos e oportunidades de melhoria do sistema desenvolvido ou da metodologia utilizada. Como o protocolo SUS é uma ferramenta que mede a usabilidade da ferramenta, o mesmo não foi usado no experimento descrito nesta dissertação pelo modo que as aulas foram planejadas e executadas.

## **2.3 Estado da arte de laboratórios e de simuladores no ensino de Engenharia Elétrica**

Nas últimas décadas, o setor elétrico tem passado por grandes transformações estruturais e tecnológicas (Namboodiri *et al.*, 2013; Gaspar *et al.*, 2023) que convergem para a necessidade de profissionais com formação multidisciplinar e experiências práticas (Strasser *et al.*, 2014; Laayati *et al.*, 2022).

Esses fatores, adicionados à evasão dos estudantes de graduação (Kabashi *et al.*, 2022; Silveira *et al.*, 2019) e ao advento da COVID-19 (Mohamed *et al.*, 2021), tem contribuído para modernização dos currículos dos cursos de engenharia (Mohan *et al.*, 2014), para a integração entre academia e indústria (Parvania; Merrill, 2018; Kamińska *et al.*, 2017), para a adoção de novas metodologias de ensino-aprendizagem (Barata *et al.*, 2015; Farooq; Wu, 2022), para a aplicação de novas metodologias de avaliação (Cohen *et al.*, 2016; Kamińska *et al.*, 2021) e para o desenvolvimento de diversos modelos de laboratórios, tais como os baseados em RV (Barata *et al.*, 2015; Kamińska *et al.*, 2021). Dentro deste contexto, o uso de RV tem sido crescente principalmente para ensino de sistemas críticos, como por exemplo subestação de energia elétrica (Proenca *et al.*, 2017).

### **2.3.1 Laboratórios físicos e de simulação computacional em Engenharia Elétrica**

É importante destacar que a formação de um engenheiro apto a trabalhar no sistema elétrico de potência requer o desenvolvimento de diversas competências, dentre as quais se destaca o domínio de simulações computacionais (Kotsampopoulos *et al.*, 2017). Dessa forma, a seguir são apresentados diversos trabalhos que utilizam de laboratórios físicos ou simulações computacionais para melhorar o processo de ensino-aprendizagem na Engenharia Elétrica.

Nesse tocante, devido à dificuldade de se obter informações do sistema elétrico real, em Birchfield *et al.* (2019) os autores apresentam o desenvolvimento e a aplicação de um laboratório de simulação computacional de redes sintéticas para simulação de ferramentas de análise de sistemas elétricos na Universidade A&M do Texas, nos Estados Unidos, usado para ensino de fluxo de potência, de análise de contingência e de despacho econômico. Apesar da exiguidade de comprovações quantitativas do impacto positivo no processo de ensino-aprendizagem, referente ao desempenho acadêmico e ao engajamento discente, os autores apresentam resultados qualitativos, como boas opiniões, que demonstraram a evolução e o desenvolvimento do aprendizado dos alunos a partir do uso da ferramenta em seus períodos finais de graduação.



Em Saha (2022), é apresentado o desenvolvimento de um laboratório de proteção baseado em software e hardware implementado em um *Real Time Digital Simulator* (RTDS)<sup>15</sup> para ensino de graduação em Engenharia Elétrica. Um estudo foi feito na Universidade de KwaZulu-Natal em Durban, África do Sul. Para validar o uso da ferramenta nas práticas de proteção, o autor utilizou apenas um modelo de avaliação da ferramenta que consistia na coleta de opinião por meio de dez perguntas sobre a experiência do discente a serem respondidas utilizando a escala Likert (Jebb *et al.*, 2021).

Em (Li *et al.*, 2021), é detalhado o desenvolvimento de um kit de ferramentas para o ensino de Redes de Transmissão Inteligentes. A aplicação, desenvolvida em C++, possui um ambiente de simulação de fluxo de potência e outro para simulação dinâmica eletromecânica de diversos componentes. Apesar da ausência de validação, os autores disponibilizaram a ferramenta de ensino em um Github para uso gratuito de qualquer computador, sendo o software compatível com Windows e GNU/Linux com a finalidade de facilitar sua utilização em diversos âmbitos acadêmicos.

Já em Mohamed *et al.* (2021), é abordada a temática acerca do impacto global da pandemia COVID-19 no ensino superior, com destaque para as consequências nos cursos de Engenharia Elétrica devido à falta de contato direto entre os alunos e o docente em disciplinas práticas durante o *lockdown*. Nesse artigo os autores apresentam um laboratório de simulação computacional que faz parte de um projeto instrucional de *e-learning*<sup>16</sup> para cursos on-line na área de energias. Neste laboratório de simulação computacional, os alunos utilizam conceituados softwares de simulação, como PowerWorld<sup>17</sup> e MATLAB<sup>18</sup>, nas aulas práticas dos cursos de engenharia. Neste trabalho, os autores afirmam que a ferramenta teve boa aceitação e contribuiu para o melhor aprendizado dos alunos. No entanto, não aplicaram metodologia de avaliação para validação do laboratório computacional.

Ao se utilizar do aprendizado baseado em projetos híbridos, o trabalho apresentado em Magnus *et al.* (2020) utiliza, na disciplina de máquinas elétricas, uma abordagem institucional distinta nas aulas práticas em laboratórios físicos e computacionais. No artigo em questão, os

---

<sup>15</sup> Simulador Digital em Tempo Real, com a sigla em inglês RTDS, é um sistema citado pelo comitê IEEE para simuladores em tempo real aplicado a sistemas de energia. RTDS são capazes de simular forma de onda e transitórios eletromagnéticos.

<sup>16</sup> O e-learning ou ensino eletrônico corresponde a um modelo de ensino não presencial apoiado em Tecnologia de Informação e Comunicação.

<sup>17</sup> PowerWorld: É um simulador que permite visualizar sistemas elétricos, bem como simulá-los, além de que é uma ferramenta de análises de fluxo de potência e de faltas.

<sup>18</sup> MATLAB: É um software de computação numérica de análise e visualização de dados.

autores concluem que o modelo tradicional de ensino, por meio de aulas expositivas e tarefas de simulação, não são suficientes para aprendizagem efetiva dos alunos, pois há uma explícita dificuldade de aplicação dos conceitos aprendidos em situações reais. Nesse contexto, os autores comprovam o impacto positivo do seu experimento por meio da avaliação baseada em grupo controle e grupo experimental<sup>19</sup>, no aprendizado e nas notas dos alunos em diversos quesitos, tais como a melhora no senso crítico discente e nas habilidades de resolução de problemas.

Com a perspectiva de crescimento contínuo da utilização das redes elétricas inteligentes, a demanda por engenheiros especializados nesse setor demonstra crescimento constante (Laayati *et al.*, 2022). Para tanto, os cursos de formação em Engenharia Elétrica buscam instruir, cada vez mais, profissionais capazes de suprir essa demanda mercadológica (Heydt *et al.*, 2009). Nesse tocante, Strasser *et al.* (2014) e Celeita *et al.* (2016) implementaram ambientes de simulação computacional para o desenvolvimento educacional nessa importante área de estudo do sistema elétrico de potência, ambos com validações pedagógicas qualitativas, por meio de *feedbacks* ou pela resposta de questionário considerando a escala Likert. Em suma, os resultados mostraram que os alunos gostaram da experiência com simuladores para o conteúdo, ao invés de serem realizados apenas cálculos de forma manual.

Outra ferramenta de simulação computacional para o sistema elétrico de potência é o *Power hardware-in-the-loop* (PHIL)<sup>20</sup> (Lauss *et al.*, 2015). Em Kotsampopoulos *et al.* (2017) os autores apresentam o desenvolvimento de um laboratório educacional utilizando de PHIL para melhorar o processo de ensino-aprendizagem na área de Geração Distribuída (GD). Para comprovar a eficácia da ferramenta no ensino de GD, os autores obtiveram opiniões dos estudantes por meio de uma pesquisa com questionário ,utilizando a escala Likert, com a finalidade de mensurar o grau de interesse dos discentes sobre o assunto proposto. Os resultados obtidos demonstraram o grau de satisfação e a motivação dos alunos no processo de ensino-aprendizagem com uso da ferramenta.

Deve-se notar que a melhora do processo de ensino-aprendizagem não passa apenas pela implementação de simulações computacionais, mas também pela criação de novas práticas laboratoriais, sejam físicas ou virtuais (Chowdhury *et al.*, 2019). Na área de proteção do sistema elétrico de potência, em Shahnian *et al.* (2016), os autores ilustram a revisão e o desenvolvimento de diversas práticas de laboratório que visam demonstrar o desempenho e a coordenação de

<sup>19</sup> Metodologia utilizada para comparar a experiência entre duas turmas. O Grupo Controle deve viver a experiência "tradicional" e o Grupo Experimental deve presenciar as modificações propostas na experiência.

<sup>20</sup> Power-Hardware-In-the-Loop (PHIL) consiste em um sistema retroalimentado que comunica o computador de bordo do produto com sua versão virtual ou gêmeo digital em um sistema elétrico de potência.

relés de proteção do ponto de vista estacionário e dinâmico. Já no setor de sistemas elétricos de potência inteligentes, Deese (2015) exhibe o desenvolvimento de um laboratório que emula, de forma física, o funcionamento mútuo de diversos componentes do sistema elétrico, tais como geradores, transformadores e contadoras. Em ambos os artigos, foi comprovada a eficácia das novas ferramentas de ensino ao se comparar o interesse discente em turmas diferentes de anos próximos, por meio da opinião dos alunos.

No contexto de inovação para o ensino de engenharia, destaca-se a utilização da gamificação (Ortiz-Rojas *et al.*, 2019). Diante disso, o *software* Griddle foi desenvolvido para introduzir, aos alunos e interessados em sistemas elétricos, uma rede elétrica fictícia na qual o usuário pode criar o projeto da rede, bem como operar o sistema elétrico de cidades. No software são ensinados, por meio de dicas e tutoriais, conceitos importantes sobre a rede elétrica, tais como demanda, abastecimento de energia e custos operacionais. Com o intento de validar o experimento em seu público alvo, alunos de ensino médio, foram aplicadas avaliações baseadas na metodologia de pré-teste e pós-teste e realizada a análise de performance do usuário com base na *The Next Generation Science Standards (NGSS)*<sup>21</sup> para *High School (HS)* (Cohen *et al.*, 2016).

O ensino por meio de ambientes virtuais teve seu aumento de popularidade nos últimos anos com o barateamento de ferramentas destinadas ao seu uso (Soliman *et al.*, 2021) e pode ser exercido por meio de RV (Turan; Karabey, 2023), seja de forma imersiva<sup>22</sup> ou não imersiva (Lanzo *et al.*, 2020). Nesse sentido, a Realidade Virtual tem-se mostrado uma ferramenta eficaz para ensino nos diversos cursos de engenharia, dentre os quais, pode-se destacar a Engenharia Elétrica.

### **2.3.2 Estado da arte do uso de RV no ensino de Engenharia Elétrica**

Existem diversas implementações de Realidade Virtual no ensino de Engenharia Elétrica em vários escopos desse curso, como subestações, motores, painéis de automação, distribuição de energia e plantas de energias renováveis (Proenca *et al.*, 2017).

<sup>21</sup> NGSS: São normas de conteúdo científico do ensino básico e secundário. As normas estabelecem as expectativas sobre o que os alunos devem saber e ser capazes de fazer. Os NGSS foram desenvolvidos pelos estados para melhorar o ensino de ciências para todos os alunos.

<sup>22</sup> Realidade imersiva: É uma tecnologia na qual é criado um ambiente virtual que os sentidos humanos são simulados, de modo que a interação entre o usuário e esse ambiente se aproxima de uma atividade no mundo “real”.

### 2.3.2.1 Realidade Virtual aplicada ao ensino de diversas áreas da Engenharia Elétrica

Na plataforma não imersiva desenvolvida em Barata *et al.* (2015) para o ensino de transformadores em cursos da área de sistemas elétricos de potência na Universidade Federal do Pará, Brasil, é demonstrado que ambientes mais interativos e imersivos em RV contribuem para a melhora do processo de aprendizado dos alunos ao detalhar, em perspectiva, objetos que normalmente são apresentados por meio de fotos ou desenhos. No trabalho em destaque, os autores validam o ambiente virtual de ensino por meio de aulas práticas na disciplina de conversão eletromecânica. Além disso, apresentam os resultados da avaliação do uso da ferramenta, obtidos de duas formas distintas. A primeira delas, qualitativa, dá-se por um questionário acerca da experiência dos discentes juntamente com a opinião por escrito. Já a quantitativa baseia-se na comparação de duas turmas de anos diferentes, uma com a experiência de Realidade Virtual e a outra de uma turma utilizando a metodologia expositiva por meio de *slides*.

Referente ao uso de ferramentas em RV aplicado ao ensino de distribuição de energia elétrica, em Araujo *et al.* (2016), os autores desenvolveram uma plataforma não imersiva focada em treinamento de operações de chaves de manobra, seguindo as normas de segurança e de operação de uma concessionária de energia. Para criar o *software* em questão, o autor cita que foram estipulados procedimentos roteirizados a fim de simular situações reais e avaliar o desempenho do participante. Vale salientar que o trabalho enfatiza que a plataforma está em fase de testes e que, portanto, não existem resultados de validação dos usuários ou índices que afirmem alguma melhora de desempenho discente. Os autores destacam que o uso de RV foi muito impactante para a melhora no processo de ensino-aprendizagem.

No campo das máquinas, em Kamińska *et al.* (2017), os autores apresentam o desenvolvimento de um simulador imersivo de treinamento interativo para o ensino de engenharia elétrica e mecânica, o qual permite a manipulação, de forma virtual, de um componente 3D condizente com o objeto de estudo de seu curso relativo ao ambiente industrial. Posteriormente, os mesmos autores publicaram a evolução de seu trabalho em Kamińska *et al.* (2021), no qual eles diversificam o campo de utilização da ferramenta em diversos cenários práticos em um galpão industrial. Em ambos os artigos, os autores evidenciam que o uso de RV pode contribuir para melhorar a qualidade do ensino superior e sustenta sua tese, principalmente em Kamińska *et al.* (2021), por meio da utilização do protocolo SUS (Brooke, 2013). Os resultados da experiência demonstram que o uso de RV, de forma adequada, pode melhorar a compreensão dos discentes no que se refere ao funcionamento de máquinas elétricas.

Ainda referente ao setor industrial, em Hamurcu *et al.* (2020), é apresentada uma revisão sistemática com o foco em tecnologia computacional no design educacional para o ambiente industrial. O trabalho destaca que o interesse em realidade virtual, do ponto de vista educacional, vem aumentando com o decorrer dos anos e essa tecnologia tem se mostrado muito eficiente no que tange ao projeto, à prototipagem, à modelagem e à visualização de componentes.

Já o uso da RV em energias renováveis tem se destacado nos últimos anos, dada a sua possibilidade de clara visualização e modelagem de redes e equipamentos (Rozmi *et al.*, 2019). Nesse sentido, a utilização de ferramentas em RV são usadas não somente para fins de treinamento, mas também para fins educacionais. Em Crisóstomo *et al.* (2018), os autores apresentam o desenvolvimento de uma ferramenta em simulação 3D não imersiva com recursos interativos para ensino de energia eólica. Apesar da ausência de validação do impacto no processo de ensino-aprendizagem do uso dessa aplicação, o software conta com diversas simulações de análise de sistema de potência que contribuem para o aprendizado dos alunos.

E mantendo-se no tema de energias renováveis, em Abichandani *et al.* (2019), os autores apresentam o desenvolvimento e a utilização de um sistema fotovoltaico em RV não imersiva, baseado em nuvem e com acesso remoto, para ensino de conceitos fundamentais de células fotovoltaicas, módulos solares e instalações. Neste artigo os autores apresentam também os resultados do uso da ferramenta por meio de gráficos que demonstram um aumento expressivo de engajamento discente com o conteúdo, bem como a melhora no entendimento dos conceitos apresentados.

Vale salientar, ainda, que a aplicação de realidade virtual também abrange disciplinas teórico-práticas, tais como circuitos elétricos (Garcia-Zubia *et al.*, 2016) e eletrônicos (Callaghan *et al.*, 2017). Em ambos os trabalhos o objetivo é similar, o de realizar práticas por meio da criação de ambientes industriais em RV que possam utilizar dos conceitos trabalhados nas disciplinas de laboratório.

#### 2.3.2.2 *Realidade Virtual aplicada ao ensino e ao treinamento em subestações*

Um dos primeiros ambientes em RV, utilizando métodos de computação gráfica, aplicado ao treinamento no setor elétrico, foi apresentado em Arroyo and Arcos (1999). Desde então, o processo de criação de um ambiente em RV evoluiu muito em função dos avanços tecnológicos e do surgimento de novos softwares de desenvolvimento (Memik; Nikolic, 2021).

Um exemplo de subestações em RV é o da plataforma apresentada em Memik

and Nikolic (2021). Os desenvolvedores criaram um software imersivo, utilizando HMD, que permite ao usuário visitar o ambiente de uma subestação e visualizar o comportamento de alguns componentes, como disjuntores ou seccionadoras. Já em Bernal *et al.* (2022), também é apresentado um ambiente de subestação desenvolvido em RV que permite, ao discente, uma visita imersiva por meio de HMD. Todavia, a inovação apresentada no artigo, em comparação com o citado anteriormente, é referente tanto à plataforma ser mais interativa, trazendo o manuseio de Equipamentos de Proteção Individual (EPI), quanto a um novo modelo de validação discente, por meio do protocolo SUS. Foi inovador por ser o primeiro, da pesquisa sistemática realizada, a fazer um procedimento com tamanha robustez na temática de subestações.

No Brasil, existem diversos pesquisadores investindo na pesquisa e desenvolvimento de ambientes de subestação em RV aplicados, prioritariamente, para treinamento técnico de profissionais em empresas. Em Cardoso *et al.* (2013), por exemplo, é apresentado um *software*, desenvolvido em parceria com a empresa concessionária de energia elétrica, aplicado à capacitação profissional de técnicos utilizando HMD. Ainda com a mesma parceria, em Cardoso *et al.* (2016), os autores apresentam uma nova abordagem para treinamento de operadores por meio de virtualização de subestações.

Ainda no Brasil, o *software* AGITO foi desenvolvido com a intenção de melhorar o treinamento de operadores em subestações por meio de RV imersiva (Reis *et al.*, 2015). Nele, os alunos participam de uma experiência que emula, de forma imersiva, a execução dos procedimentos operacionais aplicados nos treinamentos de profissionais em uma subestação, bem como visualizam o ambiente em uma perspectiva isométrica em 3D. Apesar de ambos os trabalhos não utilizarem de protocolos para validar a usabilidade das ferramentas desenvolvidas, os softwares encontram-se em fase avançada de desenvolvimento e utilização no mercado de trabalho.

Por fim, é importante salientar também que pesquisadores brasileiros desenvolveram uma solução baseada em RV para fornecer um ambiente mais natural e intuitivo para controle de centros de operação elétrica (Cyrino *et al.*, 2022). A solução exposta no trabalho em questão visa minimizar os problemas causados pela operação de subestações de energia elétrica devido à falta de informações espaciais e funcionais nas interfaces tradicionais de operação, como visualizar em tempo real se algum equipamento está de fato aberto.

Diante do exposto, o primeiro ponto inovador do presente trabalho é da criação da própria ferramenta. Por conta da inviabilidade de se ter um laboratório de subestação em um

ambiente físico do curso de engenharia elétrica, o LSRV tem se mostrado um recurso muito valioso para melhorar o processo de ensino-aprendizagem na grande área do SEP, pois possui diversos recursos didáticos para ensino de disciplinas de sistemas elétricos de potência.

Para ilustrar o pioneirismo do LSRV enquanto uma plataforma em RV focada no ensino de sistemas elétricos de potência, a Tabela 1 compara outros trabalhos do estado da arte com suas respectivas áreas de atuação.

Tabela 1 – Comparação das plataformas desenvolvidas.

Artigos	Área de estudo	Software de terceiros	Desenvolvido em RV?
Presente Trabalho	Subestações		✓
Memik and Nikolic (2021)	Subestações		✓
Bernal <i>et al.</i> (2022)	Subestações		✓
Barata <i>et al.</i> (2015)	Conversão de Energia		✓
Cohen <i>et al.</i> (2016)	Distribuição		
Birchfield <i>et al.</i> (2019)	Fluxo de Potência	✓	
Araujo <i>et al.</i> (2016)	Manutenção		✓
Kamińska <i>et al.</i> (2021)	Eletromecânica		✓
Crisóstomo <i>et al.</i> (2018)	Energia Eólica		✓
Abichandani <i>et al.</i> (2019)	Energia Solar		✓
Kotsampopoulos <i>et al.</i> (2017)	Redes Elétricas Inteligentes		
Strasser <i>et al.</i> (2014)	Redes Elétricas Inteligentes	✓	

Fonte: Próprio autor.

Além de inovar na criação da ferramenta, este trabalho descreve, também, o processo metodológico de aplicação da ferramenta, tanto no que se refere às estratégias de ensino, quanto no que tange à forma de validação do LSRV para com os discentes. Vale salientar, ainda, que o presente trabalho engloba diversas metodologias de validação no âmbito dos sistemas elétricos de potência com o intuito de atestar o impacto significativo que a construção da ferramenta teve no processo de ensino-aprendizagem.

Na Tabela 2 é apresentada a pesquisa de metodologias de avaliação de laboratórios em RV usadas por diferentes autores e comparadas com as metodologias utilizadas para validação do LSRV proposto neste trabalho.

Baseado na pesquisa, contata-se que o único trabalho que se utiliza de uma metodologia semelhante a desta dissertação é o Kamińska *et al.* (2021). Nele, também é utilizado um protocolo para mensurar insumos qualitativos, mas pela aplicação ter uma metodologia diferente, é utilizado do protocolo SUS e não do protocolo UES. Além disso, não há utilização de grupo focal, o que demonstra mais um diferencial do presente trabalho.

Tabela 2 – Comparação das metodologias de validação.

Artigos	Performance estudantil	Coleta opiniões	Utiliza protocolos	Utiliza grupo focal
Presente trabalho	✓	✓	✓	✓
Memik and Nikolic (2021)	✓	✓		
Bernal <i>et al.</i> (2022)		✓	✓	
Barata <i>et al.</i> (2015)	✓	✓		
Cohen <i>et al.</i> (2016)	✓	✓		
Birchfield <i>et al.</i> (2019)		✓		
Araujo <i>et al.</i> (2016)				
Kamińska <i>et al.</i> (2021)	✓	✓	✓	
Crisóstomo <i>et al.</i> (2018)				
Abichandani <i>et al.</i> (2019)	✓	✓		
Kotsampopoulos <i>et al.</i> (2017)	✓	✓		
Strasser <i>et al.</i> (2014)		✓		

Fonte: Próprio autor.

## 2.4 Subestações de Energia Elétrica (SEE)

Infraestruturas Críticas (IC) são instalações, serviços, bens e sistemas cuja interrupção ou destruição, total ou parcial, provocará sério impacto social, ambiental, econômico, político, internacional ou à segurança do Estado e da sociedade, necessitando de medidas especiais de proteção. Nesse contexto, as redes de energia elétrica são vitais para o funcionamento das demais IC. Dentre as instalações elétricas que estão contempladas pelas IC, as subestações de transmissão e de distribuição destacam-se por serem vitais para o funcionamento das redes de energia elétrica (Gaspar *et al.*, 2023).

Uma SEE, dependendo da sua finalidade, localização, características operacionais e nível de modernização, pode ser classificada em seccionadora, coletora, elevadora, abaixadora, transmissora, distribuidora, abrigada, aérea, subterrânea, automatizada, semi-automatizadas, inteligentes, entre outras (Padilla, 2015; Filho, 2021; Gaspar *et al.*, 2023).

Segundo o ONS (2024), uma SEE pode ser definida como parte de um SEP, lo-



calizada nas extremidades de linha de transmissão e/ou de distribuição, com os respectivos dispositivos de manobra, controle e proteção, podendo incluir transformadores, equipamentos conversores e/ou outros equipamentos, e que abrange estruturas de montagem eletromecânicas e elétricas.

Segundo Commission (2003), as SEE são compostas por um conjunto de elementos, com características modulares e funções específicas, denominados vãos ou *bays*, intimamente ligados e possuem funcionalidades comuns. Os principais vãos que compõem o projeto de uma subestação distribuidora são: vãos de entrada de linha de alta tensão, vão de saída de linha de alta tensão, barramento de alta tensão, vão de transformação, vão de banco de capacitores, vãos de saída de alimentadores (Sampaio, 2002). Na foto da Figura 1 é apresentado o pátio, as estruturas elétricas, eletromecânicas e civis de uma subestação aérea, tipo distribuidora, 69-13,8 kV, composta de vão de entrada de linha de 69 kV, barramento de 69 kV, vão de transformação, vão de banco de capacitores, barramento de 13,8 kV e vãos de saída de alimentadores em 13,8 kV com seus respectivos equipamentos.

Figura 1 – Pátio de uma subestação de distribuição de energia.



Fonte: Concessionária de energia Enel.

#### **2.4.1 Equipamentos de uma subestação**

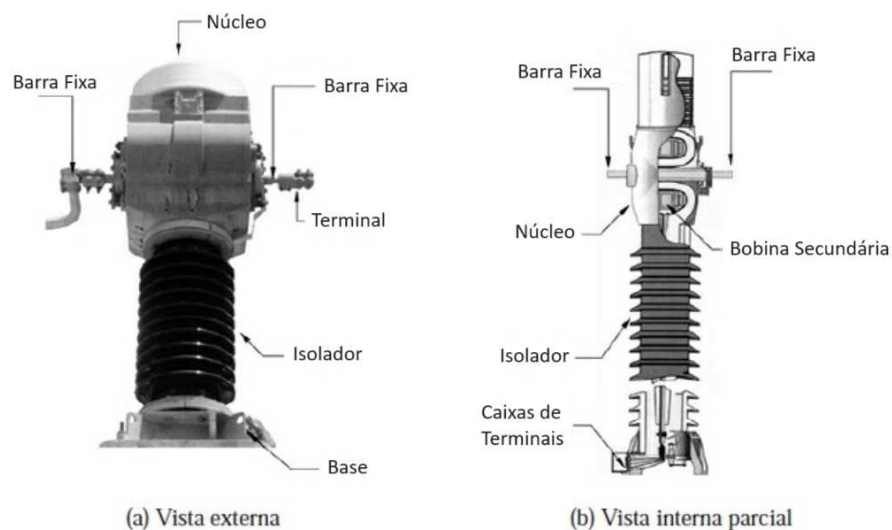
Dentro de uma subestação, cada um dos equipamentos é identificado por um código, o qual contempla características como tipo de equipamento, faixa de tensão e a localização

dentro da subestação. Dentre os diversos equipamentos presentes nas subestações de energia elétrica, alguns deles são imprescindíveis de destaque nesta dissertação, pois parte do trabalho de desenvolvimento do LSRV foi a modelagem desses equipamentos, dos quais destacam-se os transformadores de corrente, transformadores de potencial, chaves seccionadoras, relés de proteção e barramentos (Filho, 2019).

#### 2.4.1.1 Transformadores de Corrente

Os Transformadores de Corrente (TC) são usados para converter a corrente da linha de alta tensão em uma corrente gerenciável mais baixa em valores padronizados de forma isolada do circuito de energia da subestação com base nos princípios da transformação indutiva (Padilla, 2015). Os TC devem ser conectados em série com a rede, com o lado primário conectado na tensão mais alta e o lado secundário em baixa tensão. O modelo escolhido para modelagem na LSRV é o mesmo presente na subestação real e que está ilustrado na Figura 2. Nela, é possível visualizar componentes importantes do equipamento, como a barra fixa, as bobinas, o núcleo e o isolador (Filho, 2019).

Figura 2 – Transformador de Corrente de alta tensão.



Fonte: Filho (2019).

#### 2.4.1.2 Transformadores de Potencial

Na Figura 3 é ilustrado um Transformadores de Potencial (TP) que são equipamentos que possibilitam que instrumentos de medição e de proteção funcionem de forma adequada

sem que seja necessário que eles possuam a tensão de isolamento em conformidade com a rede a qual estão conectados (Filho, 2019). Seu princípio de funcionamento é semelhante aos dos TC, possuindo dois enrolamentos de cobre os quais não são conectados fisicamente, mas de forma magnética. Assim, os enrolamentos conseguem compatibilizar, por meio do fenômeno de conversão eletromagnética, os níveis de tensão, no primário, em valores menores, a serem medidos no secundário (Padilla, 2015).

Figura 3 – Transformador de Potencial.

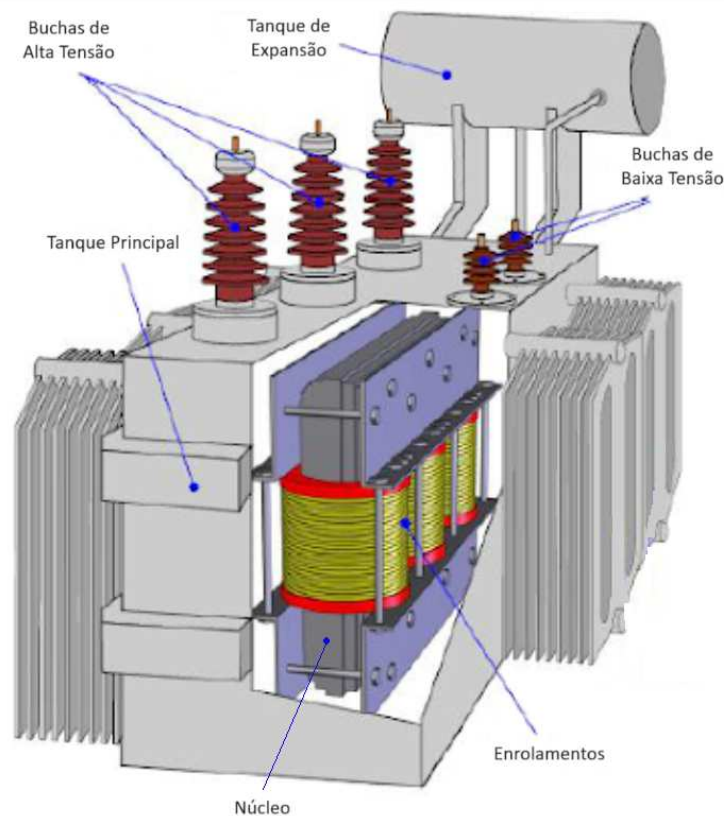


Fonte: Filho (2019).

#### 2.4.1.3 Transformador de Potência

Os transformadores de potência são, comumente, os maiores equipamentos de uma subestação e são compostos por um enrolamento primário, um enrolamento secundário e, em alguns casos, um enrolamento terciário. Conforme ilustrado na Figura 4, além dos enrolamentos que são construídos de fios de cobre ou alumínio e são centrados em um núcleo magnético comum feito de chapas de aço, os transformadores possuem buchas que possibilitam sua conexão com o sistema elétrico, seja em alta, média ou baixa tensão. Além dos componentes citados, os transformadores possuem um tanque principal e um tanque de expansão cuja função é encapsular o óleo dielétrico (Filho, 2019).

Figura 4 – Transformador de Potência.



Fonte: Adaptado de TOSHIBA (2013)

Os transformadores podem atuar em tensões de operação de alta para média (69-13,8 kV), quanto de média para baixa (13,8-0,22 kV) e podem possuir dois sistemas de ventilação distintos, como forçada ou natural. Além disso, é imprescindível destacar que para seu bom desempenho, possuem diversos acessórios acoplados ao transformador (Padilla, 2015), tais como:

- **Relé Buchholz:** qualquer problema interno, como quebra de isolamento, pode causar decomposição de materiais contidos em transformadores de potência, como madeira e óleo. Tal fato pode produzir bolhas de gás que sobem até o topo do tanque do transformador. O Relé Buchholz foi projetado para detectar essas bolhas de gás e ativar interruptores de alarme ou sinais de disparo;
- **Indicador de nível de óleo:** a função deste acessório é detectar qualquer elevação ou queda anormal do nível de óleo do transformador, pois é possível que pode esta ocorrência seja causada por eventos críticos, como vazamento de óleo, falhas ou panes. Um contato de alarme é fornecido para sinalizar condições de baixo nível de óleo;
- **Válvula de alívio de pressão:** dispositivo acionado por mola, projetado para reduzir rapidamente a pressão dentro do tanque para um valor normal. Geralmente atua de forma

conjunta com o Relé de Buchholz e sua principal funcionalidade, interruptor de desarme, é utilizada para fins de sinalização e monitoramento;

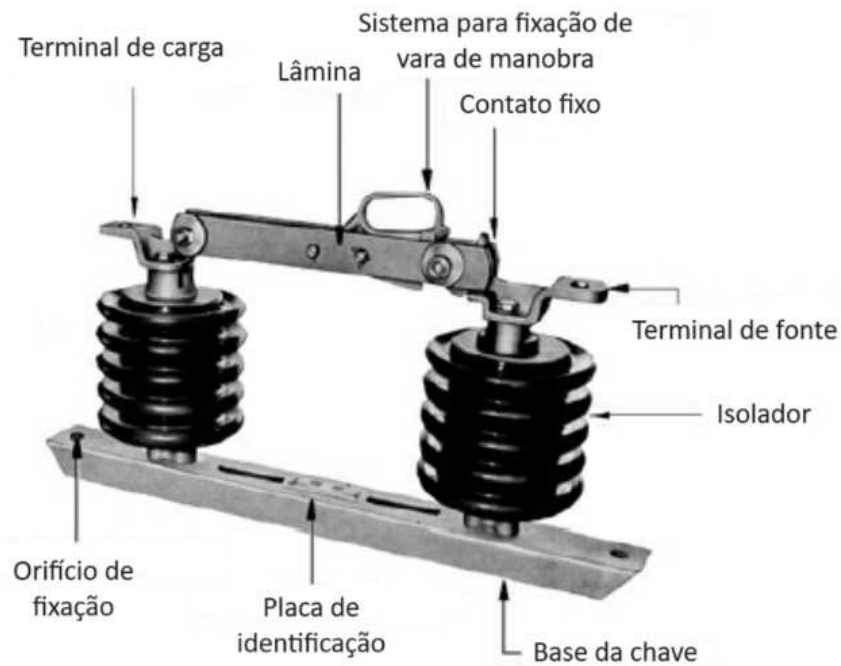
- **Bulbo de resistência:** acessório semelhante a uma sonda bimetálica baseada na variação da resistência como função da temperatura. Normalmente utilizada junto a um circuito elétrico com instrumento de medição para indicar a temperatura do óleo do transformador;
- **Sensor de temperatura do enrolamento:** trata-se de um arranjo combinado para obtenção da temperatura do enrolamento por método indireto. Baseia-se no fato de que a diferença de temperatura entre o enrolamento e o óleo, no tanque do transformador, depende da corrente presente no enrolamento.

#### 2.4.1.4 Chave Seccionadora

A chave seccionadora é um equipamento de acionamento mecânico cuja função é realizar manobras. Na posição aberta, deve assegurar distância de isolamento e na posição fechada, deve manter continuidade da alimentação do sistema elétrico. Ademais, este equipamento deve ser capaz de fechar ou de abrir um circuito quando não ocorrer variação de tensão significativa entre seus terminais. Uma chave seccionadora pode possuir diversas funcionalidades e pode mudar seus aspectos construtivos a depender da sua função principal. Dentre os muitos tipos, eles podem ser classificados como como chave seccionadora sem carga e com carga, monopolar e tripolar, e chave fusível (Filho, 2019).

Nesse sentido, em uma subestação de distribuição, com tensão nominal de 69 kV para 13,8 kV, é necessário uma seccionadora para subestações de potência, classe 72,5 kV, e uma seccionadora de distribuição, classe 15 kV (Padilla, 2015). Portanto, ambas foram modeladas com a configuração monopolar sem carga para serem utilizadas na LSRV. Na Figura 5 são mostrados os detalhes construtivos de uma seccionadora monopolar para redes de distribuição de classe 15 kV, a qual foi utilizada como base para modelar o equipamento utilizado no LSRV na seção 13,8 kV.

Figura 5 – Chave seccionadora monopolar.

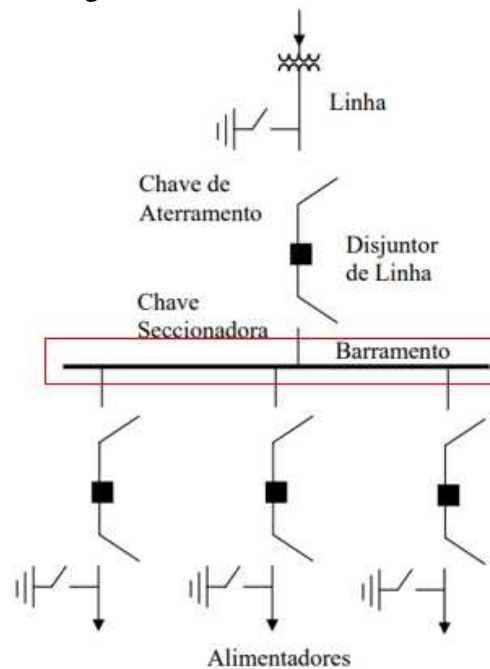


Fonte: Adaptado de Filho (2019)

#### 2.4.1.5 Barramentos de uma subestação

Barramentos podem ser descritos como condutores reforçados, de modo geral sólidos, e, por conta da sua dimensão, possuem impedância pequena o suficiente para ser desprezada. Sua função é de serem centros comuns de coleta e redistribuição de corrente elétrica e podem possuir diversos arranjos, como barramento simples, barramento duplo ou barramento em anel (Filho, 2021; Padilla, 2015). Na Figura 6 é possível visualizar um diagrama unifilar de uma subestação comum com o barramento simples em destaque de vermelho.

Figura 6 – Diagrama unifilar com barramento em destaque.



Fonte: Adaptado de Filho (2021).

#### 2.4.2 Subestação Inteligente

Com a evolução tecnológica e com a evolução dos conceitos propostos pela norma IEC 61850, um novo conceito de subestações surgiu e vem ganhando força, os Sistemas de Automação de Subestações (SAS). Essa nova concepção de projeto moderno de subestação deve considerar altos requisitos de confiabilidade, segurança, reconfigurabilidade, controlabilidade, capacidade de manutenção, flexibilidade, custo e impacto ambiental reduzidos (Huang *et al.*, 2016).

As subestações com sistemas de automação mais modernos, que possuem sua base na IEC 61850 e são popularmente chamadas de subestações digitais, têm sido muito utilizadas para promover infraestrutura para redes elétricas inteligentes em sistemas de transmissão e distribuição. Além de as subestações digitais possuírem melhor desempenho nos requisitos citados, elas também possuem sua construção e manutenção mais rápidas e com baixo custo ao se comparar com subestações mais tradicionais (Huang *et al.*, 2016).

Com o conceito de subestações inteligentes explanado, é imprescindível citar as funções que uma subestação digital deve ser capaz de realizar, tais como (Li *et al.*, 2010):

- Adquirir e compartilhar dados de operação em tempo real;
- Realizar interações entre dispositivos de informação, operação e manutenção;

- Oferecer suporte ao controle em tempo real do sistema de potência e à regulação inteligente.

Nesse sentido, a elaboração de um projeto de subestação envolve a criação de diversos diagramas elétricos, sendo o diagrama unifilar de operação a primeira representação da subestação, onde os equipamentos são identificados por meio de símbolos e códigos operacionais (Filho, 2021). O projeto de uma subestação de distribuição com sistema de automação passa pela norma IEC 61850 e por isso é imprescindível contemplar este documento técnico.

### 2.4.3 IEC 61850

Com o crescimento do uso das redes de comunicação, bem como os benefícios dos SAS, um esforço conjunto da comunidade científica e do meio industrial deu origem ao documento técnico IEC 61850, cujo objetivo principal é o de padronizar a comunicação e contribuir com a automação de subestações e delimitar os protocolos necessários para a construção de um SAS. Dessa forma, em 2003, o relatório técnico em questão foi desenvolvido pelo Comitê Técnico 57 (CT57) do IEC e pelo *Electric Power Research Institute* (EPRI) (Melo, 2015).

Ao utilizar-se de modelos de dados e protocolos, a norma IEC 61850 estabelece padrões de comunicação que permitem que *Intelligent Electronic Devices* (IED) de diferentes fabricantes consigam se comunicar. Ademais, o documento técnico em questão também padroniza os requisitos mínimos de velocidade do sistema de automação, bem como padroniza o modelo no qual os equipamentos de engenharia devem ser utilizados para configurar um IED (Melo, 2015).

#### 2.4.3.1 *Intelligent Electronic Devices*

A proteção de sistemas elétricos é muito importante, pois sistemas de energia estão sujeitos a defeitos, seja de natureza transitória ou permanente, apesar das precauções tomadas durante a elaboração e a execução do projeto de instalações. Nesse sentido, a proteção de um sistema elétrico, seja ele de baixa, média ou alta tensão, deve ser projetada contemplando a utilização de relés (Filho, 2019; Sampaio, 2017).

Em vista disso, conforme ilustrado em Padilla (2015), o termo relé representa uma gama de dispositivos ou equipamentos, com diversas formas de construção e operação. Os relés modelados no ambiente em realidade virtual são os digitais, comumente usados em subestações modernas. Os equipamentos em questão fazem parte do grupo de IED e fornecem a proteção baseada em técnicas de processamento de sinais, recebendo sinais analógicos e convertidos para



digitais, a fim de que a informação seja processada. É importante salientar que por conta da sua natureza digital, é possível, também, diagnosticar melhor as falhas por meio do processamento de dados de falha. Nesse sentido, na Figura 7 mostrado o relé digital utilizado como base para modelagem em RV.

Figura 7 – Relé digital utilizado como base para modelagem.



Fonte: Próprio autor.

Estes IED ficam instalados, predominantemente, nos painéis de controle e proteção situados da Casa de Comando das Subestações. Os principais equipamentos instalados na casa de comando são: Quadro de Serviços Auxiliares de Corrente Alternada (QSACA); Quadro de Serviços Auxiliares de Corrente Contínua (QSACC); Quadros de Medição, Proteção e Controle e Supervisão (QMPCS); Sistema Digital da Subestação; Sistema de comunicação; Retificador e Banco de Baterias

Na Figura 8 são apresentadas as fotos de um Transformador de Serviços Auxiliares (TSA) de uma casa de comando e dos principais equipamentos que devem constar na instalações de uma casa de comando da subestação: retificador, QSACA, QSACC e banco de baterias.

Figura 8 – Componentes de uma Casa de Comando.



Fonte: Concessionária de energia Enel.

#### 2.4.4 Subestação do Campus Professor Prisco Bezerra

##### 2.4.4.1 Descrição da subestação

A subestação 69-13,8 kV, situada no Campus Professor Prisco Bezerra, também conhecido como Campus do Pici, tem a função de distribuir energia elétrica pelo campus de mesmo nome da UFC. Sua construção foi realizada pelo Departamento de Infraestrutura da UFC em 2019, conhecido como UFC-INFRA, com a utilização de recursos da Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP). A subestação foi concebida com dois principais objetivos (Jaguaribe, 2022):

- Suprir a demanda de energia do Campus do Pici da Universidade Federal do Ceará;
- Servir de laboratório de pesquisa para os cursos que possuam relação curricular com a subestação.

Referente ao segundo objetivo, a subestação tem proporcionado muitos insumos para o meio acadêmico, sendo usada como ambiente de visita técnica para os graduandos em Engenharia Elétrica, bem como fonte de pesquisa e desenvolvimento para uma série de trabalhos acadêmicos desenvolvidos pelo Grupo de Redes Elétricas Inteligentes (GREI) do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará (Santos, 2015).

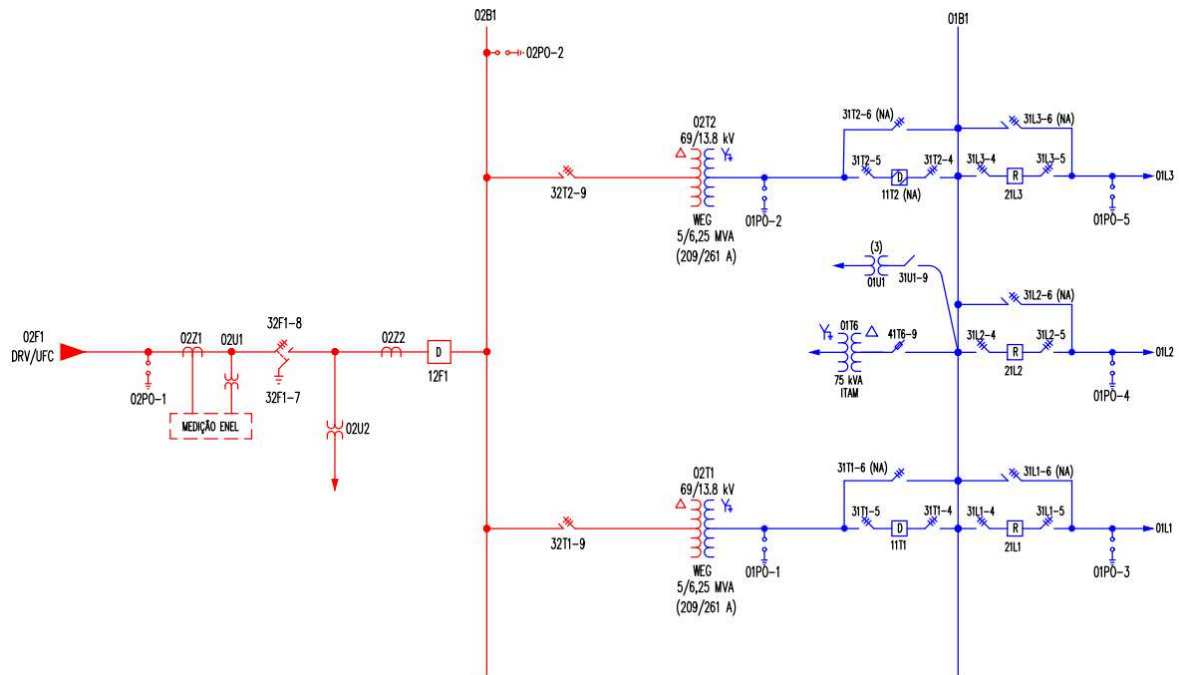
Para sua construção, foram seguidas as proposições da **IEC/TR 61850-1**, assim como foram utilizados diversos equipamentos digitais para a construção de quadros de automação e controle da subestação, **caracterizando-a como um SAS**. É importante salientar que além de existir um sistema supervisor, a subestação ainda possui três diagramas importantes, o

Diagrama Unifilar Operacional, o Diagrama de Proteção e o Diagrama de Conexões em Rede.

#### 2.4.4.2 Diagrama Unifilar Operacional da Subestação Campus do Pici

O Diagrama Unifilar Operacional da Subestação do Campus do Pici está descrito na Figura 9. Nele é possível identificar os equipamentos presentes na subestação, seguidos de seus códigos operacionais os quais estão descritos na Tabela 3. Ainda sobre o diagrama, é possível visualizar em vermelho o ambiente cuja tensão nominal de operação é de 69 kV e que, após passar pelo vão de transformação, muda sua cor para azul, cuja tensão nominal de operação é de 13,8 kV.

Figura 9 – Diagrama Unifilar Operacional da Subestação do Campus do Pici.



Fonte: Adaptado de Jaguaribe (2022).

Tabela 3 – Dados dos principais elementos da subestação.

<b>Código Operacional</b>	<b>Descrição dos elementos</b>	<b>Característica</b>
02F1	Entrada de linha de alta tensão da subestação	Tensão 69 kV
32F1-8	Seccionadora de alta tensão da subestação	Tensão 69 kV
12F1	Disjuntor do vão de entrada de linha da subestação	Tensão 69 kV
02B1	Barramento de 69 kV da subestação	Tensão 69 kV
02T1	Transformador Principal 69 - 13,8 kV	Potência 5,00/6,25 MVA
02T2	Transformador Reserva 69 - 13,8 kV	Potência 5,00/6,25 MVA
11T1	Disjuntor de média tensão do transformador 02T1	Tensão 13,8 kV
11T2	Disjuntor de média tensão do transformador 02T2	Tensão 13,8 kV
01B1	Barramento de 13,8 kV da subestação	Tensão 13,8 kV
21L1/21L2/21L3	Religadores dos vãos de saída de linha da subestação	Tensão 13,8 kV
01L1/01L2/01L3	Vãos de saída de linha da subestação	Tensão 13,8 kV

Fonte: Adaptado de Jaguaribe (2022)

#### 2.4.4.3 Diagrama de Proteção da Subestação Campus do Pici

O Diagrama de Proteção de uma subestação tem a função de ilustrar as conexões e os equipamentos responsáveis pela proteção do sistema elétrico, bem como as funções de proteção que estão sendo utilizadas pelos relés da subestação (Santos, 2015). Conforme ilustrado no Diagrama Unifilar de Proteção da Subestação do Campus do Pici, que consta no Anexo A, em cada vão da subestação há um sistema de proteção composto de TC, TP, relé de proteção multifunção e disjuntor. Além dos relés de proteção, o transformador possui suas proteções intrínsecas.

#### 2.4.4.4 Diagrama da Arquitetura de Proteção, Automação e Controle

O Diagrama da Arquitetura de Proteção Automação e Controle tem a função de ilustrar a comunicação em rede das estruturas físicas de uma subestação (Padilla, 2015). No Anexo B é apresentada a arquitetura de comunicação do SAS da SEE Campus do Pici da UFC.

Vale destacar que os Relés de Proteção apresentados no diagrama unifilar do Anexo B estão instalados nos painéis de Proteção de Controle localizados Casa de Comando. Na Figura 10 é apresentado o ambiente interno da Casa de Comando no qual estão localizados os quadros como QSACA, QSACC e QMPCS.

Figura 10 – Ambiente da Casa de Comando com os Quadros de Proteção e Automação.



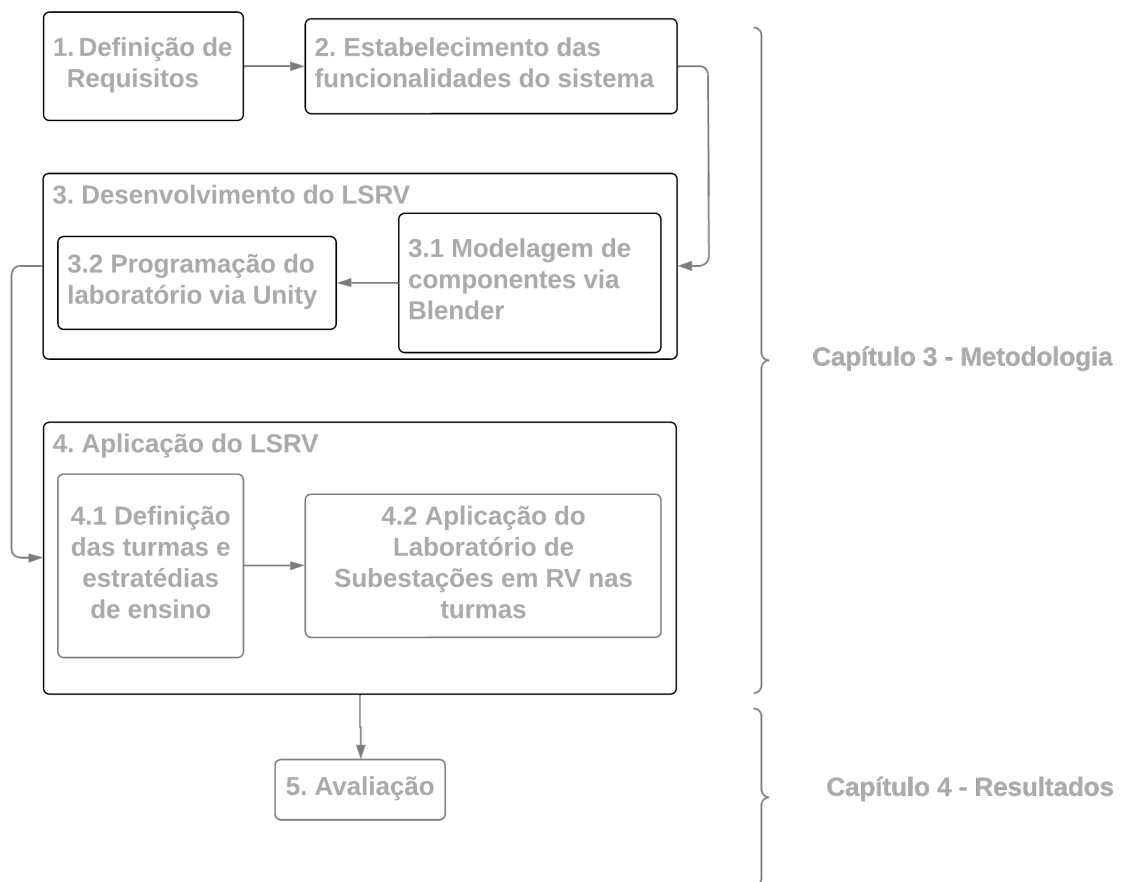
Fonte: Próprio autor.

Com base no exposto, o LSRV foi desenvolvido contemplando os equipamentos descritos no capítulo 2, bem como os ambientes da subestação de distribuição de energia elétrica do Campus do Pici que contêm os Diagramas Unifilares e da Arquitetura de Proteção, Automação e Controle.

### 3 METODOLOGIA

Neste Capítulo são descritas as metodologias utilizadas para desenvolver o presente trabalho. São cinco etapas distintas, como exibido na Figura 11, e elas contemplam a definição de requisitos, estabelecimento de funcionalidades do sistema, o desenvolvimento do software e a aplicação do LSRV perante o público alvo: os discentes.

Figura 11 – Processo metodológico para o desenvolvimento do presente trabalho.



Fonte: Próprio autor.

#### 3.1 Definição de Requisitos

Antes do processo de modelagem e de implementação da aplicação, foram estipulados alguns objetivos específicos importantes de serem alcançados para o impacto positivo no processo de ensino-aprendizagem, os quais são nomeados por Requisitos do Sistema. Esses requisitos foram definidos com a intenção de preencher as lacunas no processo de ensino-aprendizagem que os professores compartilharam com os desenvolvedores. Dentre eles, destacam-se:

1. Livre movimentação pela subestação em três dimensões por parte do usuário;
2. Verossimilhança por parte dos componentes desenvolvidos, com a intenção de representar fidelidade gráfica entre a LSRV e a subestação real;
3. Plataforma na qual os discentes estivessem aptos a comparar o diagrama unifilar da subestação com o ambiente em RV;
4. Simulações que representassem eventos tipicamente manifestados em subestações, como uma falta em algum alimentador ou curto-circuito entre fases.

## **3.2 Estabelecimento das Funcionalidades do Sistema**

Para definir as Funcionalidades do Sistema, é necessário analisar os requisitos pré-definidos e elaborar soluções viáveis de serem implementadas para atender às necessidades estabelecidas previamente na subseção 3.1.

### ***3.2.1 Livre Movimentação***

Para satisfazer o primeiro requisito do sistema, foi pensada a implementação de duas possibilidades de movimentação. A primeira delas é a movimentação no plano, a qual emula um personagem andando sobre o solo da subestação. A segunda delas é a utilização de um mecanismo para possibilitar uma visão superior da subestação, permitindo, ao usuário, visualizar os componentes sob uma perspectiva diferente da solução anterior. Para tanto, optou-se por programar um drone para movimentação do usuário, contemplando um movimento tridimensional. É importante ressaltar que a existência de ambas as soluções é imprescindível para fornecer, ao usuário, uma maior imersão, permitindo que o mesmo possa visualizar e interagir com os componentes da subestação de vários ângulos.

### ***3.2.2 Verossimilhança***

Para atender o segundo requisito do sistema, optou-se pela estratégia de modelar os componentes da subestação ao invés de utilizar modelos prontos da internet. Após uma vasta pesquisa em sites como GrabCAD e CGTrader, que são bibliotecas on-line de objetos 3D, foi possível constatar que a maioria dos equipamentos presentes nos sites não atendiam, de forma completa, o presente requisito de verossimilhança.

### 3.2.3 Comparação do diagrama unifilar com ambiente em RV

Para contemplar o terceiro requisito, pensou-se em estabelecer um ambiente separado para visualização do diagrama unifilar. Nesse sentido, o diagrama unifilar deve fazer uma ponte entre o ambiente virtualizado e o ambiente de visualização do diagrama com o intento de comparar a simbologia com um componente em RV.

### 3.2.4 Criação de simulações

Para satisfazer o quarto e último requisito do sistema, pensou-se em desenvolver duas simulações para ilustrar o funcionamento dos equipamentos em uma situação real de falta. Nesse sentido, espera-se apresentar uma sequência lógica de eventos, de forma didática ao discente, destacando o funcionamento correto dos equipamentos.

## 3.3 Desenvolvimento do Laboratório de Subestação em Realidade Virtual

Para desenvolver o LSRV foram utilizados dois *softwares*: Blender para modelagem de componentes, como em Barata *et al.* (2015) e Araujo *et al.* (2016), e Unity 3D como motor gráfico para criar funções e disponibilizá-las para o desenvolvimento de aplicações, como em Cardoso *et al.* (2016), Araujo *et al.* (2016), Kamińska *et al.* (2017) e Abichandani *et al.* (2019). Ambos os softwares foram escolhidos por serem gratuitos e amplamente utilizados em aplicações similares, conforme citado anteriormente no Capítulo 2, oferecendo aos pesquisadores uma extensa rede de pesquisa para esclarecer dúvidas, como em fóruns no site dos desenvolvedores.

### 3.3.1 Modelagem dos componentes da LSRV via Blender

Na primeira versão deste trabalho (Jaguaribe, 2022) foi desenvolvida uma subestação com alguns equipamentos modelados pelo próprio autor e outros retirados de bibliotecas on-line. Nesta segunda versão do LSRV, cada componente foi desenvolvido pelo time de desenvolvimento com o intuito de melhorar graficamente<sup>1</sup> todos os componentes presentes na subestação.

É importante salientar que, apesar da existência de uma grande comunidade em diversos fóruns na internet cuja disponibilização de objetos 3D é extensa e gratuita, a modelagem<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Com a chegada de equipamentos mais modernos durante o desenvolvimento no período do mestrado, foi possível modelar equipamentos mais detalhadamente.

<sup>2</sup> Com a melhoria de computadores para o desenvolvimento do LSRV durante o período do mestrado, foi possível criar um ambiente mais detalhado e, portanto, mais próximo da realidade.



de todos os componentes utilizados na LSRV foi realizada pelos próprios desenvolvedores, como citado na subseção 3.2.2. O motivo para tal refere-se ao objetivo final do projeto que visa dois pontos principais.

O primeiro deles possui um viés educacional, pois os desenvolvedores da aplicação são discentes de graduação e/ou pós-graduação em Engenharia Elétrica da UFC. Assim, para modelar algum componente em específico, os discentes precisaram estudar sobre ele, bem como entender seus protocolos de funcionamento e de operação. Já o segundo motivo possui natureza estratégica, pois alguns componentes encontrados nas bases on-line e utilizados no trabalho defendido em Jaguaribe (2022), por conta da forma que foram construídos, não permitiam movimentação ao serem levados para o motor gráfico, dificultando a implementação de simulações. Por exemplo, ao realizar uma simulação de uma abertura de chave seccionadora, é necessário que a alavanca de abertura seja movimentada e, para tal, é necessário que tal movimentação seja prevista no processo de modelagem.

Consoante ao comentado na Introdução deste trabalho, a aplicação desenvolvida é baseada em uma subestação real presente no campus universitário. Portanto, o processo de modelagem dos componentes tornou-se mais intuitivo por conta da facilidade que os pesquisadores possuem em visitar o ambiente real. Como pode ser visto na Figura 12, o processo de desenvolvimento dos componentes passa não só pela utilização de pranchas ou diagramas pré-existentes dos componentes, mas também por uma visita a campo guiada pelos professores orientadores e engenheiros responsáveis pela manutenção da subestação.

Figura 12 – Processo de modelagem dos componentes.



Fonte: Próprio autor.

Com a visualização de pranchas em PDF e dos componentes no AutoCAD, é possível delimitar quais os componentes presentes em cada equipamento, com seus respectivos tamanhos e ligações. Para complementar, na visita a campo foram tiradas fotografias com a intenção de visualizar os componentes, bem como a textura dos equipamentos que contemplam cada componente. Importante salientar que os desenvolvedores optaram por representar todos os

equipamentos do sistema elétrico da subestação do LSRV. Portanto, para a modelagem em 3D dos componentes, foi observado o comportamento de cada um dos equipamentos listados no Apêndice A, a fim de que eles possam exercer suas respectivas funções durante a modelagem da LSRV via Unity, a qual está descrita na subseção 3.3.2.

Dessa forma, foi possível a criação de diversos componentes 3D que são necessários para representar o pleno funcionamento de uma subestação, tais como relés, seccionadoras, transformadores, disjuntores, isoladores e também estruturas de concreto, as quais servem de apoio para os demais componentes desenvolvidos. Na Figura 13 é possível visualizar o modelo e implementação de uma chave seccionadora via Blender. No Apêndice A é possível visualizar a lista completa de equipamentos modelados para o uso do LSRV.

Figura 13 – Modelagem de uma seccionadora via Blender.



Fonte: Próprio autor.

### 3.3.2 Programação do Laboratório de Subestações em Realidade Virtual via Unity

O LSRV possui 2 ambientes bem definidos, sendo o primeiro deles o pátio da subestação, no qual estão contidos todos os equipamentos de medição e proteção do sistema elétrico. Já o segundo é a casa de comando, a qual possui diversos quadros de automação e controle, bem como os relés responsáveis pela proteção do sistema e seu computador industrial para controle dos relés. Além disso, dentro da casa de comando, há um notebook que permite

interação do usuário<sup>3</sup> e, assim, promove uma visualização do diagrama unifilar da subestação, bem como as simulações propostas dentro do ambiente. Nesse tocante, as soluções previstas para o cumprimento dos requisitos relatados do sistema são, respectivamente:

1. **Livre movimentação:** criação de um personagem, emulando uma visita do próprio aluno à subestação, proporcionando uma movimentação Bidimensional (2D) pelo ambiente de forma latitudinal e longitudinal. Além disso, foi desenvolvido um drone com a intenção de viabilizar uma movimentação 3D, o qual permite ao usuário sobrevoar a subestação e visualizar os componentes por outros ângulos. Na Figura 14 é possível visualizar o pátio da subestação sendo sobrevoado pelo drone desenvolvido.

Figura 14 – Movimentação do drone dentro da subestação.



Fonte: Próprio autor.

2. **Verossimilhança:** modelagem dos componentes citados na Seção 2.4.3 deste trabalho, a qual foi realizada pela própria equipe de desenvolvimento e acompanhada pelos professores orientadores. Na Figura 15 é possível visualizar a semelhança entre o pátio da subestação original com o virtualizado que contém diversos equipamentos, como TP, TC, seccionadoras, religadores, para-raios, condutores de cobre, transformadores de potência e estruturas de concreto.

<sup>3</sup> Por meio do teclado, o usuário interage com o notebook. Tal ação permite que o usuário do LSRV visualize tanto o diagrama unifilar interativo, quanto as simulações presentes no software. No Apêndice B é possível visualizar uma lista de comando para utilização da subestação.

Figura 15 – Comparativo Real x Virtual do pátio da subestação.



Fonte: Próprio autor.

Já na Figura 16 são apresentados tanto os componentes presentes na casa de comando da subestação real como os componentes da subestação virtual. O ambiente possui quadros para proteção e automação da subestação, os quais contêm equipamentos como relés, retificadores, computadores industriais, disjuntores e instrumentos de medição como voltímetros e amperímetros.

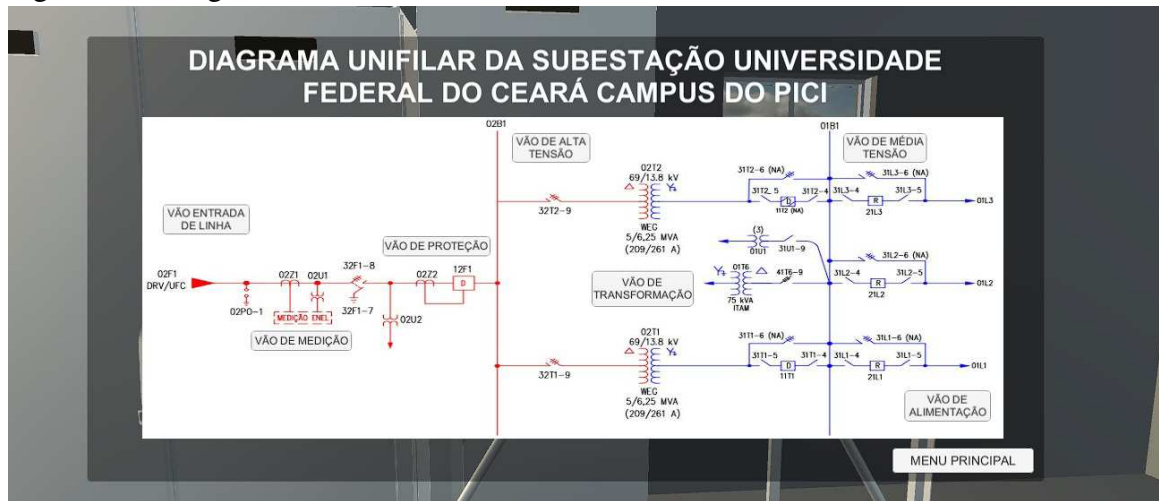
Figura 16 – Comparativo Real x Virtual da casa de comando.



Fonte: Próprio autor.

3. **Comparação do diagrama unifilar com ambiente em RV:** criação de um diagrama unifilar interativo ilustrado na Figura 17, no qual o discente pode realizar interações e é movido para o ambiente selecionado, podendo, assim, visualizar o vão selecionado em RV.

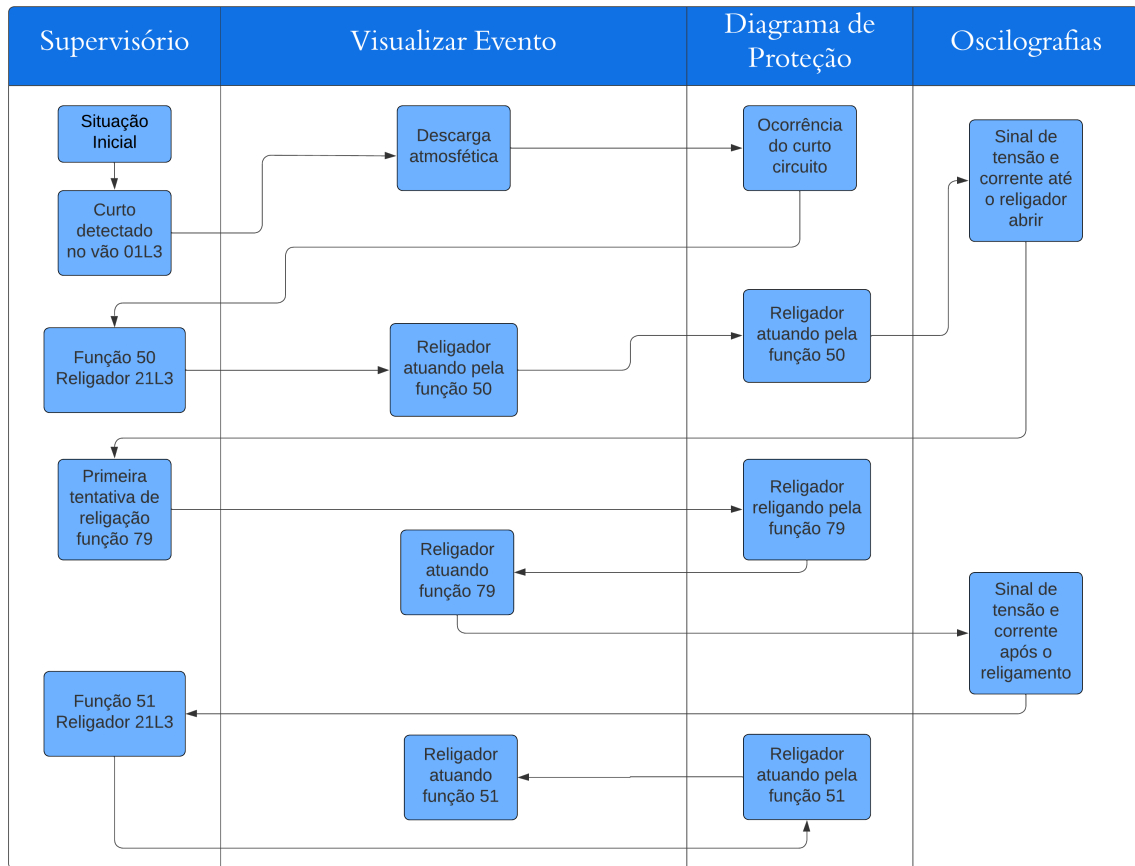
Figura 17 – Diagrama Unifilar Interativo do LSRV.



Fonte: Próprio autor.

4. **Criação de simulação:** desenvolvimento de simulações em RV de faltas que podem ocorrer no campus universitário. Foram implementadas duas simulações de faltas no LSRV. A primeira delas simula uma descarga atmosférica, fato que realmente aconteceu no primeiro trimestre de 2023, atingindo um condutor de cobre na saída de linha da subestação. A segunda simula o que aconteceria com a subestação caso ocorresse um curto-circuito entre os condutores do religador de média tensão. Para ilustrar o comportamento de uma das simulações, na Figura 18 é exibido um diagrama de atividades em linguagem UML contendo quatro atividades distintas referentes à primeira simulação: visualização do supervisor da subestação, visualização do evento acontecendo em tempo real, utilização do diagrama de proteção para exibir o comportamento da corrente elétrica conforme a atuação das funções de proteção e visualização de oscilografias.

Figura 18 – Diagrama de atividades da simulação de religador.



Fonte: Próprio autor.

Como ilustrado na Figura 19, é possível visualizar o evento que gerou a falta na RV. Já na Figura 20 é mostrado o sistema supervisório desenvolvido que apresenta, de uma forma mais lúdica, os eventos simulados. Nesse sentido, a opção de tornar o sistema supervisório de mais fácil compreensão<sup>4</sup> se dá por ser, muitas vezes, o primeiro contato dos alunos com esse sistema. É importante destacar que a simulação conta com oscilografias oriundas do relé físico com a intenção de demonstrar o comportamento dos sinais de tensão e corrente durante o evento. A segunda simulação contempla os mesmos artifícios utilizados na primeira, como diagrama unifilar, sistema supervisório e oscilografias, mas para uma situação diferente, uma falta ocasionada por um agente externo.

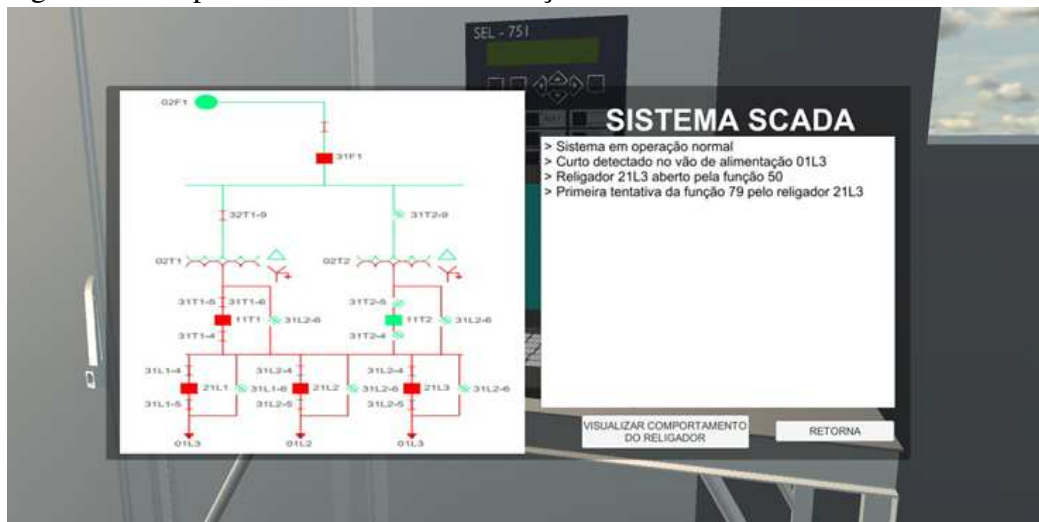
<sup>4</sup> Sistemas supervisórios reais não explicam o que causou a falta de forma detalhada, apenas indicam qual equipamento foi acionado e por qual função.

Figura 19 – Simulação de curto-circuito no vão de alimentação.



Fonte: Próprio autor.

Figura 20 – Supervisório durante a simulação de curto-circuito no alimentador.



Fonte: Próprio autor.

É importante salientar que a linguagem de programação escolhida para desenvolver as funções do LSRV foi o C# devido esta ser a principal linguagem que a comunidade do Unity 3D utiliza. Tal escolha propicia uma maior interação dos pesquisadores com fóruns e vídeos para tirar eventuais dúvidas. Dentre as funções desenvolvidas, podem ser evidenciadas as diferentes formas de movimentações do usuário, bem como as cenas de simulações cujo desenvolvimento é explicado nesta subseção.

### 3.4 Aplicação do Laboratório de Subestações em Realidade Virtual

Para contemplar a aplicação do LSRV em sala de aula, é necessário descrever a metodologia utilizada, bem como uma melhor delimitação sobre qual estratégia de ensino deve

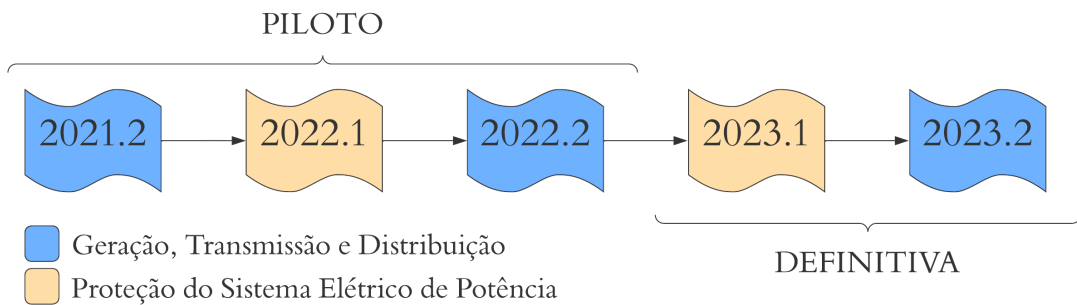
ser aplicada dentre as testadas no experimento.

### 3.4.1 Definição das turmas e das estratégias de ensino

É importante salientar que a presente experiência teve um tempo de duração total de cinco semestres e foi utilizada em duas disciplinas distintas e intercaladas, sendo elas Geração, Transmissão e Distribuição e Proteção do Sistema Elétrico de Potência. Nesse sentido, as três primeiras turmas foram utilizadas para testar diferentes estratégias de ensino e, mediante aos resultados, escolher qual a melhor forma de utilizar o LSRV no processo de ensino-aprendizagem dessas disciplinas. Essas turmas cuja função é de realizar testes são chamadas de turmas piloto.

Já para as duas turmas finais, uma de cada disciplina, foi utilizada a estratégia de ensino escolhida mediante os testes nas turmas piloto. A função dessas turmas finais é de servir como uma experiência mais consolidada, pois se baseiam nos resultados provenientes das turmas piloto. Essas turmas são chamadas de turmas definitivas, conforme ilustrado na Figura 21, que exhibe a ordem cronológica das turmas do experimento com ênfase na divisão entre os tipos de turmas.

Figura 21 – Ordem cronológica das disciplinas no experimento.



Fonte: Próprio autor.

À vista disso, é imprescindível destacar a clara divisão entre turmas piloto necessárias para a prova de conceito, cuja função é testar as diferentes estratégias de ensino, e turmas definitivas, cuja função é dividir a turma em duas partes, submetê-las a experiências distintas e, assim, comparar vivências do processo de ensino-aprendizagem diferentes.

Os experimentos foram realizados com turmas do curso de Engenharia Elétrica da UFC, com o ano letivo dividido em duas partes, sendo eles o primeiro semestre e o segundo semestre. Por exemplo, o primeiro semestre do ano 2023 é nomeado de 2023.1 e o segundo semestre é nomeado de 2023.2. Além disso, é necessário salientar que o sistema de notas da



UFC varia de 0 a 10, sendo necessário um valor superior a 7 para aprovação direta e 5 para aprovação após uma avaliação final.

Assim, os semestres de realização do experimento do presente estudo foram 2021.2, 2022.1, 2022.2, 2023.1 e 2023.2, sendo apenas o primeiro deles totalmente on-line, por consequência da pandemia COVID 19, e o restante de forma totalmente presencial. Para este experimento, como dito anteriormente, foram utilizadas duas disciplinas diferentes para validar o trabalho, sendo elas:

- **Disciplina 1:** Geração, Transmissão e Distribuição - Semestres de aplicação: 2021.2, 2022.2 e 2023.2. Esta disciplina obrigatória<sup>5</sup> é ministrada no sexto semestre do curso de Engenharia Elétrica tendo como pré-requisito a disciplina de Análise de Circuitos CA. Esta disciplina não possui créditos laboratoriais e tem a função de introduzir os sistemas de geração, transmissão e distribuição do sistema elétrico de potência brasileiro. Essa é a primeira disciplina da grande área do SEP, estando no ciclo básico, e serve de alicerce para todas as disciplinas eletivas dessa área;
- **Disciplina 2:** Proteção do Sistema Elétrico de Potência - Anos de aplicação: 2022.1 e 2023.1. Essa é uma disciplina optativa<sup>6</sup> e encontra-se no final do curso de Engenharia Elétrica tendo como pré-requisito a disciplina de Geração, Transmissão e Distribuição. Esta disciplina não possui créditos práticos e tem a função de ensinar a dimensionar o sistema de proteção e parametrizar relés. Por ser uma disciplina específica, os discentes já possuem um embasamento sobre o SEP.

Isto posto, três das cinco turmas contempladas no experimento foram da Disciplina 1, sendo elas 2021.2, 2022.2 e 2023.2, e duas da Disciplina 2, sendo elas 2022.1 e 2023.1, conforme exibido na Figura 21. É mister salientar, portanto, que o presente trabalho agrega, além dos dados já apresentados em Jaguaribe (2022), novas análises sobre os dados previamente expostos, como uma abordagem mais qualitativa sobre a eficiência das diferentes estratégias de ensino e quais impactos elas tiveram no processo de ensino-aprendizado pela perspectiva discente.

<sup>5</sup> Disciplinas Obrigatórias na UFC possuem um semestre específico para serem realizadas.

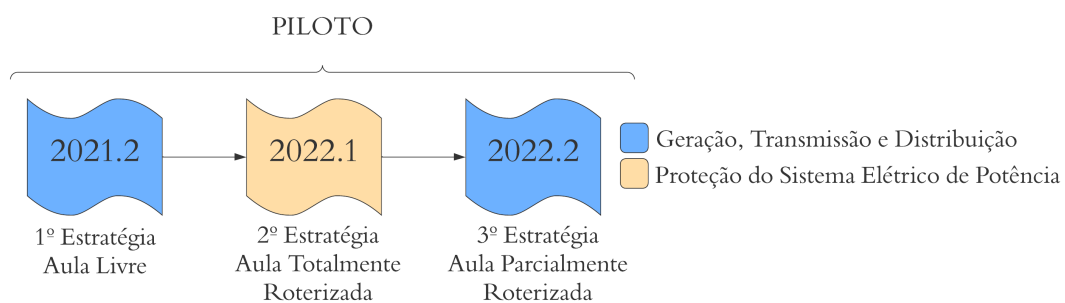
<sup>6</sup> Disciplinas Optativas na UFC, também chamadas de eletivas, não possuem um semestre específico para serem realizadas, contanto que seu pré-requisito esteja preenchido. Para a disciplina de Proteção do Sistema Elétrico de Potência é apenas necessário que a disciplina de Geração, Transmissão e Distribuição tenha sido realizada, ou seja, o discente pode realizar a partir do sétimo semestre.

### 3.4.1.1 Modelo de estratégias de ensino para turmas piloto

Como citado no início da subseção 3.4.1, o objetivo das turmas piloto é de serem realizados testes com estratégias de ensino distintas e constar qual o melhor modelo para uma aplicação definitiva. Nesse sentido, na Figura 22 é destacado as três turmas piloto com as suas respectivas estratégias de ensino, sendo elas:

- **Aula livre:** modelo no qual os docentes disponibilizam a ferramenta para exploração discente em conformidade com o que os alunos têm interesse de visualizar ou entender. Nesta estratégia, não há um cronograma pré-estabelecido e a visita virtual ao LSRV é orientada pela curiosidade dos discentes;
- **Aula totalmente roteirizada:** o tempo total da aula deve contemplar o cronograma de visita virtual ao LSRV explicitado na subseção 3.5.1.2, todavia sem tempo reservado para exploração discente;
- **Aula parcialmente roteirizada:** parte do tempo de aula de forma planejada previamente, cerca de 1 hora e 20 minutos, e com o restante do horário de aula com espaço para exploração e esclarecimento de respostas de eventuais questionamentos. A roteirização em questão seguiu o cronograma específico apresentado na subseção 3.5.1.2.

Figura 22 – Fluxograma das turmas piloto em ordem cronológica com suas estratégias de ensino.



Fonte: Próprio autor.

### 3.4.1.2 Modelo de Implementação para turmas definitivas

O modelo de estratégia de ensino escolhido para implementar nas turmas definitivas foi o de aula parcialmente roteirizada em conformidade com os resultados expressos no Capítulo 4. Dentre eles, destacam-se um melhor desempenho discente em avaliações e uma melhor aceitação dos alunos, a qual foi evidenciada por meio da pesquisa de opinião. Além disso, a

metodologia de aplicação prevista para turmas definitivas contempla mais resultados com a intenção de validar, de forma parcial, o trabalho. A validação de forma parcial é devida ao fato de que para uma validação completa, é necessário que o modelo seja replicado múltiplas vezes em ambientes diferentes.

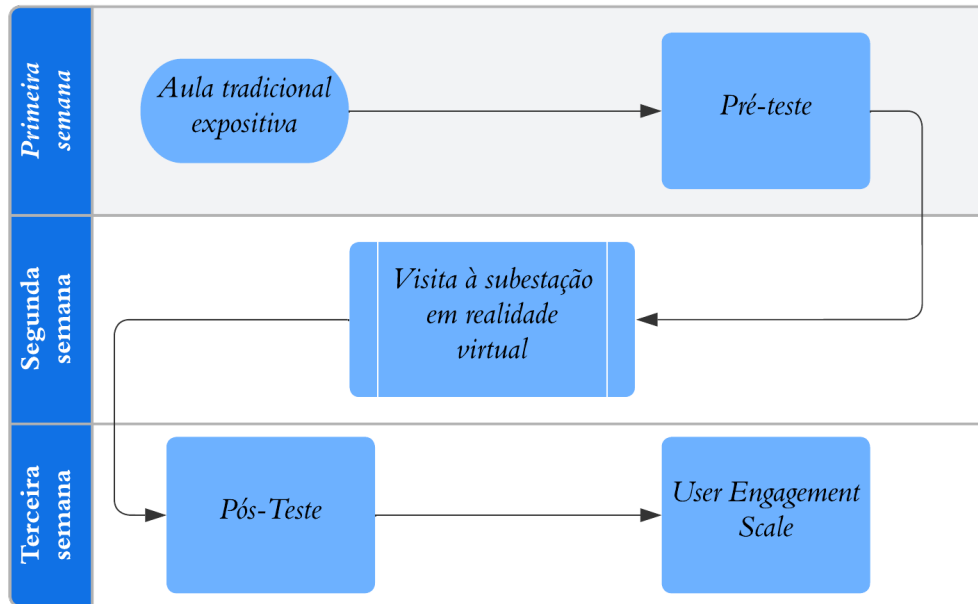
### **3.5 Aplicação do Laboratório de Subestações em Realidade Virtual nas turmas**

Nesta seção são apresentados os testes realizados em ambos os tipos de turmas citados na seção 3.4.1. É importante salientar que antes das aulas utilizando o LSRV, todo o conteúdo, que contempla subestações respectivo à disciplina do semestre em questão, já havia sido explicado aos alunos de forma convencional e expositiva por meio dos slides. Para tanto, é inviável constatar quantas aulas foram necessárias para utilizar o LSRV, pois cada turma tem seu ritmo de aprendizado.

#### ***3.5.1 Aplicação nas turmas piloto***

Nesta subseção é ilustrada a metodologia aplicada nas turmas piloto, dando ênfase na estratégia de ensino, bem como são destacados alguns dos comentários dos discentes, nas turmas piloto, sobre o uso da ferramenta, com a finalidade de justificar, de forma introdutória, a escolha da estratégia de ensino para as turmas definitivas. Nesse contexto, na Figura 23 é ilustrado o processo metodológico utilizado na turma piloto. Como o objetivo da experiência para as turmas é validar a ferramenta e a estratégia de ensino utilizada, o processo foi realizado em três semanas distintas. Na primeira há uma aula tradicional expositiva, seguido de um pré-teste. Este teste inicial serve de avaliação para aferir o grau de entendimento dos alunos sobre o conteúdo exposto previamente. Na segunda semana há a visita ao LSRV e, por fim, na terceira semana há uma aplicação de pós-teste, a fim de medir se houve ganho de aprendizagem. Além disso, há uma aplicação do UES em sua forma reduzida para medir o engajamento. Nos Apêndices C e D encontram-se os testes de avaliação.

Figura 23 – Processo metodológico para turma piloto.



Fonte: Próprio autor.

### 3.5.1.1 Teste da 1ª turma piloto no semestre 2021.2

Para este semestre, o teste foi realizado com os alunos da disciplina de Geração, Transmissão e Distribuição. Optou-se por utilizar a estratégia de aula livre, a qual os docentes disponibilizam a ferramenta para exploração discente em conformidade com o que os alunos têm interesse de visualizar ou entender. Importante salientar que, nesta estratégia, não há um cronograma pré-estabelecido e a visita ao LSRV é orientada pela curiosidade dos discentes.

O objetivo da escolha dessa estratégia de ensino foi o de oferecer aos alunos um maior grau de liberdade para explorar a subestação. Nesse tocante, na Figura 23 é ilustrado o processo metodológico seguido para a turma piloto do semestre 2021.2. Nela, é possível visualizar os acontecimentos e suas respectivas datas em ordem cronológica. A turma deste semestre possuía 25 alunos, mas apenas 18 aceitaram participar da experiência.

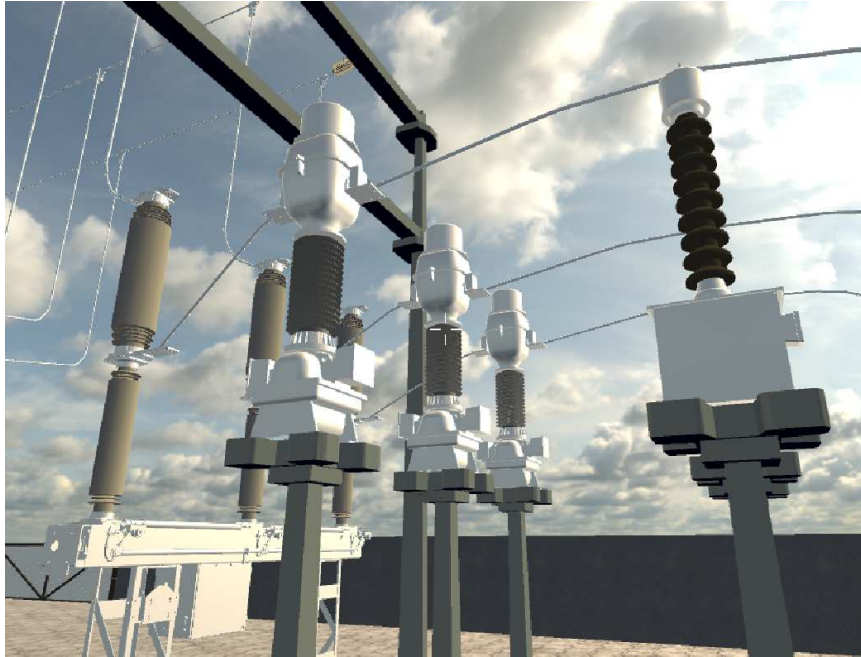
Como relatado pelos alunos, apesar dos mesmos terem achado interessante o ambiente da subestação e a inovação de utilizar de RV para o ensino, mesmo que de modo não imersivo, houve muitas reclamações para com a estratégia escolhida. O alunos desta turma de sexto semestre, em sua grande maioria, nunca tinham tido contato com uma subestação e, portanto, ficaram perdidos no ambiente. Dessa forma, foi uma sugestão geral que houvesse um cronograma mais fechado com a finalidade de guiar melhor os discentes no ambiente.

### 3.5.1.2 Teste da 2ª turma piloto no semestre 2022.1

Para este semestre, o teste foi realizado com os alunos da disciplina de Proteção do Sistema Elétrico de Potência, com um total de oito alunos, todavia, apenas cinco aceitaram participar da experiência. Optou-se por utilizar de uma aula totalmente roteirizada, cujo cronograma para visita está disposto a seguir:

1. Visita ao ambiente de alta tensão da LSRV, parando em cada componente para visualizar as suas particularidades e entender o posicionamento de cada componente, conforme a Figura 24. Nela, é possível observar equipamentos como TP e TC de proteção;

Figura 24 – Ambiente de alta tensão da subestação.



Fonte: Próprio autor.

2. Visita ao vão de transformação, ao qual é dado ênfase ao transformador abaixador, bem como seus componentes particulares, tais como tanque de expansão, buchas, quadro e sistema de ventilação, conforme apresentado na Figura 25. Além disso, é destacada a existência das proteções intrínsecas dos transformadores, bem como suas respectivas localizações e funções, como o relé de gás, relé de nível de óleo e válvula de alívio de pressão;

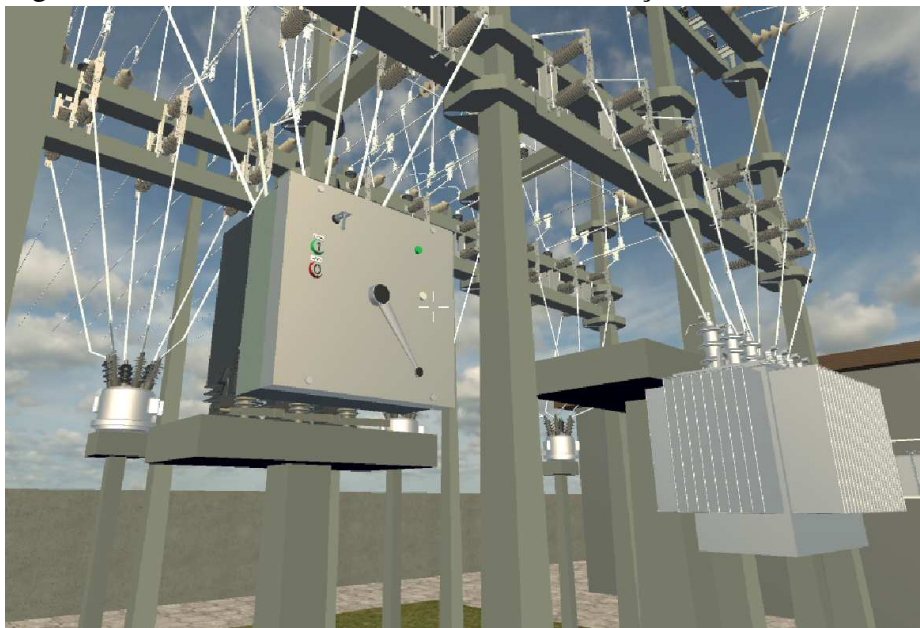
Figura 25 – Vão de transformação da subestação.



Fonte: Próprio autor.

3. Visita ao ambiente de média tensão da subestação, observando os novos componentes para entender seu funcionamento. Os equipamentos visualizados nessa etapa são disjuntores, religadores, seccionadoras e transformador de serviços auxiliares, conforme apresentado na Figura 26;

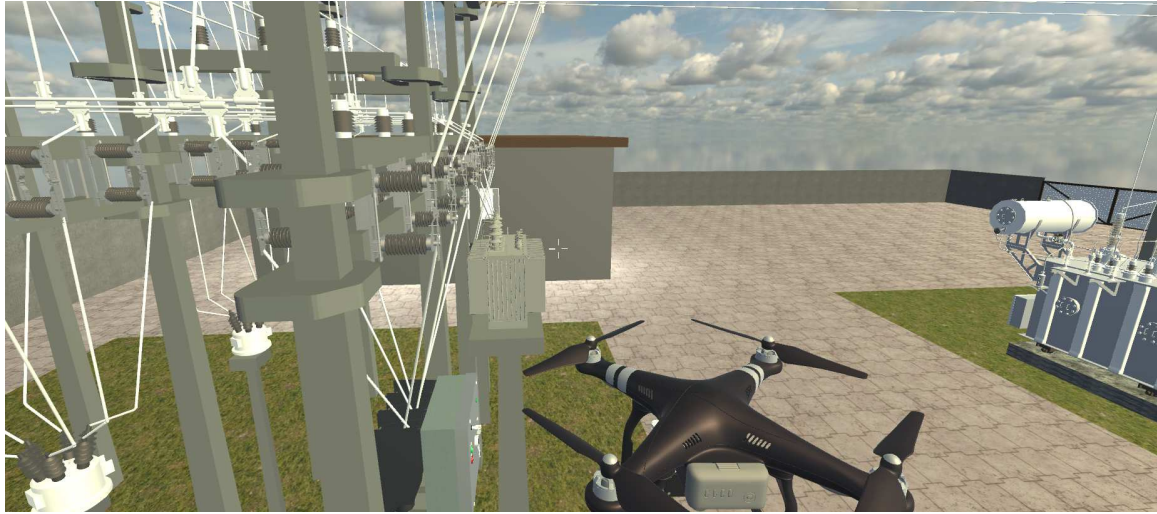
Figura 26 – Ambiente de média tensão da subestação.



Fonte: Próprio autor.

4. Visita aérea pela subestação por meio da utilização do drone, possibilitando alterar a perspectiva de visualização dos componentes, conforme mostrado na Figura 27;

Figura 27 – Movimentação livre do drone.



Fonte: Próprio autor.

5. Visita à casa de comando, na qual é possível visualizar os quadros de serviços auxiliares e de automação e controle, como mostrado na Figura 28. Ainda na casa de comando, é possível interagir com um notebook presente no ambiente para visualizar o diagrama unifilar interativo e as simulações presentes no LSRV, conforme descrito na subseção 3.3.2.

Figura 28 – Quadros da casa de comando.



Fonte: Próprio autor.

A opinião exposta pelo alunos deste semestre sobre a experiência foi de que a estratégia de utilizar um cronograma foi boa, pois eles conseguiram ficar mais atentos ao serem guiados. Apesar do ganho exposto, ainda houve crítica por ser um modelo totalmente fechado e sem brechas para exploração discente conforme demanda.

### *3.5.1.3 Teste da 3ª turma piloto no semestre 2022.2*

Para este semestre, o teste foi realizado com os alunos da disciplina de Geração, Transmissão e Distribuição em uma turma de 26 alunos, na qual apenas 17 aceitaram participar do experimento. Baseados nas críticas e sugestões dos alunos dos primeiro e segundo semestres de testes das turmas piloto, optou-se por utilizar uma estratégia híbrida mesclando os dois modelos. Nesse sentido, nomeado de aula parcialmente roteirizada, a estratégia contempla o cronograma exposto em 3.5.1.2 e possui um tempo para se tirar dúvidas dos discentes.

Diante do exposto, a opinião dos alunos com relação à estratégia utilizada foi muito boa e não houve reclamações do modelo de ensino. Com isso, a estratégia de aula parcialmente roteirizada foi escolhida como modelo para ser executado nas turmas definitivas durante os semestres 2023.1 e 2023.2.

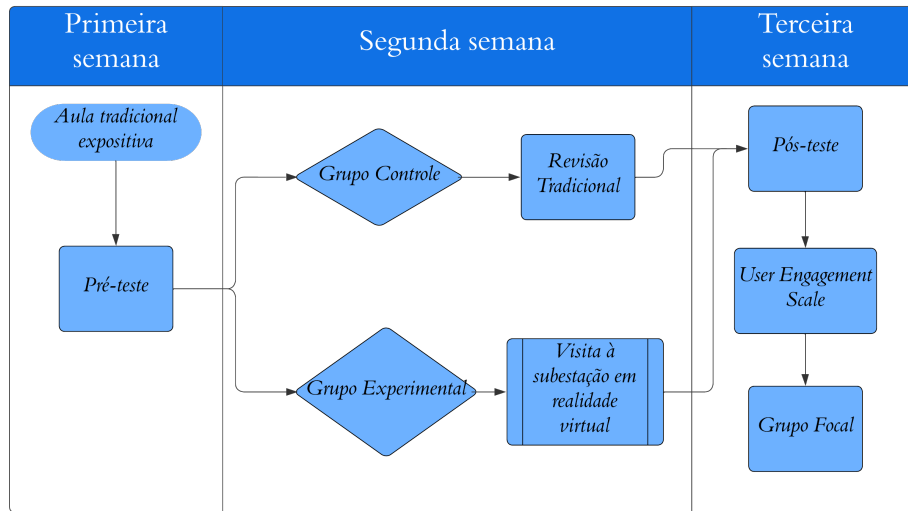
### *3.5.2 Aplicação das turmas definitivas*

Como citado na subseção 3.4, o objetivo de uma turma definitiva é de comparar vivências diferentes e analisar seus resultados. Nesse sentido, para os testes dos semestres 2023.1 e 2023.2, a comparação é feita entre uma aula de revisão expositiva, por meio de slides, com uma revisão expositiva utilizando o LSRV. Para isso, é necessário realizar um pré-teste em toda a turma, para aferir o nível de conhecimento sobre o assunto dos alunos e, após isso, dividir a turma em dois grupos: experimental e controle, conforme ilustrado na Figura 29. Para o grupo controle, foi feita uma revisão tradicional e, para o grupo experimental, foi realizada uma visita ao LSRV.

Após as aulas, na semana seguinte, foi realizado de um pós-teste que possuía a mesma quantidade de questões e de nível semelhante a do pré-teste. Por conseguinte, há a realização da avaliação por meio do protocolo UES, indicando o grau de engajamento discente para com a ferramenta. Além disso, com a finalidade de melhorar o processo de validação, foi acrescentada uma última etapa que consiste na realização de um Grupo Focal com alguns dos alunos que vivenciaram a experiência de visitar o LSRV com a intenção de complementar os resultados das pesquisas quantitativas. Importante enfatizar que os alunos foram escolhidos de forma aleatória para que não houvesse nenhum enviesamento nos resultados.



Figura 29 – Processo metodológico para turmas definitivas.



Fonte: Próprio autor.

É importante enfatizar que no início de cada semestre foram informados que aquela turma tinha sido escolhida para serem realizados testes didáticos e que a participação não era obrigatória. Dessa forma, os alunos preencheram um documento aceitando sua participação nos testes. Em nenhuma turma houve a participação completa dos discentes, mas o número de alunos dispostos a participar do experimento aumentou com o decorrer dos semestres devido à boa receptividade dos discentes que já haviam participado do experimento com o LSRV.

### 3.5.2.1 Teste da 1ª turma definitiva no semestre 2023.1

A disciplina deste semestre foi a de Proteção do Sistema Elétrico de Potência com 14 estudantes, dos quais 11 aceitaram participar do experimento. Como citado anteriormente, o cronograma para a utilização do LSRV é o mesmo apresentado na seção 3.5.1.2, todavia, por ser uma turma de uma disciplina específica, há um foco maior na apresentação dos relés e na demonstração do funcionamento das proteções da subestação.

Durante a execução do experimento nesta turma, optou-se por comparar a vivência entre laboratórios, ao ser dividida a turma entre grupo controle e grupo experimental. O primeiro deles realizou a revisão do seu conteúdo por meio de uma aula prática no laboratório de proteção que o Departamento de Engenharia Elétrica da UFC possui, o qual contém equipamentos como relés e uma mala de testes para simular eventos. Já os discentes da turma experimental vivenciaram a visita ao LSRV em conformidade com o cronograma citado anteriormente.

### *3.5.2.2 Teste da 2ª turma definitiva no semestre 2023.2*

A disciplina deste semestre foi a de Geração, Transmissão e Distribuição com 22 estudantes, dos quais 12 aceitaram participar do experimento. Nesse sentido, foram divididos os alunos de forma aleatória entre os dois grupos: controle e experimental. Para o grupo controle, foi ministrada uma aula tradicional expositiva e, para o grupo experimental, foi utilizado do LSRV em conformidade com o cronograma citado anteriormente.

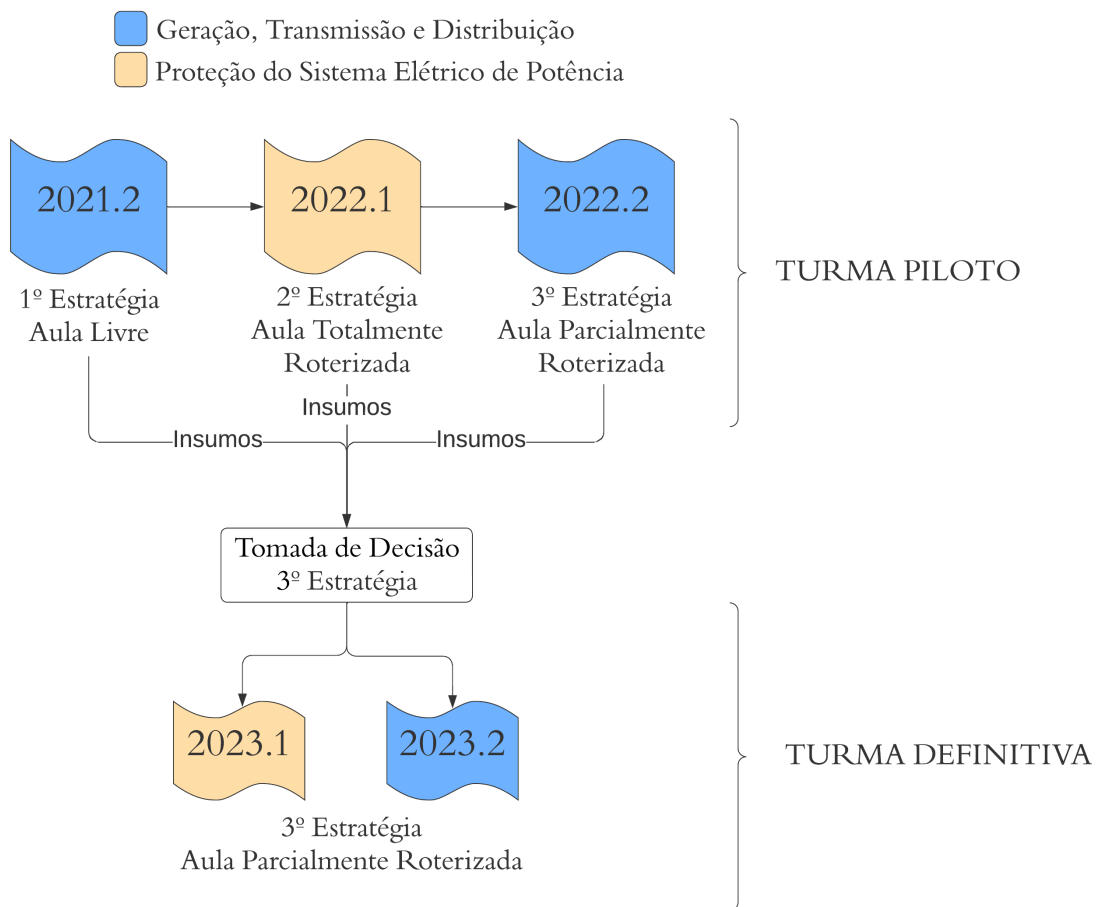
### *3.5.3 Considerações da aplicação do Laboratório de Subestações em Realidade Virtual*

Importante destacar que durante a aplicação do LSRV nas turmas piloto, o software ainda encontrava-se em desenvolvimento e, portanto, seu desenvolvimento pleno foi finalizado apenas no fim do semestre 2022.2, simultaneamente com a última aplicação em turmas piloto. Nesse sentido, a mesma versão foi utilizada em todos os testes referentes às turmas definitivas.

## 4 RESULTADOS

Neste capítulo estão descritos os resultados dos testes das subseções 3.5.1<sup>1</sup> e 3.5.2<sup>2</sup>. Para tanto, os mesmos estão subdivididos em duas subseções, uma para os resultados das turmas piloto e outra para os resultados das turmas definitivas. Na Figura 30 está ilustrado o esquemático do processo metodológico utilizado nas cinco turmas de forma cronológica.

Figura 30 – Esquemático do processo metodológico aplicado nas cinco turmas.



Fonte: Próprio autor.

### 4.1 Resultados das turmas piloto

Os resultados das turmas piloto são descritos em três subseções distintas, uma para cada semestre de teste, e, após isso, é destacado na quarta subseção uma análise crítica sobre os pontos positivos e negativos dos testes nas turmas piloto. Além disso, a quarta subseção

<sup>1</sup> Aplicação das turmas piloto

<sup>2</sup> Aplicação das turmas definitivas

também evidencia os motivos pela escolha da estratégia de ensino utilizada nas turmas definitivas, conforme é mostrado na Figura 30.

#### 4.1.1 *Semestre 2021.2: Geração, Transmissão e Distribuição*

Para os resultados da primeira turma da ordem cronológica dos experimentos, um total de 18 alunos, de 25, aceitaram fazer parte do experimento. Nesse tocante, todos os discentes que concordaram em participar da experiência preencheram a avaliação de desempenho, mas apenas 16 responderam o protocolo UES e a pesquisa de satisfação por questões pessoais<sup>3</sup>.

##### 4.1.1.1 *Resultados Quantitativos*

- **Avaliações de aprendizagem**

Optou-se por utilizar, em todas as tabelas a seguir de apresentação dos resultados, um mesmo padrão de apresentação de dados, o qual contém três informações, sendo elas: média, número de aprovados de forma direta caso fosse uma avaliação final<sup>4</sup>, como citado na subseção 3.4.1, e mediana. A Tabela 4 é mostrado os resultados da turma do semestre 2021.2 da Disciplina 1<sup>5</sup> do pré-teste e do pós-teste da turma de 18 alunos participantes.

Tabela 4 – Resultados pré-teste/pós-teste Disciplina 1: Semestre 2021.2.

<b>Testes</b>	<b>Total de alunos</b>	<b>Média</b>	<b>Nº de aprovados</b>	<b>Mediana</b>	<b>Desvio Padrão</b>
Pré-Teste	18	5,89	3	6,00	1,24
Pós-Teste	18	6,89	9	7,00	1,79

Fonte: Próprio autor.

Importante salientar que tanto o pré-teste, quanto o pós-teste, servem como avaliação final, haja vista que o conteúdo teórico das disciplinas de cada um dos semestres já havia sido apresentado ao discente antes da aplicação do pré-teste. Nesse sentido, é mister destacar, novamente que o objetivo de utilizar o LSRV, nas turmas piloto, é aferir se o uso da ferramenta, com a estratégia proposta, é eficaz para servir de revisão de conceitos e aprendizado de novas concepções, uma vez expostas e que não foram absorvidas pelos discentes pelo modelo tradicional.

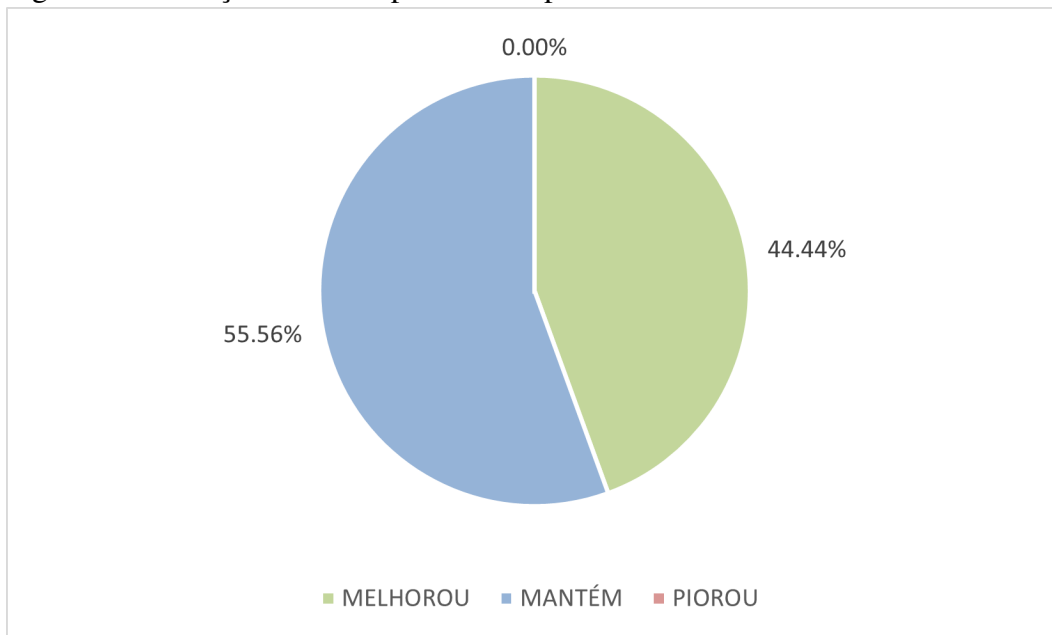
<sup>3</sup> Não foi possível que os outros alunos estivessem presentes durante o experimento completo.

<sup>4</sup> Métrica própria criada para este estudo com a intenção de aferir quantos alunos seriam aprovados sem serem submetidos a uma prova final de recuperação (nota superior a 7).

<sup>5</sup> Disciplina 1 é correspondente à disciplina de Geração, Transmissão e Distribuição, conforme descrito na subseção 3.4.1.

Com a finalidade de ilustrar o desempenho discente ao se comparar o resultado do pré-teste e do pós-teste, na Figura 31 é mostrada, em porcentagem, a quantidade de alunos que melhorou, manteve, ou piorou sua nota de uma avaliação para a outra. Por exemplo, mais da metade dos alunos presentes na classe tiveram um desempenho melhor no pós-teste do que no pré-teste<sup>6</sup>, pouco menos da metade manteve as mesmas notas<sup>7</sup> e nenhum aluno piorou seu desempenho ao passar pelo experimento<sup>8</sup>.

Figura 31 – Relação de desempenho Disciplina 1: Semestre 2021.2.



Fonte: Próprio autor.

#### • Avaliação de engajamento

Os resultados do UES referente ao primeiro semestre estão dispostos na Figura 32 e estão na escala Likert de 1 a 5 que varia da seguinte forma:

- 1 - Muito ruim;
- 2 - Ruim;
- 3 - Neutro;
- 4 - Bom;
- 5 - Excelente.

Na Figura 32, é possível visualizar que o dado representado por FA está classificado como bom e o restante dos dados estão na região entre bom e excelente, pois AE e RW estão

<sup>6</sup> Melhorar o desempenho no pós-teste em relação ao pré-teste indica que houve um ganho de aprendizado.

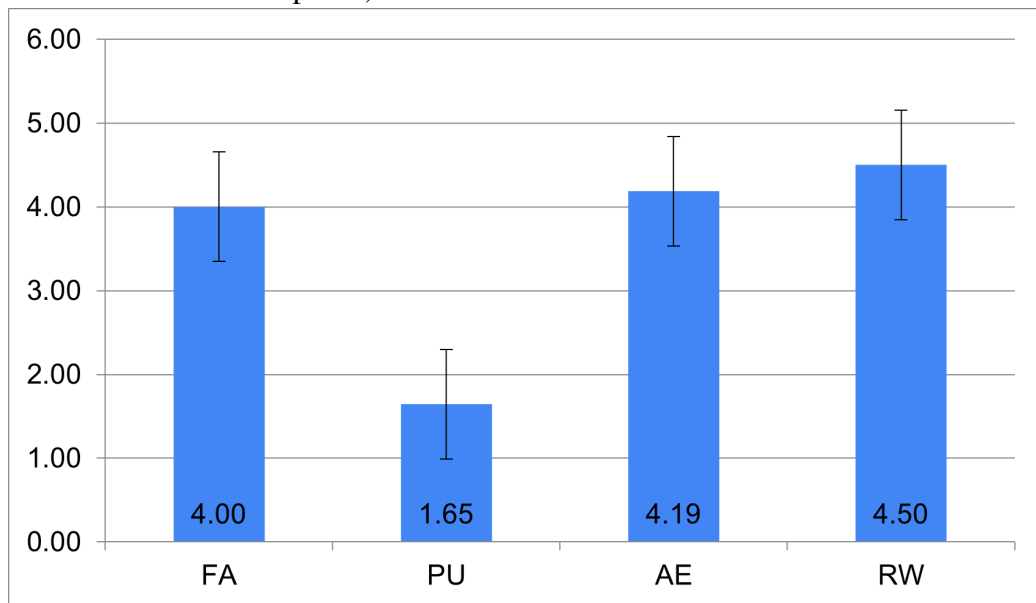
<sup>7</sup> Manter o desempenho no pós-teste em relação ao pré-teste indica que pode, ou não, existir um ganho de aprendizado.

<sup>8</sup> Tal fato indica que, inicialmente, não houve prejuízos no que se refere à aprendizagem.

entre os valores 4 e 5 e PU está entre os valores 2 e 1<sup>9</sup>.

É importante sobrelevar que o desvio padrão mostra que houve uma distância relativamente grande entre os resultados. Isso mostra que alguns discentes tiveram experiências muito boas, já outros afirmaram ter experiência entre boa e neutra.

Figura 32 – Resultado do UES na Disciplina 1: Semestre 2021.2, onde: FA (Atenção Focada), PU (Usabilidade Percebida), AE (Apelo Estético) e RW (Grau de Recompensa).



Fonte: Próprio autor.

#### 4.1.1.2 Resultados qualitativos

Muito em ressonância com o resultado aferido pelo desvio padrão oriundo do UES, os feedbacks apresentados demonstram, de uma forma geral, que os alunos gostaram muito da experiência, no entanto, também observaram muitos pontos a serem melhorados no desenvolvimento do LSRV, como nas texturas dos objetos e nas simulações implementadas. Além disso, muitos foram os comentários sobre a estratégia de ensino utilizada não ser a mais adequada, como pode ser visto a seguir:

- *"Parecia não haver um roteiro na apresentação e acabou tornando confuso, adicionar mais cores à simulação para tornar mais realista"* ;
- *"Será muito interessante, no futuro, implementações para simular diversas condições na subestação, como por exemplo a falha de um equipamento para observarmos o que*

<sup>9</sup> Como citado na subseção 2.2.2, o indicador de PU mensura o quão o usuário se esforça para manter-se focado. Portanto, quanto menor o resultado, menor o esforço e melhor é o indicador.

*acontece."*;

- *"A suavização dos movimentos e a melhoria dos gráficos."* .

#### **4.1.2 Semestre 2022.1: Proteção do Sistema Elétrico de Potência**

Como relatado anteriormente, este é o segundo semestre da ordem cronológica do experimento e o primeiro que utiliza o LSRV em uma disciplina optativa<sup>10</sup>. Por ser uma turma eletiva, a quantidade de alunos é historicamente reduzida em relação a uma turma do ciclo básico.

Desse modo, os oito alunos presentes na disciplina aceitaram participar do experimento, só que apenas cinco deles realizaram as avaliações de aprendizagem por questões pessoais<sup>11</sup>, restringindo os resultados quantitativos de avaliação de aprendizagem. Todavia, dois dos alunos que não conseguiram realizar o pós-teste responderam ao protocolo UES, bem como deixaram seus comentários para melhorar a ferramenta.

##### **4.1.2.1 Resultados quantitativos**

- **Avaliações de aprendizagem**

Desse modo, foram contabilizados, para aferir o desempenho discente, um total de cinco alunos e, para o protocolo UES, sete alunos juntamente com suas respectivas opiniões. Portanto, na Tabela 5 são exibidos os resultados estatísticos do pré-teste e do pós-teste.

Tabela 5 – Resultados pré-teste/pós-teste Disciplina 2: Semestre 2022.1.

<b>Testes</b>	<b>Total de alunos</b>	<b>Média</b>	<b>Nº de aprovados</b>	<b>Mediana</b>	<b>Desvio Padrão</b>
Pré-Teste	5	6,40	2	6,00	2,33
Pós-Teste	5	8,40	4	8,00	1,49

Fonte: Próprio autor.

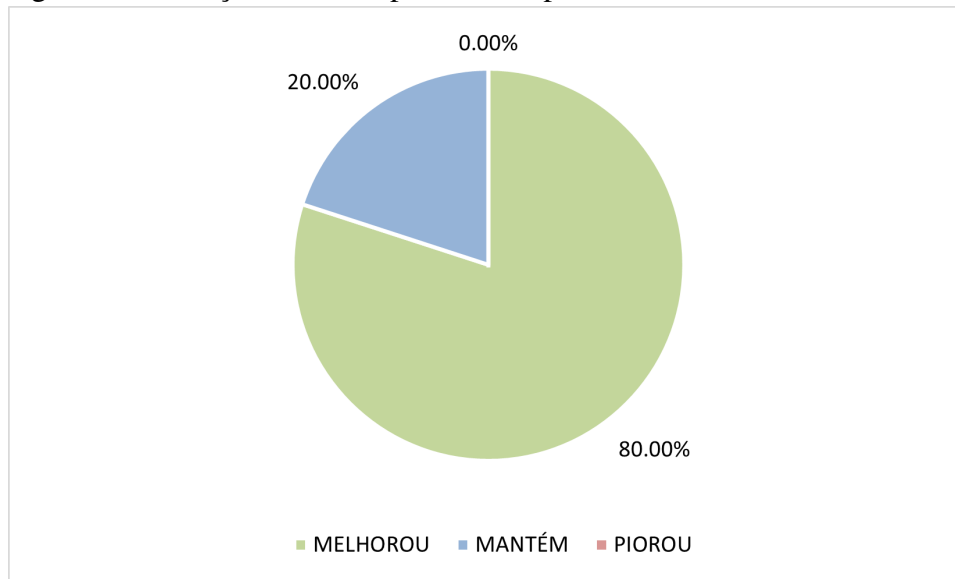
Para complementar as informações da Tabela 5, na Figura 33 é ilustrado que quatro dos cinco alunos melhoraram seu desempenho em um teste quando comparado ao outro e que apenas um manteve a nota. Importante salientar que nenhum aluno piorou seu desempenho nas avaliações de aprendizagem nesta turma da Disciplina 2<sup>12</sup>.

<sup>10</sup> Como citado na subseção 3.4.1, disciplinas optativas não são obrigatórias e devem ser escolhidas no final do curso com a intenção de aumentar a especialidade em uma temática específica.

<sup>11</sup> Não foi possível que os outros alunos estivessem presente durante o experimento completo.

<sup>12</sup> Disciplina 2 é correspondente à disciplina de Proteção do Sistema Elétrico de Potência, conforme descrito na subseção 3.4.1.

Figura 33 – Relação de desempenho Disciplina 2: Semestre 2022.1.

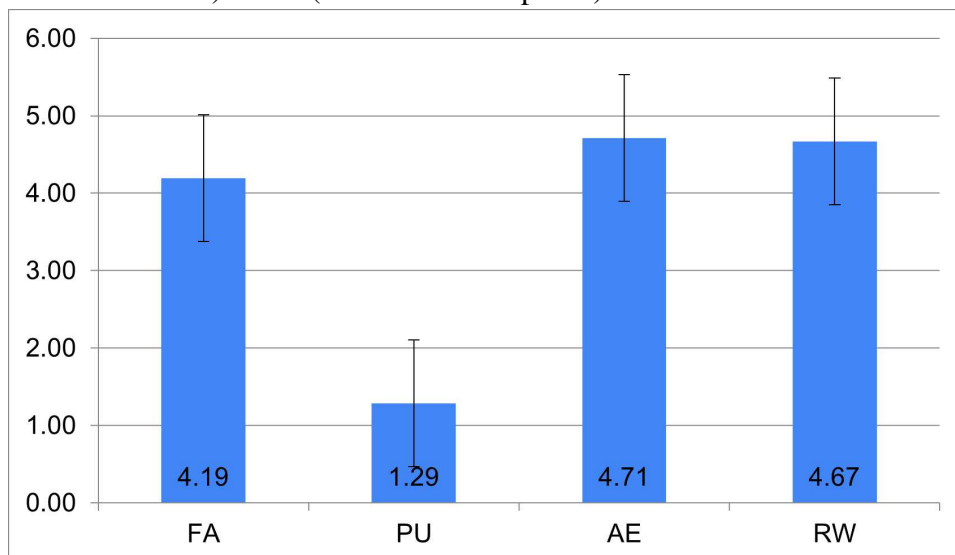


Fonte: Próprio autor.

#### • Avaliação de engajamento

Os resultados dos indicadores do protocolo UES foram muito bons, com todos eles ficando entre bom e excelente, como pode ser visto na Figura 34.

Figura 34 – Resultado do UES na Disciplina 2: Semestre 2022.1, onde: FA (Atenção Focada), PU (Usabilidade Percebida), AE (Apelo Estético) e RW (Grau de Recompensa).



Fonte: Próprio autor.



#### 4.1.2.2 Resultados qualitativos

Um ponto presente em todos os comentários é de que o LSRV permite, ao aluno, visualizar os componentes que eles tanto estudam em uma subestação em operação, mas que é geralmente inviável ter esses componentes em um laboratório didático em pleno funcionamento. Além disso, foi recomendado que o diagrama unifilar interativo permitisse que o aluno pudesse interagir com os componentes, podendo conhecer mais seu funcionamento. Abaixo, encontram-se alguns dos comentários dos alunos:

- *"Tornou mais fácil a compreensão de alguns conceitos; ajudou a fixar a ordem lógica dos elementos em uma subestação.";*
- *"A facilidade em realizar uma visita à subestação, sem necessariamente estar fora da sala de aula, onde o professor pode aproveitar os seus recursos para melhorar o aprendizado.";*
- *"Implementar ações reais que acontecem em uma SE, como por exemplo simular um curto-circuito.".*

#### 4.1.3 Semestre 2022.2: Geração, Transmissão e Distribuição

Referente à terceira turma da ordem cronológica dos experimentos e a última turma piloto do presente experimento, um total de 23 alunos, de 26, aceitaram fazer parte do experimento. Apesar disso, apenas 17 discentes optaram por responder ao protocolo UES e deixar seus comentários opinativos ao final da pesquisa.

##### 4.1.3.1 Resultados quantitativos

- **Avaliações de aprendizagem**

Na Tabela 6 são exibidos resultados estatísticos referentes ao desempenho discente dos 23 alunos que participaram do experimento.

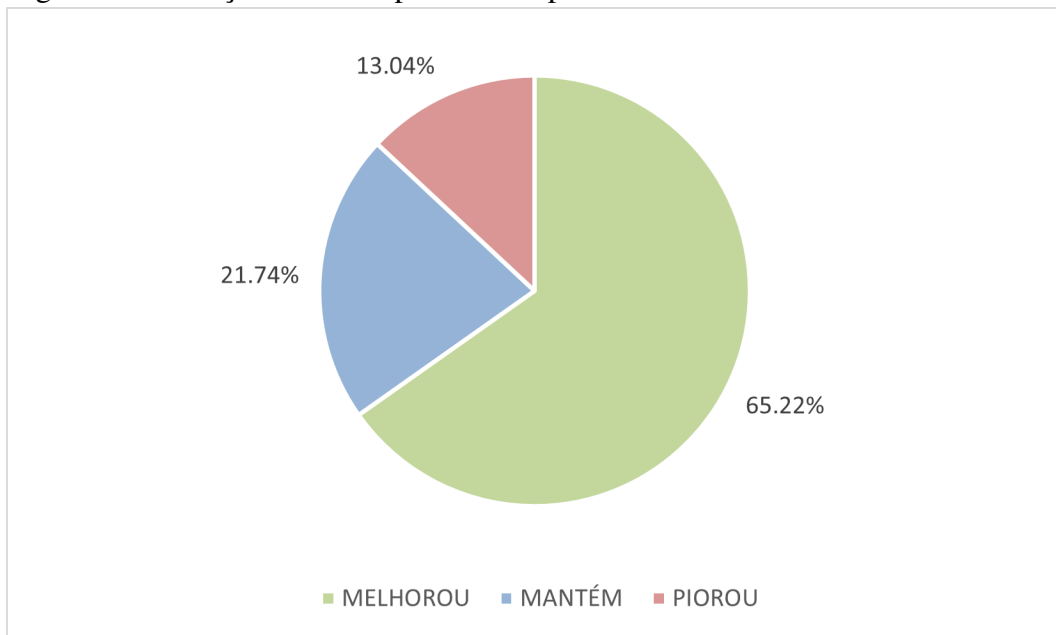
Tabela 6 – Resultados pré-teste/pós-teste Disciplina 1: Semestre 2022.2.

Testes	Total de alunos	Média	Nº de aprovados	Mediana	Desvio Padrão
Pré-Teste	23	2,96	1	2,00	2,19
Pós-Teste	23	4,87	4	6,00	2,27

Fonte: Próprio autor.

Nesse sentido, na Figura 35 é ilustrada a relação de desempenho dos alunos em relação à comparação das notas de pós-teste com as do pré-teste. Nela é possível observar que mais de 65% dos alunos obtiveram notas melhores no pós-teste do que no pré-teste e, aproximadamente, 21% dos alunos mantiveram o mesmo desempenho. Diferente da primeira aplicação nesta disciplina, houve alunos que tiveram uma performance pior no pós-teste, sendo eles responsáveis por 13% do espaço amostral.

Figura 35 – Relação de desempenho Disciplina 1: Semestre 2022.2.

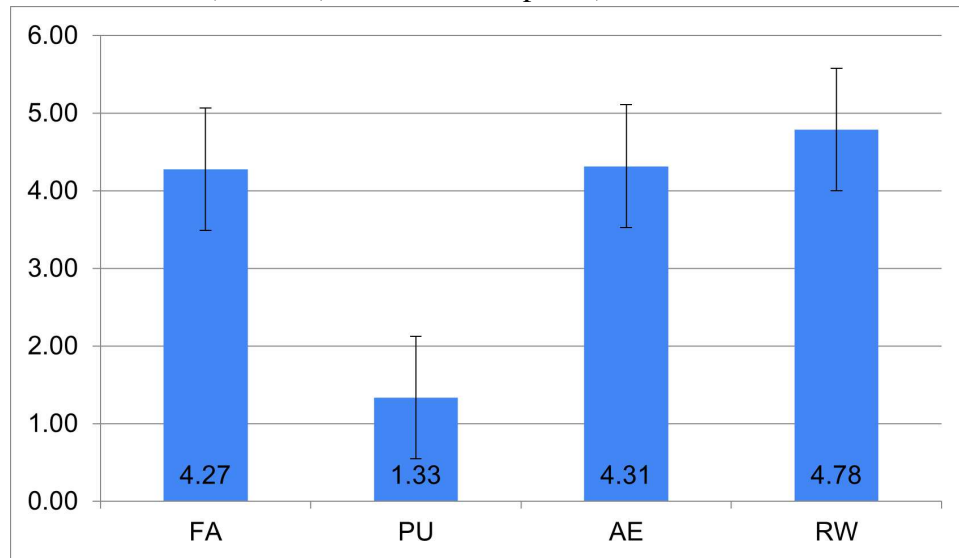


Fonte: Próprio autor.

- **Avaliação de engajamento**

Como citado anteriormente, apenas 17 alunos aceitaram participar da pesquisa do protocolo UES e fornecer suas opiniões para melhorar o desenvolvimento da pesquisa. Na Figura 36 é possível visualizar que todos os indicadores estão na região entre bom e excelente, principalmente RW, que está muito próximo do 5 e PU que está muito próximo do 1.

Figura 36 – Resultado do UES na Disciplina 1: Semestre 2022.2, onde: FA (Atenção Focada), PU (Usabilidade Percebida), AE (Apelo Estético) e RW (Grau de Recompensa).



Fonte: Próprio autor.

#### 4.1.3.2 Resultados qualitativos

As considerações dos alunos sobre o LSRV foram muito boas, com diversos elogios. Em geral, os alunos elogiaram a construção dos componentes e suas respectivas texturas. Um dos pontos de melhoria comentado pelos discentes foram as simulações que poderiam ser mais realistas, como pode ser visto abaixo:

- "Acredito que não ver o funcionamento interno prejudicou um pouco a minha vivência.";
- "Acredito que o esquemático está ótimo.";
- "Layout agradável e um pouco mais intuitivo o uso.".

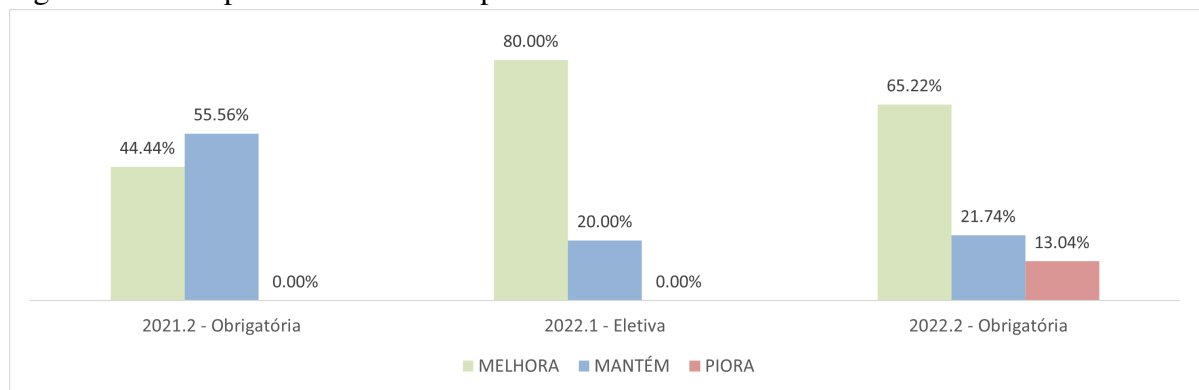
#### 4.1.4 Análise das turmas piloto

Como citado anteriormente no início do Capítulo 4, o objetivo de comparar as turmas piloto entre si é de aferir quais foram os pontos positivos e negativos dessa primeira parte do experimento. Nesse sentido, na Figura 37 é possível visualizar o comparativo de desempenho das três turmas piloto. Como salientado anteriormente, o objetivo das turmas piloto é de comprovar que a utilização do LSRV, juntamente com uma estratégia de ensino focado na revisão de conceitos, conseguem melhorar o desempenho de turma.

#### 4.1.4.1 Análise das avaliações de aprendizado e opiniões discentes

É importante salientar novamente que, durante os testes piloto, foram utilizadas três estratégias diferentes para o uso do LSRV e, independente delas durante os três semestres, é possível observar, na Figura 37, que mais de 80% dos alunos mantiveram ou melhoraram seu desempenho, podendo ser observado um impacto maior no perfil de turma eletiva. Nesse sentido, o LSRV demonstrou ser uma boa ferramenta para revisão de conceitos.

Figura 37 – Comparativo das turmas piloto.



Fonte: Próprio autor.

Outro ponto importante a destacar é o cruzamento das opiniões com os resultados. Como destacado na subseção 4.1.1.2, os alunos do semestre 2021.2 observaram pontos relevantes de melhoria na estratégia de ensino apresentada, o que pode ter refletido diretamente no grau de aproveitamento da ferramenta e, conseqüente, no desempenho da turma. Já as turmas 2022.1 e 2022.2, nas quais não houve comentários negativos referentes às estratégias de ensino utilizadas, uma porcentagem maior de alunos conseguiu melhorar o desempenho discente, como pode ser observado na Figura 37, nas colunas 2022.1 - Eletiva e 2022.2 - Obrigatória.

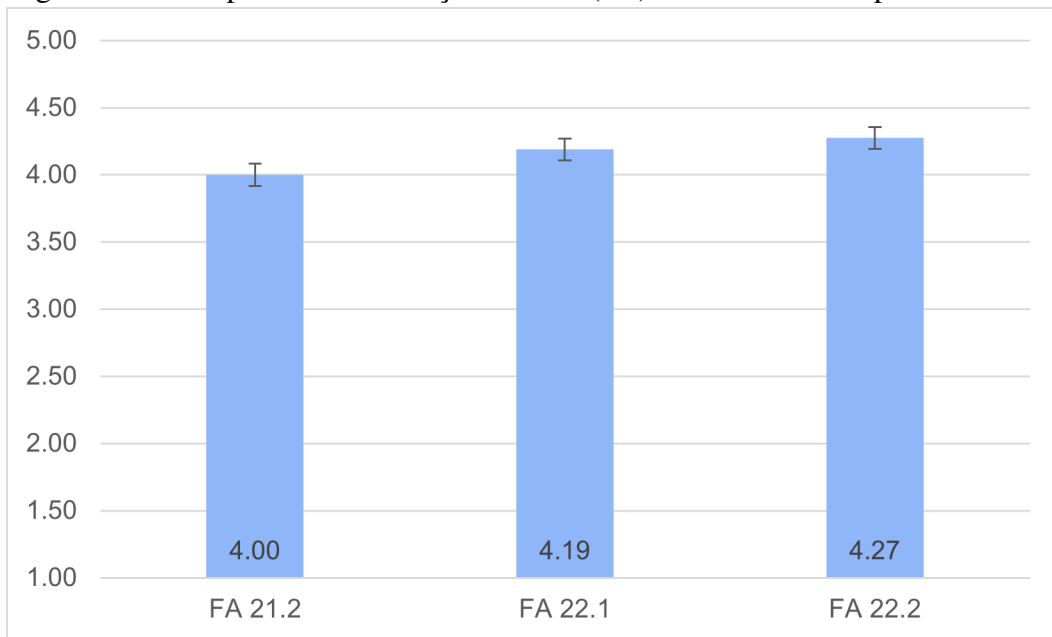
#### 4.1.4.2 Análise das avaliações de engajamento e opiniões discentes

Referente aos resultados das avaliações de engajamento, é necessário fazer o comparativo de cada um dos indicadores de forma separada, sobrelevando, novamente, que os valores possuem nota mínima unitária e nota máxima no valor de cinco. O primeiro dos indicadores a ser abordado é a Atenção Focada (FA). Na Figura 38 é possível visualizar que o grau de atenção dos alunos, para com o uso do LSRV, foi aumentando com o decorrer dos semestres.

Dentre os motivos que podem explicar esse comportamento, é necessário destacar

dois. O primeiro deles é referente à mudança da estratégia de ensino pelas opiniões dos alunos ofertadas nas subseções 4.1.1.2, 4.1.2.2 e 4.1.3.2. Já a segunda é o fato de que o LSRV, durante os testes pilotos, estava em constante desenvolvimento. Fato esse que demonstra que ao se acatar as modificações propostas pelos alunos, o engajamento discente tende a aumentar.

Figura 38 – Comparativo da Atenção Focada (FA) dentre as turmas piloto.



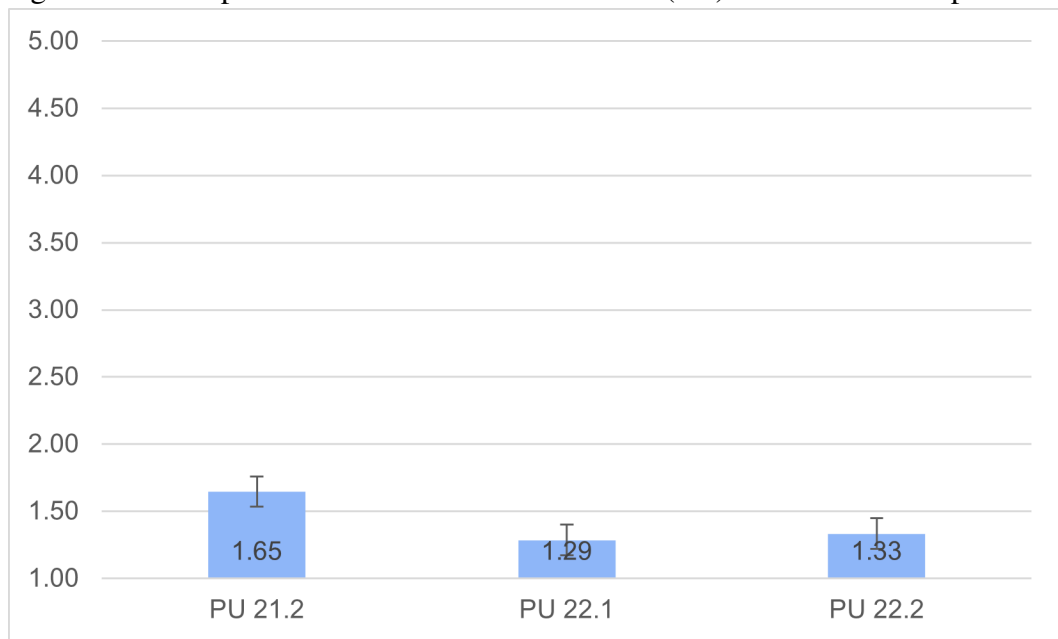
Fonte: Próprio autor.

O próximo a se destacar é a Usabilidade Percebida (PU), que quantifica o esforço do aluno em relação à atenção na aula. É necessário lembrar que quanto menor este indicador for, melhor é o resultado.

Nesse sentido, na Figura 39 é mostrado um resultado complementar ao da Figura 38. No primeiro semestre, já foi possível adquirir uma boa nota, entre 2 e 1, mas com a mudança da estratégia de ensino<sup>13</sup>, os indicadores caíram muito em valor e permaneceram praticamente iguais nos outros dois semestres. Esse fato da queda, seguida pela manutenção entre dois semestres seguidos, além do fato do comentário dos discentes sobre as estratégias de ensino, evidenciam que a estratégia proposta foi eficaz.

<sup>13</sup> No primeiro semestre de teste, 2021.2, a estratégia era de Aula Livre e no semestre seguinte foi aplicada outra estratégia baseada nos comentários dos alunos para com o modelo aplicado no primeiro semestre de teste da turma piloto.

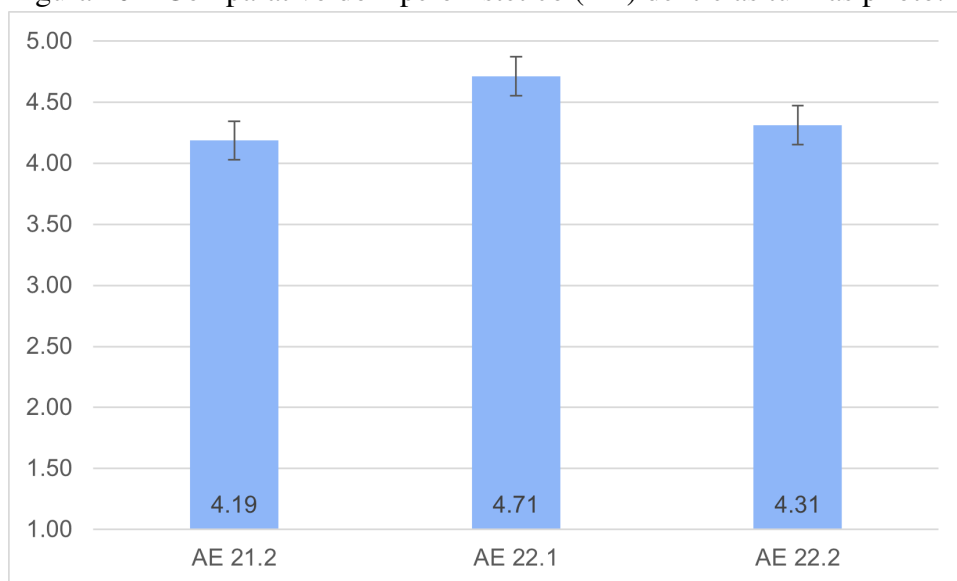
Figura 39 – Comparativo da Usabilidade Percebida (PU) dentre as turmas piloto.



Fonte: Próprio autor.

Por conseguinte, o Apelo Estético (AE) é o próximo indicador a se destacar, tendo como principal objetivo o de retratar quanto os alunos gostaram dos aspectos visuais e interativos apresentados em RV. Na Figura 40 é possível visualizar que na disciplina obrigatória houve um menor apelo estético, apesar da nota alta, em relação à turma eletiva. Em contrapartida, também é possível visualizar uma melhora no indicador das disciplinas obrigatórias, indo de 4,19 para 4,31, mostrando o impacto das melhorias feitas, ao se observar as opiniões dos discentes.

Figura 40 – Comparativo do Apelo Estético (AE) dentre as turmas piloto.

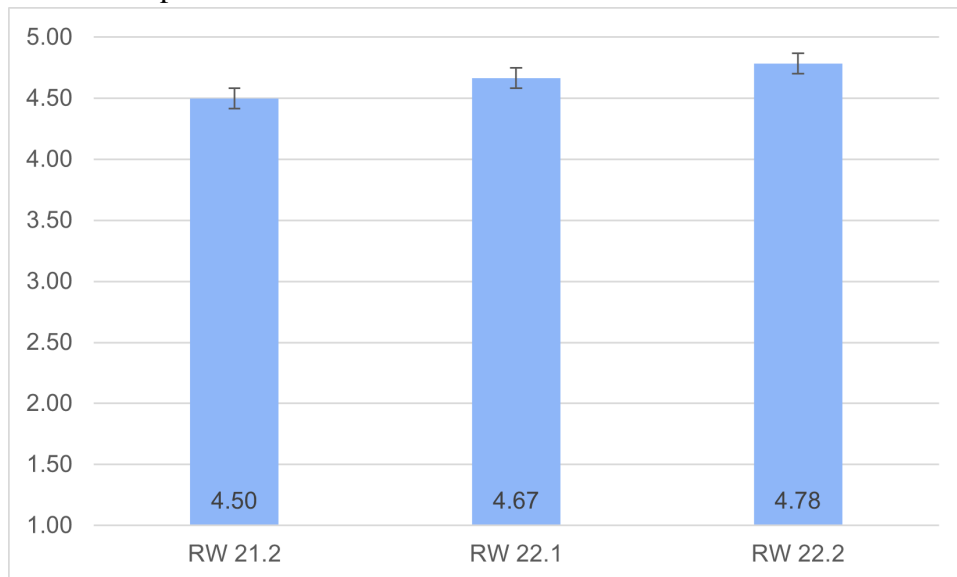


Fonte: Próprio autor.

O último indicador a ser contemplado na turma piloto é o Fator de Recompensa (RW) que especifica o quão os alunos recomendam o LSRV, bem como o grau de felicidade por participar da experiência. Nesse sentido, na Figura 41 é possível visualizar que houve uma melhora constante nesse indicador com o passar dos semestres.

É importante salientar que, desde o primeiro semestre de aplicação, o indicador RW já era bastante alto. Cruzando esses dados com os comentários registrados, é possível constatar que, mesmo com o LSRV tendo muitos pontos de melhoria, na época, os alunos já ficaram muito satisfeitos com a inovação proposta no processo de ensino-aprendizagem.

Figura 41 – Comparativo do Fator de Recompensa (RW) dentre as turmas piloto.



Fonte: Próprio autor.

É imprescindível salientar que, com os resultados ilustrados nas Figuras desta subseção 4.1.4, os objetivos previamente estabelecidos para turmas piloto foram cumpridos. A ideia das turmas piloto era de testar diversas estratégias de ensino, bem como desenvolver a ferramenta a um patamar de excelência para ser utilizada em turmas definitivas e, dessa forma, comparar o ensino usando o LSRV com metodologias mais tradicionais de ensino.

Assim, a utilização do LSRV como ambiente para revisar um conteúdo demonstrou indicativos positivos, tornando-o elegível para testes em turmas definitivas ao comparar o uso da ferramenta com uma metodologia expositiva de ensino. Nesse sentido, a terceira estratégia, de aula parcialmente roteirizada foi a mais bem aceita pelos discentes e a opção de escolha para ser utilizada nas turmas definitivas. Foi optado, também, por pequenos ajustes no cronograma de

acordo com a disciplina. Para a turma definitiva da Disciplina 1<sup>14</sup>, por ser a primeira experiência de muitos em uma subestação, optou-se por utilizar mais tempo introduzindo os componentes. Já para a turma definitiva da Disciplina 2<sup>15</sup>, por ser uma disciplina eletiva e mais específica do curso, optou-se por focar mais na casa de comando e na proteção dos equipamentos. Importante salientar que o cronograma é o mesmo, com ajustes apenas no tempo de cada uma das etapas de acordo com o público alvo.

## 4.2 Resultados das turmas definitivas

Referente às turmas definitivas, como o objetivo é diferente do objetivo das turmas piloto<sup>16</sup>, também é necessário que a análise seja feita de forma diferente. Com isso em vista, para as turmas definitivas, as aulas foram ministradas com a mesma versão do LSRV em ambas as turmas e a análise foi feita por disciplina, ao invés de comparar as turmas entre si.

O objetivo das turmas definitivas é de dividir a turma em duas partes, de forma aleatória, e comparar a vivência de alunos de uma metodologia tradicional de ensino com a experiência dos alunos que participaram da utilização do LSRV. Sendo assim, a primeira turma a ser analisada é a do semestre 2023.1. Além disso, é importante lembrar que, para melhorar o processo de validação parcial<sup>17</sup>, há a utilização de grupos focais<sup>18</sup>, cujos alunos foram escolhidos de forma aleatória e em conformidade com a vontade dos participantes.

### 4.2.1 *Semestre 2023.1: Proteção do Sistema Elétrico de Potência*

Para a primeira turma definitiva a ser testada e a quarta turma em ordem cronológica, conforme a Figura 30, a experiência foi realizada com um total de 14 participantes para avaliação de desempenho, sendo que 11 deles preencheram os procolo UES e emitiram opinião sobre a experiência.

<sup>14</sup> Geração, Transmissão e Distribuição.

<sup>15</sup> Proteção do Sistema Elétrico de Potência.

<sup>16</sup> Destacando, mais uma vez, que o objetivo das turmas definitivas é de comparar a vivência entre grupo controle, com aula tradicional, e grupo experimental, com a aula ministrada com a utilização do LSRV.

<sup>17</sup> Para que a validação seja definitiva, a experiência deve ser replicada em larga escala. Portanto, este trabalho é classificado como uma validação parcial.

<sup>18</sup> Técnica de pesquisa qualitativa, derivada das entrevistas grupais, que coleta informações por meio das interações grupais e é baseada na comunicação e na interação.



#### 4.2.1.1 Análise das avaliações de aprendizado e comentários discentes

Na Tabela 7 são ilustrados os resultados estatísticos do desempenho acadêmico dos discentes ao serem separados em turma controle e turma experimental. Nela é possível observar que a turma experimental, a qual teve a vivência do LSRV, teve uma melhora substancial nas notas, tendo melhores resultados tanto na média quanto na mediana.

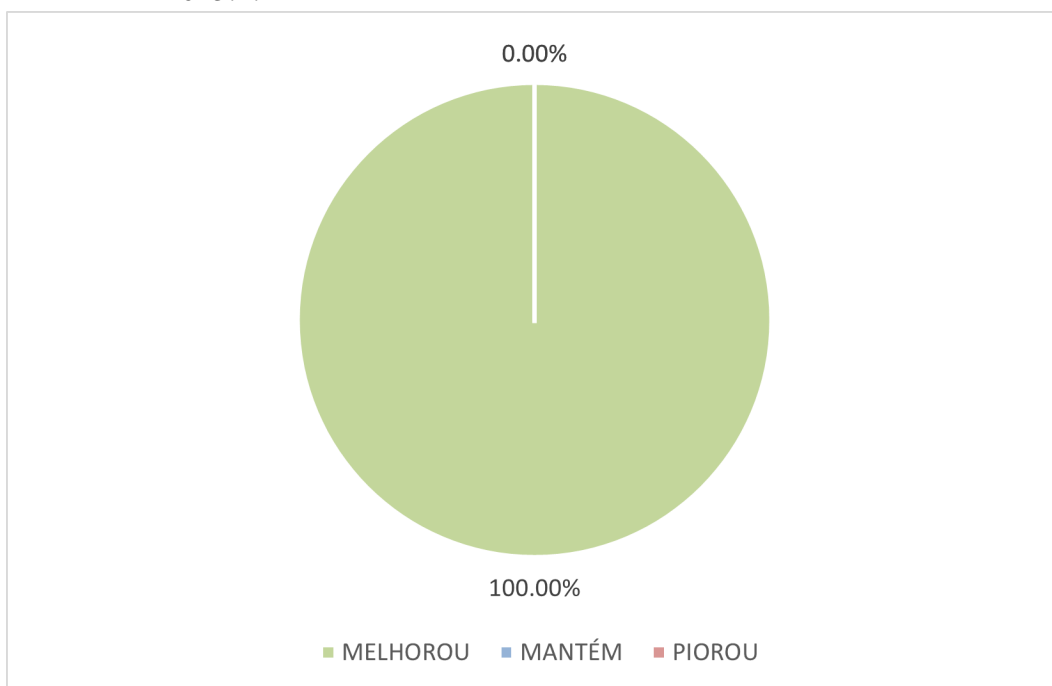
Tabela 7 – Resultados pré-teste/pós-teste Disciplina 2: Semestre 2023.1.

Testes	Média Pré-Teste	Média Pós-Teste	Mediana Pré-Teste	Mediana Pós-Teste	Desvio P. Pré-Teste	Desvio P. Pós-Teste
Experimental	2,28	7,42	2,00	8,00	2,49	2,32
Controle	3,42	6,85	4,00	6,00	1,39	0,98

Fonte: Próprio autor.

Na Figura 42 é descrito o comportamento do desempenho dos alunos em relação ao pré-teste e ao pós-teste para a turma experimental. Nela é possível ver que todos os alunos conseguiram melhorar sua performance nos testes. Já na Figura 43 é mostrado o comportamento da turma controle, na qual um dos alunos manteve seu desempenho constante após a aula de laboratório.

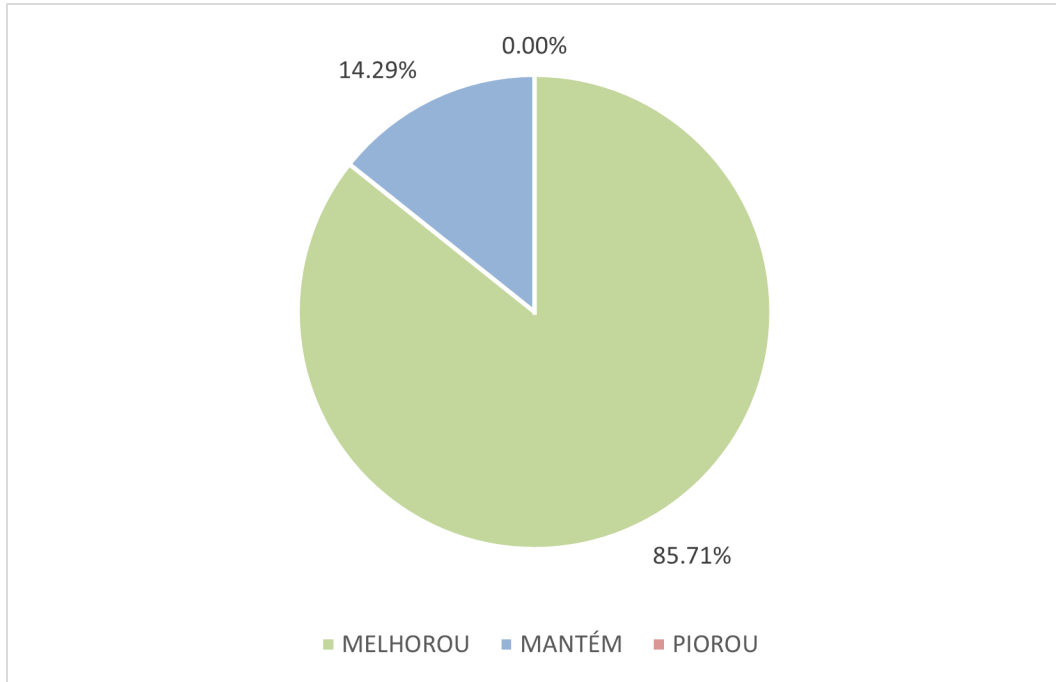
Figura 42 – Relação de desempenho Disciplina 2 turma experimental: Semestre 2023.1.



Fonte: Próprio autor.

O ponto mais importante ao se observar no comparativo das Figuras 42 e 43 é que a turma experimental, utilizando do LSRV, conseguiu melhorar o desempenho discente bem mais que uma turma que teve uma aula de laboratório com práticas de relés.

Figura 43 – Relação de desempenho Disciplina 2 turma controle: Semestre 2023.1.

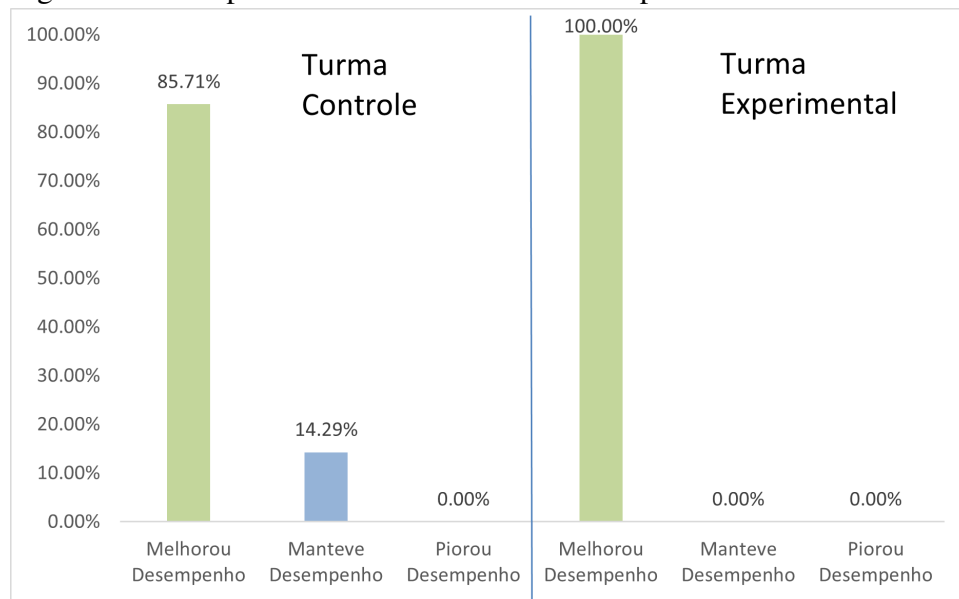


Fonte: Próprio autor.

Nesse sentido, o primeiro ponto que deve ser analisado nesta turma são os resultados expressos na Tabela 7. Nela é possível visualizar que o ambas as turmas, tanto a controle, quanto a experimental, conseguiram melhorar seu desempenho de forma significativa, haja vista que, em ambas, a média mais que dobrou.

Já na Figura 44 é possível visualizar a diferença de desempenho entre ambas as turmas. Como citado anteriormente, aulas de laboratórios são muito importantes para a fixação do conteúdo, principalmente em matérias mais específicas. Dessa forma, na Figura 44 é ilustrado o comparativo do desempenho entre as turmas, no que se refere à melhora, manutenção ou piora da nota após as aulas do experimento em questão.

Figura 44 – Comparativo das turmas controle e experimental da turma 2023.1.



Fonte: Próprio autor.

Com essa análise, é possível aferir que o uso do LSRV, juntamente com a estratégia proposta, foi mais impactante para a melhora do processo de ensino-aprendizagem do que um laboratório prático, no que se refere à avaliação conteudística. É possível complementar essa afirmação com algumas opiniões dos alunos ao serem perguntados os principais pontos positivos da utilização do LSRV, tais como:

- *"Consegui visualizar pontos abstratos nas aulas totalmente teóricas.";*
- *"A possibilidade de imersão e proximidade com os equipamentos e dispositivos da subestação, bem como os eventos que nela ocorrem, e a capacidade de prender a atenção do aluno.";*
- *"Ver os equipamentos na sua forma real (pela simulação) e na representação gráfica me ajudou a compreender melhor o assunto da cadeira e os componentes da subestação. Ver cada vão separado também foi muito proveitoso".*

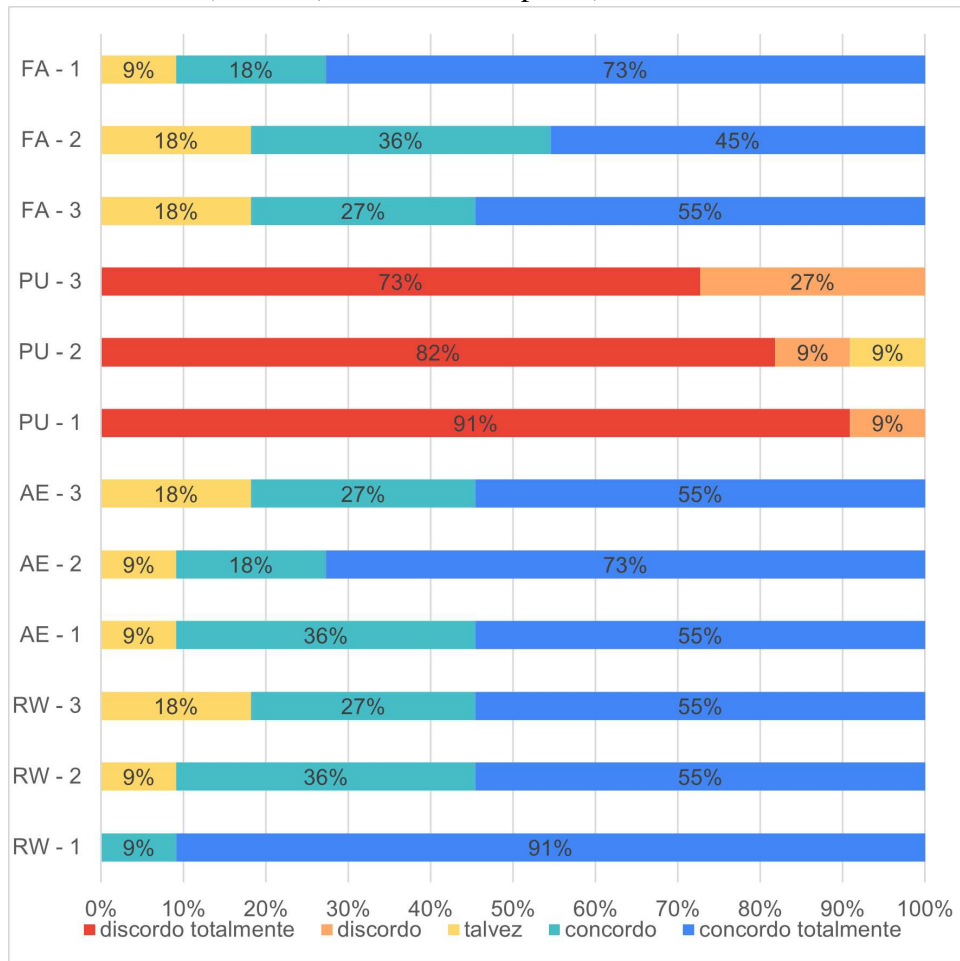
Além disso, durante o Grupo Focal, foi de consenso geral que a experiência foi muito proveitosa, possibilitando compreender componentes e eventos que não haviam sido absorvidos da melhor forma pelos discentes durante as aulas expositivas de slide.

#### 4.2.1.2 Análise das avaliações de engajamento e opinião dos discentes

Para os resultados do UES, destacam-se dois fatores. O primeiro deles é referente aos valores absolutos em duas estatísticas, FA e PU, os quais atingiram os melhores valores do

experimento até o momento. O segundo ponto a ser sobrelevado é que os limites superiores dos desvios padrões em FA, AE e RW todos os indicadores ficaram acima do valor 5, como pode ser visto na Figura 45. Tal ponto é importante, pois significa que mais alunos, do espaço amostral de dados, deram nota máxima para as avaliações em seus respectivos indicadores.

Figura 45 – Resultado do UES na Disciplina 2: Semestre 2023.1, onde: FA (Atenção Focada), PU (Usabilidade Percebida), AE (Apelo Estético) e RW (Grau de Recompensa).



Fonte: Próprio autor.

Com o resultado demonstrado na Figura 42, foi possível calcular o UES-Score. O cálculo é realizado ao inverter os valores dos indicadores referentes ao PU, se o valor for 1 vira 5, se for 2 vira 4 e assim por diante, e deve ser realizado uma média entre os doze valores com a finalidade de adquirir um valor único que expresse o engajamento. O valor do UES Score desta turma foi excelente, adquirindo a marca dos de 4,57.

Como citado anteriormente, nas turmas definitivas foi utilizada a metodologia de grupo focal. Nesse sentido, a opinião dos alunos foi de que a utilização do LSRV foi muito

proveitosa, com muitos elogios às simulações desenvolvidas e aos componentes modelados. Pela primeira vez, não houve um comentário de melhoria no que já havia sido desenvolvido, apenas novas ideias para implementação, como a de existir um ambiente específico para estudo do transformador, como pode ser visto a seguir:

- *"A possibilidade de imersão e proximidade com os equipamentos e dispositivos da subestação, bem como os eventos que nela ocorrem, e a capacidade de prender a atenção do aluno.";*
- *"Nenhuma, foi muito boa.";*
- *"Acho que seria interessante mostrar os equipamentos de forma isolada também, uma visualização tridimensional deles para visualizar melhor".*

Não obstante, ainda referente aos resultados do UES, a Figura 45 mostra que todos os indicadores mantiveram suas notas entre bom e excelente (entre 4 e 5 para FA, AE e RW e entre 1 e 2 para PU). Além disso, os comentários dos alunos comprovam os resultados defendidos pelo UES, conforme pode ser visto abaixo:

- O seguinte comentário do aluno: *"A virtualização possibilita uma visualização das estruturas estudadas na teoria e interação com o sistema de operação da subestação, proporcionando uma experiência prática muito eficiente para a plena compreensão do funcionamento operacional do sistema."* reflete o desempenho do indicador de Apelo Estético e Grau de Recompensa, haja vista que o discente gostou muito da experiência e do ambiente que viu.
- O seguinte comentário do aluno: *"A possibilidade de imersão e proximidade com os equipamentos e dispositivos da subestação, bem como os eventos que nela ocorrem, e a capacidade de prender a atenção do aluno."* mostra que, realmente, os discentes se mantiveram focados, dada a imersão, e que não lhes foi custoso prestar atenção no experimento. Tais fatos justificam a nota de Atenção focada ser tão alta e a de Usabilidade Percebida ser tão baixa.

#### **4.2.2 Semestre 2023.2: Geração, Transmissão e Distribuição**

Referente à quinta turma da ordem cronológica dos experimentos e à terceira da Disciplina 1<sup>19</sup>, um total de 22 alunos fizeram parte do experimento. Nesse sentido, apenas 12 discentes optaram por responder ao protocolo UES e deixar seus comentários opinativos ao final

<sup>19</sup> Geração, Transmissão e Distribuição.

da pesquisa.

#### 4.2.2.1 Análise das avaliações de aprendizado e comentários discentes

Na Tabela 8 é exibido alguns resultados estatísticos referentes ao desempenho discente dos 22 alunos que participaram do experimento.

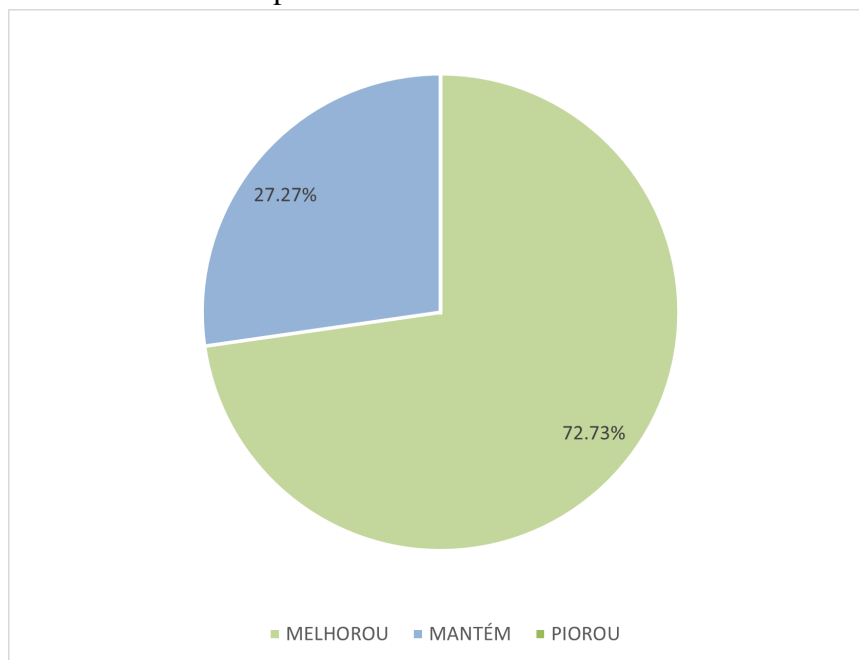
Tabela 8 – Resultados pré-teste/pós-teste Disciplina 1: Semestre 2023.2.

Testes	Média Pré-Teste	Média Pós-Teste	Mediana Pré-Teste	Mediana Pós-Teste	Desvio P. Pré-Teste	Desvio P. Pós-Teste
Experimental	1,63	4,36	2,00	4,00	1,43	1,66
Controle	5,09	5,09	6,00	6,00	2,46	1,78

Fonte: Próprio autor.

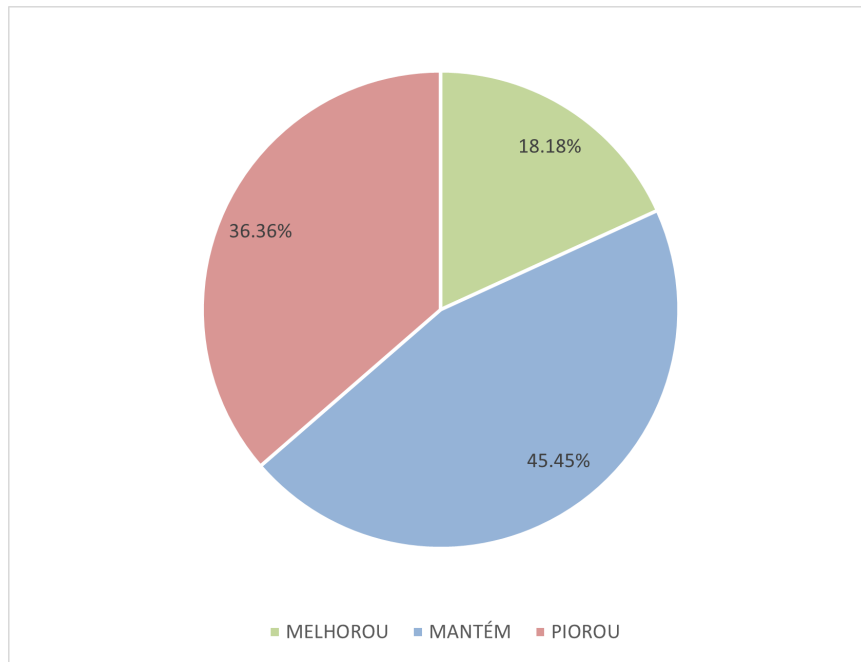
Ao avaliar apenas os resultados estatísticos, pode-se inferir que na turma experimental houve melhora nos resultados e na turma controle manteve-se o desempenho. Todavia, nas Figuras 46 e 47 são ilustradas as relações de desempenho dos alunos em relação à comparação das notas de pós-teste com pré-teste entre as turmas controle e experimental. Nelas é possível observar o contraste entre turmas experimentais, que participaram do experimento por completo, e da turma controle, que não participou.

Figura 46 – Relação de desempenho Disciplina 1: Semestre 2023.2 turma experimental.



Fonte: Próprio autor.

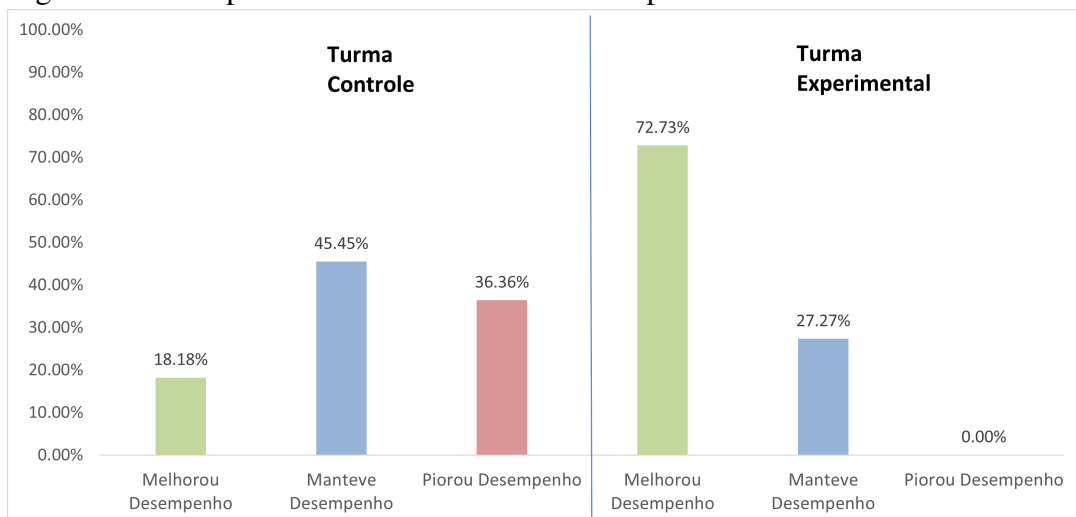
Figura 47 – Relação de desempenho Disciplina 1: Semestre 2023.2 turma controle.



Fonte: Próprio autor.

Após analisar a comparação entre os gráficos, é possível aferir que o uso do LSRV, juntamente com a estratégia proposta, foram mais significativas para a melhora do processo de ensino-aprendizagem do que uma aula de revisão expositiva, no que se refere à avaliação conteudística, conforme é mostrado na Figura 48.

Figura 48 – Comparativo das turmas controle e experimental da turma 2023.2.



Fonte: Próprio autor.

É possível ratificar essa afirmação ao analisar os resultados expressos na Figura 49 e os comentários dos alunos ao serem perguntados os principais pontos positivos da utilização do

LSRV, tais como:

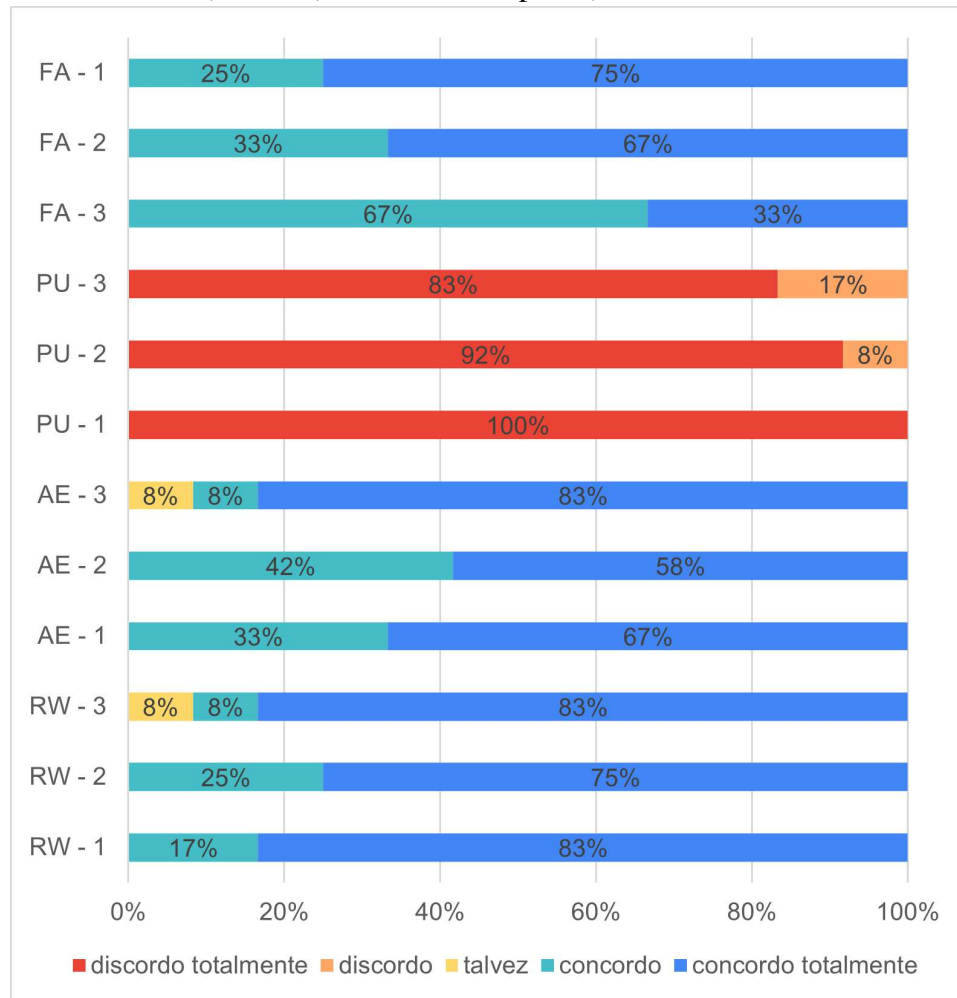
- "Explorar os componentes da subestação, sem necessidade de presença física no local, evitando possíveis acidentes. Outro fator é a possibilidade de, virtualmente, ser possível se aproximar de alguns componentes para melhor visualização, o que seria extremamente perigoso na vida real. Um terceiro ponto é poder simular incidentes sem prejudicar a distribuição de energia elétrica." Aqui é evidenciada uma justificativa para o grau de recompensa com nota bastante elevada;
- "O principal ponto positivo é a oportunidade de conhecer os equipamentos, uma vez que foram modelados de uma forma bem realista, de uma subestação real, sem a necessidade de locomoção ou de ter as precauções necessárias de uma visita física até o local." Com o comentário do discente é possível verificar a motivação da estatística de apelo estético possuir uma nota elevada.

#### *4.2.2.2 Análise das avaliações de engajamento e opinião dos discentes*

Como citado anteriormente, apenas 12 alunos aceitaram participar da pesquisa do protocolo UES e fornecer os comentários para o desenvolvimento da pesquisa. Na Figura 49 é possível visualizar que todos os indicadores estão na região entre bom e excelente, principalmente RW, que está muito próximo do 5 e PU, que atingiu o menor resultado da pesquisa. O UES-Score desta turma foi o maior dentre as turmas definitivas, adquirindo um valor de 4,74.



Figura 49 – Resultado do UES na Disciplina 1: Semestre 2023.2, onde: FA (Atenção Focada), PU (Usabilidade Percebida), AE (Apelo Estético) e RW (Grau de Recompensa).



Fonte: Próprio autor.

As considerações dos alunos sobre o LSRV foram muito boas, com diversos elogios. Em geral, os alunos elogiaram a construção dos componentes e suas respectivas texturas. Alguns dos pontos de melhoria comentados pelos discentes são de utilizar de tecnologia imersiva e de possibilitar uma maior interação com os quadros da casa de comando, como pode ser visto abaixo:

- *"O que senti falta foi de um ambiente imersivo. O ambiente em si está ótimo, vendo que ainda está em processo, mas seria muito interessante que o aluno conseguisse realmente mergulhar dentro da RV.";*
- *"O uso da realidade virtual durante as aulas consegue propiciar uma experiência realística, em que os alunos conseguem compreender o funcionamento e a dinâmica do ambiente sem ser necessário estar presente e sem a necessidade de se colocar em risco, sabendo que*

*a subestação pode acabar sendo um ambiente perigoso quando não se toma as devidas precauções. Dessa forma, a RV propicia um contato maior com a planta e um aprendizado mais dinâmico."*

- *"Sugiro abrir os quadros quando prontos e tentar uma forma de deixar a câmera mais móvel para ver os componentes com detalhes."*

## 5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

O advento de novas tecnologias em Realidade Virtual, bem como o barateamento das já consolidadas, tem sido um dos pilares responsáveis pela grande inovação no processo de ensino-aprendizagem de diversos cursos de engenharia. Nesse contexto, o curso de Engenharia Elétrica é um dos destaques pelo grau de abstração em inúmeras disciplinas ofertadas no curso de graduação e, portanto, pesquisadores e educadores do mundo todo têm demonstrado preocupação em melhorar metodologias de ensino e criar ferramentas digitais de ensino.

O presente trabalho apresentou o desenvolvimento de uma ferramenta livre e de uso gratuito, disponibilizada no site e no Github do GREI, que além de oferecer uma melhor visualização dos componentes complexos presentes em uma subestação de energia elétrica, inova em possuir simulações de eventos possíveis de ocorrer nas subestações, tais como: curto-circuito e manutenção de equipamentos. Além da ferramenta, também foram descritas diversas estratégias de ensino utilizadas para realizar os processos ligados ao ensino, bem como seus respectivos pontos fortes e fracos.

Ademais, uma das inovações presentes no trabalho é a validação do uso da ferramenta e da metodologia por meio da triangulação de resultados quantitativos e qualitativos, como desempenho acadêmico, engajamento e opinião. Em todos os semestres de aplicação, inclusive nos pilotos, há pelo menos duas metodologias de avaliação para legitimar o impacto positivo que a utilização da ferramenta desenvolvida teve no processo de ensino-aprendizagem.

As análises dos dados obtidos evidenciam que, por meio da utilização do LSRV, não apenas foi possível melhorar o desempenho discente em avaliações, como deixou a aula mais interessante, aumentando o engajamento dos alunos. O aumento do número de alunos aprovados, melhoria na média e na mediana das notas das turmas são exemplos de dados impactados pelo uso do LSRV nas disciplinas. Além disso, indicadores como Apelo Estético, Usabilidade Percebida, Atenção Focada e Grau de Recompensa são responsáveis por demonstrar o aumento do engajamento dos alunos para com a disciplina.

O LSRV demonstrou ser uma ferramenta promissora no processo de ensino-aprendizagem, tanto por oferecer um ambiente de livre exploração, como por ofertar eventos pré-simulados em RV para uma melhor compreensão didática de conteúdos complexos. Além disso, demonstrou-se que o uso do LSRV melhora o desempenho discente, o engajamento e o interesse pelos conteúdos apresentados nas disciplinas de sistemas elétricos de potência.

## 5.1 Trabalhos Futuros

O LSRV é um software que pode servir de modelo para a criação de outros ambientes em RV para o ensino de estudantes ou treinamento de operadores no setor elétrico. Nesse sentido, apesar dos resultados que comprovam a afirmação destacada acima, ainda há alguns pontos a serem desenvolvidos e testados em trabalhos futuros, como:

- Adaptação do software do LSRV para o uso em tecnologia imersiva;
- Criação de ambientes próprios para estudo e teste em equipamentos;
- Gamificação do software a fim de se poder medir indicadores a partir da simples utilização do LSRV;
- Criação de planos de aula para a utilização do software por outros professores com seus devidos processos de validação;
- Utilização de Nuvem de Pontos para modelar a rede de distribuição de energia elétrica do Campus do Pici;
- Transformação do sistema LSRV em multiusuários.

## REFERÊNCIAS

- ABICHANDANI, P.; MCINTYRE, W.; FLIGOR, W.; LOBO, D. Solar energy education through a cloud-based desktop virtual reality system. **IEEE Access**, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., v. 7, p. 147081–147093, 2019. ISSN 21693536. VREEE.
- AGBO, F. J.; SANUSI, I. T.; OYELERE, S. S.; SUHONEN, J. Application of virtual reality in computer science education: A systemic review based on bibliometric and content analysis methods. **Education Sciences**, MDPI, v. 11, n. 3, p. 142, 2021.
- ARAUJO, R.; ARAUJO, M.; MEDEIROS, F.; OLIVEIRA, B.; ARAUJO, N. Interactive simulator for electric engineering training. **IEEE Latin America Transactions**, IEEE, v. 14, n. 5, p. 2246–2252, 2016.
- ARROYO, E.; ARCOS, J. L. L. Srv: a virtual reality application to electrical substations operation training. In: IEEE. **Proceedings IEEE International Conference on Multimedia Computing and Systems**. [S.l.], 1999. v. 1, p. 835–839.
- ARRUDA, J. S.; SIQUEIRA, L. M. R. de C. Metodologias ativas, ensino híbrido e os artefatos digitais: sala de aula em tempos de pandemia. **Práticas Educativas, Memórias e Oralidades-Rev. Pemo**, v. 3, n. 1, p. e314292–e314292, 2021.
- BARATA, P. N. A.; FILHO, M. R.; NUNES, M. V. Consolidating learning in power systems: Virtual reality applied to the study of the operation of electric power transformers. **IEEE Transactions on Education**, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., v. 58, p. 255–261, 11 2015. ISSN 00189359.
- BERNAL, I. F. M.; LOZANO-RAMÍREZ, N. E.; CORTÉS, J. M. P.; VALDIVIA, S.; MUÑOZ, R.; ARAGÓN, J.; GARCÍA, R.; HERNÁNDEZ, G. An immersive virtual reality training game for power substations evaluated in terms of usability and engagement. **Applied Sciences**, MDPI, v. 12, n. 2, p. 711, 2022.
- BIRCHFIELD, A. B.; OVERBYE, T. J.; DAVIS, K. R. Educational applications of large synthetic power grids. **IEEE Transactions on Power Systems**, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., v. 34, p. 765–772, 1 2019. ISSN 08858950.
- BROOKE, J. Sus: a retrospective. **Journal of usability studies**, Usability Professionals' Association Bloomington, IL, v. 8, n. 2, p. 29–40, 2013.
- CALLAGHAN, M.; SAVIN-BADEN, M.; MCSHANE, N.; EGUILUZ, A. G. Mapping learning and game mechanics for serious games analysis in engineering education. **IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing**, IEEE Computer Society, v. 5, p. 77–83, 1 2017. ISSN 21686750. VREEE<br/>GBL, mas usa coisa em 3D. Vale manter para ver depois.
- CARDOSO, A.; JR, E. L.; LIMA, G. F. M. de; PRADO, P. R. do; FERREIRA, J. N. Vrcemig: a novel approach to power substation control. In: **ACM SIGGRAPH 2016 Posters**. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–2.
- CARDOSO, A.; LAMOUNIER, E.; LIMA, G.; OLIVEIRA, L.; MATTIOLI, L.; JÚNIOR, G.; SILVA, A.; NOGUEIRA, K.; PRADO, P. do; NEWTON, J. Vrcemig: A virtual reality system for real time control of electric substations. In: IEEE. **2013 IEEE Virtual Reality (VR)**. [S.l.], 2013. p. 165–166.

CARNEIRO, J. R. d. S.; VIEIRA, J. S. B. C.; GUENDLER, J. d. A. O uso da aprendizagem baseada em times em um laboratório de uma instituição de ensino superior que utiliza metodologia ativa. 2018.

CARVALHO, J. B. de. Uma revisão sistemática sobre metodologias ativas no ensino da matemática: aprendizagem ativa, protagonismo dos estudantes. **Journal of Education Science and Health**, v. 1, n. 4, p. 1–13, 2021.

CELEITA, D.; HERNANDEZ, M.; RAMOS, G.; PENAFIEL, N.; RANGEL, M.; BERNAL, J. D. Implementation of an educational real-time platform for relaying automation on smart grids. **Electric Power Systems Research**, Elsevier Ltd, v. 130, p. 156–166, 1 2016. ISSN 03787796.

CHOWDHURY, H.; ALAM, F.; MUSTARY, I. Development of an innovative technique for teaching and learning of laboratory experiments for engineering courses. **Energy Procedia**, Elsevier, v. 160, p. 806–811, 2019.

COHEN, M. A.; NIEMEYER, G. O.; CALLAWAY, D. S. Griddle: video gaming for power system education. **IEEE Transactions on Power Systems**, IEEE, v. 32, n. 4, p. 3069–3077, 2016.

COMMISSION, I. E. **IEC TR 61850-1: Communication networks and systems in substations - Part 1: Introduction and overview**. Disponível em: <https://webstore.iec.ch/publication/20071>: Webstore, 2003.

CRISÓSTOMO, D.; MOURA, A.; ROCHA, E.; CRUZ, F.; MOURA, A. Educational software for simulation of power and voltage control in power systems connected with wind farms. **IEEE Latin America Transactions**, IEEE, v. 16, n. 6, p. 1603–1609, 2018.

CYRINO, G. F.; JR, C. L. B.; MATTIOLI, L. R.; CARDOSO, A.; JR, E. A. L.; LIMA, G. F.; RAMOS, D. S. An intuitive vr-based environment for monitoring and control of electrical power substations. **Procedia Computer Science**, Elsevier, v. 201, p. 551–558, 2022.

DEESE, A. S. Development of smart electric power system (seps) laboratory for advanced research and undergraduate education. **IEEE Transactions on Power Systems**, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., v. 30, p. 1279–1287, 5 2015. ISSN 08858950.

FAROOQ, A.; WU, X. Review of edutainment immersive visualization (iv) development tools for simulating renewable energy systems (ress). **Energy Strategy Reviews**, Elsevier Ltd, v. 44, 11 2022. ISSN 2211467X.

FILHO, J. M. **Manual de Equipamentos Elétricos** . [S.l.]: Grupo Gen-LTC, 2019.

FILHO, J. M. **Subestações de alta tensão**. [S.l.]: Grupo Gen-LTC, 2021.

GARCIA-ZUBIA, J.; CUADROS, J.; ROMERO, S.; HERNANDEZ-JAYO, U.; ORDUNA, P.; GUENAGA, M.; GONZALEZ-SABATE, L.; GUSTAVSSON, I. Empirical analysis of the use of the visir remote lab in teaching analog electronics. **IEEE transactions on education**, IEEE, v. 60, n. 2, p. 149–156, 2016.

GASPAR, J.; CRUZ, T.; LAM, C.-T.; SIMÕES, P. Smart substation communications and cybersecurity: A comprehensive survey. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, IEEE, 2023.

GODOI, A. F.; FERREIRA, J. V. Metodologia ativa de aprendizagem para o ensino em administração: relatos da experiência com a aplicação do peer instruction em uma instituição de ensino superior. **REA-Revista Eletrônica de Administração**, v. 15, n. 2, p. 337–a, 2017.

HAMURCU, A.; TIMUR, Ş.; RIZVANOĞLU, K. An overview of virtual reality within industrial design education. **Journal of Engineering, Design and Technology**, Emerald Publishing Limited, v. 18, n. 6, p. 1889–1905, 2020.

HARTWIG, A. K.; SILVEIRA, M.; FRONZA, L.; MATTOS, M.; KOHLER, L. P. de A. Metodologias ativas para o ensino da computação: uma revisão sistemática e um estudo prático. In: **Anais do Workshop de Informática na Escola**. [S.l.: s.n.], 2019. v. 25, n. 1, p. 1139–1143.

HEYDT, G. T.; KEZUNOVIC, M.; SAUER, P. W.; BOSE, A.; MCCALLEY, J. D.; SINGH, C.; JEWELL, W. T.; RAY, D. J.; VITTAL, V. Professional resources to implement the “smart grid”. In: **IEEE. 41st North American power symposium**. [S.l.], 2009. p. 1–8.

HUANG, Q.; JING, S.; LI, J.; CAI, D.; WU, J.; ZHEN, W. Smart substation: State of the art and future development. **IEEE Transactions on Power Delivery**, IEEE, v. 32, n. 2, p. 1098–1105, 2016.

JAGUARIBE, D.; FREITAS, R.; FURTADO, R.; BARROSO, G.; JÚNIOR, A.; LIMA, M.; LEÃO, R.; MELO, L. Laboratório de subestação baseado em realidade virtual aplicado ao ensino de engenharia elétrica. In: **ERAC. XIX Encontro Regional Ibero-americano do CIGRE (ERAC)**. [S.l.], 2023. Seção CED2.

JAGUARIBE, D. R. Laboratório de subestação baseado em realidade virtual aplicado ao ensino de engenharia elétrica. 2022.

JEBB, A. T.; NG, V.; TAY, L. A review of key likert scale development advances: 1995–2019. **Frontiers in psychology**, Frontiers Media SA, v. 12, p. 637547, 2021.

JERALD, J. **The VR book: Human-centered design for virtual reality**. [S.l.]: Morgan & Claypool, 2015.

JÚNIOR, J. N. da S.; OLIVEIRA, J. M. de S.; WINUM, J.-Y.; JUNIOR, A. J. M. L.; ALEXANDRE, F. S. O.; NASCIMENTO, D. M. do; SOUSA, U. Silva de; PIMENTA, A. T. Á.; MONTEIRO, A. J. Interactions 500: design, implementation, and evaluation of a hybrid board game for aiding students in the review of intermolecular forces during the covid-19 pandemic. **Journal of Chemical Education**, ACS Publications, v. 97, n. 11, p. 4049–4054, 2020.

KABASHI, Q.; SHABANI, I.; CAKA, N. Analysis of the student dropout rate at the faculty of electrical and computer engineering of the university of prishtina, kosovo, from 2001 to 2015. **IEEE Access**, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., v. 10, p. 68126–68137, 2022. ISSN 21693536.

KAMIŃSKA, D.; SAPIŃSKI, T.; AITKEN, N.; ROCCA, A. D.; BARAŃSKA, M.; WIETSMA, R. Virtual reality as a new trend in mechanical and electrical engineering education. **Open Physics**, De Gruyter Open, v. 15, n. 1, p. 936–941, 2017.

KAMIŃSKA, D.; ZWOLIŃSKI, G.; WIAK, S.; PETKOVSKA, L.; CVETKOVSKI, G.; BARBA, P. D.; MOGNASCHI, M. E.; HAAMER, R. E.; ANBARJAFARI, G. Virtual reality-based training: Case study in mechatronics. **Technology, Knowledge and Learning**, Springer, v. 26, p. 1043–1059, 2021.

KOTSAMPOPOULOS, P. C.; KLEFTAKIS, V. A.; HATZIARGYRIOU, N. D. Laboratory education of modern power systems using phil simulation. **IEEE Transactions on Power Systems**, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., v. 32, p. 3992–4001, 9 2017. ISSN 08858950.

KRÜGER, L. M. *et al.* Método tradicional e método construtivista de ensino no processo de aprendizagem: uma investigação com os acadêmicos da disciplina contabilidade iii do curso de ciências contábeis da universidade federal de santa catarina. 2013.

LAAYATI, O.; HADRAOUI, H. E.; GUENNOUI, N.; BOUZI, M.; CHEBAK, A. Smart energy management system: Design of a smart grid test bench for educational purposes. **Energies**, MDPI, v. 15, n. 7, p. 2702, 2022.

LAINE, T. H. Mobile educational augmented reality games: A systematic literature review and two case studies. **Computers**, MDPI, v. 7, n. 1, p. 19, 2018.

LAMPROPOULOS, G.; KERAMOPOULOS, E.; DIAMANTARAS, K.; EVANGELIDIS, G. Augmented reality and gamification in education: A systematic literature review of research, applications, and empirical studies. **applied sciences**, MDPI, v. 12, n. 13, p. 6809, 2022.

LANZO, J. A. di; VALENTINE, A.; SOHEL, F.; YAPP, A. Y.; MUPARADZI, K. C.; ABDELMALEK, M. A review of the uses of virtual reality in engineering education. **Computer Applications in Engineering Education**, Wiley Online Library, v. 28, n. 3, p. 748–763, 2020.

LAUSS, G. F.; FARUQUE, M. O.; SCHODER, K.; DUFOUR, C.; VIEHWEIDER, A.; LANGSTON, J. Characteristics and design of power hardware-in-the-loop simulations for electrical power systems. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, IEEE, v. 63, n. 1, p. 406–417, 2015.

LI, C.; WU, Y.; ZHANG, H.; YE, H.; LIU, Y.; LIU, Y. Steps: A portable dynamic simulation toolkit for electrical power system studies. **IEEE Transactions on Power Systems**, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., v. 36, p. 3216–3226, 7 2021. ISSN 15580679.

LI, F.; QIAO, W.; SUN, H.; WAN, H.; WANG, J.; XIA, Y.; XU, Z.; ZHANG, P. Smart transmission grid: Vision and framework. **IEEE transactions on Smart Grid**, IEEE, v. 1, n. 2, p. 168–177, 2010.

MACHADO, L. C.; FACCHINI, G.; GEHRMANN, A. L.; NODARI, C. T.; GARCÍA, D. S. P. Comparação da sensação de presença entre simulador de direção imersivo e não imersivo. In: **Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET (36.: 2022: Fortaleza)**. Anais [recurso eletrônico]. Rio de Janeiro: ANPET, 2021. [S.l.: s.n.], 2022.

MAGNUS, D. D. M.; CARBONERA, L. F. B.; PFITSCHER, L. L.; FARRET, F. A.; BERNARDON, D. P.; TAVARES, A. A. An educational laboratory approach for hybrid project-based learning of synchronous machine stability and control: A case study. **IEEE Transactions on Education**, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., v. 63, p. 48–55, 2 2020. ISSN 15579638.

MARTINS, O. A. da S.; SILVA, M. R. da; ALMEIDA, V. de S. Sala de aula invertida: Uma metodologia ativa na aprendizagem. **Ensino em Perspectivas**, v. 2, n. 2, p. 1–5, 2021.



MASSON, T. J.; MIRANDA, L. F. d.; JR, A. H. M.; CASTANHEIRA, A. M. P. Metodologia de ensino: aprendizagem baseada em projetos (pbl). In: SN. **Anais do XL Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia (COBENGE), Belém, PA, Brasil.** [S.l.], 2012. p. 13.

MELO, L. S. Desenvolvimento de uma plataforma para implementação de sistemas multiagentes com aplicação para recomposição automática de sistemas de distribuição de energia elétrica. 2015.

MEMIK, E.; NIKOLIC, S. The virtual reality electrical substation field trip: Exploring student perceptions and cognitive learning. **STEM Education**, STEM Education, v. 1, n. 1, p. 47–59, 2021.

MESSAOUDI, F.; SIMON, G.; KSENTINI, A. Dissecting games engines: The case of unity3d. In: IEEE. **2015 international workshop on network and systems support for games (NetGames).** [S.l.], 2015. p. 1–6.

MOHAMED, O.; BITAR, Z.; ABU-SULTANEH, A.; ELHAIJA, W. A. A simplified virtual power system lab for distance learning and abet accredited education systems. **International Journal of Electrical Engineering Education**, SAGE Publications Inc., 2021. ISSN 20504578.

MOHAN, N.; ROBBINS, W. P.; WOLLENBERG, B. F. Power systems education based on cusp<sup>TM</sup>-curriculum. **IEEE Transactions on Power Systems**, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., v. 29, p. 1896–1902, 2014. ISSN 08858950.

NAMBOODIRI, V.; ARAVINTHAN, V.; JOSEPH, S.; SAWAN, E.; JEWELL, W. Five heads are better than one: An interdisciplinary graduate course on smart grids: Lessons, challenges, and opportunities. **IEEE Power and Energy Magazine**, IEEE, v. 11, n. 1, p. 44–50, 2013.

ONS. **Glosário**. 2024. Accessed on June 19, 2024. Available at: <<https://www.ons.org.br/paginas/conhecimento/glossario>>.

ORTIZ-ROJAS, M.; CHILUIZA, K.; VALCKE, M. Gamification through leaderboards: An empirical study in engineering education. **Computer Applications in Engineering Education**, Wiley Online Library, v. 27, n. 4, p. 777–788, 2019.

O'BRIEN, H. L.; CAIRNS, P.; HALL, M. A practical approach to measuring user engagement with the refined user engagement scale (ues) and new ues short form. **International Journal of Human-Computer Studies**, Elsevier, v. 112, p. 28–39, 2018.

PADILLA, E. **Substation automation systems: design and implementation.** [S.l.]: John Wiley & Sons, 2015.

PAIVA, M. R. F.; PARENTE, J. R. F.; BRANDÃO, I. R.; QUEIROZ, A. H. B. Metodologias ativas de ensino-aprendizagem: revisão integrativa. **SANARE-Revista de Políticas Públicas**, v. 15, n. 2, 2016.

PARVANIA, M.; MERRILL, H. M. Toward a 21st century power education: A bright future awaits students in utah. **IEEE Power and Energy Magazine**, IEEE, v. 16, n. 5, p. 87–95, 2018.

PEREIRA, C. A.; OLIVEIRA, P. M.; REIS, M. Processos e metodologias não-tradicionais no ensino superior de engenharia elétrica: a percepção de coordenadores de curso em dois países lusófonos. **Meta: Avaliação**, v. 12, n. 34, p. 211–246, 2020.

POTKONJAK, V.; GARDNER, M.; CALLAGHAN, V.; MATTILA, P.; GUETL, C.; PETROVIĆ, V. M.; JOVANOVIĆ, K. Virtual laboratories for education in science, technology, and engineering: A review. **Computers & Education**, Elsevier, v. 95, p. 309–327, 2016.

PROENÇA, A. P.; AQUINO, R.; CARDOSO, A.; NOTARGIACOMO, P. Usabilidade no contexto de ambientes virtuais para educação ou treinamento. **I Jornada Latino-Americana de Atualização em Informática ANAIS**, p. 102, 2018.

PROENCA, A. P.; MIRANDA, M.; JR, E. A. L.; CARDOSO, A.; NOTARGIACOMO, P. Systematic review on cognitive engineering applied to critical systems for proposition of evaluation heuristics for virtual reality. **IEEE latin america transactions**, IEEE, v. 15, n. 10, p. 2024–2029, 2017.

REIS, P. R. J. D.; MATOS, C. E. F.; DINIZ, P. S.; SILVA, D. M.; DANTAS, W.; BRAZ, G.; PAIVA, A. C. de; ARAÚJO, A. S. An immersive virtual reality application for collaborative training of power systems operators. In: IEEE. **2015 XVII Symposium on Virtual and Augmented Reality**. [S.l.], 2015. p. 121–126.

ROZMI, M. D. A. B.; THIRUNAVUKKARASU, G. S.; JAMEI, E.; SEYEDMAHMOUDIAN, M.; MEKHILEF, S.; STOJCEVSKI, A.; HORAN, B. Role of immersive visualization tools in renewable energy system development. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 115, p. 109363, 2019.

SAHA, A. K. A real-time simulation-based practical on overcurrent protection for undergraduate electrical engineering students. **IEEE Access**, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., v. 10, p. 52537–52550, 2022. ISSN 21693536.

SALAS-MORERA, L.; MOLINA, A. C.; OLMEDILLA, J. L. O.; GARCÍA-HERNÁNDEZ, L.; ROMERO, J. M. P. Factors affecting engineering students dropout: A case study. **The International journal of engineering education**, Instituto de Relaciones Internacionales "Daza de Valdes", v. 35, n. 1, p. 156–167, 2019.

SALES, G. L.; CUNHA, J. L. L.; GONÇALVES, A. J.; SILVA, J. B. da; SANTOS, R. L. dos. Gamificação e ensinagem híbrida na sala de aula de física: metodologias ativas aplicadas aos espaços de aprendizagem e na prática docente. **Conexões-Ciência e Tecnologia**, v. 11, n. 2, p. 45–52, 2017.

SAMPAIO, R. F. Sistema de diagnóstico de faltas para subestações baseado em redes de petri coloridas. **Universidade Federal do Ceará–UFC**, 2002.

SAMPAIO, R. F. Sistema de automação distribuído: uma abordagem baseada em multiagente aplicada a sistemas de distribuição de energia elétrica em média tensão. 2017.

SANTOS, L. A. d. Integração de um sistema de recomposição automático via opc para automação da rede elétrica de distribuição em média tensão do campus do pici da universidade federal do ceará. 2015.

SHAHNIA, F.; MOGHBEL, M.; YENGEJEH, H. H. Motivating power system protection course students by practical and computer-based activities. **IEEE Transactions on Education**, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., v. 59, p. 81–90, 5 2016. ISSN 00189359.

SHERMAN, W. R.; CRAIG, A. B. Understanding virtual reality. **San Francisco, CA: Morgan Kauffman**, Elsevier, 2003.

SILVEIRA, R. da F.; HOLANDA, M.; VICTORINO, M. de C.; LADEIRA, M. Educational data mining: Analysis of drop out of engineering majors at the unb-brazil. In: IEEE. **2019 18th IEEE International Conference On Machine Learning And Applications (ICMLA)**. [S.l.], 2019. p. 259–262.

SOLIMAN, M.; PESYRIDIS, A.; DALAYMANI-ZAD, D.; GRONFULA, M.; KOURMPETIS, M. The application of virtual reality in engineering education. **Applied Sciences**, MDPI, v. 11, n. 6, p. 2879, 2021.

STRASSER, T.; STIFTER, M.; ANDRÉN, F.; PALENSKY, P. Co-simulation training platform for smart grids. **IEEE Transactions on Power Systems**, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., v. 29, p. 1989–1997, 2014. ISSN 08858950.

TAYEBI, A.; GOMEZ, J.; DELGADO, C. Analysis on the lack of motivation and dropout in engineering students in spain. **IEEE Access**, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., v. 9, p. 66253–66265, 2021. ISSN 21693536.

TORI, R.; KIRNER, C.; SISCOOTTO, R. A. **Fundamentos e tecnologia de realidade virtual e aumentada**. [S.l.]: Editora SBC Porto Alegre, 2006.

TOSHIBA. **Transformadores: Aspectos Construtivos dos Transformadores de Potência**. CEFETMG, 2013. Available at: <[https://univertecefetmg.blogspot.com/2013/11/toshiba-transformadores-aspectos\\_19.html](https://univertecefetmg.blogspot.com/2013/11/toshiba-transformadores-aspectos_19.html)>.

TURAN, Z.; KARABEY, S. C. The use of immersive technologies in distance education: A systematic review. **Education and Information Technologies**, Springer, 2023. ISSN 15737608.

WIEBE, E. N.; LAMB, A.; HARDY, M.; SHAREK, D. Measuring engagement in video game-based environments: Investigation of the user engagement scale. **Computers in Human Behavior**, Elsevier, v. 32, p. 123–132, 2014.

XIE, J.; YAN, Z.; WANG, X. A vr-based interactive teaching and practice environment for supporting the whole process of mining engineering education. **Mining Technology: Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy**, Taylor and Francis Ltd., 2023. ISSN 25726676.

**APÊNDICE A – LISTA DE EQUIPAMENTOS MODELADOS NO LSRV.**

- Transformador de Potencial;
- Transformador de Corrente;
- Transformador de Potência 69/13,8 kV com suas respectivas proteções intrínsecas (Relé de gás, Relé de nível de óleo, Válvula de alívio de pressão);
- Transformador de Potência de 13,8/0,22 kV;
- Estrutura de fixação dos equipamentos na subestação;
- Para-raios;
- Condutores de cobre;
- Religadores;
- Seccionadoras;
- Isoladores;
- Casa de comando da subestação;
- Quadros de automação e controle da subestação com seu respectivos componentes (disjuntores, relés, voltímetros e amperímetros);
- Banco de baterias;

## **APÊNDICE B – LISTA DE COMANDOS PARA A UTILIZAÇÃO DO LSRV.**

- Tecla W – Movimentação para frente;
- Tecla A – Movimentação para direita;
- Tecla S – Movimentação para trás;
- Tecla D – Movimentação para esquerda;
- Tecla Shift – Corre rápido;
- Tecla Ctrl esquerdo - Agachar;
- Tecla Ctrl direito – Ponta dos pés;
- Tecla I – Movimentação pra frente no drone;
- Tecla K – Movimentação para trás no drone;
- Tecla J – Movimentação para direita no drone;
- Tecla L – Movimentação para esquerda no drone;
- Tecla O – Sair do drone;
- Tecla T – Parar o drone no ar;
- Tecla E – Interagir com componentes como portas, drones etc;
- Tecla M – Habilitar/Desabilitar minimapa;
- Tecla Barra de espaço – Pular;
- Tecla Esc – Opções do jogo.

Dentro do LSRV, o usuário tem liberdade para se movimentar e visualizar qualquer equipamento em qualquer ângulo. É recomendável que o usuário acesse o computador, na casa de comando, para utilizar todas as funcionalidades do software, como visualizar e interagir com o diagrama unifilar da subestação e visualizar simulações.

**APÊNDICE C – AVALIAÇÃO DE APRENDIZAGEM: PRÉ-TESTE.**

# Pré-Teste: Equipamentos e Elementos da Subestação

Reconhecimento de vãos e Equipamentos da Subestação

\* Indica uma pergunta obrigatória

1. E-mail \*

---

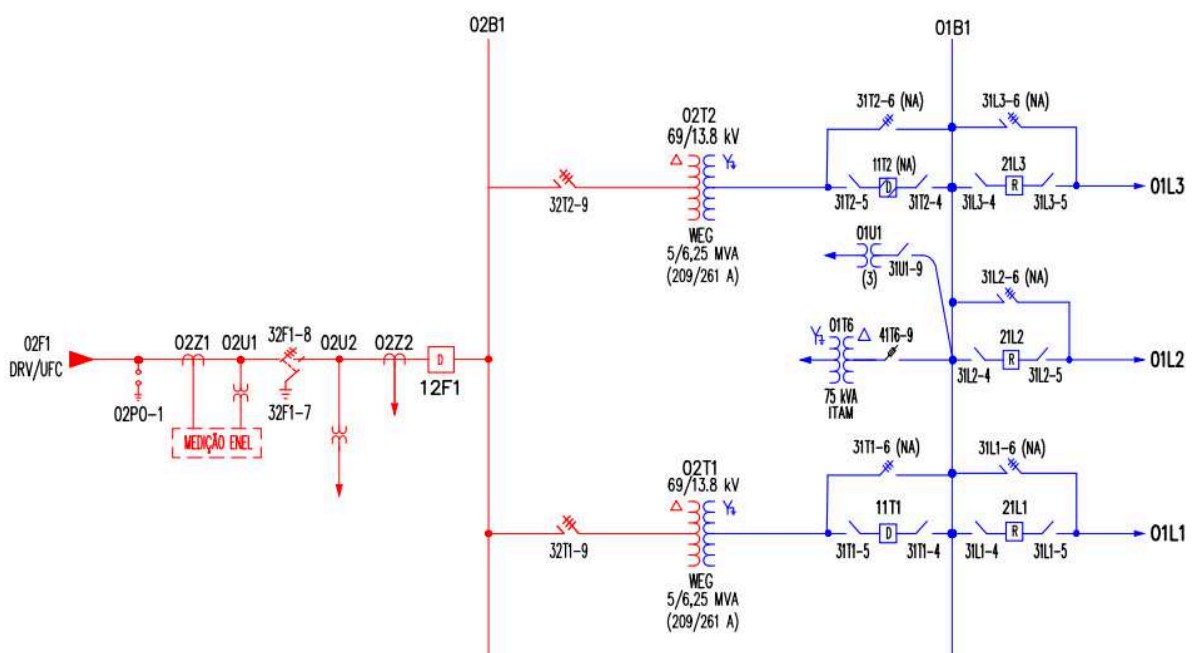
2. Digite seu nome completo. \*

---

3. Coloque seu E-mail, por favor. \*

---

Figura 1 - Diagrama Unifilar da Subestação do Campus do Pici da UFC.



4. 1. Marque uma ou mais alternativas com descrição de um ou mais vãos \* 20 pontos  
inexistente na subestação do Campus do Pici da UFC.

*Marque todas que se aplicam.*

- Vão do barramento de 69 kV
- Dois vãos de transformação
- Um vão de entrada de linha
- Vão do barramento de 13,8 kV
- Vão de banco de capacitores
- Três vãos de saída de alimentadores



Na Foto abaixo é apresentado o vão de entrada de linha da SE Pici.



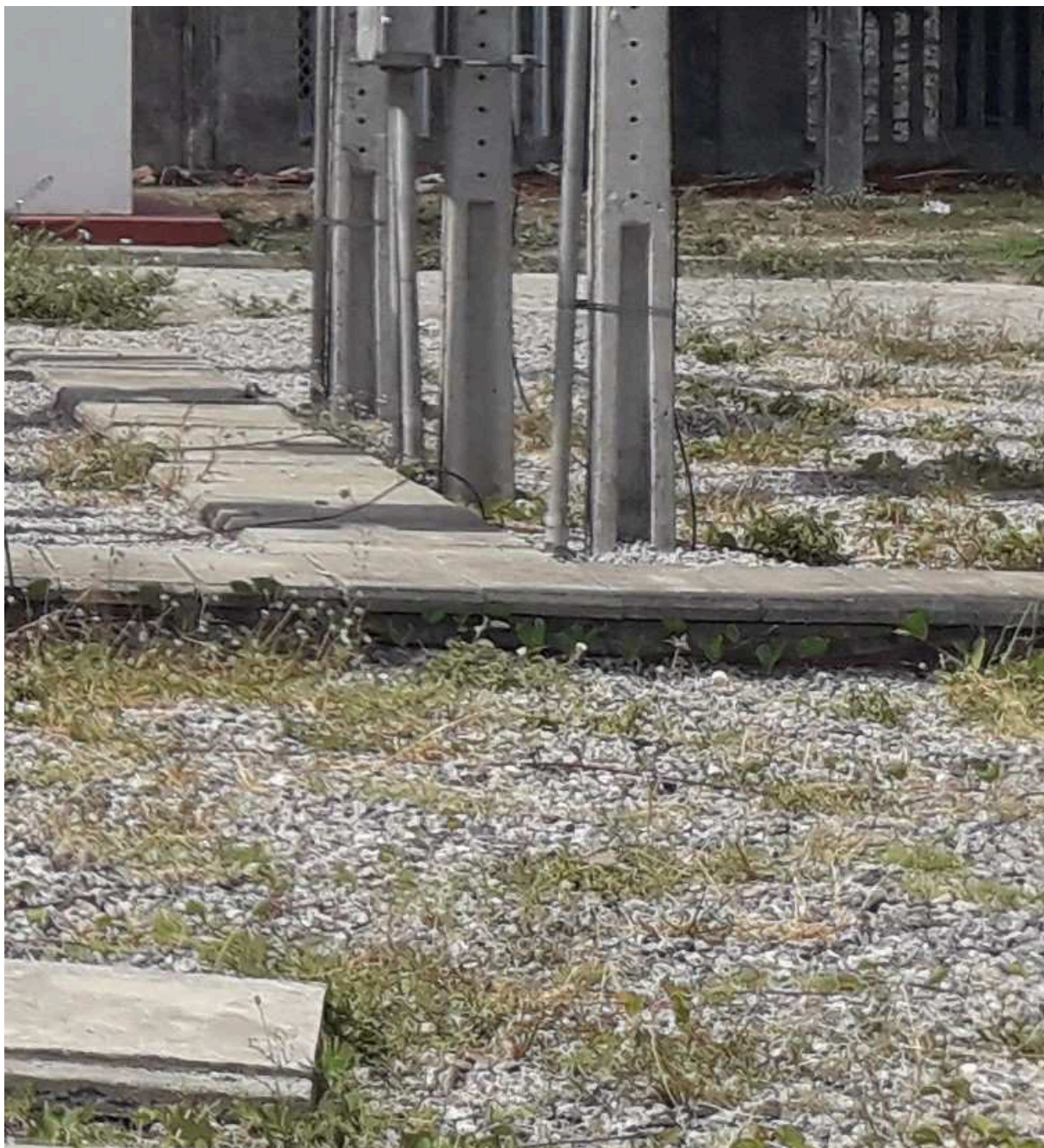
5. 2. Identifique os equipamentos que fazem parte do vão de entrada de linha Campus do Pici da UFC a partir da análise do diagrama apresentado na Figura 1 e na imagem acima. \* 20 pontos

*Marque todas que se aplicam.*

- Para-raios
- Banco de capacitores
- Chave tripolar com lâmina de terra
- Transformador de potência
- Transformador de corrente e transformador de potencial para serviço de faturamento
- Transformador de corrente e transformador de potencial para serviço de proteção
- Chave seccionadora monopolar
- Disjuntor
- Isolador

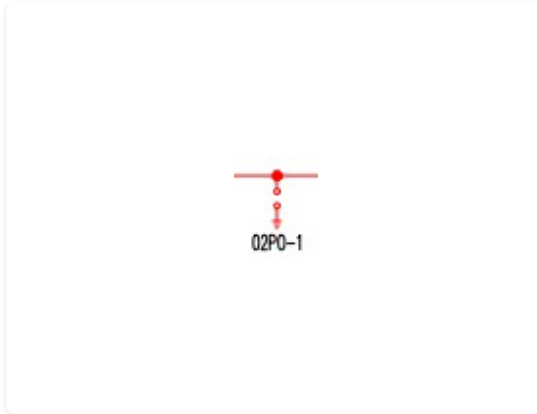
Na Figura 3 é apresentado um equipamento do vão de entrada de linha da SE Campus do Pici.





6. 3. Marque a opção com o símbolo do equipamento apresentado na Figura \* 20 pontos  
3.

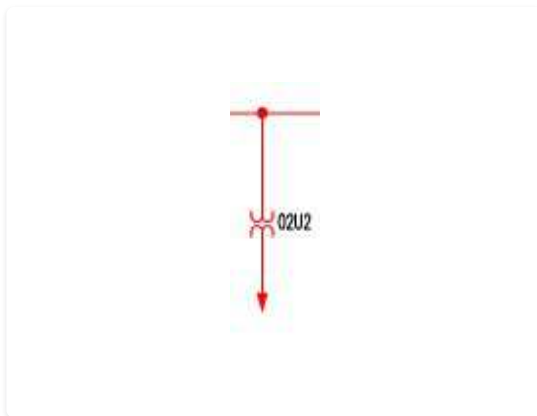
*Marcar apenas uma oval.*



Opção 1



Opção 2



Opção 3



Opção 4

7. 4. Ainda referente à Figura 03, qual o nome correto do objeto desconhecido? \* 20 pontos

*Marcar apenas uma oval.*

- Transformador de Corrente (TC)  
 Transformador de Potencial (TP)  
 Disjuntor  
 Para-Raio

8. 5. Na Figura 1 é o diagrama unifilar da subestação Campus do Pici. Caso \* 20 pontos  
haja uma falta no barramento 01B1, como o sistema deve responder à  
falta?

*Marcar apenas uma oval.*

- As seccionadoras 32T1 devem ser seccionar para impedir que a falta chegue aos clientes.
- O disjuntor 11T1 deve acionar para impedir que a falta chegue à geração.
- O disjuntor 11T1 deve acionar para impedir que a falta chegue aos clientes.
- As seccionadoras 32T1 e o disjuntor 11T1 devem ser acionados para impedir que a falta chegue tanto ao cliente quanto à geração.

---

Este conteúdo não foi criado nem aprovado pelo Google.

Google Formulários





**APÊNDICE D – AVALIAÇÃO DE APRENDIZAGEM: PÓS-TESTE**

# Pré-Teste: Equipamentos e Elementos da Subestação

Reconhecimento de vãos e Equipamentos da Subestação

\* Indica uma pergunta obrigatória

1. E-mail \*

---

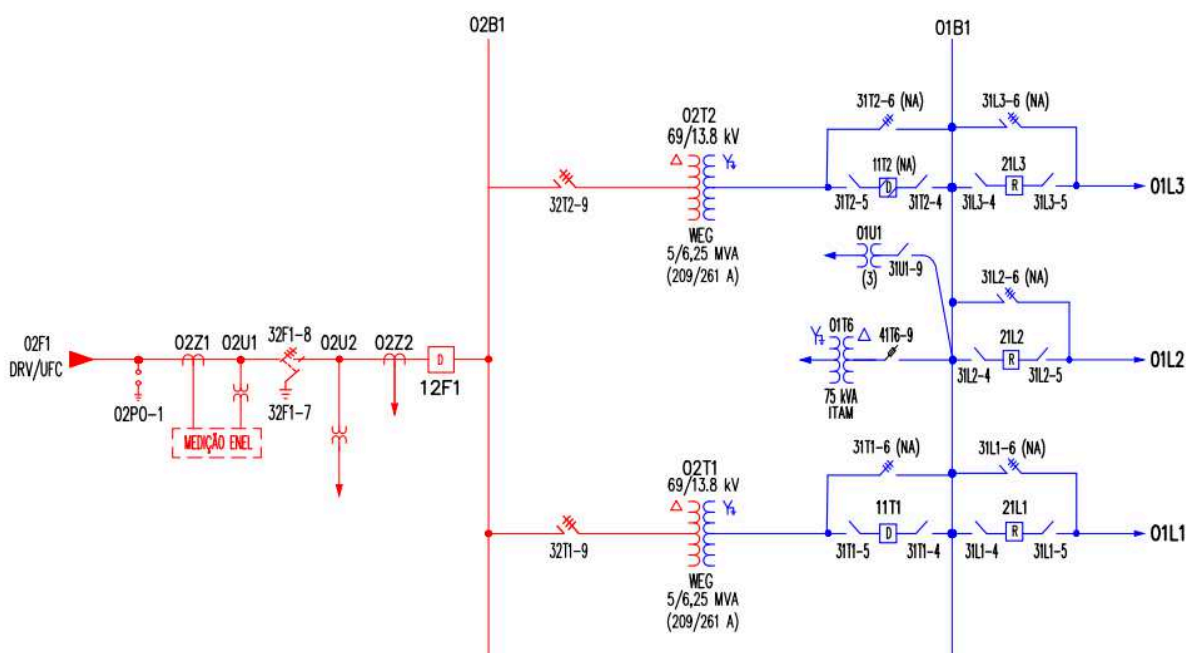
2. Digite seu nome completo. \*

---

3. Coloque seu E-mail, por favor. \*

---

Figura 1 - Diagrama Unifilar da Subestação do Campus do Pici da UFC.



4. 1. Marque uma ou mais alternativas com descrição de um ou mais vãos \* 20 pontos  
inexistente na subestação do Campus do Pici da UFC.

*Marque todas que se aplicam.*

- Vão do barramento de 69 kV
- Dois vãos de transformação
- Um vão de entrada de linha
- Vão do barramento de 13,8 kV
- Vão de banco de capacitores
- Três vãos de saída de alimentadores

Na Foto abaixo é apresentado o vão de entrada de linha da SE Pici.



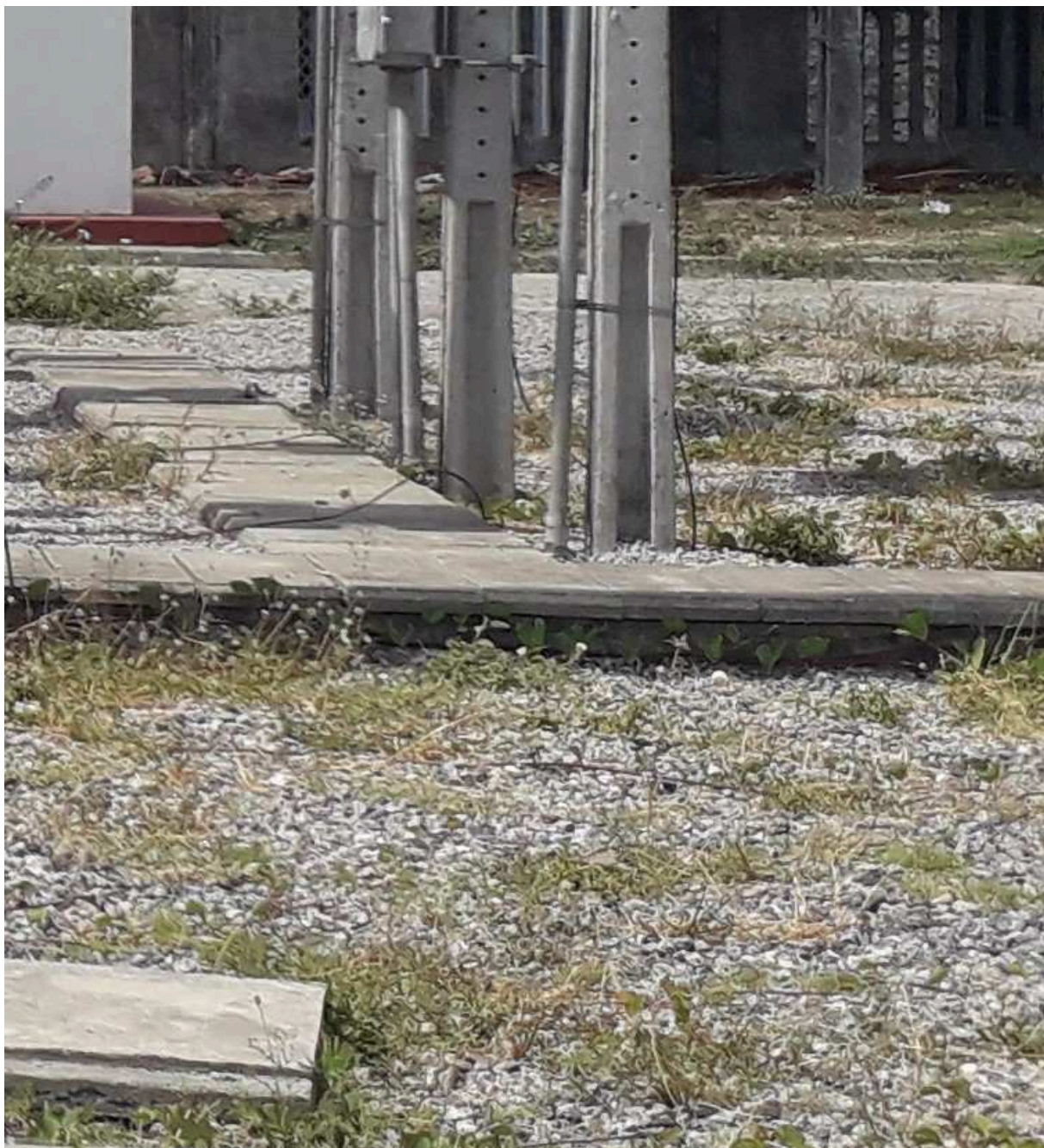
5. 2. Identifique os equipamentos que fazem parte do vão de entrada de linha Campus do Pici da UFC a partir da análise do diagrama apresentado na Figura 1 e na imagem acima. \* 20 pontos

*Marque todas que se aplicam.*

- Para-raios
- Banco de capacitores
- Chave tripolar com lâmina de terra
- Transformador de potência
- Transformador de corrente e transformador de potencial para serviço de faturamento
- Transformador de corrente e transformador de potencial para serviço de proteção
- Chave seccionadora monopolar
- Disjuntor
- Isolador

Na Figura 3 é apresentado um equipamento do vão de entrada de linha da SE Campus do Pici.







6. 3. Marque a opção com o símbolo do equipamento apresentado na Figura \* 20 pontos  
3.

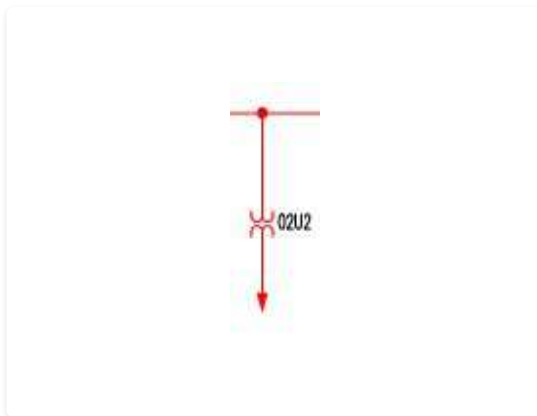
Marcar apenas uma oval.



Opção 1



Opção 2



Opção 3



Opção 4

7. 4. Ainda referente à Figura 03, qual o nome correto do objeto desconhecido? \* 20 pontos

Marcar apenas uma oval.

- Transformador de Corrente (TC)  
 Transformador de Potencial (TP)  
 Disjuntor  
 Para-Raio

8. 5. Na Figura 1 é o diagrama unifilar da subestação Campus do Pici. Caso \* 20 pontos  
haja uma falta no barramento 01B1, como o sistema deve responder à  
falta?

*Marcar apenas uma oval.*

- As seccionadoras 32T1 devem ser seccionar para impedir que a falta chegue aos clientes.
- O disjuntor 11T1 deve acionar para impedir que a falta chegue à geração.
- O disjuntor 11T1 deve acionar para impedir que a falta chegue aos clientes.
- As seccionadoras 32T1 e o disjuntor 11T1 devem ser acionados para impedir que a falta chegue tanto ao cliente quanto à geração.

---

Este conteúdo não foi criado nem aprovado pelo Google.

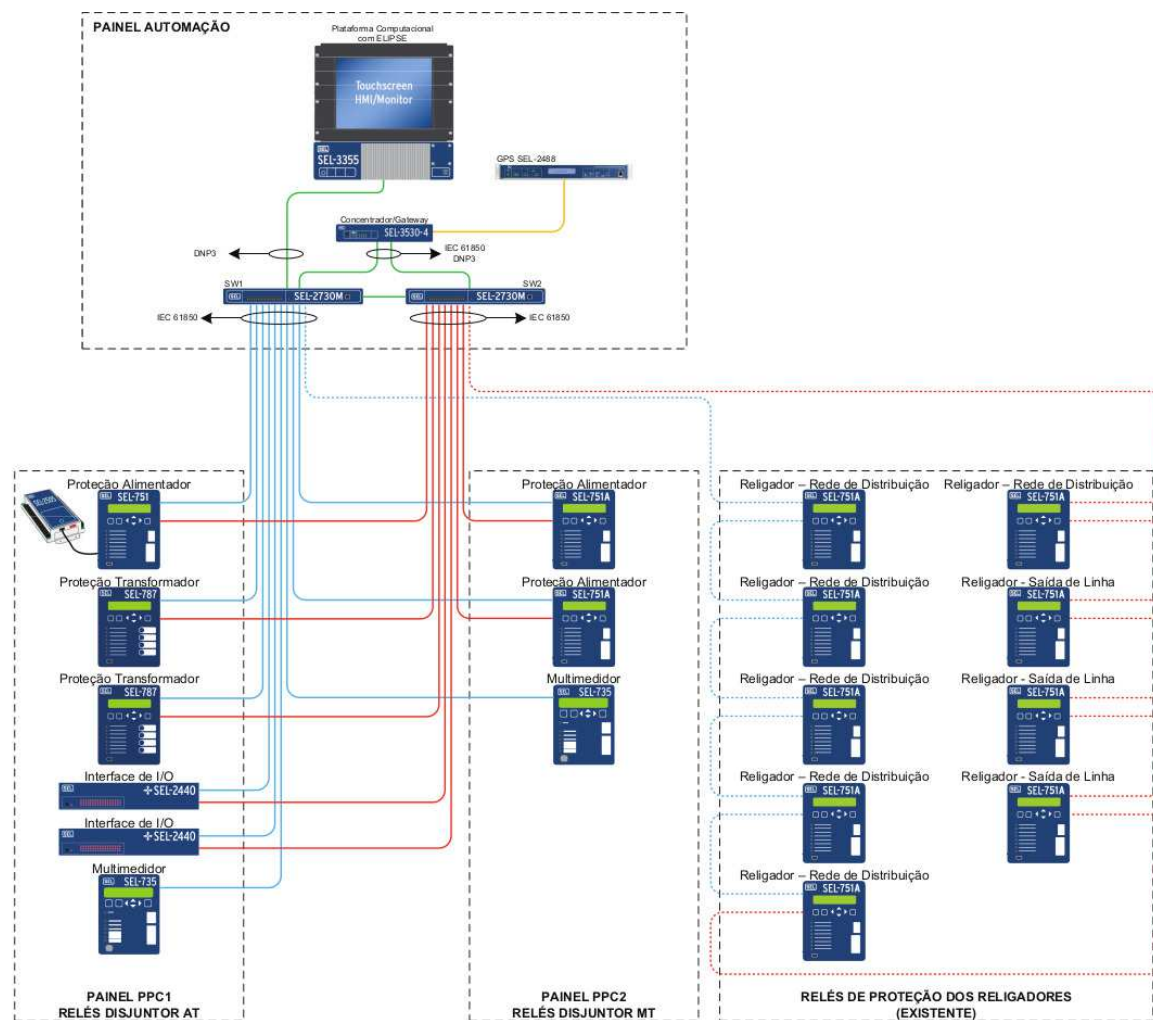
Google Formulários



**ANEXO A – *DIAGRAMA DE PROTEÇÃO E MEDIÇÃO DA SUBESTAÇÃO DO CAMPUS  
DO PICI***



**ANEXO B – DIAGRAMA DA ARQUITETURA DE PROTEÇÃO, AUTOMAÇÃO E CONTROLE DA SUBESTAÇÃO CAMPUS DO PICI.**



Fonte: UFC INFRA (2019).