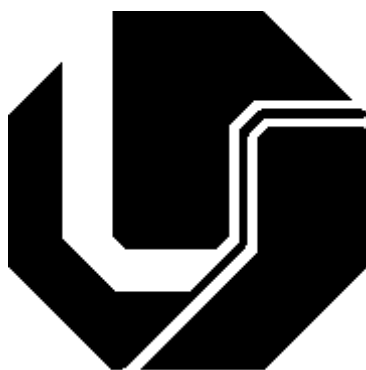


**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA**  
**PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**



**Uma Solução para Integração de Sistemas de Realidade Virtual  
e Tradicionais de Operação de Subestações de Energia Elétrica**

**Alexandre Carvalho Silva**

**TESE**

**Dezembro**

**2020**

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

**Uma Solução para Integração de Sistemas de Realidade Virtual e  
Tradicionais de Operação de Subestações de Energia Elétrica**

**Alexandre Carvalho Silva**

Texto apresentado à Universidade Federal de Uberlândia, perante a banca de examinadores abaixo, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Doutorado em Ciências.

Banca Examinadora:

Prof. Alexandre Cardoso, Dr. – Orientador (UFU)

Prof. Edgard Afonso Lamounier Jr, PhD – Co-orientador (UFU)

Prof. Luciano Silva, Dr. (Mackenzie)

Prof. Renato Aquino Lopes, Dr. (UFU)

Prof. Arnaldo José Pereira Rosentino Júnior, Dr. (UFTM)

Prof. Keiji Yamanaka, PhD (UFU)

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

S586 2021	<p>Silva, Alexandre Carvalho, 1987- Uma solução de integração de sistemas de Realidade Virtual e tradicionais de operação de Subestações de Energia Elétrica [recurso eletrônico] / Alexandre Carvalho Silva. - 2021.</p> <p>Orientador: Alexandre Cardoso. Coorientador: Edgard Afonso Lamounier. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia, Pós-graduação em Engenharia Elétrica. Modo de acesso: Internet. Disponível em: <a href="http://doi.org/10.14393/ufu.te.2021.16">http://doi.org/10.14393/ufu.te.2021.16</a> Inclui bibliografia. Inclui ilustrações.</p> <p>1. Engenharia elétrica. I. Cardoso, Alexandre, 1964-, (Orient.). II. Lamounier, Edgard Afonso, 1964-, (Coorient.). III. Universidade Federal de Uberlândia. Pós-graduação em Engenharia Elétrica. IV. Título.</p> <p>CDU: 621.3</p>
--------------	--

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:

Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091

# **Uma Solução para Integração de Sistemas de Realidade Virtual e Tradicionais de Operação de Subestações de Energia Elétrica**

**Alexandre Carvalho Silva**

Texto apresentado à Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos para  
obtenção do título de Doutor em Ciências.

---

Prof. Alexandre Cardoso, Dr.

Orientador

---

Prof. Edgard A. Lamounier Jr, PhD.

Co-orientador

---

Prof. José Roberto Camacho, Dr.

Coordenador do curso de Pós-Graduação



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA**  
Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica  
Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 3N - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-MG, CEP 38400-902  
Telefone: (34) 3239-4707 - www.posgrad.feelt.ufu.br - copel@ufu.br



### ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Elétrica				
Defesa de:	Tese de Doutorado, 278, PPGEELT				
Data:	Vinte e dois de dezembro de dois mil e vinte	Hora de início:	14:30	Hora de encerramento:	18:00
Matrícula do Discente:	11413EEL009				
Nome do Discente:	Alexandre Carvalho Silva				
Título do Trabalho:	<b>Uma solução de integração de sistemas, de Realidade Virtual e tradicionais de operação de Subestações de Energia Elétrica</b>				
Área de concentração:	Processamento da informação				
Linha de pesquisa:	Computação gráfica				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Título: Desenvolvimento de ambientes virtuais para centro de operações de sistemas representativos das subestações e usinas da CEMIG associados a tecnologias de projeção 3D. Agência Financiadora: CEMIG Início 01/04/2012 Término 28/02/2018 No. do Projeto na agência: GT411 Professor Coordenador: Prof. Dr. Alexandre Cardoso				

Reuniu-se por meio de Videoconferência, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, assim composta: Professores Doutores: Renato Aquino Lopes - FACOM/UFU; Keiji Yamanaka - FEELT/UFU; Arnaldo José Pereira Rosentino Junior - UFTM; Luciano Silva - MACKENZIE; Alexandre Cardoso - FEELT/UFU, orientador(a) do(a) candidato(a).

Iniciando os trabalhos o(a) presidente da mesa, Dr(a). Alexandre Cardoso, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato(a), agradeceu a presença do público, e concedeu ao Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovado(a).

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de **Doutor**.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Arnaldo José Pereira Rosentino Junior, Usuário Externo**, em 22/12/2020, às 17:37, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Alexandre Cardoso, Professor(a) do Magistério Superior**, em 22/12/2020, às 17:39, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Renato de Aquino Lopes, Professor(a) do Magistério Superior**, em 22/12/2020, às 17:39, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Keiji Yamanaka, Professor(a) do Magistério Superior**, em 23/12/2020, às 14:39, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **LUCIANO SILVA, Usuário Externo**, em 10/01/2021, às 23:55, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://www.sei.ufu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **2387331** e o código CRC **E6549597**.

## ***Agradecimentos***

*Ao meu pai Orlando Silva e minha mãe Joana Darc Carvalho Silva por serem meus primeiros “orientadores” e pelo apoio proporcionado em todas as etapas de minha vida.*

*A minha esposa Ligia Christine pelo apoio, incentivo e principalmente compreensão que teve durante esse desafio.*

*A minha irmã Cristiane de Cássia por ser referência em minha vida acadêmica.*

*Aos meus irmãos do Lab-CG UFU, por toda ajuda durante este período.*

*Ao meu orientador Professor Alexandre Cardoso, por toda ajuda, apoio incondicional, confiança e por me mostrar sempre o caminho correto a se seguir.*

*Ao Professor Edgard Afonso Lamounier Jr. por sua sabedoria e coerência durante as orientações.*

*Ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia, em especial os professores e secretária Cinara Fagundes, pelo suporte prestado.*

*Ao Instituto Federal Goiano pelo apoio total na capacitação dos servidores.*

*A toda equipe da empresa CGWorks, pelo companheirismo durante o desenvolvimento do trabalho.*

*A CEMIG e FURNAS por todo apoio prestado durante o desenvolvimento desta pesquisa.*

*Obrigado!*

## **Financiadores**

*Este trabalho foi parcialmente financiado pelo Projetos de Pesquisa e Desenvolvimento – P&D Cemig/Aneel – GT411 e P&D Cemig/Aneel 0618 de parceria entre a Cemig Geração e Transmissão com a Universidade Federal de Uberlândia, P&D Furnas/Elektrobras, e por bolsa de demanda social da Capes. Sinceros agradecimentos da Equipe de desenvolvimento e deste pesquisador.*



## **Resumo**

SILVA, Alexandre C. *Uma Solução para Integração de Sistemas de Realidade Virtual e Tradicionais de Operação de Subestações de Energia Elétrica*, Uberlândia, Faculdade de Engenharia Elétrica – UFU, 2020.

**Palavras-chave:** Operação de Subestações, Informações Espaciais e Realidade Virtual

Este trabalho apresenta os resultados obtidos de uma nova estratégia baseada em Realidade Virtual, que tem como intuito minimizar problemas causados na operação de subestações de energia elétrica devido à ausência de informações espaciais e funcionais nas interfaces tradicionais de operação, esta problemática é apresentada pela metodologia HEART (Human Error Assessment and Reduction Technique - Técnica de Avaliação e Redução de Erros Humanos) como condição promotora de erro de forte fator de impacto em sistemas críticos de engenharia, nesta condição surge a necessidade de elaborar soluções que promovam mecanismos facilitadores no domínio da operação, visando melhorias na qualidade e continuidade da geração e transmissão de energia elétrica. Para tanto, foi elaborada uma solução de integração de Realidade Virtual com interfaces tradicionais de operação, capaz de disponibilizar recursos complementares que utilizados em momentos pertinentes propiciam recursos favoráveis à operação das subestações, reduzindo ambiguidades enfrentadas nos processos de tomada de decisão. Como prova de conceito esta estratégia foi suportada por um ambiente virtual tridimensional interativo referente às subestações da Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG – Brasil) e posteriormente implantado em seu centro de operação para tarefas relacionadas ao funcionamento. Por fim, foram aplicados testes aos operadores para obtenção de resultados visando a problemática contextualizada.

## ***Abstract***

SILVA, Alexandre C.; Virtual Reality for Operation of Electric Power Substations, Uberlândia, Faculdade de Engenharia Elétrica – UFU, 2020.

**Keywords:** Substation Operation, Spatial Information and Virtual Reality

This project shows the results obtained from a new strategy based on Virtual Reality that has the objective of minimizing the problems caused in the operation of electric power substations due to the absence of spacial and functional information in the traditional operation interfaces. This problematic is shown through the HEART (Human Error Assessment and Reduction Technique) as an error-promoting condition with a strong impact on critical engineering systems. Under this condition, there is the necessity to create solutions that promote mechanisms to facilitate the operation domain, looking for improvements in the quality and continuity of generation and transmission of electric power. For this purpose, it was elaborated a strategy of a Virtual Reality integration to the traditional operation interfaces, which is capable of showing complementary resources that when used in relevant moments, are able to supply resources favorable to the substations' operation, reducing the ambiguity faced in decision-making processes. To prove the concept, this strategy was supported by an interactive tridimensional virtual environment using CEMIG's (Companhia Energética de Minas Gerais - Minas Gerais' Energy Company) substations that was then implemented in its operation center to perform tasks related to its functioning. Lastly, tests had been applied to the operators in order to obtain results related to the contextualized problematic.

## ***Publicações***

Principais publicações resultantes desta pesquisa:

1. Silva, A.C.; Cardoso, A; Lamounier Jr., Barreto, C.L.; Prado, P.R.M; Ferreira, J.N.F; Bechelane, A.P; Lima, G.F. **RVCemig: O Uso de Realidade Virtual no Centro de Operação do Sistema da CEMIG**, In: Anais do VIII Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica – CITENEL, 2015, Costa do Sauípe, BH, Brasil.
2. Silva, A.C.; Cardoso, A; Lamounier Jr. **Virtual Reality for Monitoring and Control of Electrical Power Substations**. In: Workshop de Teses e Dissertações do Simpósio de Realidade Virtual, 2018, Foz do Iguaçu, PR, Brasil.
3. Cardoso, A; Silva, A. C.; Ramos, D.S.; Lamounier, E. A.; Lima, G.F.M; Almeida, P. **Realidade Virtual e Indústria 4.0 aplicado na Operação de Subestações de Energia Elétrica**. In: Anais do XVIII Encontro Regional Ibero-americano do Cigré, 2019, Foz do Iguaçu, PR, Brasil.
4. Silva, A.C.; Cardoso, A; Lamounier Jr., E.A.; Lima, G.F.M., Ferreira, J.N, Ramos, D. S. **Virtual Reality for Monitoring of Electrical Power**. In: Anais do Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos – SBSE 2020, 2020, Santo André, SP, Brasil
5. Silva, A.C.; Cardoso, A; Lamounier Jr., E.A.; Barreto, C.L. **Virtual Reality for Monitoring and Control of Electrical Substations**. Annals of the Brazilian Academy of Sciences, Aceite definitivo e aguardando publicação.

# Sumário

<b>Introdução .....</b>	<b>1</b>
Contextualização e Motivação.....	1
Hipótese e Objetivos.....	3
Organização da Tese .....	4
 <b>Fundamentos .....</b>	 <b>6</b>
1.    Introdução.....	6
1.1    Operação de Subestações de Energia Elétrica.....	6
1.1.1    Subestações .....	6
1.1.2    Operação do Sistema Elétrico.....	7
1.1.3    Interface de Operação do Sistema Elétrico .....	8
1.2    Confiabilidade Humana em Sistemas Críticos de Engenharia .....	10
1.2.1    Métodos de Análise da Confiabilidade Humana .....	11
1.2.2    Método HEART.....	13
1.3    Realidade Virtual.....	14
1.3.1    Definições.....	14
1.3.2    Realidade Virtual aplicada em Simulações Visuais .....	15
1.3.3    Interação em Ambientes Virtuais Tridimensionais.....	16
1.3.3.1 Manipulação e Seleção .....	16
1.3.3.2 Navegação.....	17
1.3.3.3 Controle do Sistema.....	17
1.3.3.4 Entradas Simbólicas .....	17
1.4    Considerações Finais.....	18
 <b>Trabalhos Correlatos .....</b>	 <b>19</b>
2.    Introdução.....	19
2.1    Scene Graph Organization and Rendering in 3D Sub. Simulation System.....	21
2.2    3D Virtual Models Applied in Power Substation Projects .....	22
2.3    An Improved Virtual Reality Engine for Substation Simulation .....	23

2.4	Virtual Reality in the Substation Training Simulator.....	25
2.5	A Training Simulator for PD Detection Personnel .....	26
2.6	Semi-automatic methodology for augmented panorama development in industrial outdoor environments .....	27
2.7	Resumo Comparativo dos Trabalhos Analisados.....	28
<b>Arquitetura e Desenvolvimento do SRV .....</b>		<b>30</b>
3.	Introdução.....	30
3.1	Descrição do SRV para Monitoramento e Controle de subestações de Energia Elétrica. ....	30
3.2	Arquitetura de Atualização do SRV.....	31
3.3	Tecnologias de Apoio .....	32
3.3.1	3D Studio Max.....	33
3.3.2	<i>Engine</i> Unity 3D.....	34
3.3.3	Codificação – MonoDevelop .....	35
3.4	Modelagem UML .....	36
3.4.1	Casos de Uso .....	37
3.4.2	Descrição dos Atores .....	38
3.4.3	Descrição dos Casos de Uso.....	38
3.5	Diagrama de Classes .....	41
3.6	Diagrama de Sequência .....	42
3.7	Contribuições deste autor para a construção deste SRV .....	43
<b>Estratégia e solução para Integração das Interfaces de Realidade Virtual com o Sistema Tradicional de Operação.....</b>		<b>45</b>
4.	Introdução.....	45
4.1	Descrição da Estratégia.....	45
4.2	Solução baseada nas estratégias .....	46
4.2.1	Representação e Interação do <i>Menu</i> .....	47
4.2.2	Representação e Interação do Sub <i>Menu</i> .....	48
4.2.3	Representação e Interação de Interface Alternativa de Controle.....	52

4.2.4	Representação e Interação com Janelas de Controle e de Apresentação de Dados .....	54
4.2.5	Apresentação e Interação das Camadas de Conteúdo .....	54
4.2.6	Ícones .....	57
4.3	Integração entre a Interface de Realidade Virtual com Interface Tradicional de Operação.....	57
4.4	Considerações Finais.....	58
<b>Análise e Resultados Iniciais da Solução de Integração .....</b>		<b>60</b>
5.	Introdução.....	60
5.1	Critérios de Análise .....	60
5.2	Análise do Questionário de Avaliação .....	61
5.2.1	Reação à utilização do Sistema de Realidade Virtual .....	61
5.2.2	Telas de Controle – Widgets 2D.....	62
5.2.3	Formas de Navegação e Visualização Espacial .....	63
5.3	Análise de Desempenho .....	64
5.3.1	Atividade 1 – Localizar e aproximar o campo de visão.....	65
5.3.2	Atividade 2 – Consultar informações e alterar o estado .....	65
5.4	Relatos Complementares.....	66
<b>Conclusões e Trabalhos Futuros .....</b>		<b>67</b>
Conclusões .....		67
Trabalhos Futuros .....		68
<b>Referências Bibliográficas .....</b>		<b>69</b>
<b>Apêndice I .....</b>		<b>75</b>
<b>Apêndice II .....</b>		<b>79</b>

# Lista de Figuras

Figura 01: Sistema Elétrico Simplificado (Mattioli, 2015) .....	7
Figura 02: Diagrama unifilar de operação da subestação Vespasiano 2.....	9
Figura 03: Visão de campo da subestação Vespasiano 2 .....	10
Figura 4– Sistema de Treinamento em Normas de Segurança Para Manutenções de Redes Elétricas (Morais et.al., 2013).....	15
Figura 5 – Exemplo de Subestação (Guangwei & Wenjuan, 2009) .....	22
Figura 6 – Subestação de Xochimilco (Quintana & Mendoza, 2009) .....	23
Figura 7 – Resultado de uma simulação visual de uma subestação (Meng & Kan, 2010) .....	24
Figura 8– Representação virtual da sala de controle (Wang & Li, 2010) .....	25
Figura 9 – Ambiente virtual para treinamento em detecção de descargas parciais (Yang, Wu & Tian,2014).....	26
Figura 10 – Visualização do Panorama aumentado com as marcações realizadas nos equipamentos Gomes et. al. (2017) .....	27
Figura 11 - Consulta das informações de estado de um transformador via Webservice.....	31
Figura 12 - Arquitetura Proposta.....	32
Figura 13 - Modelo Virtual do Reator Shunt .....	34
Figura 14 - Construção da Cena referente à Subestação de Emborcação .....	35
Figura 15 - MonoDevelop .....	36
Figura 16 – Diagrama de Casos de Uso .....	37
Figura 17– Diagrama de classes do sistema .....	41
Figura 18 – Diagrama de sequência. ....	42
Figura 19-A – Menu em momento de utilização .....	47
Figura 19-B – Menu em momento de inatividade .....	48
Figura 20 – Sub Menu referente a troca de navegação. ....	49
Figura 21 – Representação dos botões e mecanismo de ativação da interface alternativa ...	49
Figura 22 – Visão em Primeira Pessoa.....	50
Figura 23– Visão em Terceira Pessoa .....	50
Figura 24 – Visão de Topo ou Visão Geral .....	51

Figura 25 – Visão Lateral.....	51
Figura 26 – Visão Frontal .....	51
Figura 27 – Mini Mapa para acesso rápido .....	52
Figura 28 – Interface Alternativa em uso .....	53
Figura 29 – Interface alternativa ativa, mas sem utilização.....	53
Figura 30 – Janelas de Controle e Apresentação de Dados .....	54
Figura 31 – Apresentação do Sub Menu com suas camadas desativadas .....	55
Figura 32 – Apresentação do Sub Menu com suas camadas ativas.....	55
Figura 33 – Camada “rótulo” ativa .....	56
Figura 34 – Camada “envoltória” ativa .....	56
Figura 35 – Integração da Interface de Realidade Virtual com Interface Tradicional de Operação aplicado na subestação de Emborcação.....	58
Figura 36: Gráfico referente aos critérios de análise sobre a utilização do sistema .....	61
Figura 37: Gráfico referente aos critérios de análise sobre as telas de controle. ....	62
Figura 38 – Confusão Visual entre menu e janela de apresentação de dados. ....	63
Figura 39- Gráfico referente aos critérios de análise sobre a nav. no ambiente virtual 3D ....	64
Figura 40: Gráfico referente à atividade localização e aproximação de equipamentos.....	65
Figura 41: Gráfico referente à atividade localização e aproximação de equipamentos.....	66



# Lista de Tabelas e Quadros

Tabela 1 – Comparativo entre as principais metodologias de análise da confiabilidade humana que possui como foco a taxonomia das falhas humanas.....	12
Tabela 2– Resultado por bibliotecas digitais e filtros.....	21
Tabela 3 – Comparativo entre os trabalhos correlatos.....	29
Tabela 4 - Atores do sistema .....	38
Tabela 5 - Descrição do caso de uso “Navegar no SRV” .....	38
Tabela 6 - Descrição do Caso de Uso “Alterar Formas de Navegação” .....	39
Tabela 7 - Descrição do Caso de Uso “Alterar Status das Camadas de Conteúdo” .....	39
Tabela 8 - Descrição do Caso de Uso “Monitorar Estado dos Equipamentos” .....	40
<i>Tabela 9 - Descrição do Caso de Uso “Atuar sobre o Estado dos Equipamentos” .....</i>	<i>40</i>
<i>Tabela 10 - Tabela comparativa entre os trabalhos correlatos e esta pesquisa .....</i>	<i>59</i>

# Lista de Abreviaturas

ACH	Análise da Confiabilidade Humana
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais
COS	Centro de Operação do Sistema
CPE	Condições Promotoras de Erro
HEART	Human Error Assessment and Reduction Technique
IHM	Interface Homem Computador
RV	Realidade Virtual
SE	Subestações de Energia
SEB	Setor Elétrico Brasileiro
SIN	Sistema Interligado Nacional
SRV	Sistema de Realidade Virtual
UML	Linguagem de Modelagem Unificada

# Introdução

## Contextualização e Motivação

No Setor Elétrico Brasileiro (SEB), as concessionárias de energia elétrica têm empregado esforços no sentido de melhorar a qualidade e continuidade do fornecimento de energia elétrica aos seus consumidores (Bernardon *et. al.*, 2016).

No entanto, as interrupções neste fornecimento são inevitáveis, por diversas razões, entre as quais destaca-se a execução de obras de expansão do sistema, manutenções preventivas e/ou corretivas em componentes da rede ou, ainda, por falhas associadas à aspectos humanos na operação do Sistema Interligado Nacional (SIN) (Porto *et. al.*, 2017).

No contexto das falhas relacionadas à aspectos humanos, análises estatísticas demonstram que erros associados a fatores humanos em um sistema correspondem em até 90%. (Peng-Cheng, 2012).

No Brasil, historicamente, grandes blecautes ocorridos no SIN estão relacionados a erros humanos na operação. Neste contexto, uma situação que merece destaque foi o blecaute sucedido no ano de 1996, onde o mesmo afetou 9 estados durante 100 minutos devido à uma falha de manobra em uma chave seccionadora, especificamente na atuação indevida da proteção diferencial do barramento de 345kV de uma subestação da usina (Gomes, 2004), (Lopes, 2008).

Com base nestes cenários, em que uma ação exercida por uma interpretação equivocada pode acarretar danos irreversíveis em diversas áreas, a operação de subestações de energia elétrica é suportada e classificada como um sistema crítico de engenharia, no qual falhas podem ter consequências severas em aspectos humanos e econômicos.

Nestas circunstâncias identificar os fatores que exercem influência sobre o desempenho dos operadores é necessário para identificar aspectos problemáticos que aumentam o potencial de ocorrência de erro humano (Embrey, 2000).

Diante desta condição, metodologias referentes à análise da confiabilidade humana em sistemas críticos de Engenharia podem auxiliar na busca da melhoria no processo de operação do SIN. O objetivo destes métodos é analisar os fatores que contribuem para a ocorrência de erros humanos e determinar a probabilidade de sua ocorrência. O modelo utilizado em estudos do tipo deve ser construído e validado por dados empíricos, como, pela experiência operacional e resultado baseado em uso de simuladores (Podofillini, 2013).

Nesta vertente, a metodologia HEART - *Human Error Assessment and Reduction Technique* - (Técnica de Avaliação e Redução de Erros Humanos) elaborada por Willians (1986) e posteriormente revisada e atualizada por Bell e Willians (2016) pressupõe que qualquer confiabilidade no desempenho de uma tarefa pode ser modificada de acordo com a presença de condições promotoras de erro (CPE). A metodologia identifica tipos genéricos de tarefas e propõe valores nominais de probabilidade de erros humanos correspondentes, com base nisto, relaciona 38 condições promotoras de erros com respectivos valores de impacto, que têm grande influência no desempenho das tarefas relacionadas a sistemas críticos de engenharia.

Vale destacar duas condições promotoras de erros referentes ao processo de operação de sistemas críticos de Engenharia, sendo estas: a) Ausência de uma interface para transmitir informações espaciais e funcionais ao operador de forma que o mesmo possa prontamente assimilar; b) Interface Homem Máquina (IHM) deficiente (divergência entre a realidade de trabalho do operador com o que lhe é apresentado pela planta) (Bell & Willians 2016).

Tendo em vista que os sistemas computacionais atuais para monitoramento e controle de subestações de energia elétrica não contemplam recursos que promovam a visualização de informações espaciais funcionais, contendo uma interface de operação baseada em simbologia, paradigma este divergente ao visualizado em campo, surge a seguinte problemática: Como proporcionar informações espaciais e funcionais para possibilitar recursos complementares e facilitadores nas tarefas de monitoramento e controle de subestações de energia elétrica?

É importante enfatizar que solução de integração deverá atuar de forma complementar e coerente aos métodos tradicionais de operação, sem comprometer a técnica atual por parte dos operadores, com intuito de preservar o modelo mental de operação adquirido durante toda capacitação e experiência do operador.

Mediante as condições de criticidade envolvidas na operação de subestações e os agentes promotores de erros relacionados a informações espaciais, permeia-se as características inatas da Realidade Virtual como instrumento de amparo para problemática abordada.

A aplicação de técnicas de Realidade Virtual (RV) visa desenvolver um modelo de interface mais intuitivo que maximize os aspectos de interatividade, usabilidade e naturalidade durante o processo de ação (Kirner & Kirner, 2011).

Sob este contexto, a RV permite ao usuário manipular informações semelhantes ao espaço real sendo favorecido pela sensação de imersão, característica fundamental nestes ambientes pois ela é responsável por produzir o sentimento de presença no mundo virtual (Landberg, 2010).

Por fim, a motivação central desta pesquisa fundamenta-se na busca de melhorias no processo de operação de subestações de energia elétrica, a partir da associação das interfaces da operação com Realidade Virtual, com intuito de propiciar redução de erros humanos, maior eficiência e segurança nos processos de operação.

## **Hipótese e Objetivos**

Perante as potencialidades da área de Realidade Virtual esta pesquisa orienta-se na seguinte hipótese: A integração de uma interface de Realidade Virtual com os sistemas tradicionais de operação fundamentadas por arranjos lógicos, propicia ao usuário mecanismos facilitadores para o controle da operação de subestações de energia elétrica, aprimorando o discernimento por meio de informações espaciais as possíveis ambiguidades enfrentadas nos processos de tomada de decisão.

Assim, o objetivo central deste trabalho é elaborar uma estratégia e solução de integração entre Realidade Virtual e sistemas tradicionais de operação de subestações de energia elétrica capaz de prover de recursos facilitadores referentes ao processo.

Considerando os aspectos fundamentais dos Sistemas de Realidade Virtual (SRV), são objetivos específicos deste trabalho:

1. Conceber mecanismos suportados por técnicas de Realidade Virtual capazes de monitorar e controlar uma subestação de energia elétrica, com comunicação

bidirecional com o sistema supervisorio (SCADA), para posterior integração com a sistema tradicional de operação.

2. Elaborar métodos e estilos de interface para monitoramento e controle de subestações de energia elétrica que reaproveitem o modelo mental e experiência do operador referente ao processo tradicional de operação.
3. Depreender sobre os resultados inerentes a usabilidade e efetividade do SRV proposto e aplicado, por meio de técnicas e métodos de avaliação de interfaces.

Posteriormente, são consideradas as seguintes etapas metodológicas desta pesquisa:

1. Pesquisar e investigar o estado da arte do processo de operação de subestações de energia elétrica enfatizando aspectos de interface de operação, confiabilidade humana em sistemas críticos de engenharia, além de trabalhos correlatos na área de Realidade Virtual aplicado em subestações elétricas.
2. Analisar as tecnologias que são adequadas para a construção do sistema de Realidade Virtual, priorizando atributos técnicos pertinentes à integração com as interfaces tradicionais de operação, aquisição e envio de dados para componentes físicos, telas de controle disponíveis no SRV e formas adequadas de navegação.
3. Apresentar e treinar os operadores para a utilização do SRV desenvolvido, utilizando como referência tarefas tradicionais realizadas no processo de operação.
4. Realizar análises de usabilidade e satisfação, além de aplicar formulários de avaliação e observação para obtenção de resultados.

## **Organização da Tese**

Esta tese é estruturada em seis capítulos distribuídos da seguinte forma.

O primeiro capítulo apresenta conceitos de Operação de subestações de Energia Elétrica, Confiabilidade Humana em Sistemas Críticos de Engenharia, e Realidade Virtual.

O segundo capítulo apresenta trabalhos relacionados ao tema proposto, demonstrando a relevância desta pesquisa.

O terceiro capítulo relata a arquitetura utilizada para implementação do SRV.

O quarto capítulo apresenta as partes principais para desenvolvimento da estratégia proposta.

O quinto capítulo refere-se à análise da estratégia, relatando aspectos observados no usuário.

E finalmente são apresentadas conclusões e trabalhos futuros desta pesquisa.

# Capítulo 1

## Fundamentos

### 1. Introdução

Neste capítulo serão abordados tópicos que fundamentam a presente pesquisa, especificamente, Operação de subestações de Energia Elétrica, Confiabilidade Humana em Sistemas Críticos de Engenharia e Realidade Virtual.

#### 1.1 Operação de Subestações de Energia Elétrica

##### 1.1.1 Subestações

As subestações têm um papel fundamental no Sistema Interligado Nacional (SIN), estas podem ser definidas, de forma genérica, como sendo um conjunto de sistemas específicos e interdependentes concebidos para atender a um objetivo comum: servir ao sistema elétrico da melhor maneira possível, proporcionando confiabilidade adequada, facilidades e segurança para a sua manutenção e operação, além de um sistema de comando e proteção capaz de atuar corretamente de forma eficaz.(Violin, *et. al.*, 2014).

Desta forma, em condições adequadas de operação, as subestações de energia elétrica desempenham papel fundamental na transmissão da energia elétrica. No entanto, para que a transmissão e distribuição desta energia sejam viáveis, é necessário que esta seja convenientemente condicionada e controlada. Neste sentido, as subestações atuam como importantes elementos de um sistema elétrico, podendo servir para: a) alterar o nível de tensão; b) efetuar medições para controle de qualidade; c) conectar-se a outras usinas



geradoras e outras linhas de transmissão; d) converter corrente alternada em corrente contínua; e) direcionar fluxo energético (Mattioli, 2015).

A Figura 01 contextualiza um sistema elétrico simplificado.

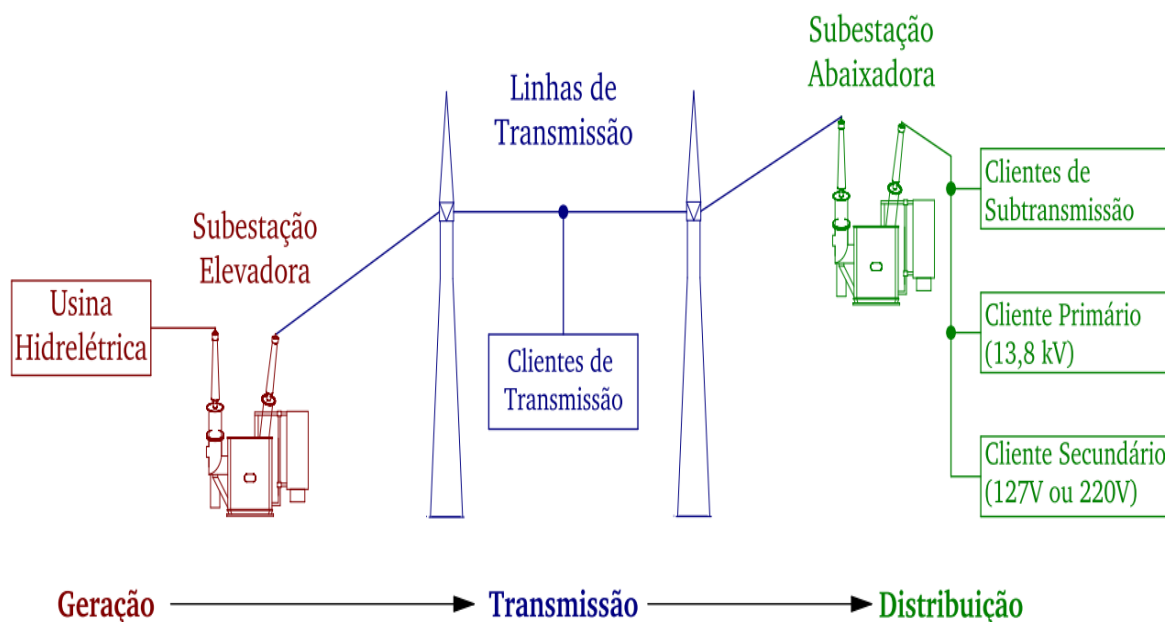


Figura 01: Sistema Elétrico Simplificado (Mattioli, 2015)

### 1.1.2 Operação do Sistema Elétrico

Inicialmente, a operação do sistema elétrico era baseada em nível local, por operadores de subestações que faziam, na maior parte das vezes, a operação diretamente nos equipamentos, de forma manual com acionamento mecânico. Com a evolução dos equipamentos trouxe a possibilidade de execução de comandos remotamente visando maior eficiência e segurança. Nesta direção, as interfaces de operação também evoluíram, abandonando a execução da operação diretamente nos equipamentos e buscando o oferecimento de interfaces suportadas por computadores e baseadas em diagramas unifilares em salas denominadas Centros de Operação do Sistema (COS). (Bechelane *et. al.*, 2014).

Prado (2016), relata que as atividades relacionadas à operação do SIN pelos COS podem ser divididas em subgrupos de acordo com sua posição temporal:

- **Pré-operação:** todas as atividades elaboradas e planejadas previamente à execução da operação. Elas subdividem-se em um conjunto de tarefas:

- Normatização: atividade relacionada à elaboração de instruções de operação usadas para operação do sistema.
- Programação de Intervenções: preparação do sistema elétrico para execução da operação.
- Operação em Tempo Real: todas as atividades relacionadas ao monitoramento e controle dos equipamentos executadas em tempo real.
- Pós-Operação: corresponde a todas as atividades realizadas posteriormente ao tempo real. É responsável pela avaliação do desempenho da operação. Exerce função similar a um controle de qualidade.

Esta pesquisa possui como foco o subgrupo denominado Operação em Tempo Real com aplicabilidade em subestações elevadoras, com intuito elevar o nível de tensão após o processo de geração.

### **1.1.3 Interface de Operação do Sistema Elétrico**

Para que um sistema de operação atinja seus objetivos, as informações referentes ao estado dos equipamentos precisam ser disponibilizadas aos diversos setores interessados, mantendo simultaneamente a integridade dos dados e a segurança do acesso. Para permitir a disponibilização das informações do sistema, em geral, o computador que executa o software de operação estará conectado à rede da companhia (Alves, 2014).

Atualmente, com exceção de sistemas de pequeno porte e subestações singelas que não possuam equipamentos com comandos elétricos, a interface “comum” de operação é baseada em computadores com diagramas unifilares 2D (Bechelane *et. al.*, 2014). A Figura 2 apresenta um exemplo desta interface.

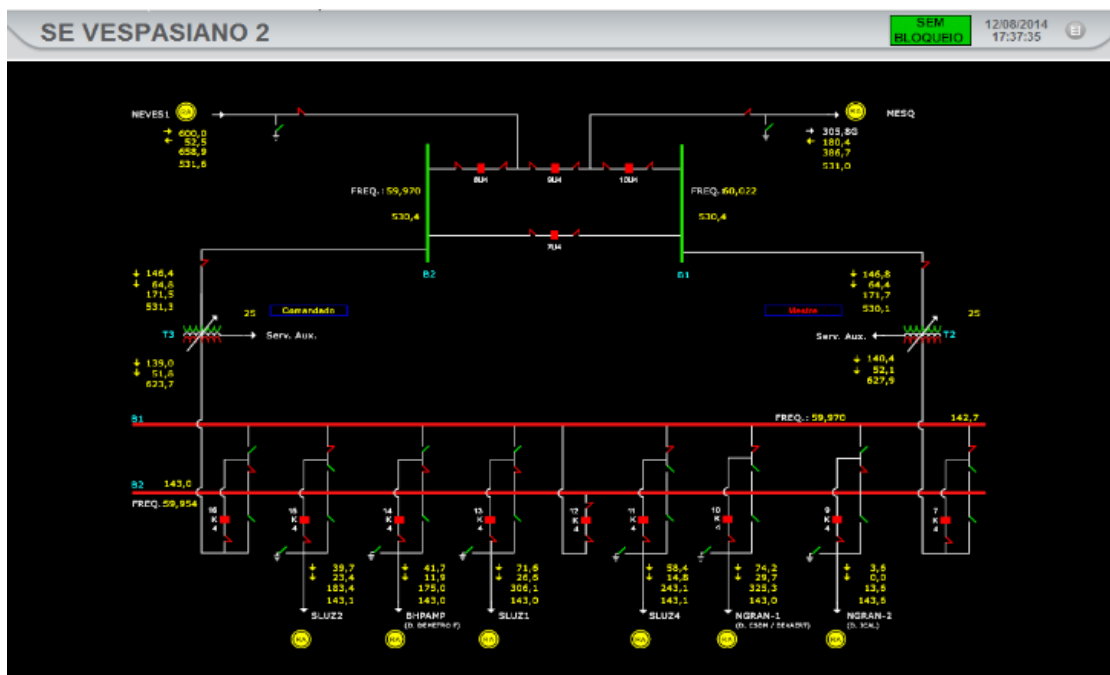


Figura 02: Diagrama unifilar de operação da subestação Vespasiano 2

Fonte: Imagem cedida pela Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG)

Portanto, entende-se que esta interface de operação é responsável por representar aos operadores os dados referentes ao *status* dos dispositivos, além de fornecer mecanismos para a realização do controle remoto dos equipamentos que compõem a subestação, por exemplo, abertura e fechamento de chaves seccionadoras e disjuntores.

Durante os procedimentos de monitoramento e controle os operadores podem utilizar recursos complementares sem integração a interface tradicional de operação, como ligações para outras equipes de campo, materiais textuais e diagramas estáticos para obtenção de outras informações.

Assim, a construção destas interfaces de operação precisa ser estudada de forma a permitir clara escolha das ações e caminhos a serem percorridos entre cada atividade, evitando ambiguidades que possam confundir os operadores, levando-os ao equívoco e provocando o erro.

Entretanto, pode-se observar que na interface atual de operação encontram-se duas condições promotoras de erro segundo a metodologia HEART, a saber: não proporciona informações espaciais e funcionais ao operador de forma que o mesmo possa prontamente assimilar durante o processo da tomada de decisão; apresentar divergência com a realidade em campo.

A Figura 3 apresenta a visão de campo de um componente da subestação de Vespasiano 2. Percebe-se, portanto, a diferença entre o real e o que é apresentado em um diagrama unifilar.



*Figura 03: Visão de campo da subestação Vespasiano 2*

*Fonte: Imagem cedida pela Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG)*

Assim, como mencionado, para os operadores de subestações, o ambiente tradicional de operação é uma interface 2D, representada por diagramas unifilares (Figura 2).

## **1.2 Atuação da Confiabilidade Humana na Operação de um Sistema**

Swain e Guttman (1983), definiram o conceito de confiabilidade humana como a probabilidade de procedimento ou atividade na operação de um sistema ser concluída com sucesso, pelo operador ou equipe, dentro do mínimo tempo exigido, quando a dimensão do tempo for relevante.

Em contrapartida, um atributo que pode comprometer os índices de confiabilidade humana em um sistema é a falha humana, sendo esta capaz de causar danos irreparáveis.

As falhas humanas ocorrem quando os erros são cometidos durante a realização de atividades necessárias para operação do sistema dentro de seus limites de segurança ou na execução de ações desnecessárias que interfiram no desempenho do sistema (Kirwan, 1992; Sheridan, 2008).

Diante desta situação, diversas metodologias foram desenvolvidas para analisar e otimizar aspectos referentes a confiabilidade podendo ser classificadas em 3 segmentos, conforme (Calixto, Lima & Firmino, 2013 apud Guedes, 2017):

- Taxonomia das falhas humanas – Métodos direcionados, principalmente, ao estudo da probabilidade de ocorrência da falha humana e condições promotoras de erro.
- Cognitivos – Metodologia que analisa fatores como carga de trabalho, stress, questões sociológicas, psicológicas e relacionadas à saúde, podem exercer influência sobre o desempenho do homem na execução das tarefas.
- Interdependências – Métodos caracterizados por estudar as relações entre os fatores de desempenho e suas interdependências.

É importante destacar que a problemática desta pesquisa é fundamentada e justificada pelos estudos da confiabilidade humana em sistemas críticos de engenharia por meio de taxonomia das falhas humanas, e os objetivos da pesquisa estão associados a inibição de duas condições promotoras de erros por meio da integração das técnicas de Realidade Virtual ao ambiente tradicional de operação.

### **1.2.1 Métodos de Análise da Confiabilidade Humana**

Utilizando como referência revisões sistemáticas realizadas por Bell & Holroyd (2009), Spurgin (2010), Groth e Swiler (2013), pode-se destacar 4 metodologias para análise da confiabilidade humana que possui como foco a taxonomia das falhas humanas. A Tabela 1 apresenta breve descrição e comparativo sobre estas.

*Tabela 1: Comparativo entre principais metodologias de análise da confiabilidade humana que possui como foco a taxonomia das falhas humanas.*

<b>MÉTODO</b>	<b>DESCRIÇÃO</b>	<b>APLICAÇÃO</b>	<b>VANTAGENS</b>	<b>DESVANTAGENS</b>
HEART	Método de relativa facilidade de aplicação e compreensão por engenheiros e especialistas em ACH.	Genérico	- Possui estudos referentes à aplicação em subestações de energia elétrica. - Bom levantamento das condições promotoras de erro. - Boa documentação de referência.	- Os critérios para avaliação por especialistas não são claros. - A seleção de tarefas-chave não é fácil, e as descrições são vagas.
SPAR-H	Abordagem útil para situações em que não é necessária uma avaliação detalhada. Desenvolvido para o USNRC. Baseado no HEART	Nuclear	- Similar ao HEART.	- Similar ao HEART. - Não encontrado aplicações destes métodos em subestações de energia elétrica.
THERP	Método com abordagem abrangente desenvolvido pela USNRC – (Comissão Reguladora Nuclear dos Estados Unidos).	Genérico, com ampla aplicação em Usinas Nucleares	- Facilidade de aplicação. - Pode ser usado para tarefas semelhantes à aplicação original. - Boa documentação de referência.	- Dificuldade na definição de subtarefas chaves. - Relevância dos dados para situações atuais é questionável. - Dificuldade para relacionar descrições de subtarefas com aplicação atual.
ASEP	Uma versão simplificada do THERP desenvolvido pela USNRC.	Nuclear	Similar THERP.	- Similar THERP. - Não encontrado aplicações destes métodos em subestações de energia elétrica.

*Fonte: Adaptado de Holroyd e Bell (2009), Spurgin (2010), Groth e Swiler (2013)*

Em suma, devido a boa cobertura referente a condições promotoras de erros, facilidade de compreensão e histórico de aplicação da metodologia associados a subestações de energia elétrica, este trabalho adotou a metodologia HEART como referência para análise e identificação dos agentes causadores de erros nas interfaces de operação do sistema elétrico.

### 1.2.2 Método HEART

O método HEART - *Human Error Assessment and Reduction Technique* (Técnica de Avaliação e Redução de Erros Humanos), elaborada por Willians (1986) e posteriormente revisada e atualizada por Bell e Willians (2016), pressupõe que qualquer confiabilidade no desempenho de uma tarefa pode ser modificada de acordo com a presença e força de condições promotoras de erro.

A metodologia relaciona 38 condições promotoras de erros que têm grande influência no desempenho das tarefas. Cada condição possui valor associado ao impacto que a mesma pode ocasionar, este valor é baseado em extensa análise da literatura sobre o desempenho humano. Vale destacar que este valor é atribuído em escala de 0 a 17.

É importante evidenciar que a condição promotora de erro número 5 intitulada como “Ausência de um meio de transmitir informações espaciais e funcionais ao operador de forma que possa prontamente assimilar” possui o valor 9 dentro de uma escala de 0 a 17 com relação ao impacto que a mesma pode ocasionar.

No mesmo sentido, a condição de número 6, “Interface Homem Máquina deficiente” (divergência entre a realidade de trabalho do operador com o que lhe é apresentado pela planta) tem como valor de impacto 8.

Estas condições promotoras de erro estão presentes no diagrama unifilar (interface utilizada pelos operadores) e, portanto, contribuem para ocorrência de falhas.

## 1.3 Realidade Virtual

### 1.3.1 Definições

Existem muitas definições de RV desenvolvidas por diversos autores envolvendo vários aspectos. Uma das mais aceitas é: “uma interface avançada para aplicações computacionais, que permite ao usuário a movimentação (navegação) e interação em tempo real, em um ambiente tridimensional, podendo fazer uso de dispositivos multissensoriais, para atuação ou feedback.” (Tori, Kirner & Siscoutto, 2006).

A definição apresentada por Cardoso e Lamounier (2006), define a RV como tecnologia que combina computadores de alto desempenho, programas e periféricos especializados que permitem a manipulação de objetos gráficos em um ambiente gráfico de aparência realística, e ainda apontam a possibilidade de criação de interface homem-máquina poderosa que oferece interação, navegação e imersão em ambiente virtual podendo fazer uso de canais multissensoriais de visão, audição, tato, olfato ou paladar.

Um aspecto importante desta tecnologia é a interação com o usuário, que leva em consideração a capacidade do computador reagir e responder às ações do usuário, sendo que alterações sejam feitas na aplicação (Bowman *et. al*, 2005).

Diversas são as formas de se atuar em um ambiente virtual e a navegação representa uma das interações possíveis mais simples. A navegação é responsável pela movimentação do personagem dentro da cena para uma completa visualização e exploração do ambiente. A navegação por si só não aplica modificações, mas possibilita a visualização de novos pontos de vista no ambiente. Manipulações e interações com alterações ocorrem quando o usuário entra no espaço virtual, visualiza e exerce algum tipo de modificação, como por exemplo, a rotação ou a posição de um objeto e a iluminação da cena (Kirner & Siscoutto, 2007).

Uma aplicação feita a partir dos conceitos propostos pela RV possibilita ao usuário atuar de forma intuitiva e manipular os objetos virtuais. Ele também pode desencadear eventos e animações que podem ser visualizadas e analisadas. Essa interação pode ser realizada através de dispositivos tecnológicos especiais, como por exemplo, capacetes especiais, luvas, leitores gestuais, comando de voz, ou até mesmo com dispositivos convencionais como teclado, mouse e um monitor comum. Independentemente da interface,



é importante que o usuário seja capaz de manipular o espaço e executar atividades em tempo real (Kirner & Siscoutto, 2007).

### 1.3.2 Realidade Virtual aplicada em Simulações Visuais

A RV pode ser utilizada para visualização de eventos, propriedades e comportamentos presentes em uma simulação. Ao mesmo tempo, uma simulação pode integrar a tecnologia da RV para demonstrar comportamentos específicos. Geralmente, um sistema de RV procura reproduzir características presentes no mundo real. Essas mesmas características devem ser obtidas através de simulações que podem ser realizadas por meio de SRV, definindo-se ações sobre objetos específicos ou sobre todo o ambiente. A física, o movimento e a colisão entre objetos exemplificam a simulação de comportamentos apresentados em um ambiente virtual (Kirner & Siscoutto, 2007).

O uso da RV para o monitoramento de dados e comportamentos presentes em uma simulação é possível e muito útil. Nesse caso, a RV é utilizada como módulo da simulação possibilitando análises visuais. Este módulo pode ser complexo e apresentar funções voltadas para visualização realística e interativa de simulação. Para que isso aconteça, os objetos 3D devem ser modelados em ferramenta de autoria e, posteriormente, ser integrado ao simulador. Ainda é necessária uma interface especial que permita visualizações interativas, além da possibilidade de alteração de parâmetros que definem aspectos da simulação (Bellinger, 2004). A Figura 4 retrata a exemplificação deste contexto.



*Figura 4— Ambiente de Realidade Virtual para Treinamento em Normas de Segurança Para Manutenções de Redes Elétricas (Morais et.al., 2013)*

### **1.3.3 Interação em Ambientes Virtuais Tridimensionais**

Novas tendências no campo da Interação Homem-Computador (IHC) começaram a surgir com a ascensão dos SRV, como Realidade Aumentada (RA), Interação Natural (IN) e Sistemas dotados de grandes telas para exibição de aplicações tridimensionais. Nesse campo de desenvolvimento, a interação acontece em um contexto espacial com diferentes graus de liberdade. Com o tempo, pesquisadores e desenvolvedores perceberam diferenças fundamentais entre as interfaces presentes em ambientes tridimensionais e em computadores convencionais. Com isso, uma área de pesquisa separada passou a ser necessária para estudar as técnicas de interação que as novas aplicações tridimensionais exigem (Bowman et al. 2011).

Em uma interação realizada em ambiente virtual tridimensional, as atividades de um usuário representam uma atuação sobre o ambiente em contexto tridimensional. Mas isto não quer dizer que sistemas tridimensionais interativos exijam interações 3D. Por exemplo, se o usuário explora o modelo em seu computador desktop escolhendo pontos de vista dispostos em um menu tradicional, não ocorre interações tridimensionais, não exigindo o uso de dispositivos 3D especiais de interação (Bowman et al. 2011).

Técnicas de interação são métodos utilizados pelos usuários para completar alguma tarefa através de uma interface, sendo que suas vantagens e desvantagens dependem diretamente dos requisitos particulares de um sistema. Dessa forma, padrões não são adotados e hardware e software devem ser levados em consideração. Para que interações homem-máquina sejam naturais e intuitivas, metáforas são utilizadas. Metáforas podem ser entendidas como modelos mentais que permitem ao usuário a aplicação de conhecimentos cotidianos em ambiente virtual (Schlattmann & Klein, 2007).

A seguir são apresentados os principais aspectos no processo de interação em ambientes virtuais tridimensionais.

#### **1.3.3.1 Manipulação e Seleção**

A manipulação é essencial em qualquer ambiente, seja ele físico ou virtual. Logo, a seleção de um objeto para posicioná-lo ou alterá-lo de alguma forma é muito importante para

um sistema interativo. Existem várias abordagens para a realização de tal tarefa e cada uma possui vantagens e desvantagens (Kirner & Kirner, 2008).

### **1.3.3.2 Navegação**

Técnica importante e muito utilizada em ambientes tridimensionais e exemplificada até mesmo pela navegação na internet através de um navegador. Exige noção espacial na qual o usuário deve saber onde ele está em relação a outros objetos. Esta técnica pode ser implementada através de viagens ou pela busca de caminhos. Em viagens, o usuário pode “saltar” de um lugar para o outro quase que imediatamente sendo o componente motor da navegação. Na busca de um caminho, o usuário deve definir o percurso dentro do ambiente para chegar a seu objetivo. Neste caso, conhecimento espacial é necessário e pode ser suportado por sugestões, naturais ou artificiais, durante o percurso (Kirner & Kirner, 2008).

### **1.3.3.3 Controle do Sistema**

No controle do sistema, o usuário desenvolve suas tarefas inserindo comandos no sistema. Estes comandos podem ter intuitos distintos, como executar uma função específica, mudar as formas de interação, navegação, o estado do sistema, entre outros. O usuário deve dar comando ao sistema e este, por sua vez, executa o comando da forma como foi programado. Janelas, ícones, menus e ponteiros exemplificam esta técnica, ilustrada em interfaces bidimensionais (Kirner e Kirner, 2008).

### **1.3.3.4 Entradas Simbólicas**

Informações simbólicas são exemplificadas por textos, números, símbolos, marcas ou rótulos. Em sistemas com entradas simbólicas, o usuário trabalha com esse tipo de informação tão comum no cotidiano. O envio de um e-mail para outro indivíduo faz uso dessa técnica de interação. Assim, fica clara a importância desse tipo de informação em interfaces 2D. Ao dividir um ambiente 3D, o usuário pode demandar funcionalidades que permitem a troca de informações. Em ambiente tridimensional, esse tipo de linguagem pode ser utilizado para

informar o usuário sobre objetos na cena (nome, status, alerta), além de ser indispensável para possibilitar a comunicação (Kirner e Kirner, 2008).

## **1.4 Considerações Finais**

Os tópicos abordados nestes capítulos são muito importantes para o pleno entendimento de conceitos e visualizações das diversas necessidades envolvendo sistemas de energia e potencialidades que a Realidade Virtual pode oferecer.

Logo, o objetivo deste capítulo é prover conceitos básicos e necessários para entendimento dos fundamentos desta pesquisa relatando definições, critérios e aplicabilidade.

No próximo capítulo apresenta-se o estado da arte por meio de trabalhos relacionados a esta pesquisa.

## Capítulo 2

# Trabalhos Correlatos

### 2. Introdução

Elaborou-se uma revisão bibliográfica sistemática para analisar e avaliar por meio de publicações científicas o uso de Realidade Virtual aplicado no contexto de Subestações de Energia Elétrica. As bases de dados de periódicos científicos utilizadas na revisão foram: a) IEEEXplore; b) ACM Digital Library; c) Scopus; d) Science Direct.

Foram definidas questões de pesquisa para nortear os objetivos dos trabalhos selecionados, sendo estas questões:

QP1 – Propostas, análises e avaliações de Sistemas de Realidade Virtual em Subestações de energia elétrica.

QP2 – Estratégias para Integração da RV com interface tradicional de operação para conservação do modelo mental de operação.

QP3 – Manipulação de dados reais de medição com representação tridimensional realística.

QP4 – Impactos e desafios de implantação de Sistemas de Realidade Virtual em centro de operações.

Posteriormente foram definidos 3 filtros com critérios de inclusão e exclusão:

Filtro 01: Leitura do Título e palavras-chave.

- Inclusão: a) Trabalhos que abordam uso de Realidade Virtual em subestações de energia elétrica; b) Apresentam pelo menos uma palavra-chave relacionadas às questões da pesquisa.

- Exclusão: a) Trabalhos duplicados; b) Trabalhos com mais de 10 anos até a data de realização da busca.

Filtro 02: Leitura do Resumo.

- Inclusão: a) Trabalhos que relatam algum tipo de envolvimento dos profissionais que atuam na área de subestações de energia elétrica durante o decorrer da pesquisa.
- Exclusão: a) Trabalhos que têm como foco técnicas diferentes de Realidade Virtual para construção de interfaces como Realidade Aumentada e Holografia;

Filtro 03: Leitura na íntegra do artigo.

Critérios para seleção: a) Acesso ao artigo completo; b) Trabalhos que apresentam resultados. c) Trabalhos que relatam os mecanismos de controle e interação com ambiente de Realidade Virtual.

Com a definição dos procedimentos adotados para a execução da busca dos trabalhos foram definidas as seguintes palavras-chaves:

- Associadas a Realidade Virtual: Virtual Reality, VR, Immersive Environment.
- Associadas a Subestações: Power Substation, Electric Substation, Electrical Power Substation.
- Associadas a Aplicabilidade: Monitoring, Control, Training, Maintenance, Integration.

Consequentemente foi adaptada uma *string* de busca de acordo com cada sistema de busca das plataformas de pesquisa. De modo geral pode-se generalizar a constituição da seguinte string:

("Virtual Reality" OR "VR" OR "Immersive Environment") AND ("Power Substation" OR "Electric Substation" OR "Electrical Power Substation") AND ("Monitoring" OR "Control" OR "Training" OR "Maintenance" OR "Integration").

Após a aplicação destes procedimentos, não foi encontrada nenhuma proposta que utilize Realidade Virtual para compor uma interface complementar de controle de subestação de energia elétrica, caracterizando originalidade e ineditismo desta pesquisa. Entretanto, foram encontrados diversos trabalhos que utilizam Realidade Virtual em outras vertentes do âmbito de subestações de energia elétrica, sendo estas: a) Treinamento de Operadores de Subestação de Energia Elétrica; b) Planejamento de Manutenção e Intervenções de

Subestações de Energia Elétrica; c) Metodologias para o desenvolvimento de subestações virtuais.

As buscas foram realizadas no período de fevereiro até abril de 2019. Foram percebidos que os mecanismos de buscas de algumas plataformas podem comportar de maneira inesperada ao planejamento da string retornando alguns trabalhos sem relação com a proposta investigativa que foram desconsiderados. A Tabela 2 apresenta os resultados das buscas por trabalhos após aplicado as strings com os critérios de inclusão, exclusão e seleção.

*Tabela 2: Resultado por bibliotecas digitais e filtros.*

<b>Biblioteca Digital</b>	<b>Busca</b>	<b>Filtro 1</b>	<b>Filtro 2</b>	<b>Filtro 3</b>
<b>IEEEXplore</b>	113	38	15	3
<b>ACM Digital</b>	21	4	0	0
<b>Scopus</b>	68	27	8	1
<b>ScienceDirect</b>	187	13	11	2
<b>Total</b>	389	82	34	6

*Fonte: O autor.*

Ao final, foram selecionados 6 trabalhos relevantes para o tema desta pesquisa, estes serão apresentados brevemente nas subseções deste capítulo.

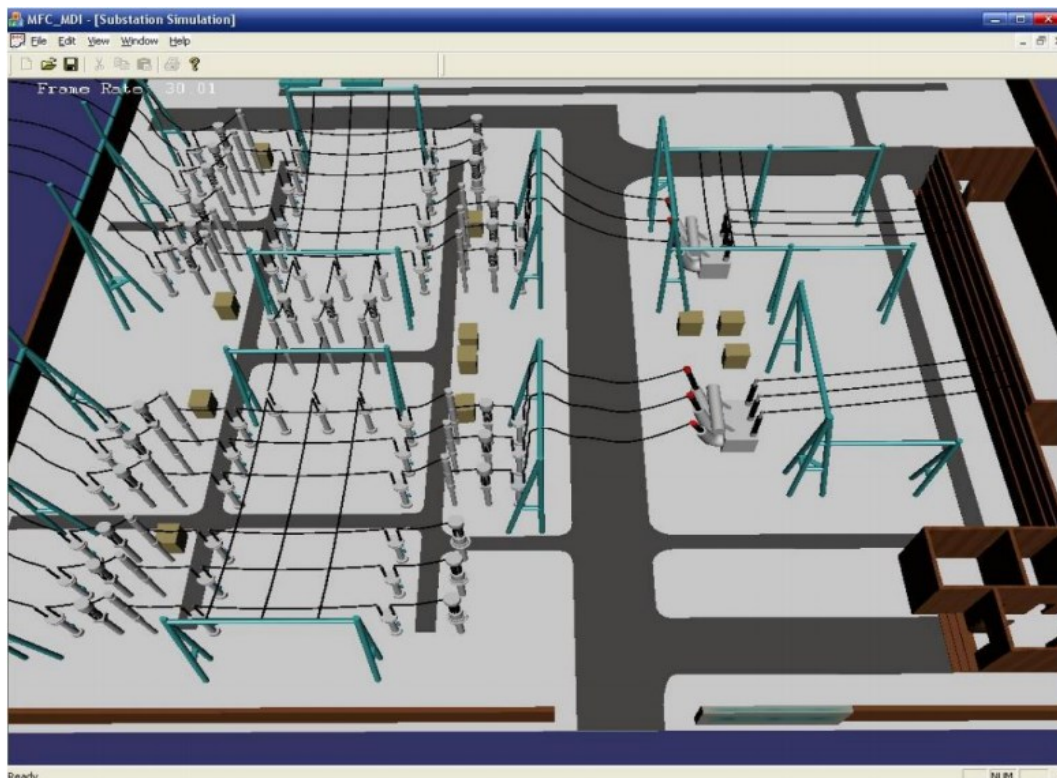
## **2.1 Scene Graph Organization and Rendering in 3D Substation Simulation System**

Neste artigo, Guangwei & Wenjuan (2009), tem como propósito o desenvolvimento de uma ferramenta que inclui técnicas de Realidade Virtual que permite aos operadores de subestações treinarem tarefas específicas relacionadas à inspeção de equipamentos. O sistema proposto permite que os operadores de subestações possam ter uma visão completa do processo que envolve a operação por uma vertente simulada com objetivo de treinamento.

Os autores evidenciam detalhes da estratégia de construção do ambiente virtual esclarecendo aspectos de modelagem geométrica, construção por meio de grafo de cena e

otimização da renderização. Por fim, relatam sobre a necessidade de padronização da avaliação do treinamento para mensurar valores quantitativos e qualitativos.

A Figura 05 ilustra uma subestação que o sistema contempla.



*Figura 5 – Exemplo de Subestação (Guangwei & Wenjuan, 2009)*

Com relação à atuação deste trabalho, é importante destacar que não é possível o operador controlar os estados dos componentes da subestação, evidenciando apenas aspectos de visualização e navegação para o treinamento de inspeção dos componentes.

Por fim, vale ressaltar que a representação tridimensional não possui forte sensação de realismo.

## **2.2 3D Virtual Models Applied in Power Substation Projects**

O trabalho de Quintana e Mendoza (2009), possui como um dos objetivos elaborar uma metodologia para criação de modelos virtuais de subestações de energia elétrica, podendo atuar como ferramenta complementar no planejamento da manutenção. Neste sentido torna-se possível simular virtualmente sua alteração, seja esta inclusão ou remoção de equipamentos. Os autores também esclarecem detalhes de todas as etapas da construção



e apresentam uma aplicação real da metodologia simulando a expansão virtual da subestação de Xochimilco. A complementação de informações espaciais 3D pode auxiliar no planejamento das ações de manutenção das subestações.

A Figura 6 apresenta o resultado da construção da subestação.



*Figura 6 – Subestação de Xochimilco (Quintana & Mendoza, 2009)*

É importante salientar que esta ferramenta não apresenta informações referentes aos estados dos equipamentos e nenhuma integração com interface tradicional de operação, embora que sua aplicabilidade reforça importância de interfaces que contemplem realidade de trabalho, maximizando resultados nas diversas áreas de atuação relacionados a subestações de energia elétrica.

## **2.3 An Improved Virtual Reality Engine for Substation Simulation**

Meng & Kan (2010), tem como proposta um modo de desenvolvimento flexível para criar uma estrutura de ambiente de Realidade Virtual para Subestações de Energia Elétrica voltada a treinamento para não-especialistas compreenderem os processos de funcionamento de uma subestação. É apresentado como um dos aspectos de motivação da proposta a importância de prover recursos visuais mais próximos da realidade de campo, pois grande parte destes são fundamentados por simbologias.

Os pesquisadores relatam ainda a necessidade de desenvolver módulos complementares para aprimorar a *Game Engine* de Realidade Virtual. Como a maioria das *Game Engines* não possuem módulos dedicados à confecção de subestações de energia elétrica, foi desenvolvido módulos para complementar a *Engine* e reduzir alguns gastos no momento da fabricação das SEs. A estrutura desenvolvida conta com métodos para captura dos valores reais aos estados dos equipamentos.

A Figura 7 apresenta o resultado da simulação visual da ferramenta.



*Figura 7 – Resultado de uma simulação visual de uma subestação (Meng & Kan, 2010)*

Neste trabalho, os autores não relatam a implantação do mesmo em um cenário real de utilização. Também, não destacam a possibilidade de controlar equipamentos da subestação, e por fim não é abordado o desenvolvimento de soluções para integração da ferramenta com interface tradicional de operação privilegiando a reutilização e associação com o modelo mental padrão de operação.

## 2.4 Virtual Reality in the Substation Training Simulator

No trabalho de Wang & Li (2010), baseia-se em um sistema de Realidade Virtual conectado a uma base de dados, concebido para fins de treinamento de operadores em salas de controle de subestações. O sistema contempla a preparação para resolução de problemas de equipamentos de energia e tratamento de acidentes envolvendo a operação. Por fim, os autores relatam que ao utilizar este sistema os operadores compreenderam completamente o funcionamento correto do equipamento em condições diferentes, além de melhorar efetivamente o tempo de resposta em situações emergenciais. Algumas propostas para questões de desempenho são apresentadas evidenciando a troca rápida de texturas para representar estados dos dispositivos.

A Figura 8 apresenta o ambiente virtual representando a sala de controle.



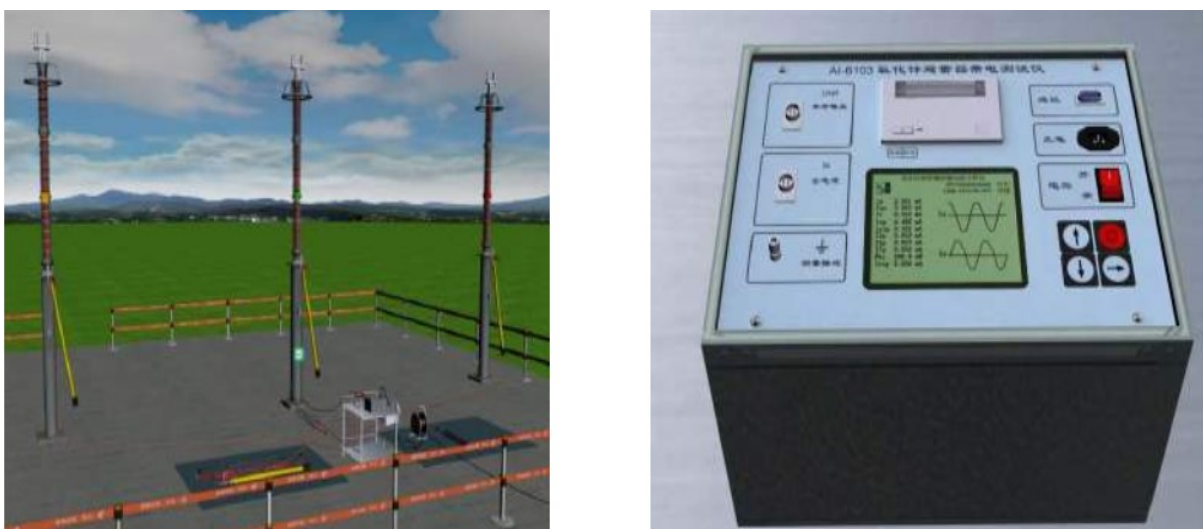
*Figura 8– Representação virtual da sala de controle (Wang & Li, 2010)*

Embora o sistema desenvolvido utilize base de dados interligada e possuir grande similaridade com operação de campo, ele possui como foco apenas o treinamento, não permitindo a atuação nos painéis das salas de controle.

## 2.5 A Training Simulator for PD Detection Personnel

O sistema concebido por Yang, Wu & Tian (2014), é destinado ao treinamento em detecção de falhas por descargas parciais. A pesquisa apresenta arquitetura de comunicação desde a camada de aquisição dos dados até a camada de dados. O sistema oferece vários esquemas de detecção e permite que algoritmos de simulação de falhas e de simulação de instrumentos sejam empacotados em componentes separados, permitindo adicionar novos esquemas de detecção para estender funções do sistema. O Centro de Treinamento de Fornecimento de Energia de Guangzhou foi beneficiado com a implantação deste sistema.

A Figura 9 apresenta o ambiente proposto.



*Figura 9 – Ambiente virtual para treinamento em detecção de descargas parciais (Yang, Wu & Tian, 2014)*

São apresentados resultados qualitativos evidenciando bons resultados no processo de treinamento, embora não tenha apresentado nenhuma metodologia para avaliação de resultados quantitativos.

Nesta pesquisa não é relatado a integração em algum nível com a interface tradicional do contexto da solução.



## 2.6 Semi-automatic methodology for augmented panorama development in industrial outdoor environments

Outra pesquisa relacionada é a de Gomes *et. al.* (2017), é apresentado uma ferramenta de autoria utilizando panoramas esféricos para construção de ambientes imersivos de Realidade Virtual (RV) associada ao conceito de panoramas aumentados. A ferramenta permite a construção de panoramas aumentados a partir de imagens adquiridas previamente, utilizando um servidor web, e permite a associação dos objetos presentes no panorama com uma base de dados para fornecer informações sobre eles no ambiente de RV. A ferramenta foi utilizada para construir ambiente imersivo baseado em uma subestação de energia, onde foram adquiridas imagens da subestação real e dados sobre os equipamentos foram consultados através de comunicação com os sistemas de aquisição de dados da subestação.

A Figura 10 apresenta o ambiente virtual, com destaque para as informações de leitura dos principais atributos de monitoramento de transformador de uma subestação de energia elétrica.

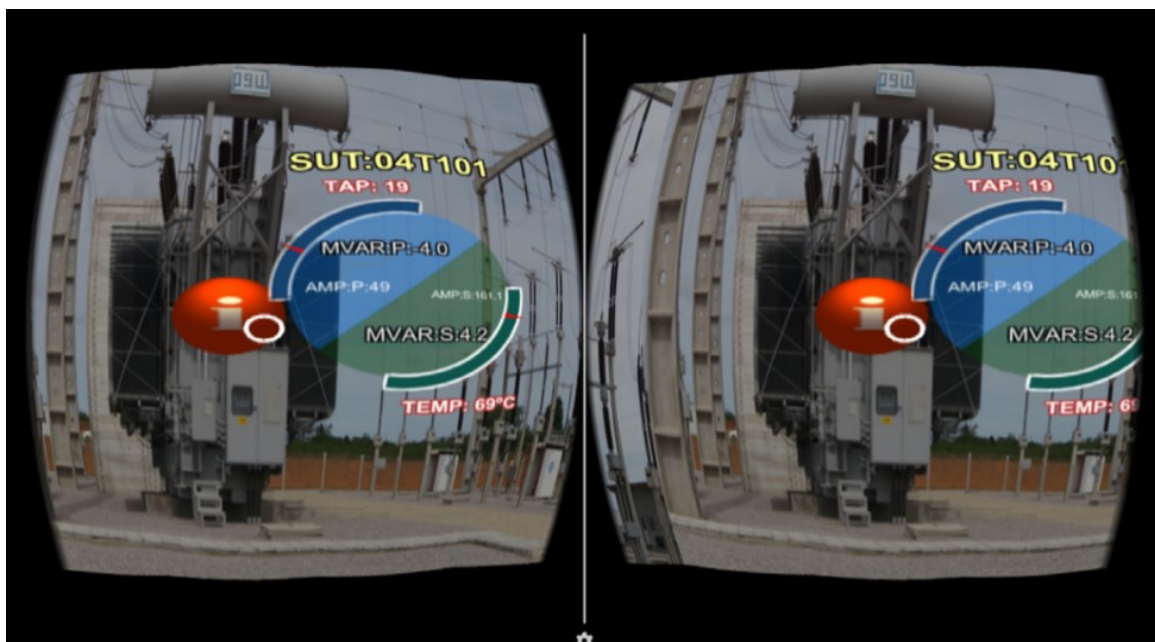


Figura 10 – Visualização do Panorama aumentado com as marcações realizadas nos equipamentos Gomes *et. al.* (2017)

A solução foi aplicada e apresentada para os operadores do sistema elétrico de uma determinada concessionária. Para obtenção dos resultados foi aplicado um questionário para avaliar o grau de satisfação subjetiva dos usuários (operadores e estudantes), sendo

apresentando resultados satisfatórios. É importante frisar que não foi relatado a possibilidade de controle e atuação dos estados dos equipamentos que compõem a subestação, apenas navegação e visualização das informações sem integração com a interface tradicional de operação.

## 2.7 Resumo Comparativo dos Trabalhos Analisados

Mesmo apresentando escopos de atuação distintos no âmbito de subestações de energia elétrica, é possível notar nos trabalhos analisados a importância de desenvolver interfaces que apresentem informações espaciais pertinentes no domínio da proposta, e por consequência propiciar uma interface homem máquina mais natural e intuitiva com a realidade vivenciada.

De tal maneira, é possível identificar e analisar atributos que favoreçam a experiência do uso da Realidade Virtual em diversos domínios no âmbito das subestações de energia elétrica, sendo estes: a) Integração da solução de RV com Sistema tradicional de operação (2D/Unifilar); b) Realismo dos objetos virtuais; c) Conexão da Interface de Realidade Virtual com sistema de supervisão para fornecimento de valores em tempo real de medição; d) Adaptação *widgets* de controle contidas na interface de Realidade Virtual que favoreça o modelo mental de operação já adquirido pelo operador. A Tabela 3 apresenta análise destes recursos em função dos trabalhos relacionados apresentados.

Com base nos fundamentos abordados na Introdução e capítulo 1, e análises no capítulo 2, criou-se o escopo para elaboração de uma estratégia para desenvolver interface complementar de operação baseada em Realidade Virtual que possibilita transmitir informações espaciais e funcionais no processo de monitoramento e controle de subestações de energia elétrica, sendo apresentado nos próximos capítulos.

Tabela 3 – Tabela comparativa entre os trabalhos correlatos

<b>Tópico Abordado</b>	Guangwei & Wenjuan, 2009	Quintana & Mendoza, 2009	Meng & Kan, 2010	Wang & Li, 2010	Yang, Wu & Tian, 2014	Gomes <i>et. al.</i> (2017)
Integração da da solução de RV com Sistema tradicional de operação.	✗	✗	✗	✗	✗	✗
Realismo dos objetos virtuais	✗	✓	✓	✱	✓	✓
Apresentação de valores em tempo real de medição	✗	✗	✓	✓	✓	✓
Adaptação das Widgets de controle	✗	✗	✗	✓	✓	✗
Área de atuação no âmbito das subestações	T	PM	M	T	T	M

Fonte: O autor.

✓ - SIM      ✗ - NÃO      ✱ - FORMA PARCIAL OU APROXIMADA

T – Treinamento

PM – Planejamento de Manutenção

M – Metodologia para Elaboração e Construção

MC – Monitoramento e Controle

## Capítulo 3

# Arquitetura e Desenvolvimento do SRV

### 3. Introdução

Este capítulo apresenta as especificações de Engenharia de Software do sistema de Realidade Virtual que suportará a estratégia de integração proposta, além de breve conceito das tecnologias de apoio utilizadas e detalhes de implementação.

#### 3.1 Descrição do SRV para Monitoramento e Controle de subestações de Energia Elétrica.

O sistema proposto consiste num ambiente virtual realístico que representa uma subestação de Energia Elétrica da Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG), dotado de interfaces de monitoramento e controle.

Por meio de uma arquitetura interna elaborada para a *engine Unity*, dados referentes aos estados dos equipamentos (ligado, desligado, aberto, fechado, medições elétricas) que compõem uma subestação da concessionária de Energia Elétrica CEMIG, são recebidos e processados em tempo real via *WebService*. Dispondo dessas informações o ambiente virtual é atualizado representando fielmente o estado dos dispositivos.

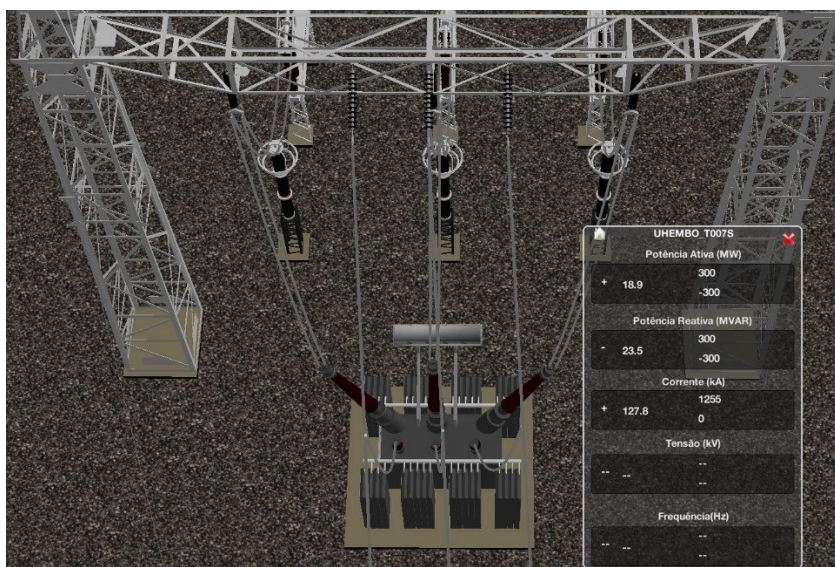
Com essa arquitetura, é possível fornecer uma abordagem para controlar e operar dispositivos da subestação de energia por meio do uso das técnicas Realidade Virtual, propiciando maior imersão e interações mais intuitivas. Outro aspecto pertinente é que os



operadores podem navegar das mais diversificadas formas e customizar ângulos de navegação, explorando e visualizando as condições dos componentes elétricos para controlar a subestação com maior segurança.

Devido à reconstrução virtual ser fiel ao ambiente real, existe possibilidade de utilizar o sistema para fins de treinamento. Assim, os operadores podem explorar e conhecer detalhes físicos dos objetos, além de simular diferentes possibilidades de operação do circuito sem comprometer sua segurança e desempenho do sistema.

A Figura 11 apresenta o sistema durante a operação de consulta do estado de um dos componentes da subestação.



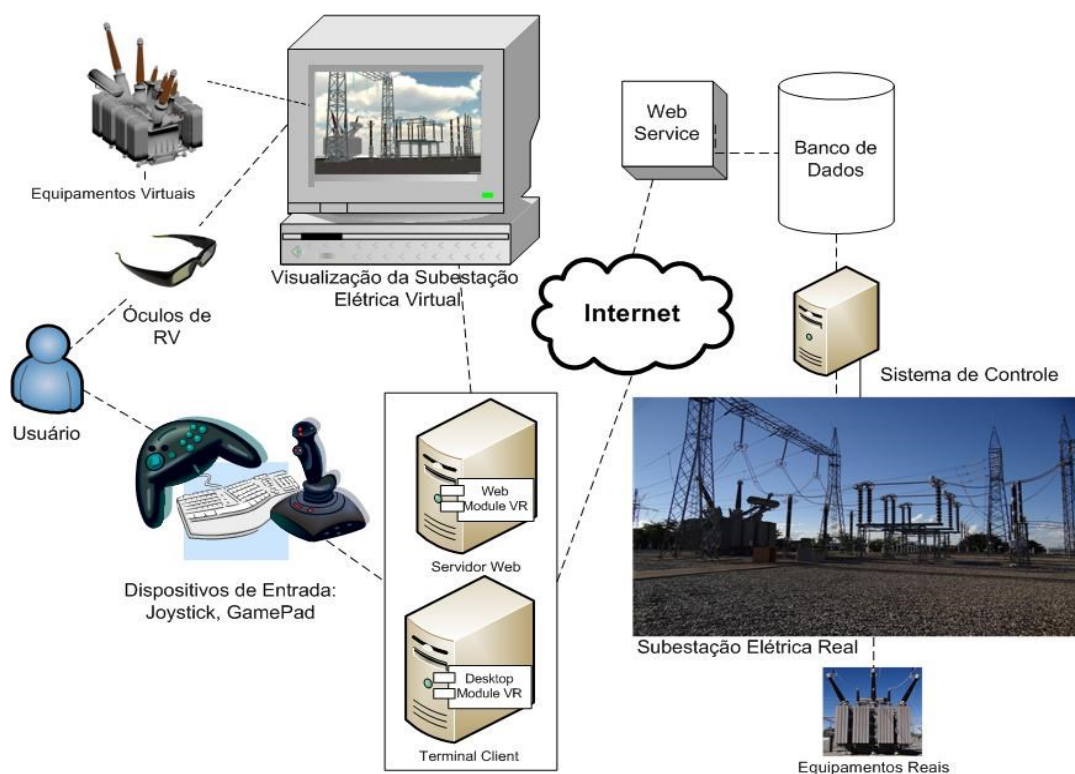
*Figura 11 - Consulta das informações de estado de um transformador via WebService*

## 3.2 Arquitetura de Atualização do SRV

O sistema proposto deve representar uma subestação real apresentando informações corretas dos equipamentos. Neste sentido, torna-se necessário a elaboração de uma arquitetura. Essa foi concebida utilizando o paradigma de orientação a objetos. Os dados dos equipamentos são coletados e enviados via WebService, que por sua vez é disponibilizado pela operadora de energia - CEMIG.

A Figura 12 apresenta fluxo bidirecional de aquisição e envio de dados. Por meio de sistema de controle e coleta de dados, os estados dos equipamentos reais que compõem a

subestação elétrica são coletados, processados e disponibilizados via WebService. Posteriormente, o ambiente virtual faz o consumo destas informações e realiza a atualização do sistema, correspondendo de forma fiel à subestação real. Por se tratar de uma arquitetura bidirecional torna-se possível alterar o estado dos equipamentos por meio do ambiente virtual, modificando assim o estado dos componentes reais.



*Figura 12 - Arquitetura Proposta*

### 3.3 Tecnologias de Apoio

Sementille (1999) apud Ribeiro (2006) aponta que novas tecnologias têm sido criadas para dar suporte ao desenvolvimento de aplicações em RV.

Sendo assim, no desenvolvimento desse projeto são utilizadas algumas dessas tecnologias para realização das técnicas de RV, onde serão apresentadas a seguir.

### 3.3.1 3D Studio Max

Como em toda aplicação em Realidade Virtual, objetos tridimensionais são essenciais. Para modelagem destes objetos tridimensionais que compõem uma subestação (Transformadores, Chaves Seccionadoras, Para-Raios), foi utilizado o Software Autodesk 3D Studio Max 2014.

Almeida, (2007) relata que o software 3D Studio Max 2014 é um aplicativo de modelagem tridimensional que aceita converter uma sequência de símbolos gráficos num arquivo visual e produzir animações. É uma das principais ferramentas para a criação de objetos e cenários virtuais.

O software realiza criação de modelos de alta qualidade, com transparências, sombreamentos, luzes, etc. Possui tecnologia de programação orientada a objetos, ou seja, tudo possui nomes e propriedades que podem ser modificados a qualquer instante e é considerado como um dos softwares de modelagem tridimensional mais utilizados, oferecendo uma solução completa para modelagem, simulação, renderização, animação entre outros (Almeida, 2007).

Para a construção dos modelos, foi elaborada uma convenção de modelagem para que todos os objetos tridimensionais fossem desenvolvidos com os mesmos padrões, por exemplo, alto grau de realismo, baixa quantidade de polígonos e dimensões em escala real. Para tanto, foram utilizados catálogos dos equipamentos, plantas e imagens.

Após a modelagem dos componentes o 3DS Max foi responsável também pela exportação dos objetos, através do seu plugin FBX. Foi possível exportar objetos ou até mesmo cenas inteiras em formatos perfeitamente reconhecidos pela engine na qual o SRV foi desenvolvido.

A Figura 13 apresenta componente elétrico modelado no 3D Studio Max.

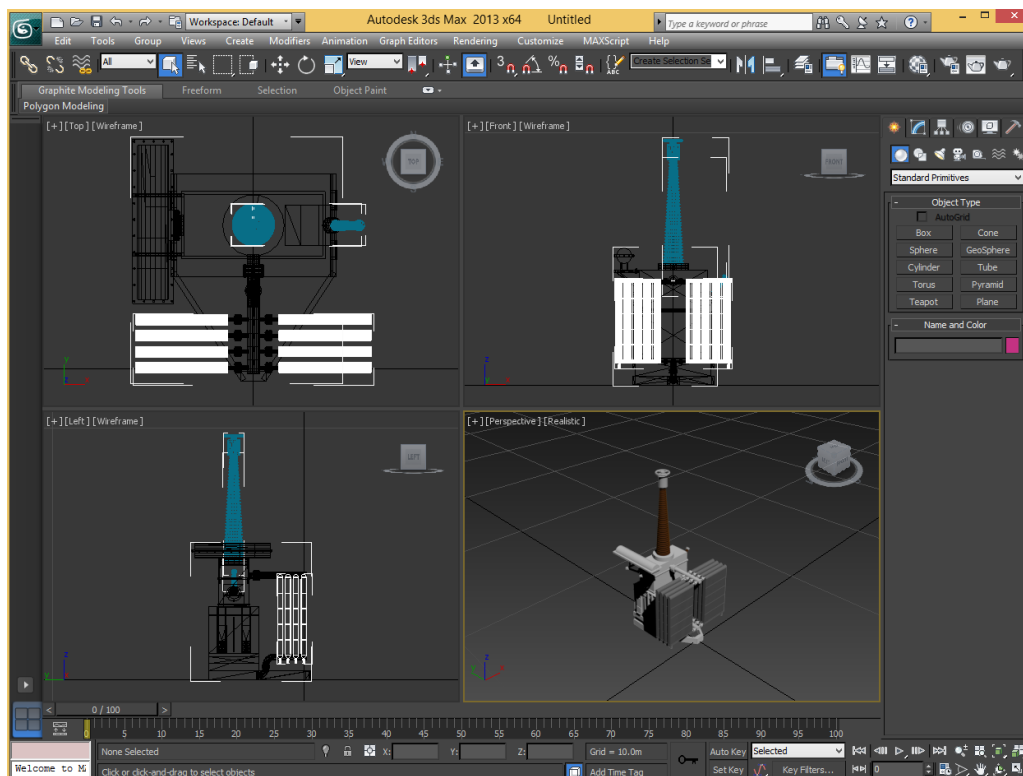


Figura 13 - Modelo Virtual do Reator Shunt

### 3.3.2 Engine Unity 3D

A *Unity3D* versão 4.6, foi o *engine* escolhido para desenvolvimento deste projeto é um exemplo de software popular para o desenvolvimento de aplicações tridimensionais.

Assim como várias outras engines, oferece um ecossistema de desenvolvimento com ferramentas próprias para a criação de conteúdo 3D com possibilidade de interação. Também oferece suporte a diversas plataformas como por exemplo *iOS*, *Android*, *PS4*, *Windows*, *Linux*, *Web Player* com boa qualidade visual e performance, disponível em versão gratuita ou paga. A *Unity3D* ainda suporta sistemas de iluminação, áudio, efeitos especiais e animação, oferecendo ao desenvolvedor a possibilidade de testar e editar, simultaneamente, a aplicação que está sendo desenvolvida.

Um dos maiores motivos para escolha deste motor foi sua completa documentação e disponibilidade da comunidade *Unity*. Possui comunidade com milhares de membros e com grande diversidade de conteúdos capaz de auxiliar os desenvolvedores, desde os iniciantes até os mais experientes, assim todas essas funcionalidades e potencialidades contribuem

drasticamente para redução do tempo e custo do trabalho, justificando a escolha da *Unity* para o desenvolvimento deste projeto.

Todo cenário tridimensional, arquitetura de aquisição e envio de dados e mecanismos de interação que compõem o SRV foram construídos utilizando a Engine, com importação de objetos tridimensionais e desenvolvimento de *scripts* (Códigos de Programação). É importante lembrar que algumas animações também foram criadas na própria *Unity 3D*, como transições de câmeras, por exemplo, trabalhando em conjunto com animações desenvolvidas no software de modelagem.

A Figura 14 apresenta *engine* em processo de desenvolvimento do SRV proposto.

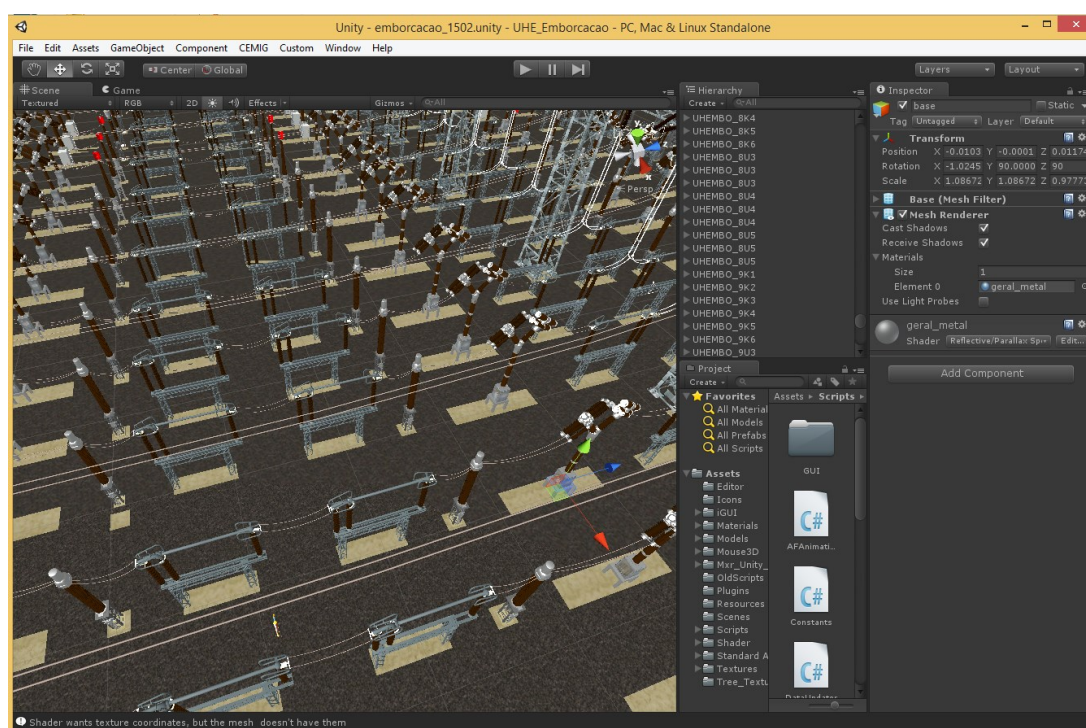


Figura 14 - Construção da Cena referente à Subestação de Emborcação

### 3.3.3 Codificação – MonoDevelop

A instalação da Engine *Unity3D* oferece o ambiente de desenvolvimento MonoDevelop, ambiente integrado de desenvolvimento no qual toda a codificação do SRV foi realizada. O ambiente foi desenvolvido originalmente para o C#, mas atualmente oferece suporte a diversas linguagens de programação. Possui funcionalidades interessantes para desenvolvimento como auto complemento de código, localização e layout personalizável,



assim como modo Debug, que possibilita verificação de cada linha de código durante execução da aplicação.

Apesar de ser editor de *script* padrão, este software é complemento opcional para a *Unity3D* e pode ser substituído por outros editores nas configurações de preferências da Engine. O *MonoDevelop* é um editor externo ao Motor Gráfico, mas ambos compartilham funcionalidades. Na criação de um script dentro da interface da *Unity3D*, por exemplo, o novo arquivo gerado, se aberto, poderá ser imediatamente editado no *MonoDevelop* e já incluirá trechos de código básico quase sempre utilizados no desenvolvimento de uma aplicação.

Para o desenvolvimento foi utilizado a plataforma *MonoDevelop 4.0.1*, com extensões escritas na linguagem C#, aplicando os conceitos de orientação à objetos.

A Figura 15 apresenta o ambiente de desenvolvimento.

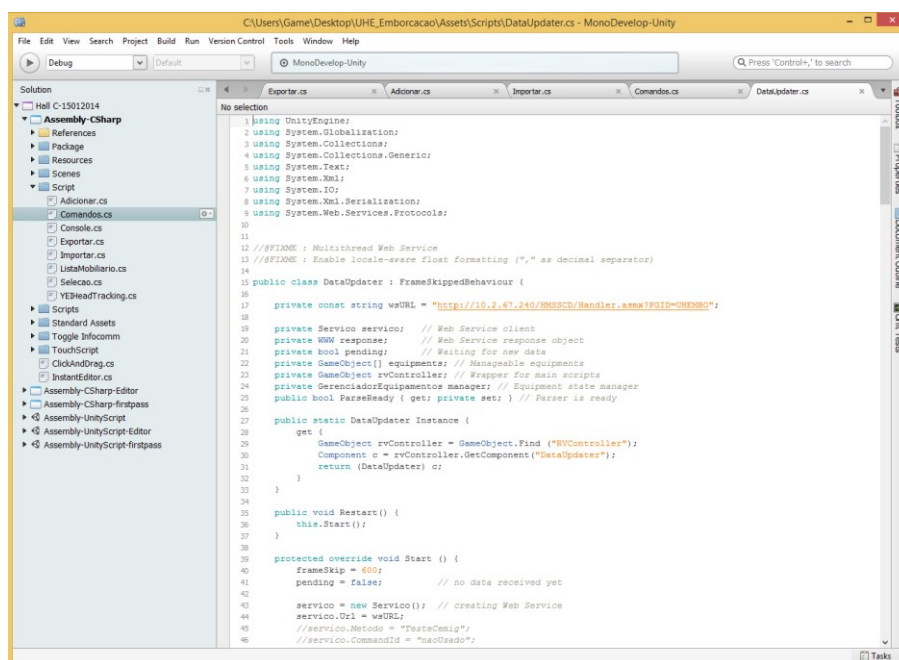


Figura 15 - MonoDevelop

### 3.4 Modelagem UML

Segundo Bezerra (2002), a Linguagem de Modelagem Unificada (UML) é definida como uma linguagem visual para modelar sistemas orientados a objetos. Isso quer dizer que, a UML é uma linguagem constituída de elementos gráficos (visuais) utilizados na modelagem que permitem representar os conceitos do paradigma da orientação a objetos. Por meio dos elementos gráficos definidos nesta linguagem podem-se construir diagramas que representam diversas perspectivas de um sistema (Bezerra, 2002).

### 3.4.1 Casos de Uso

Nesta seção serão apresentados os principais casos de usos relacionados às ações para monitoramento e controle contidos no ambiente 3D que integrarão ao sistema tradicional de operação, sendo estes: a) mudanças da forma de navegação; b) consultas de estado dos equipamentos; c) envio de comandos; d) manipulação (ativação/desativação) das camadas de conteúdos.

Observa-se que a interação do usuário com o sistema baseia-se na navegação pela subestação virtual, monitoramento e controle dos equipamentos que compõem a mesma.

Os casos de uso distribuem-se nessas grandes áreas, conforme apresentado na Figura 16.

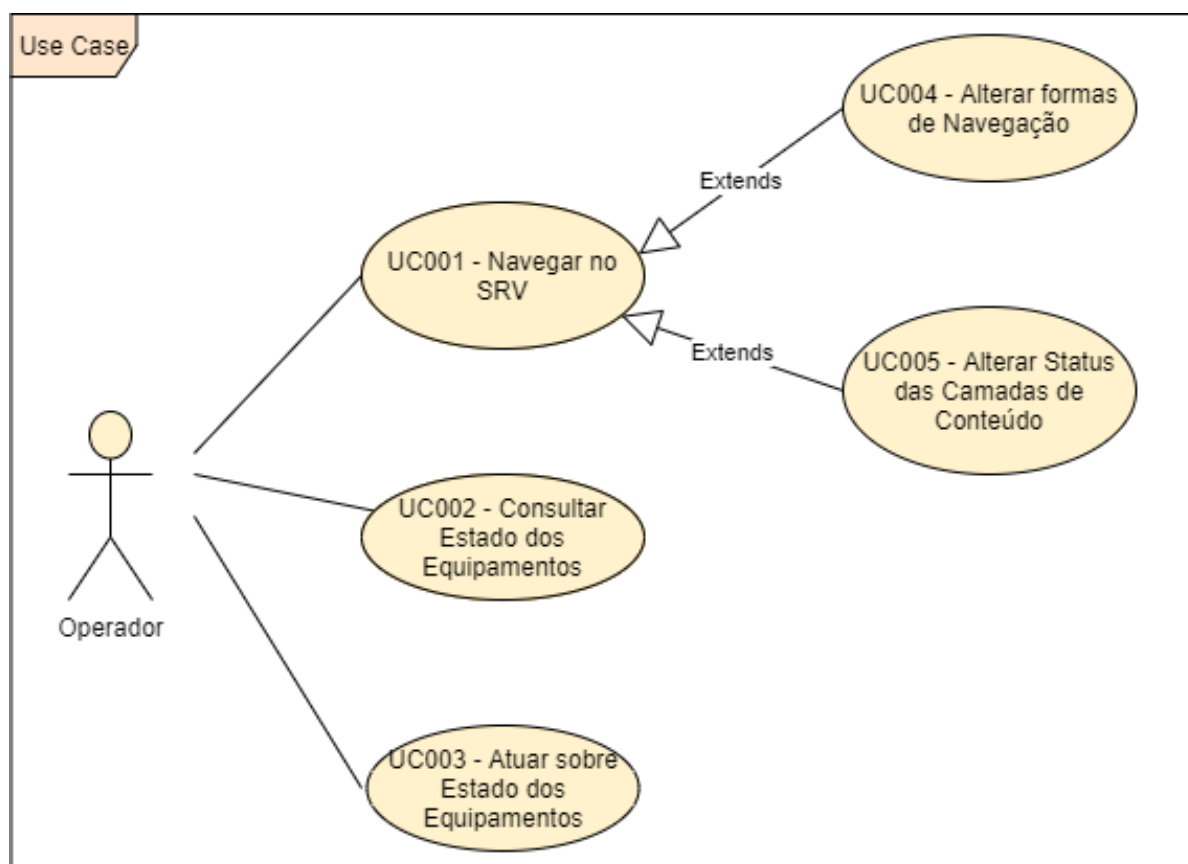


Figura 16 – Diagrama de Casos de Uso

São descritos a seguir atores e casos de uso do sistema, enfatizando suas funções gerais do aplicativo.

### 3.4.2 Descrição dos Atores

Os atores do sistema, bem como suas atribuições podem ser vistos na Figura 16. Tendo em vista que o SRV desenvolvido possa atuar como ferramenta de treinamento, optou-se por não separar os usuários “Operador” e “Aprendiz” em grupos diferentes, uma vez que a primeira versão do sistema não permite privilégios distintos e regras específicas para treinamento. Para simplificar o sistema, adotou-se a notação “usuário” para todo o grupo.

*Tabela 4 - Atores do sistema*

Nome	Descrição	Atribuições
Operador	Operador da Subestação	Navegar pela Subestação Virtual para realizar atividades de monitoramento e controle dos equipamentos elétricos.

Para as próximas versões do sistema, estima-se a preparação de módulo específico para treinamento, concedendo privilégios limitados à simulação.

### 3.4.3 Descrição dos Casos de Uso

São descritos nas Tabelas 5 a 9 casos de uso apresentados anteriormente.

*Tabela 5 - Descrição do caso de uso “Navegar no SRV”*

<b>Caso de Uso</b>	<i>UC001 - Navegar no SRV</i>
<b>Ator Principal</b>	<i>Usuário</i>
<b>Descrição</b>	<i>Possibilitar o usuário navegar pelo ambiente tridimensional por distintos ângulos, pontos de vista e graus de liberdade.</i>
<b>Pré-Condição</b>	-
<b>Fluxo Normal</b>	<i>1. Utilizar os dispositivos de entrada (teclado, joystick, gamepad), combinando graus de liberdade para efetuar a navegação.</i>
<b>Fluxos Excepcionais</b>	<i>1. Utilizar Mini Mapa.</i>
<b>Pós-Condição</b>	<i>Atualização do ponto de visão</i>



Tabela 6 - Descrição do Caso de Uso “Alterar Formas de Navegação”

<b>Caso de Uso</b>	<i>UC004 - Alterar Formas de Navegação</i>
<b>Ator Principal</b>	<i>Usuário</i>
<b>Descrição</b>	<i>Possibilitar o usuário navegar pelo ambiente tridimensional em primeira e terceira pessoa, visão de topo com possibilidade de alterar ângulo de visão, visão lateral e visão frontal.</i>
<b>Pré-Condição</b>	-
<b>Fluxo Normal</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li><i>1. Acessar menu principal da aplicação.</i></li> <li><i>2. Acessar sub menu Navegação;</i></li> <li><i>3. Clicar no botão que representa a forma de navegação desejada.</i></li> </ol>
<b>Fluxos Excepcionais</b>	<i>Utilizar Interface Alternativa</i> <ol style="list-style-type: none"> <li><i>1. Ativar Interface Alternativa pelo botão representativo, localizado no menu principal, submenu Navegação.</i></li> <li><i>2. Aproximar ícone do ícone representativo.</i></li> <li><i>3. Clicar no botão que representa a forma de navegação desejada.</i></li> </ol>
<b>Pós-Condição</b>	<i>Atualização do ponto de visão.</i>

Tabela 7 - Descrição do Caso de Uso “Alterar Status das Camadas de Conteúdo”

<b>Caso de Uso</b>	<i>UC005 - Alterar Status das Camadas de Conteúdo</i>
<b>Ator Principal</b>	<i>Usuário</i>
<b>Descrição</b>	<i>Permitir o usuário ligar e desativar camadas de conteúdo, como rótulos que identificam equipamentos e efeitos visuais que representam estados dos equipamentos.</i>
<b>Pré-Condição</b>	-
<b>Fluxo Normal</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li><i>1. Acessar menu principal da aplicação.</i></li> <li><i>2. Acessar sub menu Camadas;</i></li> <li><i>3. Clicar no botão para ativar/desativar a camada desejada.</i></li> </ol>
<b>Fluxos Excepcionais</b>	<i>Utilizar Interface Alternativa.</i>

	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Ativar Interface Alternativa pelo botão representativo, localizado no menu principal, submenu Camadas.</li> <li>2. Aproximar ícone do ícone representativo.</li> <li>3. Clicar no botão para ativar/desativar a camada desejada.</li> </ol>
<b>Pós-Condição</b>	Apresentar/Ocultar conteúdo desejado.

*Tabela 8 - Descrição do Caso de Uso “Monitorar Estado dos Equipamentos”*

<b>Caso de Uso</b>	UC002 - Monitorar Estado dos Equipamentos
<b>Ator Principal</b>	Usuário
<b>Descrição</b>	Permitir o usuário monitorar os estados dos componentes, por meio de navegação ou interface de pesquisa.
<b>Pré-Condição</b>	-
<b>Fluxo Normal</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Utilizar os dispositivos de entrada (teclado, joystick, gamepad), combinando graus de liberdade para efetuar a navegação.</li> <li>2. Clicar no equipamento que deseja gerenciar.</li> <li>3. Realizar o monitoramento.</li> </ol>
<b>Fluxos Excepcionais</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Ativar camada de conteúdo que apresenta rótulos que identificam nome e dados de equipamentos.</li> </ol>
<b>Pós-Condição</b>	Visualização dos estados dos equipamentos realizada.

*Tabela 9 - Descrição do Caso de Uso “Atuar sobre o Estado dos Equipamentos”*

<b>Caso de Uso</b>	UC003 - Atuar sobre o Estado dos Equipamentos
<b>Ator Principal</b>	Usuário
<b>Descrição</b>	Permitir o usuário alterar estados digitais dos equipamentos que compõem a subestação.
<b>Pré-Condição</b>	---
<b>Fluxo Normal</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Utilizar os dispositivos de entrada (teclado, joystick, gamepad), combinado graus de liberdade para efetuar a navegação.</li> </ol>

	<p>2. <i>Clicar no equipamento que deseja gerenciar.</i></p> <p>3. <i>Realizar ação de Atualização.</i></p>
<b>Fluxos Excepcionais</b>	<i>Ativar camada de gerenciamento e controle que permite envio de dados de equipamentos.</i>
<b>Pós-Condição</b>	<i>Atualização Realizada.</i>

### 3.5 Diagrama de Classes

Nesta seção será apresentado diagrama de classes do sistema. As classes foram criadas com base nos diagramas apresentados anteriormente, a fim de satisfazer os requisitos do sistema.

A Figura 17 apresenta as principais classes utilizadas no sistema, bem como seus atributos e principais funções.

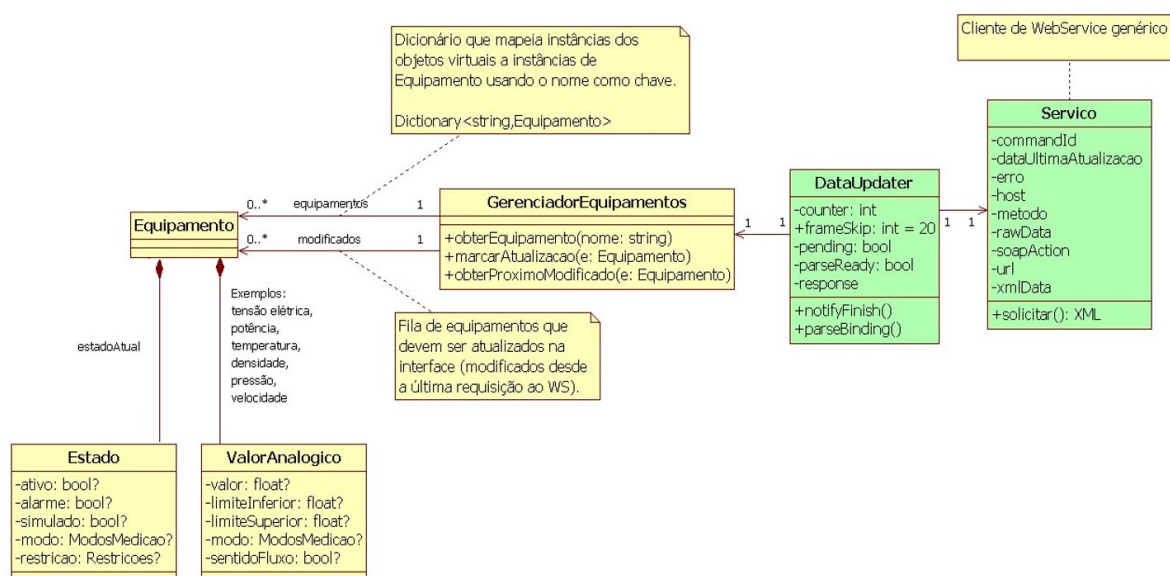


Figura 17– Diagrama de classes do sistema

Sendo o ambiente SRV multitarefa ou com um sistema interno de escalonamento, pois realiza atualizações dos estados dos equipamentos periodicamente (valores de medidas, *status* e alarme) e permite manipulação do ambiente virtual 3D, um componente de software chamado DataUpdater se responsabiliza pela rotina a ser executada (atualização). Deve ser usado um cliente de Web Service, responsável pela criação das requisições e obtenção das respostas. Esse cliente é uma instância da classe Servico.

Um objeto do tipo GerenciadorEquipamentos é responsável pela transformação linear necessária para mapear cada instância de Equipamento a um componente elétrico virtual do ambiente, usando o identificador do equipamento como chave. Além disso, essa entidade gerencia uma fila de equipamentos modificados, necessitando de atualização na exibição da interface.

As entidades GerenciadorEquipamentos e DataUpdater podem usar o padrão de projeto Singleton, com objetivo de garantir única instância em tempo de execução.

### 3.6 Diagrama de Sequência

A seguir, na Figura 18 será apresentado o diagrama de sequência do SRV ilustrando seu comportamento diante de um evento de atualização.

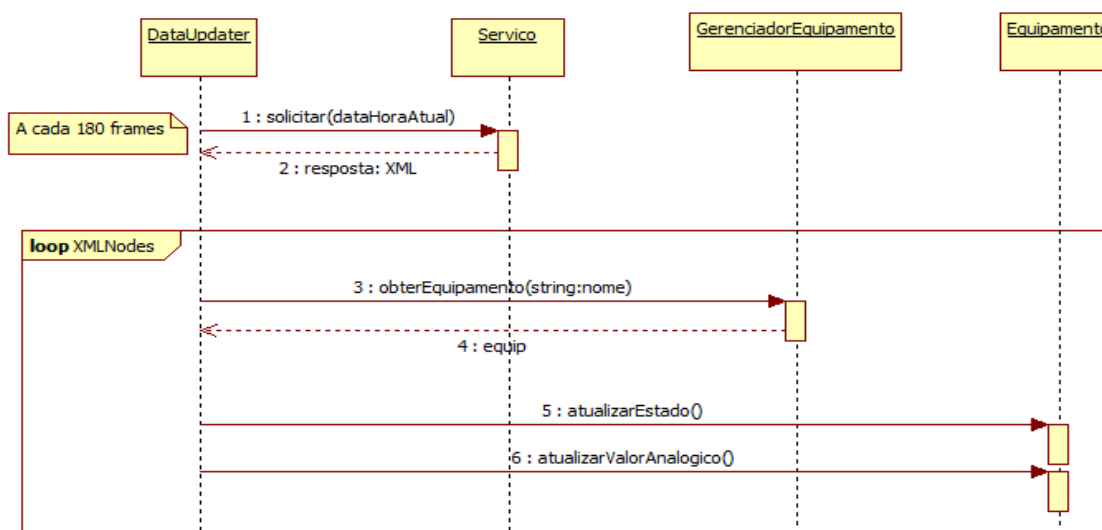


Figura 18 – Diagrama de sequência.

A instância de DataUpdater faz solicitação ao Web Service, por meio de chamada ao método solicitar(). Cada equipamento tem seu estado atualizado por meio do processamento do XML retornado pelo Web Service e uma interação com GerenciadorEquipamentos. Todo equipamento modificado é “marcado” no gerenciador de equipamentos, sendo adicionado a uma fila de elementos que precisam ser atualizados na interface.

O XML retornado pelo Web Service tem formato ilustrado no exemplo abaixo:

```

<!-- cabeçalho do envelope SOAP... -->
<!-- Exemplo: equipamento ESTEIRA_12U4 (transformador) -->
<Equipamento nome="ESTEIRA_12U4">
    <!-- Exemplo de tag para a medição da velocidade -->
    <ValorAnalogico ref="V" value="19,6" mod="C" stf="-" li="0,0" ls="25,0"/>
    <Estado value="0" mod="C"/>
</Equipamento>
<!-- rodapé do envelope SOAP... -->

```

Nesse exemplo foi considerado que o equipamento em questão é uma esteira cuja velocidade atual é 19,6 unidades. Os limites inferior e superior da velocidade para esta esteira estão ajustados para 0 e 25 unidades. Se o valor da velocidade não estiver nesta faixa, o sistema RV deve apresentar um alarme. O atributo stf indica o sentido do fluxo. No atributo ref coloca-se uma referência para a variável lida (no exemplo citado, “V” indica que se trata de uma velocidade). Um equipamento pode conter vários valores analógicos (um para cada variável medida).

### 3.7 Contribuições deste autor para a construção deste SRV

Este trabalho é oriundo de um projeto de Pesquisa e Desenvolvimento entre as empresas Universidade de Federal de Uberlândia (UFU), Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG) e Computer Graphics Works (CGW).

Para concepção e construção deste SRV composto por 39 subestações virtuais foi necessária a participação de mais de 26 membros sendo estes pesquisadores e desenvolvedores atuando em diversas tarefas como: a) Modelagem 3D; b) Estratégias para montagem manual e automatizada da cena; c) Design de Interação; d) Mecanismo para atuação do monitoramento e controle; e) Testes; e) implantação; f) Treinamento.

Neste contexto, o autor deste trabalho esteve envolvido nos seguintes aspectos do desenvolvimento:

- a) Modelagem geométrica de alguns equipamentos da subestação de Emborcação.
- b) Comunicação bidirecional para aquisição dos dados dos SRV com sistema supervisorio da CEMIG.

- c) Estratégias de interação associadas à Navegação.
- d) Elaboração de telas de monitoramento e controle contidas no SRV enfatizando a manutenção da imersão e reutilização do modelo mental tradicional de operação (Descritos no Capítulo 4).
- e) Implantação do SRV na CEMIG.
- f) Treinamento dos operadores para utilização do SRV proposto.

De tal maneira, as contribuições deste autor apresentadas neste trabalho podem ser distribuídas em duas vertentes: a) promoção de novos recursos para visualização dos arranjos e informações para monitoramento de equipamentos, baseados em informações espaciais funcionais possibilitando a operação de subestações de energia elétrica, com maior intuitividade, naturalidade e segurança; b) criação de modelos de telas de controle baseados em Realidade Virtual para sistemas críticos de engenharia.

## **Capítulo 4**

# **Estratégia e solução para Integração das Interfaces de Realidade Virtual com o Sistema Tradicional de Operação.**

### **4. Introdução**

Este capítulo apresenta detalhes sobre a criação de uma estratégia para elaboração de métodos e estilos de interface para o monitoramento e controle de subestações que reutilize o modelo mental e experiência do operador adquiridos no processo tradicional de operação, além de destacar o mecanismo desenvolvido para integração entre Realidade Virtual com o sistema tradicional de operação.

#### **4.1 Descrição da Estratégia**

Por se tratar de uma estratégia complementar ao contexto da operação de subestações de Energia Elétrica, torna-se importante elaborar telas para controle do sistema de Realidade Virtual que reaproveite o modelo mental de operação adquirido pelos operadores ao longo do tempo de utilização da interface tradicional de operação baseada em diagrama unifilar.

Para elaboração destas telas de controle, que tem como proposta operar os componentes elétricos da subestação, foram definidas algumas estratégias visando aspectos

de usabilidade, layout e design. Estas, tradicionais em sistemas bidimensionais (widgets 2D). As estratégias são:

- Toda tela de controle deve estar integrada no ambiente virtual e seguir os princípios da proximidade com relação às suas funções.
- Todos os mecanismos devem favorecer os princípios de facilidade, agilidade e intuitividade.
- A tela de controle deve promover mecanismos que possibilitem seu acesso e uso rapidamente.
- Os componentes de controle devem ser apresentados apenas quando necessários ao contexto da interação ou quando ativos pelo usuário, evitando assim, a apresentação de conteúdos fora do escopo da ação.
- Todos os componentes da interface de controle devem ter transparência de 50%, para maior sensação de integração com os modelos 3D que compõem a subestação.
- Produção de estratégias de interfaces alternativas para controle que possuam mecanismos que possibilitem ao usuário sua ativação e desativação, além da opção de deslocamento para qualquer espaço desejado no ambiente virtual.
- Desenvolver camadas de controle de conteúdo que possibilitem ao usuário sua ativação e desativação em qualquer momento, assim, o usuário tem a flexibilidade de apresentar somente informações desejadas.
- Toda interface de controle deve ser livre de ambiguidade e segura para o propósito que se destina.

## **4.2 Solução baseada nas estratégias**

Nessa seção, será apresentado à forma de criação da solução proposta e aplicação das mesmas no SRV desenvolvido para monitoramento e controle de subestações de Energia Elétrica, descrito no capítulo 4.



### 4.2.1 Representação e Interação do *Menu*

A solução elaborada contém única barra para seleção de opções de controle (*menu*) estando situado em qualquer sentido (vertical ou horizontal). O tamanho ocupado pelo menu, caso seja posicionado em sentido vertical do sistema de projeção é 100%, em relação ao sentido horizontal, em momentos de inatividade, são ocupados apenas 1,5% (espaço suficiente para referenciar sua existência) da área e não apresenta nenhum item referente às opções de seleção contidas nela. Entretanto, em momentos de atividade seu espaço é alterado para 15% e os itens contidos são apresentados. O tempo para os efeitos de transição e animação é de 0.5 segundo para todos os itens que compõem a interface. Para elaboração das dimensões das widgets foram utilizados os conceitos da Lei de Fitt.

A Lei de Fitt auxilia a determinar o tamanho dos elementos alvo, tais como botões, campos de texto para o desenvolvimento de interfaces, tendo como base a distância que o dispositivo apontador do usuário deve percorrer. Este modelo prova que, quanto maior a distância que o usuário tiver de percorrer entre dois elementos, menor será a precisão com que o usuário alcançará o alvo. A lei de Fitt é correlativa, ou seja, quanto maior a distância que o usuário deve percorrer, maiores deverão ser os objetos alvo (Yvonne, Sharp & Preece, 2011).

Caso seja prototipado um menu no sentido horizontal, os valores horizontais e verticais serão inversos.

A Figura 19-A apresenta o menu em momento de utilização. Esta ativação é feita pelo apontamento do mouse sobre o mesmo.

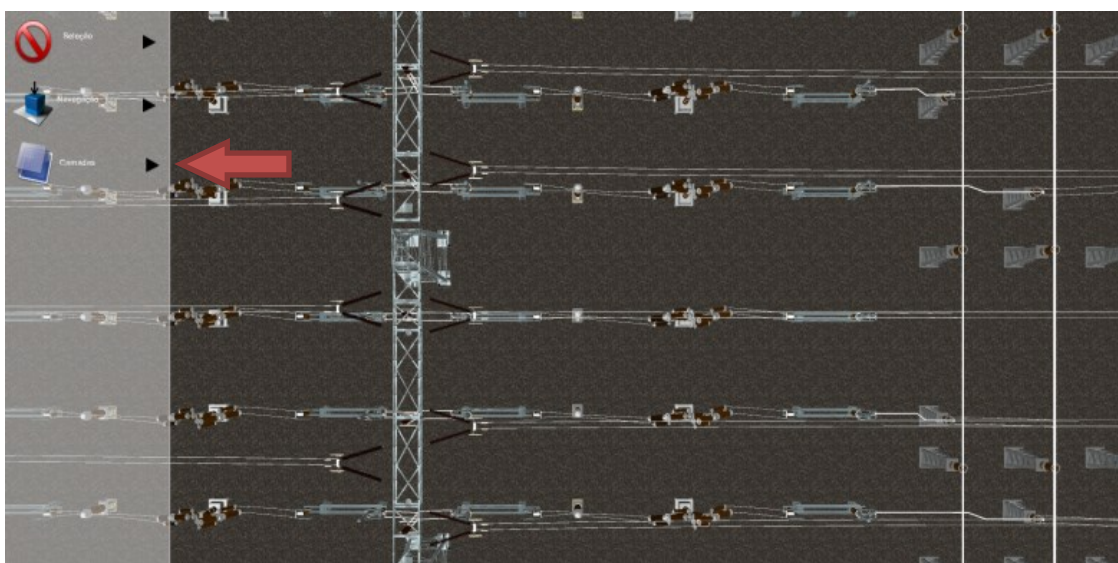
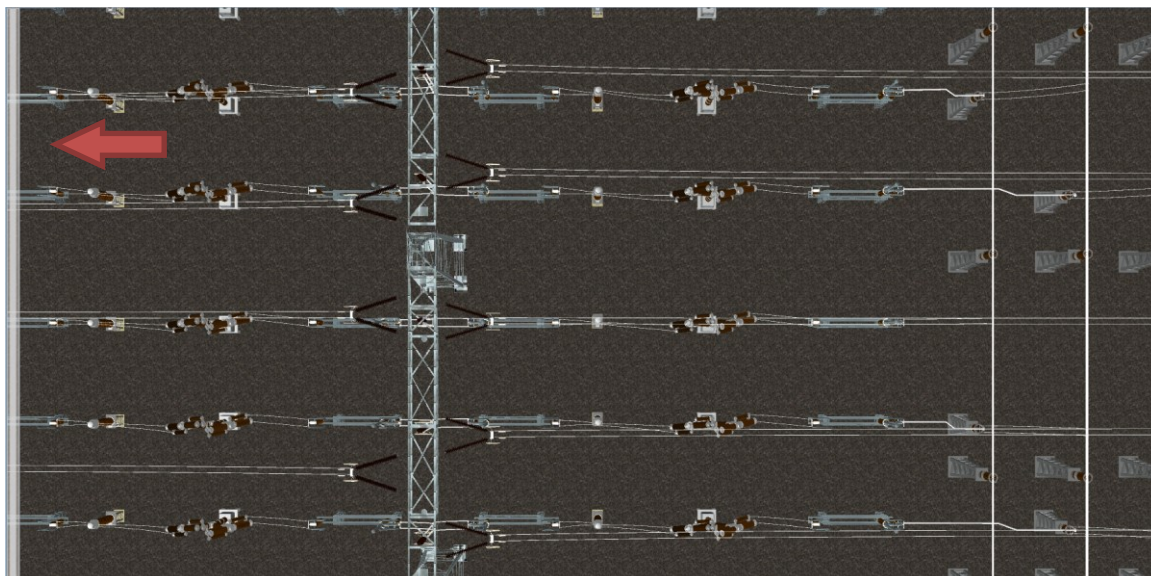


Figura 19-A – Menu em momento de utilização

Já a Figura 19-B representa o cenário inverso.

*Figura 19-B – Menu em momento de inatividade*

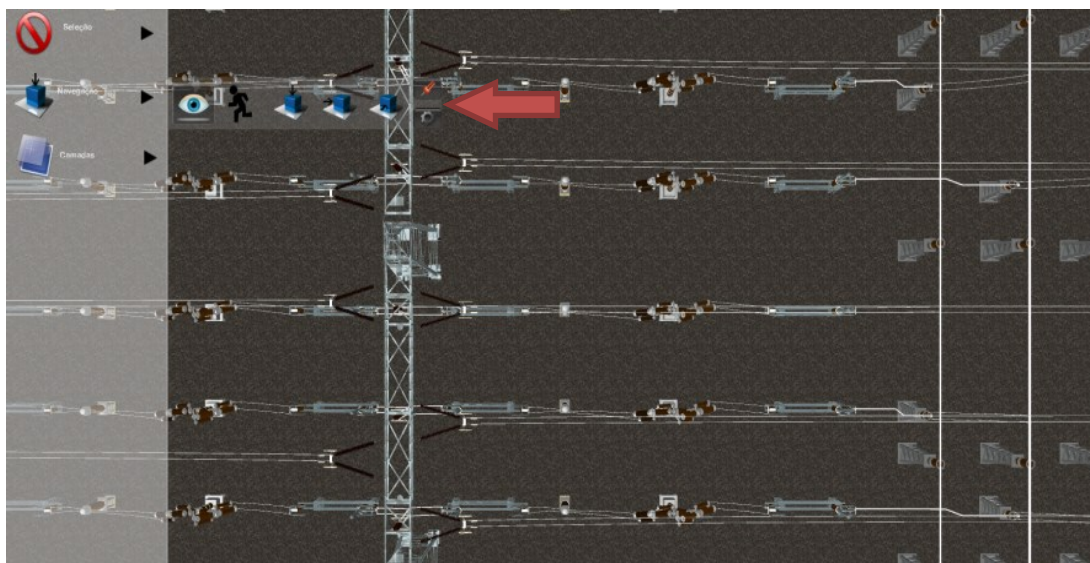


Nota-se que a interface de controle referida está inserida no contexto da aplicação 3D, seguindo o padrão de transparência de 50%, e transição entre ativo e inativo refere-se ao conceito da apresentação do conteúdo apenas no momento necessário.

#### **4.2.2 Representação e Interação do SubMenu**

Cada item que compõe o *menu* possui um painel com as opções referentes às determinadas ações. Para apresentar este painel é necessário apenas apontar o mouse sobre o ícone de desdobramento (▀). Assim, o mesmo é apresentado apenas quando a ação envolvida está sendo solicitada. Quando o apontamento do mouse é deslocado fora da interface de controle (Menu/SubMenu) o painel sai e não é mais apresentado. Posteriormente, a barra lateral volta para o estado inativo. Esta estratégia de elaboração de submenu refere-se ao conceito de hierarquia.

A Figura 20 apresenta parte da barra lateral e painel referente a ação de controle (Forma de Navegação) contido no ambiente virtual.



*Figura 20 – Sub Menu referente a troca de navegação.*

Todo painel de ação de controle possui um botão (🚩) de ativação de interfaces alternativas para o mesmo controle. Este é situado na parte superior direita do painel.

A Figura 21 apresenta as características dos botões e mecanismo de ativação de interface alternativa, seguindo todos os requisitos estabelecidos para construção da estratégia.

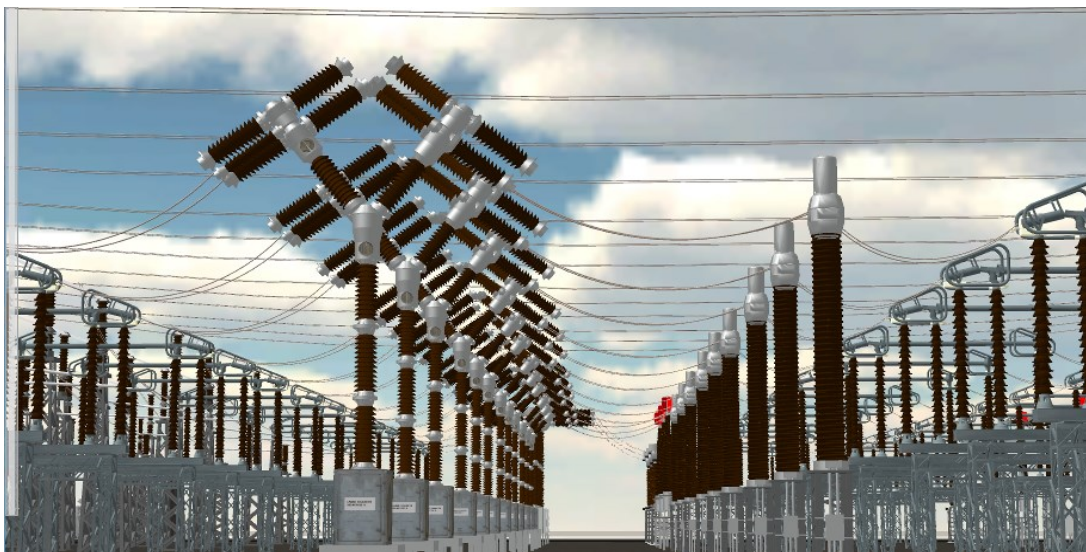


*Figura 21 – Representação dos botões e mecanismo de ativação da interface alternativa*

No submenu apresentado nas Figuras 20 e 21, pode-se observar 5 formas de navegação e visualização.

Na Figura 22, pode-se observar a vista em primeira pessoa, onde o usuário pode se aproximar dos dispositivos em diferentes velocidades e utilizar diferentes graus de liberdade para visualizar a cena em ângulos distintos.





*Figura 22 – Visão em Primeira Pessoa*

Na Figura 23, representa a visão em terceira pessoa e a representação do usuário como um avatar no ambiente virtual.



*Figura 23– Visão em Terceira Pessoa*

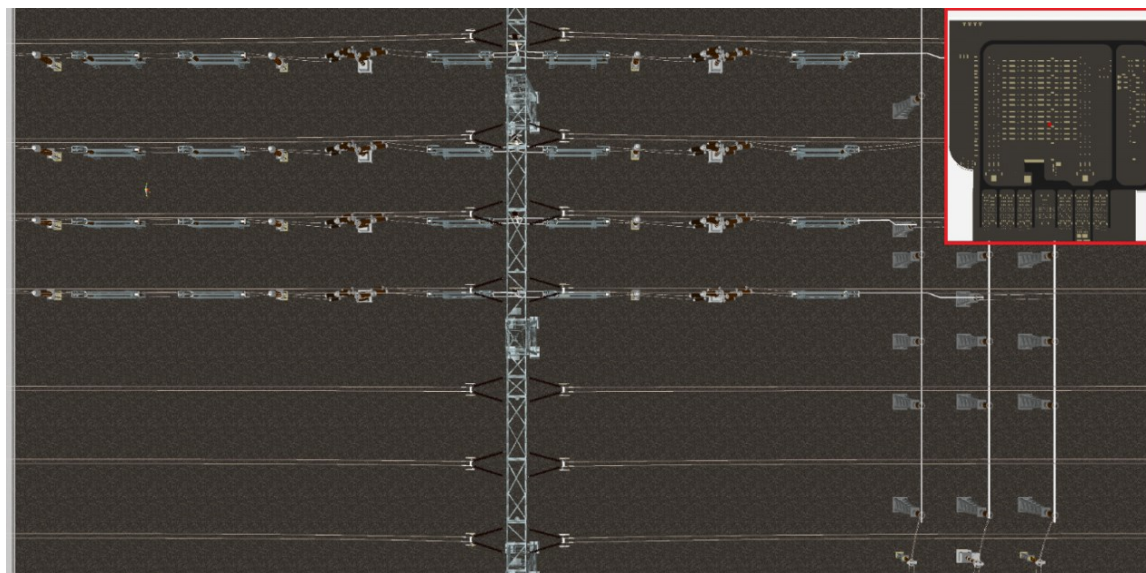
A Figura 24 apresenta visão de topo ou visão geral, onde o usuário pode combinar a manipulação de diversos graus de liberdade, como mover o ângulo de visão (pan), inclinar o ângulo de visão em sentido longitudinal (pitch), inclinar o ângulo de visão em sentido transversal (roll) e aproximar ou afastar o ângulo de visão (zoom) possibilitando a visualização de componentes dos mais diversificados e privilegiados ângulos.





Além destas 5 formas, existe a possibilidade de visualização da posição no ambiente virtual por meio de mini mapa, utilizado para acesso rápido aos locais do ambiente. Durante a navegação, os usuários podem utilizar diversos dispositivos de entrada e saída, como joystick, gamepad, mouse, teclado e óculos de Realidade Virtual.

Na Figura 27 mostra o mini mapa.



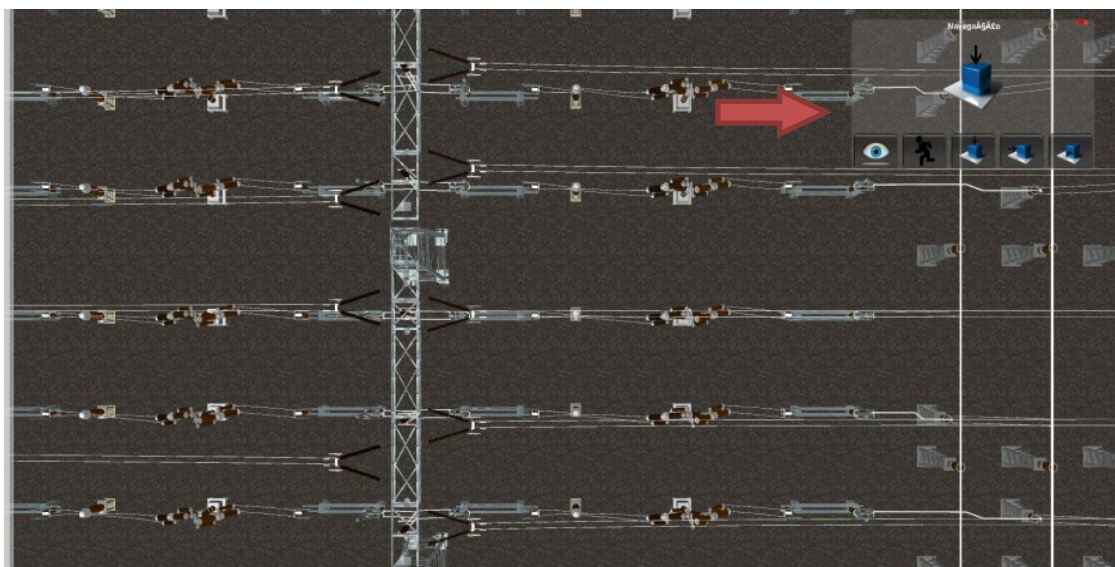
*Figura 27 – Mini Mapa para acesso rápido*

### **4.2.3 Representação e Interação de Interface Alternativa de Controle**

As interfaces alternativas de controle possuem como função realizar as mesmas ações dos painéis. Porém, de maneira mais rápida, pois não há necessidade de se deslocar ao menu, tornando-se um recurso eficaz em momentos em que a interação é rotineira. Cada item que compõe a barra lateral deve possuir uma janela alternativa, sendo opção do usuário ativar e desativar quando julgar necessário, além da possibilidade de movê-la para qualquer posição.

A Figura 28 apresenta a janela alternativa em processo de execução de comandos, contendo os mesmos recursos e padrões de design e layout dos botões.



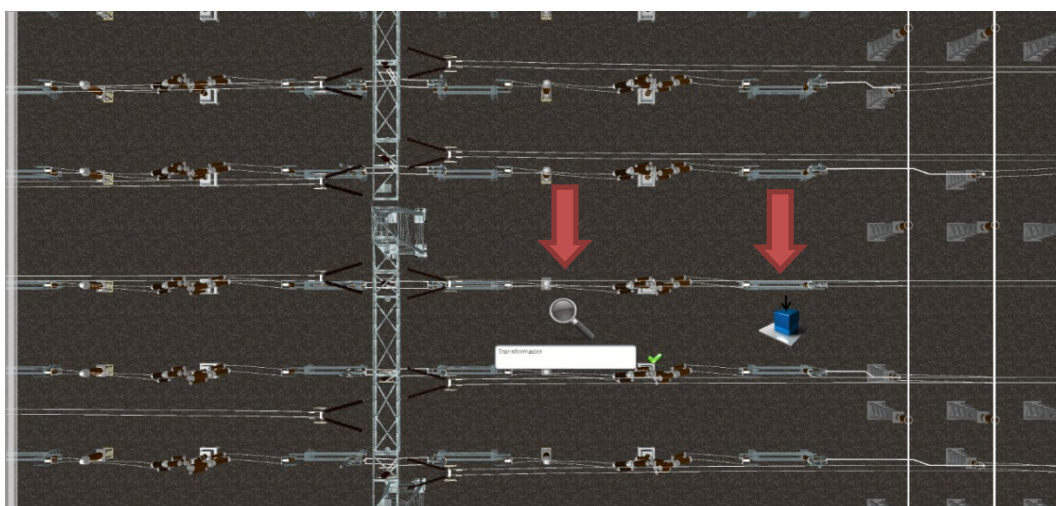


*Figura 28 – Interface Alternativa em uso*

Quando uma janela alternativa não estiver em modo de utilização, ou seja, não havendo apontamento do mouse sobre a janela, a mesma tem como função informar apenas o resultado da seleção apresentando apenas o ícone ativo. A Figura 29 demonstra o resultado da janela quando não há utilização.

Pode-se observar que em momentos de utilização, a mesma aumenta sua dimensão em 100% e apresenta todos os botões que compõem o comando, criando agrupamentos de determinada ação (princípio da proximidade), caso contrário é visualizado apenas o ícone referente à opção ativa. O usuário pode desativar este recurso durante qualquer momento da utilização.

A interface segue todos os princípios da estratégia, sendo que o principal intuito é favorecer aspectos de usabilidade.



*Figura 29 – Interface alternativa ativa mas sem utilização.*

#### 4.2.4 Representação e Interação com Janelas de Controle e de Apresentação de Dados

Quando o usuário necessita manipular um componente virtual, janelas e elementos de controle são apresentados após seleção dos mesmos. Estas janelas também são integradas no ambiente virtual e sua exibição é finalizada automaticamente após a execução ou cancelamento da ação, tornando o ambiente virtual menos sobrecarregado e mais intuitivo. Todo funcionamento destas janelas é baseado no princípio da disponibilidade e confirmação, sendo apresentado ao usuário somente o conteúdo referente a operação e solicitando ao mesmo a confirmação da ação. Os conteúdos destas janelas são similares aos conteúdos referentes apresentados nas interfaces tradicionais de operação, reaproveitando o modelo metal do operador.

A Figura 30 apresenta estas janelas.

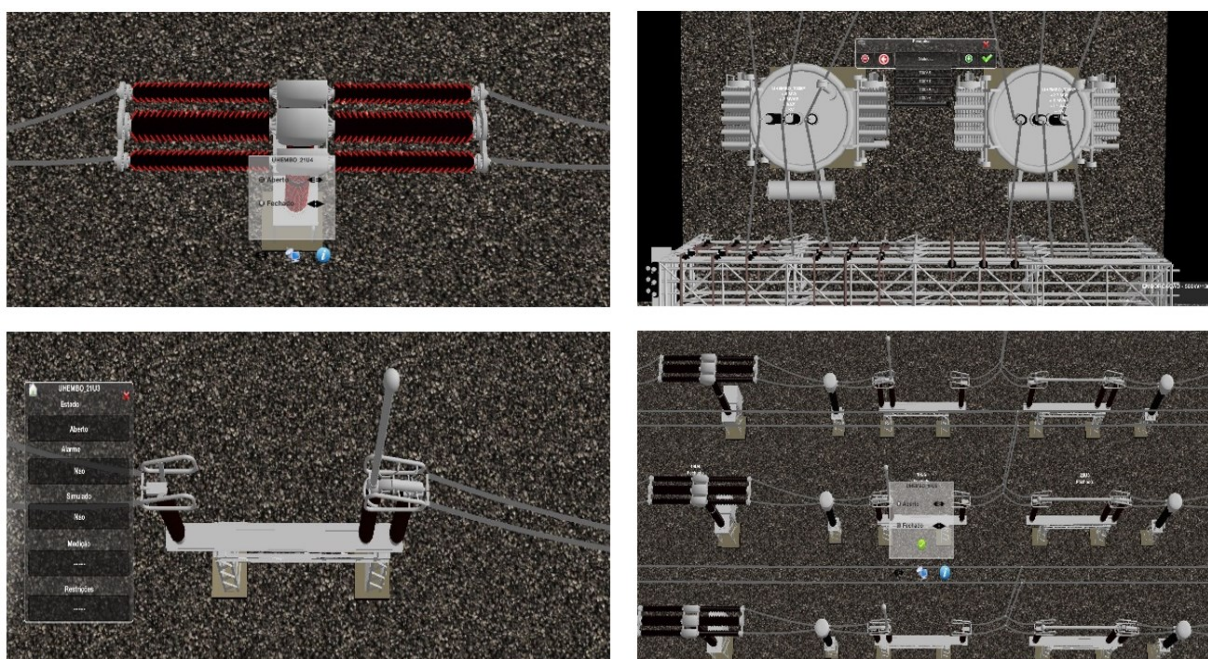


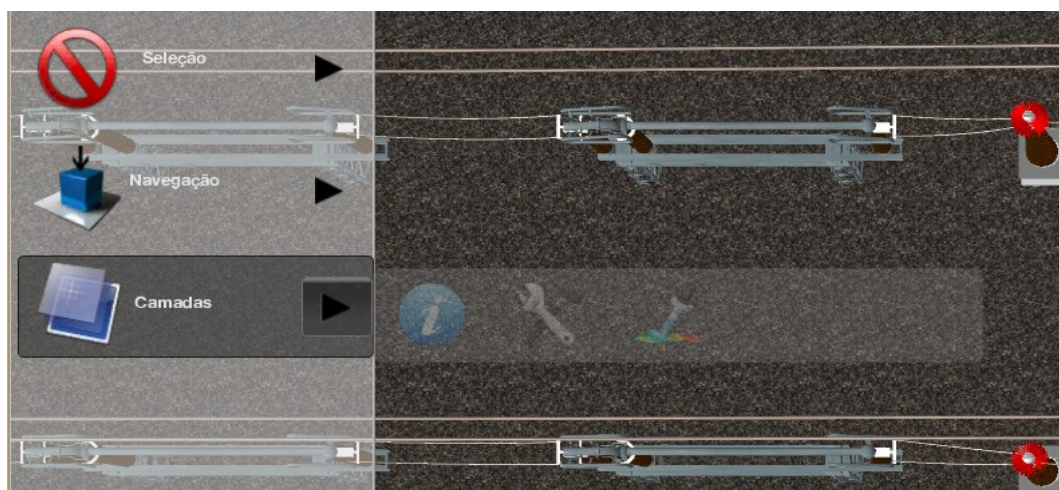
Figura 30 – Janelas de Controle e Apresentação de Dados

#### 4.2.5 Apresentação e Interação das Camadas de Conteúdo

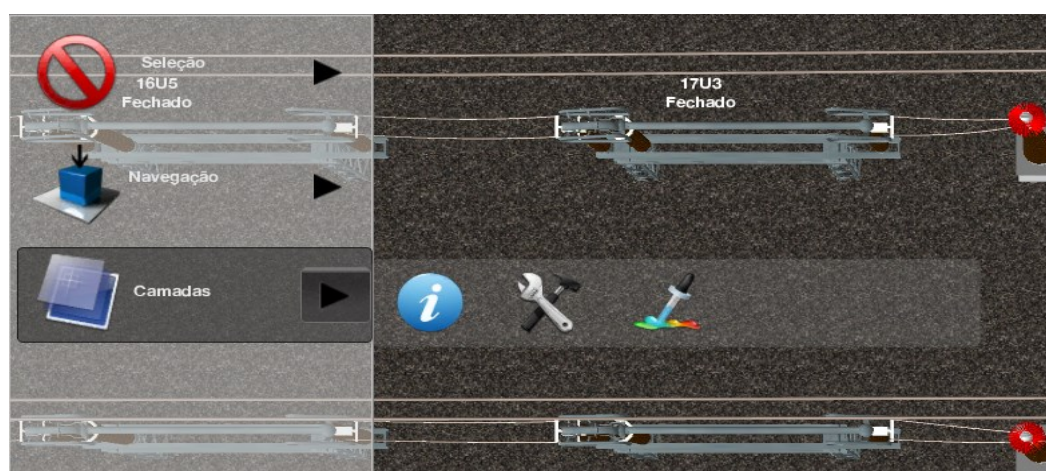
O menu contido na aplicação, contém sub menu referente ao acionamento das camadas. Por meio de um botão, o usuário pode alterar o status da mesma, sendo que o ícone que representa o conteúdo se torna opaco quando a camada está desativada, e sem opacidade em momentos de ativação.

A Figura 31 e 32 representam estas ações.





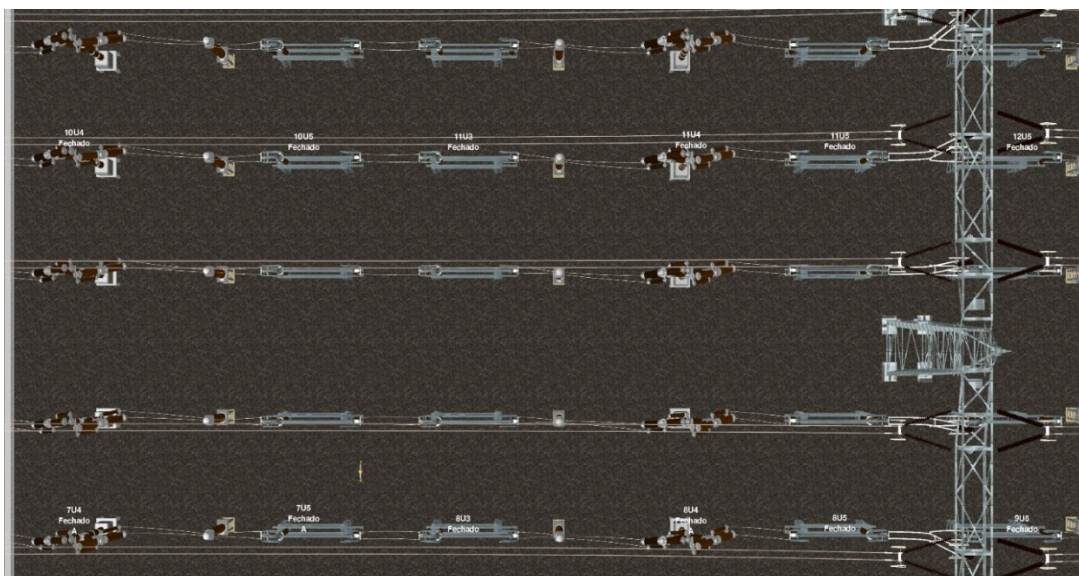
*Figura 31 – Apresentação do Sub Menu com suas camadas desativadas*



*Figura 32 – Apresentação do Sub Menu com suas camadas ativas*

Estas camadas têm como função controlar a visualização de conteúdo de forma independente, possibilitando ativação/desativação durante o uso do SRV. O operador é livre para manipular este recurso de acordo com sua necessidade, em qualquer momento da aplicação, agregando ao ambiente virtual informações complementares.

Na figura 33, apresenta-se a camada nomeada como rótulo em estado de ativação. É possível observar nos equipamentos (cada 3 componentes elétricos, compõem um conjunto trifásico), seus respectivos nomes e valores, caso a camada seja desativada estas informações serão ocultadas. Os valores apresentados e sua sequência são idênticos aos apresentados nas interfaces tradicionais de operação, sendo esta outra ação para reaproveitar o modelo metal do operador.

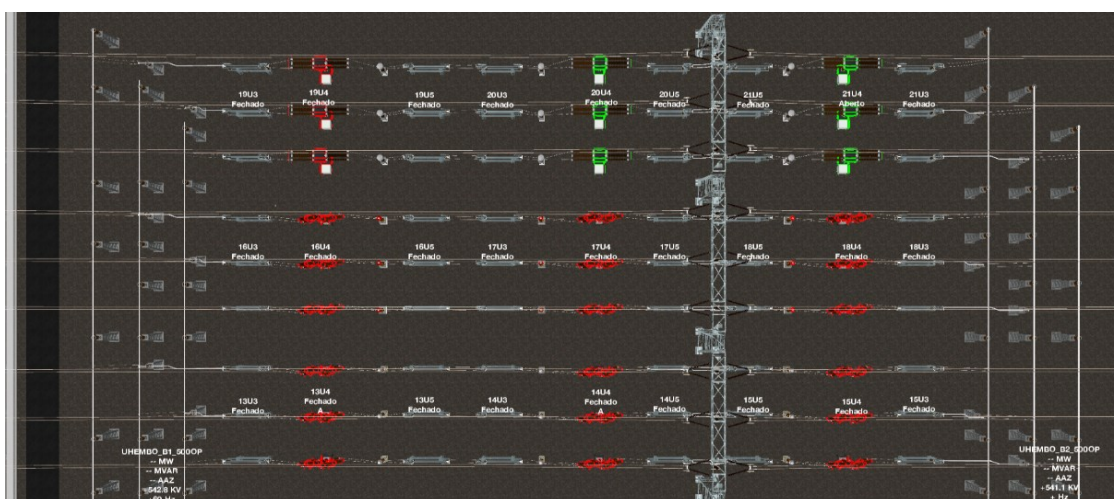


*Figura 33 – Camada “rótulo” ativa*

Outro conteúdo controlado é a camada nomeada de “envoltória”. Seu valor de agregação ao ambiente virtual é a aplicação de um contorno sobre os equipamentos virtuais. Caso o estado do equipamento seja fechado o contorno será de cor vermelha, caso contrário a cor representativa será o verde, assim com a ativação desta camada o usuário obterá uma interpretação mais rápida sobre o estado dos equipamentos. O uso destas cores, está relacionado ao conceito de modelo mental utilizado pelo operador da subestação, pois o mesmo utiliza em sua interface tradicional de operação estas atribuições para representar estes estados (aberto e fechado).

Momentos que desejam apenas uma navegação sobre a subestação virtual poderão desligar a camada, evitando sobrecarga visual no ambiente virtual.

A Figura 34 apresenta esta camada de conteúdo em estado ativo.



*Figura 34 – Camada “envoltória” ativa*

### **4.2.6 Ícones**

Os ícones de um aplicativo apresentam forte importância para a interface, pois fazem parte do processo de identificação do comando de interação. Se bem aplicado, um ícone pode contribuir nos aspectos de aprendizagem e intuitividade dos comandos.

No SRV desenvolvido foram escolhidos desenhos simples, a fim de facilitar a assimilação do mesmo à sua ação e seguir as atuais tendências de interfaces.

## **4.3 Integração entre a Interface de Realidade Virtual com Interface Tradicional de Operação**

É importante salientar que o SRV proposto atua de maneira complementar na operação de subestações. De tal modo, o operador possui total autonomia para acionar a interface de Realidade Virtual em momentos que julgar pertinentes potencializar seu ambiente operacional com informações espaciais tridimensionais.

Para tanto, é fundamental que haja integração eficiente entre os dois paradigmas de interfaces para que o acionamento de ambas seja fácil e preciso.

Para acionamento da interface de Realidade Virtual foi atribuído o comando “Shift + clique sobre equipamento” na interface tradicional de operação (Diagrama Unifilar). Quando realizado este comando, o SRV é inicializado instantaneamente com a respectiva subestação relacionada no diagrama unifilar com campo de visão, evidenciando o equipamento alvo do clique. A partir de então, o operador poderá navegar pela subestação, realizar a leitura dos estados dos equipamentos e efetuar comandos de alteração na interface de Realidade Virtual, ou se preferir, retornar para interface tradicional de operação. A ação também pode ser executada em condição inversa, do ambiente de Realidade Virtual para interface tradicional de operação.

A definição deste comando “Shift + clique sobre equipamento” foi realizada com equipe de operadores.



A Figura 35 apresenta os dois paradigmas de interface de operação em utilização.



*Figura 35 – Integração da Interface de Realidade Virtual com Interface Tradicional de Operação aplicado na subestação de Emborcação*

## 4.4 Considerações Finais

Este capítulo apresentou os detalhes da elaboração da estratégia de representação e interação com widgets 2D em SRV.

Abordaram-se também aspectos de desenvolvimento da interface, detalhes de funcionamento e interação aplicados ao protótipo desenvolvido.

Com finalidade de apresentar a contribuição desta pesquisa, o próximo capítulo trata dos relatos obtidos.

Com base na área de atuação e funcionalidades desenvolvidas nesta pesquisa a Tabela 10 apresenta comparativo entre os trabalhos correlatos e esta pesquisa, enfatizando como principal diferencial o uso de Realidade Virtual para compor recursos complementares para monitoramento e controle das subestações de energia elétrica.

Tabela 10 – Tabela comparativa entre trabalhos correlatos e esta pesquisa

<b>Tópico Abordado</b>	Guangwei & Wenjuan, 2009	Quintana & Mendoza, 2009	Meng & Kan, 2010	Wang & Li, 2010	Yang, Wu & Tian, 2014	Gomes et. al. (2017)	Esta Pesquisa, 2020
Integração da solução de RV com Sistema tradicional de operação.	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✓
Realismo dos objetos virtuais	✗	✓	✓	✱	✓	✓	✓
Apresentação de valores em tempo real de medição	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✓
Adaptação das Widgets de controle	✗	✗	✗	✓	✓	✗	✓
Área de atuação no âmbito das subestações	T	PM	M	T	T	M	MC

Fonte: O autor.

✓ - SIM      ✗ - NÃO      ✱ - FORMA PARCIAL OU APROXIMADA

T – Treinamento

PM – Planejamento de Manutenção

M – Metodologia para Elaboração e Construção

MC – Monitoramento e Controle

## **Capítulo 5**

# **Análise e Resultados Iniciais da Solução de Integração**

### **5. Introdução**

Neste capítulo apresentam-se os critérios de análise do SRV desenvolvido, além de relatos sobre benefícios e impactos que a solução de integração causou aos usuários durante sua utilização. Esta análise tem como intuito apresentar o desempenho da estratégia de representação elaborada, evidenciado aspectos relacionados à imersão e confronto de paradigmas em SRV.

#### **5.1 Critérios de Análise**

Durante todo período de desenvolvimento e aplicação desta estratégia houve envolvimento por parte dos potenciais usuários (operadores de subestações de Energia Elétrica da CEMIG), além de treinamento específico de 6 horas referente ao uso e funcionalidade do sistema.

Para análise da solução, foram aplicados diversos métodos como: momentos de observação e monitoramento durante a utilização do sistema de Realidade Virtual, aplicação de questionários avaliação (Apêndice 1) e formulários para análise e observação de desempenho (Apêndice 2). Estes testes foram aplicados a 12 operadores do Centro de Operação do Sistema da CEMIG, e corresponde 65% desta população.

O desenvolvimento do questionário de avaliação baseou-se na ferramenta QUIS (*Questionnaire for User Interaction Satisfaction*) versão 7, O QUIS foi projetado para avaliar a satisfação subjetiva dos usuários com aspectos específicos da interface homem-computador.

Para o desenvolvimento dos formulários voltados à análise de observação e desempenho dos operadores, foram utilizadas situações comuns recorrentes de falhas associadas a operações de subestações.

Lowdermilk (2013) relata que os usuários podem dizer muito bem sobre o que está funcionando e o que não está. No entanto, uma maneira eficiente de perceber as necessidades dos usuários é observando-os diretamente.

Nos sub tópicos desta seção, apresentam-se critérios analisados juntamente com relatos dos métodos de análise.

## 5.2 Análise do Questionário de Avaliação

Neste tópico serão apresentados resultados referentes à aplicação do questionário de avaliação da solução respondidos pelos operadores.

### 5.2.1 Reação à utilização do Sistema de Realidade Virtual

Critério que analisa a satisfação do usuário em relação à proposta do sistema: utilização para monitoramento e controle de subestações. São levantados aspectos referentes ao grau de interesse pela aplicação, facilidade de utilização, adequação com a proposta e agradabilidade. A Figura 36 apresenta resultados obtidos nestes atributos.

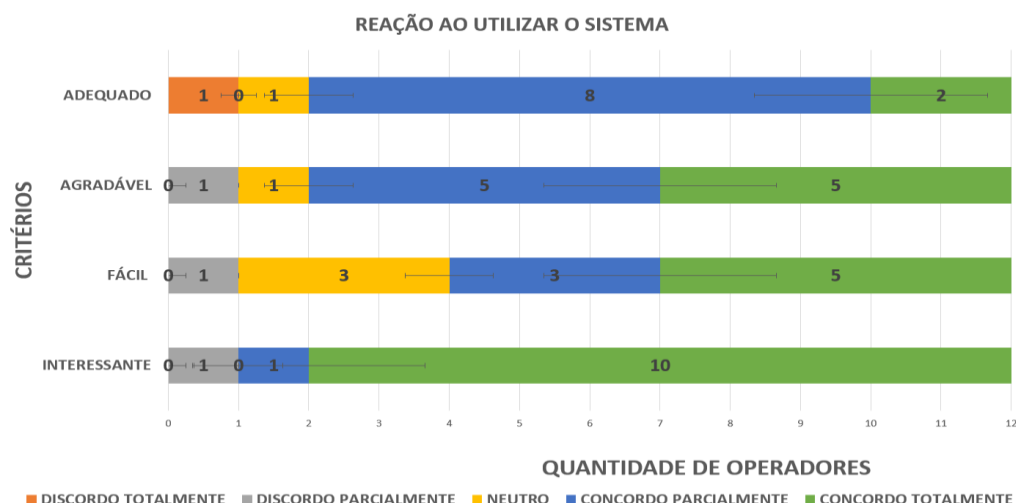


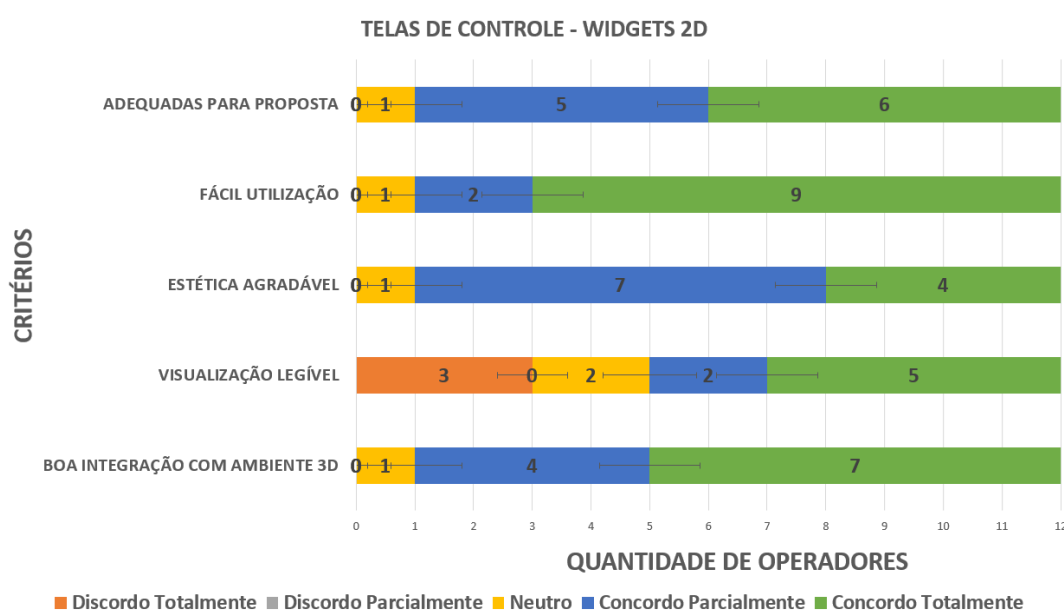
Figura 36: Gráfico referente aos critérios de análise sobre utilização do sistema

Fazendo uma média global entre a quantidade de operadores que utilizaram o sistema com os critérios adotados para análise da proposta, foi mensurado que 76,5% dos usuários concordam parcialmente ou totalmente que o sistema baseado em Realidade Virtual possui aderência para utilização no contexto da operação de subestações.

É importante salientar que grande parte dos usuários se consideram com baixa experiência em utilização de ambientes virtuais tridimensionais.

### 5.2.2 Telas de Controle – Widgets 2D

Critério que analisa menu, sub menu, interface alternativa, janelas de controle e de apresentação de dados. São analisados aspectos pertinentes à visualização, adequação para proposta, estética, facilidade de utilização e sensação de integração ao ambiente 3D foram testados. Na Figura 37 é possível visualizar resultados obtidos.



*Figura 37: Gráfico referente aos critérios de análise sobre telas de controle.*

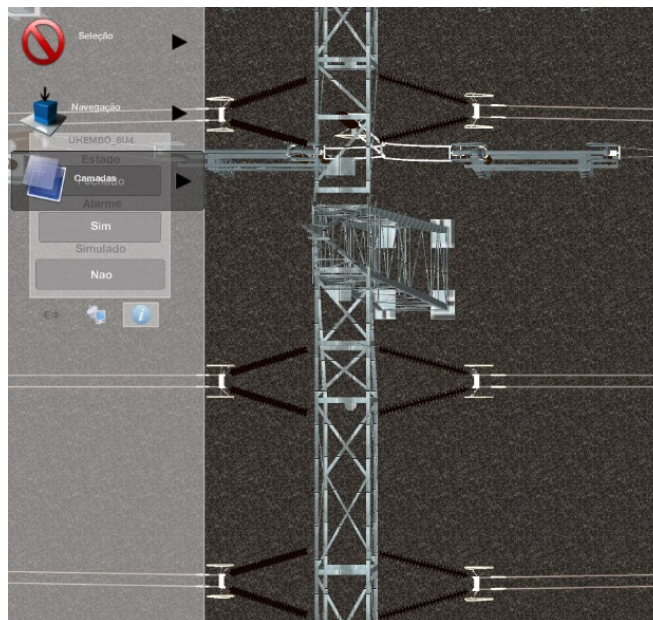
De acordo com gráfico apresentado, pode-se perceber ampla satisfação com mecanismos de controle utilizados no sistema de Realidade Virtual, sendo estes elaborados com intuito de reutilizar o modelo mental adquirido no modelo convencional, facilitando o processo de treinamento e adaptabilidade por parte do operador, sendo este um dos objetivos específicos da pesquisa.

É importante salientar que no critério “visualização legível” 41% dos operadores não avaliaram positivamente o atributo, perante isto, foi necessário realizar análise específica da



situação e percebeu-se que em determinados momentos pequenas confusões visuais eram apresentadas.

A Figura 38 contextualiza o cenário de falha.



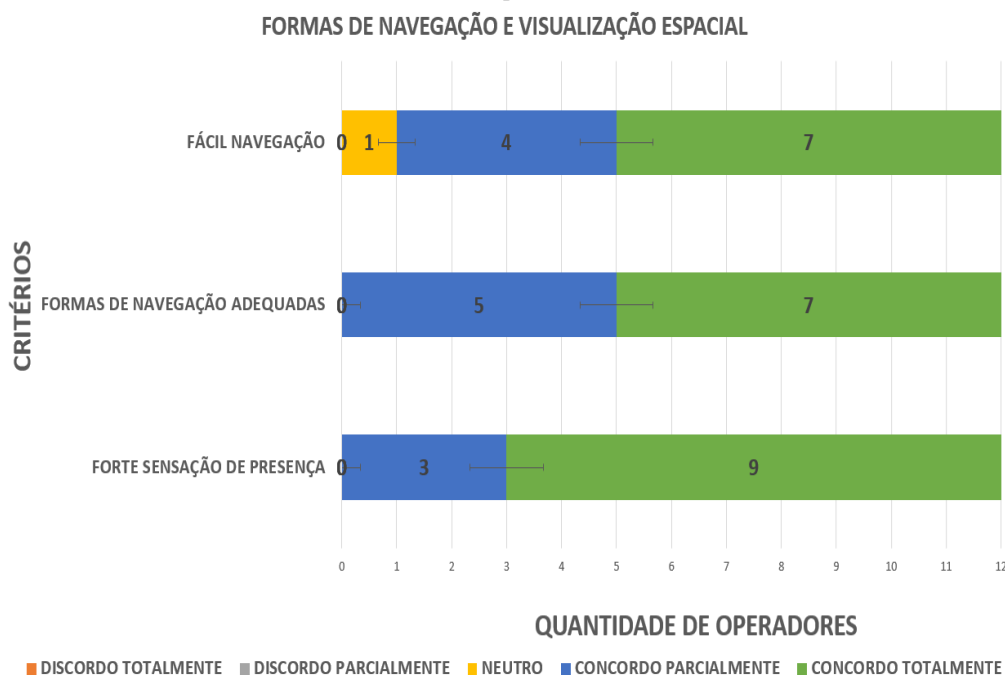
*Figura 38 – Confusão Visual entre menu e janela de apresentação de dados.*

Após identificado a falha de sobreposição entre dois mecanismos de controle, foi realizada a correção no algoritmo de apresentação das interfaces de controle, sendo eliminada a ocorrência de falhas deste gênero.

### **5.2.3 Formas de Navegação e Visualização Espacial**

Critério que analisa a usabilidade das distintas formas de navegação que o sistema de Realidade Virtual possui, evidenciando a sensação de presença do usuário, considerando a integração das interfaces de controle no ambiente virtual e confronto dos paradigmas (widgets 2D e ambiente virtual 3D).

Os parâmetros avaliados foram à eficiência, interesse, facilidade de aprendizagem para execução dos comandos e transmissão da sensação de presença durante a utilização. Na Figura 39 constam resultados levantados neste critério.



*Figura 39- Gráfico referente aos critérios de análise sobre navegação no ambiente virtual 3D*

Com base nos dados obtidos, pode-se notar que as formas de navegação disponibilizadas e sua maneira de realizar este procedimento foram bem aceitas por parte dos operadores, possibilitando facilmente acesso aos pontos de interesse do mesmo.

É importante relatar que todos os operadores que participaram desta pesquisa concordam parcialmente ou totalmente que o sistema desenvolvido transmite forte sensação de presença com contexto abordado, atributo este importante para reduzir a problemática da ausência de um meio de transmitir informações espaciais e funcionais ao operador de forma que possa prontamente assimilar, além de possibilitar uma interface homem computador mais amigável.

Posteriormente, foi aplicada uma segunda etapa para testes referentes ao sistema, sendo esta constituída na execução de tarefas e procedimentos associados ao domínio da operação de subestações de energia elétrica.

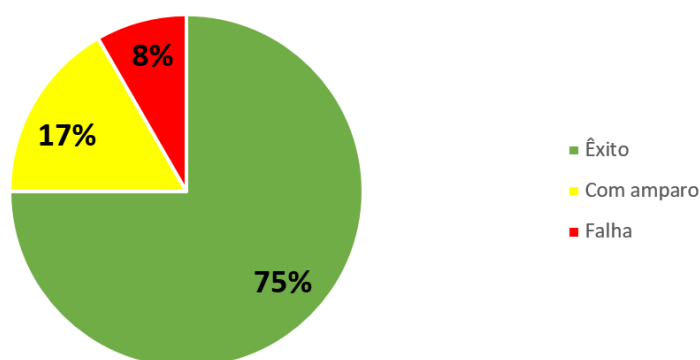
### 5.3 Análise de Desempenho

Para tanto, foram definidas e simuladas duas atividades pertinentes no processo de operação para que os operadores realizassem na nova interface proposta, tendo como intuito mensurar o êxito dos mesmos durante a execução.

### 5.3.1 Atividade 1 – Localizar e aproximar o campo de visão

Nesta atividade consiste em o operador localizar um determinado transformador situado em uma subestação e posteriormente aproximar o campo de visão por meio do recurso zoom in, tendo como tempo limite 30 segundos. Na Figura 40 é apresentado resultados referentes à atividade.

**Atividade 1 - Localização e Aproximação de Equipamentos**



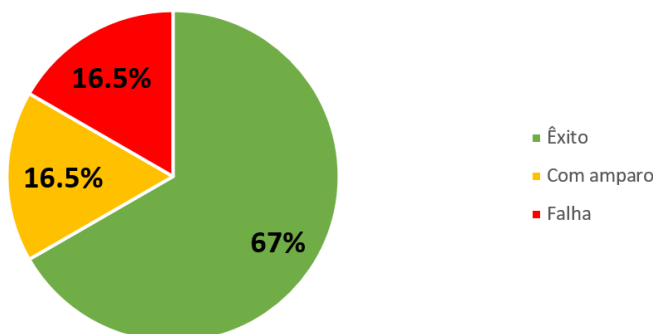
*Figura 40: Gráfico referente à atividade de localização e aproximação de equipamentos.*

Nesta situação, pode-se observar que a ampla maioria obteve êxito ao realizar a atividade proposta sem nenhuma dificuldade enfrentada obtendo facilidade na localização espacial dos componentes da subestação, em contrapartida 17% da amostragem necessitaram de amparo para à realização e 8% não obteve êxito considerando o tempo máximo de 30 segundos para execução. Por se tratar de sistema crítico de engenharia torna-se importante delimitar o fator tempo na execução de uma tarefa.

### 5.3.2 Atividade 2 – Consultar informações e alterar o estado

Nesta atividade o operador realizará consulta das informações de determinado disjuntor (status, alarme, modo simulado) e posteriormente alterar o estado do mesmo (aberto para fechado, ou, fechado para aberto), tendo como tempo limite 45 segundos. Na Figura 41 é apresentado resultados referentes à atividade.

#### Atividade 2 - Consultar Informações e Alteração de Estado



*Figura 41: Gráfico referente à atividade localização e aproximação de equipamentos.*

Esta atividade realizada é considerada comum e rotineira no contexto da operação de subestações, e conforme resultado apresentado a ampla maioria conseguiu realizar com total êxito, sendo apenas 16,5% dos operadores necessitaram de auxílio para concluírem a tarefa e outra parcela de mesmo percentual não realizaram em tempo hábil.

Por fim, é importante salientar que aproximadamente 83,3% dos operadores participantes destes processos relataram que já tiveram anteriormente algum tipo de experiência de uso com ambientes virtuais tridimensionais interativos.

## 5.4 Relatos Complementares

Com base nos resultados obtidos nos testes, comentários fornecidos pelos operadores durante as etapas de treinamento e avaliação e em períodos de observação dos mesmos durante utilização da ferramenta, pode-se notar que, a interface de Realidade Virtual transmite fortemente sensação espacial que envolve ação da operação.

Entretanto, foi possível observar por parte dos operadores que a interface tradicional no contexto da operação sistêmica, ou seja, no trato do todo, é muito eficiente pois apresenta específica de acordo com contexto da operação, não havendo necessidade de complementação com informações espaciais tridimensionais.

Já no trato de eventos específicos, por exemplo, pátios com níveis de tensões distintos ou duas subestações interconectadas a visão “real” das mesmas pode facilitar manobras de operação complexas e não rotineiras, assim reduzindo chances de erros humanos, uma vez que, a interface de Realidade Virtual evidencia aspectos espaciais, onde há clara redução de ambiguidades.

# Conclusões e Trabalhos Futuros

## Conclusões

Como mencionado anteriormente, é muito importante que o operador possa assimilar sua interface de operação de forma que não exista divergência entre a realidade de campo, para tanto, torna-se importante desenvolver estratégias que transmitam informações espaciais e funcionais

Técnicas e conceitos de interação em Realidade Virtual podem favorecer a noção intuitiva e natural de operação, que é fortemente requisitada em contextos da operação de sistemas de engenharia. Assim, este trabalho apresentou nova estratégia e exemplos de representação e interação de interfaces do usuário que são por sua vez, capazes de atuar de forma complementar às formas atuais de operação.

Portanto, acredita-se que a solução de integração proposta contribui para um aspecto positivo e mais natural no processo de operação das subestações, consequentemente, um aliado na busca da melhoria da qualidade e continuidade do fornecimento de energia elétrica.

Neste contexto, todos operadores serão exaustivamente treinados para assimilarem e detectarem em quais situações a complementação das informações espaciais funcionais auxiliarão no processo de monitoramento e controle. Uma possibilidade, é utilizar a própria interface com situações simuladas de monitoramento e controle para exercitar o uso destes recursos complementares, sendo possível observar nos testes de operação aplicados certa facilidade de utilização e satisfação da solução proposta.

Entretanto, é preciso estar atento ao fato de que projetos de Realidade Virtual possibilitam virtualização de ambientes reais e específicos, representando quebras de

paradigmas rotineiros da operação e controle, gerando barreira na introdução destas interfaces em Centros de Operação e precisa ser profundamente estudada e planejada.

Acredita-se que os resultados desta pesquisa contribui com o avanço do estado da arte na área de Sistemas Energia no qual é proposto métodos e recursos inéditos como determinada eficiência para operar subestações de energia elétrica, além de contribuir para consolidação da área de Realidade Virtual apresentando novas interfaces de controle para sistemas críticos de engenharia.

Por fim, é possível validar a hipótese de que a integração da Realidade Virtual nas interfaces tradicionais de operação fornece mecanismos facilitadores para monitoramento e controle de subestações de energia elétrica.

## **Trabalhos Futuros**

Atualmente, este sistema encontra-se implantado e em utilização no centro de operação do sistema da CEMIG e como trabalhos futuros desta pesquisa, pretende-se analisar outras condições promotoras de erros enfrentadas em sistemas de engenharia e construir novas estratégias para minimizar os impactos das mesmas no contexto da operação de subestações de energia elétrica.

Também considera-se importante realizar testes que confrontam usabilidade *versus* segurança da interface frente aos modelos mentais, comparando se estas interfaces possuem resultados distintos entre os operadores que controlam remotamente com os que atuam em campo (subestação real).

Outro aspecto importante seria o desenvolvimento de requisitos específicos para a estratégia, considerando sistemas de Realidade Virtual estereoscópicos com paralaxe positiva e negativa, reavaliando *layout*, visibilidade e aspectos visuais relacionados ao stress causado durante longo tempo de utilização.

Por fim, realizar um estudo específico sobre quantificação da imersão e aplicar testes, com intuito de comparar as técnicas tradicionais de representação de widgets 2D em SRV com estratégia elaborada.

# Referências Bibliográficas

ALMEIDA, M. **Desvendando o 3ds Max**. São Paulo: Digerati Bools, 2007.

ALVES, M; **Inovações Aplicadas ao Monitoramento de Equipamentos de Alta Tensão**, in Equipamentos de Alta Tensão: Prospecção e Hierarquização de Inovações Tecnológicas, 1ª ed., Brasília, Brasil: Fontin, 2014, cp.17, pp.784-827.

BECHELANE, A; PRADO, P; SILVA, A; CARDOSO, A; FERREIRA, J; LAMOUNIER, E; **Sistemas de Realidade Virtual para Operação de Subestações e usinas – uma IHM do Futuro**, XIII Encontro para Debates de Assuntos de Operação. Belo Horizonte, 2014.

BELL, J.; WILLIAMS, J.C. **Consolidation of the HEART Human Reliability Assessment Principles**. Symposium Series No 161 – Hazards 26, 2016.  
<https://doi.org/10.1080/09617353.2015.11691047>

BELL, J; HOLROYD, J. **Review of human reliability assessment methods**. Prepared by the Health and Safety Laboratory for the Health and Safety Executive. Derbyshire, 2009.

BELLINGER, G. **Modeling & simulation: An introduction**. Disponível em: <  
<http://www.systems-thinking.org/modsim/modsim.htm> >. Acesso em 28/10/2018.

BERNARDON, D.; KANAK N.; GARCIA, V.; FAGUNDES, D.; KROEFF, D.; VARGAS, E.; PRESSI, R.; MARTINS, E.; VIANA, S. **Planejamento de Sistemas de Distribuição Considerando a Realidade de Redes Elétricas Inteligentes e Geração Distribuída**. SENDI, 2016, Curitiba – Paraná, 2016.

BEZERRA, E. **Princípios de análise e projeto de sistemas com UML**. Rio de Janeiro: Campus, 2002.

BOWMAN, D.; KRUIJFF, E.; LaVIOLA, J.; POUPYREV, I. **3D User Interfaces – Theory and Practice**, Addison Wesley; 2011.

BOWMAN, D.; RAJA, D.; LUCAS, J.; and DATEY, A. **Exploring the Benefits of Immersion for Information Visualization**. Proceedings of HCI International, 2005.

CARDOSO, A.; LAMOUNIER, E. **A Realidade Virtual na Educação e Treinamento**. In: TORI, Romero; KIRNER, Claudio; SISCOUTO, Robson. Fundamentos e Tecnologia de Realidade Virtual e Aumentada. Belém: SBC, 2006. P. 304-312.

CARDOSO, A.; LAMOUNIER, E.; KIRNER, C.; KELNER, J. **Tecnologias e Ferramentas para o Desenvolvimento de Sistemas de Realidade Virtual e Aumentada**. Recife: Editora Universitária UFPE, 2007.

EMBREY, D. **Performance Influencing Factors (FIPs)**. Human Reliability Associates, 2000.

GOMES, P. **New strategies to improve bulk power system security: lessons learned from large blackouts**. IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2004., IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2004., 10-1, 1703-1708 Vol.2

GOMES, L.; REIS, P.; PAIVA, A.; SILVA, A.; BRAZ, G.; ARAÚJO, A.; GATTAS, M. **Semi-automatic methodology for augmented panorama development in industrial outdoor environments**. Advances in Engineering Software, Elsevier, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2017.07.012>

GROTH, K. M.; SWILER, L. P. **Bridging the gap between HRA research and HRA practice: A Bayesian network version of SPAR-H**. Reliability Engineering and System Safety, n. 155, p. 33-42, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2013.02.015>

GUANGWEI, Y. A. N. **Scene Graph Organization and Rendering in 3D Substation Simulation System**. APPEEC, 2009.



GUEDES, J. P. **Análise da confiabilidade Humana na Operação de uma Subestação do Sistema Elétrico de Potência**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2017. 79f.

KIRNER, C.; KIRNER, T. **“Evolução e Tendências da Realidade Virtual e da Realidade Aumentada”** In: Livro do XIII Pré-Simpósio de Realidade Virtual e Aumentada, Uberlândia, 2011, pp. 10-25.

KIRNER, C.; KIRNER, T. **Virtual Reality and Augmented Reality Applied to Simulation Visualization**. In: SHEIKH, El Asim; AJEELI, Abid Thyab Al; ABU-TAIEH. Simulation and Modeling: Current Technologies and Applications. New York: IGI Publishing, 2008

KIRNER, C.; SISCOOTTO, R. **Realidade Virtual e Aumentada: Conceitos, Projeto e Aplicações**. Rio de Janeiro: IX Symposium on Virtual and Augmented Reality, 2007. 292 p. <https://doi.org/10.4018/978-1-59904-198-8.ch014>

KIRWAN, B. **Human error identification in human reliability assessment. Part 1: Overview of approaches**. Applied Ergonomics, n. 23, p. 299-318, 1992. [https://doi.org/10.1016/0003-6870\(92\)90292-4](https://doi.org/10.1016/0003-6870(92)90292-4)

LANDBERG, V. **Developing User Interfaces in Virtual Reality; Department of Computing Science**; Umeå University, Master’s Thesis, 2000.

LOPES, G. **Proposta de Estratégia para Agilização do Controle Restaurativo de Sistemas Elétricos de Potência**, Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), - UFMG, Belo Horizonte, 2008. 127f.

LOWDERMILK, T. **Design Centrado no Usuário**, O’Reilly Novatec; 2013.

MATTIOLI, L.; **Uma proposta de um procedimento para geração semiautomática de ambientes virtuais para subestações de energia elétrica**, Dissertação (Mestrado em Ciências) – Faculdade de Engenharia Elétrica – UFU, Uberlândia, 2015. 66f.

MENG, F.; KAN, Y. **An improved virtual reality engine for substation simulation.** Proceedings of the 2010 2nd International Conference on Future Computer and Communication, ICFCC 2010, v. 1, p. 846–849, 2010.

MORAIS, I.; ANDRADE, H.; SILVA, A.; CARDOSO, A. **Realidade Virtual Para Treinamento em Normas de Segurança Para Manutenções de Redes Elétricas;** Anais do Workshop de Realidade Virtual e Aumentada de 2013; Jataí, GO, 2013.

PENG-CHENG, L. **A fuzzy Bayesian network approach to improve the quantification of organizational influences in HRA frameworks.** Safety Science, n. 50, p. 1569-1583, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2012.03.017>

PESSOA, A. C. P.; GOMES JR, D. L.; REIS, P. R. J.; PAIVA, A. C.; SILVA, A. C.; BRAZ JR, G.; ARAÚJO, A. S. (2017). **Uma ferramenta de autoria para construção de ambientes de realidade virtual para subestações de energia baseada em panoramas aumentados.** In: CONFERENCE ON GRAPHICS, PATTERNS AND IMAGES, 30. (SIBGRAPI), Niterói, RJ. Proceedings. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Computação, 2017. On-line.

PODOFILLINI, L; DANG, V. **A Bayesian approach to treat expert-elicited probabilities in human reliability analysis model construction.** Reliability Engineering System Safety, n. 117, p. 52-64, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2013.03.015>

PORTO, D; RAMOS, M. ; FAGUNDES, D. ; BERNARDON, D. ; MILBRADT, R. ; MARTINS, E. ; VIANA, S. **Solução Inovadora para Gerenciamento Ativo de Sistemas de Distribuição.** In: CITENEL 2017, 2017, João Pessoa. IX Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica. CITENEL, 2017.

PRADO, P. **Sistema de apoio a programação de intervenções no sistema elétrico de transmissão baseado em Realidade Virtual,** Dissertação (Mestrado em Ciências) – Faculdade de Engenharia Elétrica – UFU, Uberlândia, 2016. 67f.

QUINTANA, J.; MENDOZA, E. **3D virtual models applied in power substation projects.**: In 15th International Conference on Intelligent System Applications to Power Systems, ISAP '09, p. 1–3, 2009. <https://doi.org/10.1109/ISAP.2009.5352921>

QUIS. **Questionnaire for User Interaction Satisfaction.** Disponível em: <<http://www.lap.umd.edu/quis>>. Acesso em: 07 de Janeiro de 2017.

RIBEIRO, M. **Arquitetura para Distribuição de Ambientes Virtuais Multidisciplinares.** Tese (Doutorado em Ciências) – Faculdade de Engenharia Elétrica – UFU, Uberlândia, 2006.

SCHLATTMANN, M. and KLEIN, R. **Simultaneous 4 gestures 6 DOF real-time two-hand tracking without any markers.** In: ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology (VRST '07). Newport Beach, California, pp. 39-42.

SHERIDAN, T. B. **Risk, human error, and system resilience: Fundamental ideas.** Human Factors, v. 50, n. 3, p. 418-426, 2008. <https://doi.org/10.1518/001872008X250773>

SPURGIN, A. J. **Human Reliability Assessment – Theory and Practice.** New York: CRC Press, 2010. <https://doi.org/10.1201/9781420068528>

SWAIN, A. D.; GUTTMANN, H. E. **Handbook of Human Reliability Analysis with Emphasis on Nuclear Power Plant Applications.** Washington DC: US Nuclear Regulatory Commissions, 1983. <https://doi.org/10.2172/5752058>

TORI, R.; KIRNER, C.; SISCOOTTO, R. **Livro Do Simpósio Brasileiro De Realidade Virtual E Aumentada.** Belém - Pa: Centro Universitário do Pará - Cesupa, 2006. 320 p

UNITY3D. **Game Engine, tools and multiplatform.** Disponível em: <<http://unity3d.com/unity>> Acesso em: 27 de outubro de 2018.

VIOLIN, A; D'AJUZ, A.; LACORTE, M; Subestações de Alta Tensão, in Equipamentos de Alta Tensão: Prospecção e Hierarquização de Inovações Tecnológicas, 1ª ed., Brasília, Brasil: Fontin, 2014, cp.2, pp.784-827.

WANG, W.; LI, G. **Virtual Reality in the substation training simulator**. 14<sup>th</sup> International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design, 2010. <https://doi.org/10.1109/CSCWD.2010.5471934>

WILLIAMS, J. C. **HEART - a proposed method for assessing and reducing human error**. In: NINTH ADVANCES IN RELIABILITY TECHNOLOGY SYMPOSIUM. B3/R. Bradford, 1986.

YANG, X.; WU, J.; TIAN, Q. **A Training simulator for PD detection personnel**. Journal of Power and Energy Engineering, 2014. <https://doi.org/10.4236/jpee.2014.24077>

YVONNE,R; SHARP, H; PREECE, J. **Design de interação: além da interação homem-computador**. 3 ed. Bookman, 2011.

# Apêndice I

## FORMULÁRIO DE AVALIAÇÃO DE INTERFACE

Nome: \_\_\_\_\_ Data de Nascimento: \_\_/\_\_/\_\_ ( ) UFU ( ) CEMIG

Avalie sua experiência em ambientes virtuais 3D:

- ( ) Nenhuma Experiência ( ) Experiência Moderadamente Alta  
 ( ) Alguma Experiência ( ) Experiência Alta  
 ( ) Experiência Moderada

		Grau de Concordância					
		1	2	3	4	5	
<b>a) Reação ao Sistema</b>							
Satisfação em relação a proposta do protótipo: Utilização para Monitoramento e Controle de Subestações.	Desinteressante						Interessante
	Tedioso						Estimulante
	Difícil						Fácil
	Frustrante						Satisfatório
	Inadequado						Adequado
Comentários:							
<b>b) Tela - Interface de Controle – Menu, Interfaces Alternativas, Janelas</b>							
Com relação a utilização:	Inadequado						Adequado
	Desinteressante						Interessante
	Difícil						Fácil
Com relação a eficiência:	Pouco						Muito
Com relação a visualização:	Inadequado						Adequado
	Desinteressante						Interessante
	Pouco Legível						Muito Legível
Com relação a estética:	Desinteressante						Interessante
Oferece facilidade de aprendizagem:	Pouco						Muito
Transmite a sensação de Integração ao ambiente 3D.	Pouco						Muito



A facilidade de operar o sistema depende do nível de experiência – (em relação a sistemas 3D e jogos)	Nunca						Sempre
Você pode realizar tarefas conhecendo poucos comandos:	Com Dificuldade						Com Facilidade
Comentários:							
<b>f) Aprendizagem do Sistema</b>		1	2	3	4	5	
Aprender a operar o sistema é:	Difícil						Fácil
Iniciar o uso é:	Difícil						Fácil
Aprender a funções avançadas (Formas de Navegação – Visão Geral)	Difícil						Fácil
O tempo de aprendizagem é:	Longo						Curto
Explorar uso por tentativa e erro é:	Desencorajador						Encorajador
Relembra nomes e uso de comandos é:	Difícil						Fácil
O número de etapas por tarefa é:	Excessivo						Adequado
As etapas para completar tarefas seguem uma sequência lógica:	Nunca						Sempre
A resposta do sistema ao completar uma sequência de etapas é:	Confusa						Clara
Comentários:							
<b>g) Terminologia e Informações do Sistema</b>		1	2	3	4	5	
Uso dos termos relacionados à atividade	Inconsistente						Consistente
Uso dos termos relacionados à tecnologia	Inconsistente						Consistente
Os termos utilizados se relacionam com as tarefas desempenhadas	Nunca						Sempre
Os termos utilizados são:	Ambíguos						Precisos
Lembrança de nomes e uso dos comandos	Nunca						Sempre
A posição das interfaces são:	Inconsistente						Consistente
Instruções para comandos ou funções são:	Confusas						Claras
O sistema mantém informado sobre o que está sendo feito	Nunca						Sempre
Realizar uma operação/função no sistema leva a resultados previsíveis:	Nunca						Sempre
Duração da espera entre operações/funções do sistema é:	Inaceitável						Aceitável

Comentários:							
<i>h) Imersão</i>		1	2	3	4	5	
<i>Sentiu empatia com sistema:</i>	<i>Pouca</i>						<i>Muita</i>
<i>Sentiu interesse no sistema:</i>	<i>Pouco</i>						<i>Muito</i>
<i>Sentiu envolvido no sistema:</i>	<i>Pouco</i>						<i>Muito</i>
<i>Sentiu realismo com as ações exercidas</i>	<i>Pouco</i>						<i>Muito</i>
<i>Gostou da qualidade gráfica do sistema (Modelagem, Construção da Cena e Interfaces)</i>	<i>Pouco</i>						<i>Muito</i>
<i>Gostou de utilizar o protótipo:</i>	<i>Pouco</i>						<i>Muito</i>
<i>Os controles e comandos foram fáceis de utilizar:</i>	<i>Pouco</i>						<i>Muito</i>
Comentários:							
<i>g) Utilização do óculos 3D (esterescopia) e GamePad (controle)</i>		1	2	3	4	5	
<i>Sentiu algum desconforto em utilizar óculos:</i>	<i>Pouco</i>						<i>Muito</i>
<i>Conseguiu visualizar efeito de profundidade:</i>	<i>Nunca</i>						<i>Sempre</i>
<i>Com relação as interfaces de controle (menu, janelas, interface alternativa) utilizando o óculos:</i>	<i>Inadequado</i>						<i>Adequado</i>
	<i>Desinteressante</i>						<i>Interessante</i>
	<i>Pouco Legível</i>						<i>Muito Legível</i>
<i>Com relação a utilização do GamePad</i>	<i>Inadequado</i>						<i>Adequado</i>
	<i>Desinteressante</i>						<i>Interessante</i>
	<i>Difícil</i>						<i>Fácil</i>
<i>Sentiu algum desconforto em utilizar o GamePad</i>	<i>Pouco</i>						<i>Muito</i>
<i>Sentiu facilidade de utilizar o GamePad</i>	<i>Pouca</i>						<i>Muita</i>
Comentários:							



# Apêndice II

## FORMULÁRIO DE ATIVIDADES

Nome: \_\_\_\_\_

### TAREFAS

Tarefa 01 - Navegação: Alterar modo de navegação para 3ª Pessoa, posteriormente 1ª Pessoa e por fim voltar ao modo visão geral.

Tarefa 02 - Camadas: Em modo visão geral, manipular (ligar, navegar e desligar) camada rótulos.

Tarefa 03 – Camadas: Em 3ª pessoa, realizar leitura do equipamento na camada controle, e posteriormente alterar o estado do equipamento.

Tarefa 04 – Camadas: Em visão geral, manipular (ligar, aplicar zoom e desligar), a camada envoltória.

Tarefa 05 – Interfaces Alternativas – Utilizando a camada de controle alternativa altere o modo de navegação para 1ª pessoa.

Tarefa 06 – Minimap – Utilizando minimap, navegue até um dos transformadores de 500Kv

Tarefa 07 – Manipulação Direta – Clique no transformador, realize a leitura pela janela de informações e posteriormente feche a janela.

	<i>Tempo Gasto</i>	<i>Nº de Acesso de Ajuda</i>	<i>Nº de Erros</i>	<i>Comentário do Participante e Observações</i>
<i>Tarefa 01</i>				
<i>Tarefa 02</i>				
<i>Tarefa 03</i>				
<i>Tarefa 04</i>				
<i>Tarefa 05</i>				
<i>Tarefa 06</i>				
<i>Tarefa 07</i>				