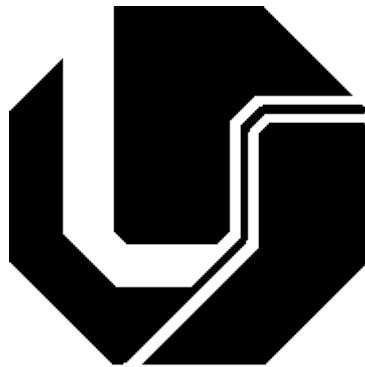


**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA**  
**PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**



**Uma Estratégia para Otimizar a Geração de Arranjos em  
Subestações Virtuais de Energia Elétrica**

**Camilo de Lellis Barreto Junior**

**Agosto**

**2016**

**Uma Estratégia para Otimizar a Geração de Arranjos em Subestações  
Virtuais de Energia Elétrica**

**Camilo de Lellis Barreto Junior**

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

---

Prof. Alexandre Cardoso, Dr.

Orientador

---

Prof. Edgard A. Lamounier Jr, PhD.

Co-orientador

---

Prof. Darizon Alves de Andrade, PhD.

Coordenador do curso de Pós-Graduação

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

---

B273e Barreto Junior, Camilo de Lellis, 1991-  
2016 Uma estratégia para otimizar a geração de arranjos em subestações  
virtuais de energia elétrica / Camilo de Lellis Barreto Junior. - 2016.  
114 f. : il.

Orientador: Alexandre Cardoso.

Coorientador: Edgard Afonso Lamounier Júnior.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

Inclui bibliografia.

1. Engenharia elétrica - Teses. 2. Subestações elétricas - Teses. 3.  
Realidade virtual - Teses. I. Cardoso, Alexandre, 1964- II. Lamounier  
Júnior, Edgard Afonso, 1964- III. Universidade Federal de Uberlândia.  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. IV. Título.

---

CDU: 621.3

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

**Uma Estratégia para Otimizar a Geração de Arranjos em Subestações Virtuais  
de Energia Elétrica**

**Camilo de Lellis Barreto Junior**

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

Banca Examinadora:

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

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

Prof. Igor Santos Peretta, PhD (UFU)

Prof. Cláudio Kirner, Dr. (UNIFEI)

## ***Agradecimentos***

Primeiramente, agradeço a Deus por toda saúde, sabedoria, fé e oportunidades que me foram concedidas.

Ao meu pai Camilo de Lellis Barreto e minha mãe Rosângela de Oliveira Barreto por serem meus primeiros “orientadores” e pelo apoio proporcionado em todas as etapas de minha vida.

Às minhas avós, Eugênia, Juliêta e Julita, pelas orações.

Ao meu irmão Henrique pelo apoio e bons momentos.

À minha família, por tocarem por mim.

Aos meus amigos do Laboratório de Computação Gráfica-UFU, por toda ajuda, experiências, bons e más momentos, viagens e comemorações durante este período.

Ao meu orientador Professor Alexandre Cardoso, pelas oportunidades, por toda ajuda, confiança e por me mostrar sempre o caminho correto a seguir.

Ao Professor Edgard Afonso Lamounier Júnior, 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.

Obrigado!

## ***Apoiadores***

Este trabalho foi apoiado por recursos de Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento – P&D Cemig/Aneel – GT411, oriundos da parceria entre a Cemig Geração e Transmissão com a Universidade Federal de Uberlândia, por bolsa de demanda social da Capes e recursos de infraestrutura da Fapemig. Sinceros Agradecimentos da Equipe de desenvolvimento e deste pesquisador.

## ***Resumo***

BARRETO JUNIOR, Camilo de L.; Uma Estratégia para Otimizar a Geração de Arranjos em Subestações Virtuais de Energia Elétrica, Uberlândia, Faculdade de Engenharia Elétrica – UFU, 2016.

**Palavras-chave:** Grafos de Cena, Ambientes Virtuais, Subestação de Energia Elétrica

O uso de Ambientes de Realidade Virtual em Subestações de Energia Elétrica provê um novo paradigma para o controle supervisão. A existência de um ambiente virtual, geometricamente compatível com a subestação real, reduz a diferença entre os modelos mentais construídos pelos operadores de campo e pelo pessoal do Centro de Operação do Sistema (COS), melhorando a comunicação. Além disso, esses sistemas podem ser usados como interfaces de visualização para simuladores de sistemas de energia, ou ainda como ambientes de treinamento para professores e alunos de graduação, operadores em campo e outros profissionais de suporte e manutenção. Entretanto, o processo de desenvolvimento destas aplicações é inerentemente complexo, envolvendo diversas atividades como programação, modelagem 3D, construção de cenários virtuais, estudo de usabilidade e técnicas para acompanhamento e gestão de projeto. Neste contexto, este trabalho apresenta uma estratégia suportada por Interface Gráfica com Usuário para criar arranjos de campos baseado em Grafos de Cena para acelerar o processo de desenvolvimento de Ambientes Virtuais de Subestações de Energia Elétrica. Evitando os erros pertinentes oriundos da construção de AV, reduzindo o tempo de desenvolvimento e melhorando a qualidade e fidelidade, as ferramentas aqui descritas são avaliadas para cenários virtuais correspondentes a subestações reais da concessionária Cemig.

## ***Abstract***

BARRETO JUNIOR, Camilo de L.; An Optimization Strategy Applied in Virtual Electricity Substations Arrangements Generation, Uberlândia, School of Electrical Engineering – UFU, 2016.

**Keywords:** Scene Graph, Virtual Environment, Electric Power Substations

The Virtual Reality techniques applied in Electricity Environments provide a new supervisory control paradigm. The fact of existing a virtual environment (VE), geometrically similar to a real substation, reduces the difference of mental models built by field operators compared with those built by system center operation improving the communication. Beside this, those systems can be used as visualization interfaces for electricity system simulators, training systems for professors and undergraduate students, field operators and maintenance professionals. However, the development process of these systems is quite complex, combining several activities such as implementation, 3D modeling, virtual sceneries construction, usability assessment and management project techniques. In this context, this work present a GUI strategy to build field arrangements based on scene graphs, to reduce time in Virtual Electricity Substations Arrangement development. Through this, mistakes during the VE building can be avoided making this process more reliable. As an concept proof, all toolkits developed in this work were applied in the virtualization of the substations from a Brazilian power concessionary named CEMIG.



## ***Publicações***

São publicações resultantes deste trabalho:

### **Trabalhos Completos**

1. BARRETO JUNIOR, C.L.; CARDOSO, A.; LAMOUNIER, E.; PRADO, P.; MATTIOLI, L.; SILVA, A. C. **Reuse of Virtual Objects from Scene Graphs for the Conception of Virtual Environments**. In: Anais do Workshop de Realidade Virtual e Aumentada – WRVA 2015, 2015, Presidente Prudente, SP, Brasil.
2. CARDOSO, A.; SILVA, A. C.; LAMOUNIER, E.; BARRETO JUNIOR, C. L.; PRADO, P. FERREIRA, J. N. F.; BECHELANE, A. P.; LIMA, G. F. M. **RVCemig: O Uso de Realidade Virtual no Centro de Operação de Sistema da CEMIG**. In: Anais do Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica – Citenel 2015, 2015, Belo Horizonte, MG, Brasil.

### **Resumo Expandido**

3. SILVA, A. C.; CARDOSO, A.; BARRETO JUNIOR, C. L.; LAMOUNIER, E.; LIMA, G. F. M.; MATTIOLI, L.; MIRANDA, M. **A Methodology for Reducing the Time Necessary to Generate Virtual Electric Substations**. In: Anais do IEEE Virtual Reality 2016, 2016, Greenville, SC, Estados Unidos da America.

### **Revista**

4. CARDOSO, A.; LAMOUNIER, E.; SILVA, A. C.; BARRETO JUNIOR, C. L.; MATTIOLI, L. **Adequação de Soluções de RV para Dispositivos Cardboard: Tendências e Técnicas em Realidade Virtual e Aumentada**. v. 6, p. 120-130, 2016. ISSN: 2177-6776

# Sumário

<b>Introdução .....</b>	<b>1</b>
1.1 Contextualização e Motivação.....	1
1.2 Objetivos .....	3
1.3 Organização da Dissertação.....	4
<b>Fundamentos .....</b>	<b>5</b>
2.1 Introdução.....	5
2.2 Ambientes de Realidade Virtual .....	5
2.2.1 Classificações de Realidade Virtual .....	6
2.2.2 Desafios da Concepção de Sistemas de Realidade Virtual .....	6
2.3 Subestações de Energia Elétrica .....	8
2.3.1 Conceitos Básicos .....	8
2.3.2 Classificação das Subestações: Nível de Tensão e Função .....	9
2.3.3 Composição das Unidades Modulares de Subestação .....	11
2.3.4 Configurações de Barra dos Arranjos Físicos de Subestações de Energia Elétrica .....	11
2.4 Grafos de Cena.....	17
2.4.1 Estrutura do Grafo de Cena .....	19
2.4.2 Vantagens.....	21
2.5 <i>Game Engine Unity</i> .....	21
<b>Trabalhos Correlatos .....</b>	<b>23</b>
3.1 Introdução.....	23
3.2 Scene Graph Organization and Rendering in 3D Substation Simulation System	23
3.3 Research and Implementation of the Auto-generating System of Three-dimensional Substation Simulation Scene.....	24
3.4 An Improved Virtual Reality Engine for Substation Simulation.....	28
3.5 3D Virtual Models Applied in Power Substation Projects .....	30

3.6	Resumo Comparativo dos Trabalhos Analisados.....	32
<b>Arquitetura da Solução.....</b>		<b>34</b>
4.1	Considerações Iniciais .....	34
4.2	Montagem de Ambientes Virtuais de Subestações de Energia Elétrica.....	34
4.2.1	Estratégias de Montagem de Ambientes Virtuais de Subestações de Energia Elétrica .....	35
4.2.2	Problemas Pertinentes do Processo de Montagem .....	43
4.3	Solução Proposta .....	46
4.3.1	Grafos de Cena para Criação Manual de Arranjos Elétricos de SE .....	46
4.3.2	Desenho Automático de Cabos Condutores .....	52
4.3.3	Ferramenta de Criação de Grafos de Cena e <i>Prefab</i> .....	54
4.3.4	Ferramenta Auxiliar para Posicionamento de Arranjos Elétricos de SE.....	59
4.3.5	Posicionamento do Arranjo Virtual.....	60
4.4	Considerações Finais.....	61
<b>Implementação .....</b>		<b>62</b>
5.1	Considerações Iniciais .....	62
5.2	Ferramenta de Criação de <i>Prefab</i> de Arranjos .....	62
5.2.1	<i>Design</i> da Interface Gráfica com Usuário .....	62
5.2.2	Arquitetura do Sistema de Criação de Arranjos de SE.....	66
5.3	Considerações Finais.....	72
<b>Análise da Estratégia .....</b>		<b>73</b>
6.1	Considerações Iniciais .....	73
6.2	Estudo de Caso Aplicado ao Projeto RVCemig.....	73
6.3	Análise da Construção de Ambientes Virtuais de Subestações de Energia Elétrica .....	80
6.3.1	Critérios de Análise .....	80
6.3.2	Análise da Construção da SE de Sete Lagoas .....	81
6.3.3	Análise da Construção da SE de São Gotardo .....	84
6.3.4	Tempo Total de Construção dos Ambientes Virtuais.....	86

6.4	Considerações Finais.....	90
<b>Conclusões e Trabalhos Futuros.....</b>		<b>91</b>
7.1	Introdução.....	91
7.2	Conclusões .....	91
7.3	Trabalhos Futuros .....	92

# Lista de Figuras

Figura 1 - Sistema de energia elétrica: fluxo de energia elétrica a partir dos geradores à áreas urbanas (CELPA, 2015).....	9
Figura 2 - Subestação de baguari, tensão de 138kV .....	10
Figura 3 - Fotografia de um arranjo de barra simples da subestação de São Gotardo. ....	12
Figura 4 - Barra simples (BOZZI; SILVA, 2011). ....	13
Figura 5 - Barra simples seccionada (MUZY, 2012). ....	14
Figura 6 - Barra principal e de transferência (VIOLIN; D’AJUZ; LACORTE, 2013). ....	14
Figura 7 - Barra dupla e um disjuntor (BOZZI; SILVA, 2011).....	15
Figura 8 - Barra dupla com dois disjuntores (BOZZI; SILVA, 2011).....	16
Figura 9 - Barra dupla com disjuntor e meio (VIOLIN; D’AJUZ; LACORTE, 2013) .....	16
Figura 10 - Barramento em anel (MUZY, 2012). ....	17
Figura 11 - Estrutura de um grafo de cena (WALSH, 2002).....	20
Figura 12 - Construção da cena referente a Ribeirão das Neves .....	22
Figura 13 - Resultado da montagem do ambiente virtual da subestação (GUANGWEI, 2009) .....	24
Figura 14- Representação bidimensional do projeto da subestação (YAN; ZHANG; WANG, 2010).....	25
Figura 15 - Quadro do sistema de RV (YAN; ZHANG; WANG, 2010) .....	26
Figura 16 - Fluxograma de criação de grafos de cena bidimensional (YAN; ZHANG; WANG, 2010).....	27
Figura 17 - Simulação de subestação tridimensional de 110kV (YAN; ZHANG; WANG, 2010)	27
Figura 18 - Módulos do fluxo do sistema de modelagem (MENG; KAN, 2010) .....	29
Figura 19 - Cena desenvolvida pelo sistema aprimorado (MENG; KAN, 2010) .....	29
Figura 20 - Vista da subestação virtual de Xochimilco (QUINTANA; MENDOZA, 2009) .....	31
Figura 21 - Arquitetura do processo de montagem de cenas – adaptado de (MATTIOLI, 2015) .....	35
Figura 22 - Foto para modelagem de equipamentos - Subestação de Araçuaí .....	36
Figura 23 -Fotografia de um disjuntor de 230kV da subestação de Taquaril .....	37
Figura 24 - Modelo 3D de disjuntor de 230kV.....	38

Figura 25 - Posicionamento do pivot em modelos – Fonte: GRVA UFU .....	39
Figura 26 - Posicionamento do dummy em modelos – Fonte: GRVA UFU .....	40
Figura 27 - Conectores de um disjuntor .....	40
Figura 28 - Seleção de um modelo para inserção na cena .....	41
Figura 29 - Inserção de disjuntor no terreno .....	42
Figura 30 - Ferramenta para desenhar cabos .....	42
Figura 31 - Geração de cabos condutores entre equipamentos de SE .....	43
Figura 32 - Cenário que envolve o uso de grafos de cena em sistemas de realidade virtual para subestações de energia elétrica .....	47
Figura 33 - Desenho de uma barra simples .....	49
Figura 34 - Grafo de cena da barra simples apresentado na Figura 33 .....	49
Figura 35 - Estrutura do grafo de cena em um arranjo virtual.....	51
Figura 36 - Arranjo virtual barra simples sem cabos condutores.....	51
Figura 37 - Exemplo de conexão de cabos de 2 conectores para 1 conector .....	53
Figura 38 - Exemplo de conexão de cabos de 2 conectores para 2 conectores .....	53
Figura 39 - Dinamismo de cabos condutores a medida que um componente é reposicionado .....	54
Figura 40 - Ferramenta para automatizar o processo de criação de grafos de cena para arranjos virtuais .....	56
Figura 41 - Nó do tipo init node utilizado no grafo de cena de um arranjo virtual de São Gotardo .....	57
Figura 42 - Nó do tipo gameobject utilizado no grafo de cena de um arranjo virtual de São Gotardo.....	58
Figura 43 - Diagrama de criação de grafo de cena .....	58
Figura 44 - Arranjo virtual criado a partir da Figura 43 .....	58
Figura 45 - Interface gráfica com usuário para definir o raio de busca de bases .....	59
Figura 46 - Como a base é detectada pelo equipamento virtual .....	60
Figura 47 - Posicionamento de um arranjo do tipo disjuntor e meio em um conjunto de bases de apoio .....	60
Figura 48 - Posicionamento de arranjo disjuntor e meio em um pátio de subestação de energia elétrica .....	61

Figura 49 - (a) Menu de opções de um nó, (b) criando uma conexão entre nós, (c) conexão criada entre os nós .....	63
Figura 50 - (a) Lista de tipos de equipamentos de um arranjo de SE, (b) lista com opções de rotação, (c) objeto selecionado sendo exibido pelo nó .....	64
Figura 51 - Janela de modelos de equipamentos para incluir no nó do grafo .....	64
Figura 52 - Menu de seleção rápida da ferramenta .....	64
Figura 53 - Interface de definição de distancias padrões.....	65
Figura 54 - Menus dos scripts de edição, (a) menu de configuração de arranjos, (b) menu de configuração de cabos condutores .....	66
Figura 55 - Diagrama de classe da arquitetura dos blocos de nós dos grafos de cena.....	67
Figura 56 - Diagrama de classe da arquitetura da interface gráfica (NodeEditor) e mecanismo de criação dos arranjos de SE .....	70
Figura 57 - Ambientes virtuais de subestações de energia elétrica desenvolvidos para o projeto RVCemig: (a) SE Ribeirão das Neves, (b) SE da usina hidrelétrica Capim Branco II, (c) SE de Ouro Preto, (d) SE de Barreiro .....	74
Figura 58 - Consulta das informações de estado de um transformador via Webservice (SILVA, 2014).....	75
Figura 59 - Diagrama de componentes (SILVA, 2014).....	76
Figura 60 - Construção da subestação de energia elétrica Sete Lagoas: processo manual e semiautomático.....	78
Figura 61 - Construção da subestação de energia elétrica São Gotardo: processo manual e semiautomático.....	79
Figura 62 - ambientes virtuais da SE Sete Lagoas construídas de forma manual e semiautomática comparando a equivalência com os modelos reais .....	82
Figura 63 - Ambientes virtuais da SE Sete Lagoas construídos de forma manual e semiautomática comparando o posicionamento dos equipamentos virtuais com os equipamentos reais .....	82
Figura 64 - Posição de equipamento virtual à base de apoio, (a) erro no posicionamento, (b) posicionamento correto .....	83
Figura 65 - Ambientes virtuais da SE Sete Lagoas construídas de forma manual e semiautomática comparando a fidelidade com o ambiente real .....	83

Figura 66 - Ambientes virtuais da SE São Gotardo construídas de forma manual e semiautomática comparando a equivalência com os modelos reais .....	84
Figura 67 - Ambientes virtuais da SE São Gotardo construídos de forma manual e semiautomática comparando o posicionamento dos equipamentos virtuais com os equipamentos reais .....	85
Figura 68 - Posição de equipamento virtual à base de apoio, (a) erro no posicionamento, (b) posicionamento correto .....	85
Figura 69 - Ambientes virtuais da SE São Gotardo construídas de forma manual e semiautomática comparando a fidelidade com o ambiente real .....	86
Figura 70 - Áreas de construção complexas da SE de Sete Lagoas, (a) cabos e suportes de um pórtico, (b) conexão por barramento entre disjuntor e chave pantográfica.....	89
Figura 71 - Áreas de construção complexas da SE de São Gotardo, (a) barramento de seleção de reatores 500kV, (b) barramento para seleção de reatores 345kV.....	89



# Lista de Tabelas

Tabela 1 - Quadro comparativo entre os trabalhos correlatos.....	33
Tabela 2 - Algoritmo de desenho de cabos entre dois equipamentos virtuais.....	52
Tabela 3 - Descrição das classes do pacote de nós da ferramenta.....	68
Tabela 4 - Descrição das classes do pacote da interface gráfica e mecanismo de criação de arranjos de SE.....	71
Tabela 5 - Características construtivas das SEs de Sete Lagoas e São Gotardo.....	77
Tabela 6 - Quantidades de equipamentos, arranjos e tempo total de construção dos AVs ...	87

# Lista de Abreviaturas

<b>2D</b>	Bidimensional
<b>3D</b>	Tridimensional
<b>ARV</b>	Ambiente de Realidade Virtual
<b>AV</b>	Ambiente Virtual
<b>CAD</b>	<i>Computer-aided Design</i>
<b>CEMIG</b>	Companhia Energética de Minas Gerais
<b>COM</b>	<i>Component Object Model</i>
<b>COS</b>	Centro de Operações de Sistema
<b>GC</b>	Grafo de Cena
<b>GRVA</b>	Grupo de Realidade Virtual
<b>GUI</b>	<i>Graphical User Interface</i>
<b>IDE</b>	<i>Integrated Development Environment</i>
<b>KV</b>	Quilo Volts
<b>LOD</b>	<i>Level of Detail</i>
<b>RV</b>	Realidade Virtual
<b>SCADA</b>	<i>Supervisory Control and Data Acquisition</i>
<b>SDK</b>	<i>Softwares Development Kit</i>
<b>SE</b>	Subestação
<b>SRV</b>	Sistema de Realidade Virtual
<b>TC</b>	Transformador de Corrente
<b>TGE</b>	<i>Torque Game Engine</i>
<b>TP</b>	Transformador de Potencial
<b>UFU</b>	Universidade Federal de Uberlândia
<b>XML</b>	<i>eXtensible Markup Language</i>

# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Contextualização e Motivação

A Realidade Virtual (RV) pode ser compreendida como “um sistema computacional usado para criar um ambiente artificial, no qual o usuário tem a impressão de não somente estar dentro deste ambiente, mas também habilitado, com a capacidade de navegar no mesmo, interagindo com seus objetos de maneira intuitiva e natural” (CARDOSO et al., 2007). Dentre as aplicações tradicionais estão a medicina, notavelmente cirurgia e reabilitação, educação e entretenimento, simulações militares, sistemas de manufatura, robótica e visualização da informação.

Diante dessa diversidade de aplicações, o setor de geração e transmissão de energia elétrica vem, recentemente, emergindo como um forte candidato a ser beneficiado pelas técnicas de Realidade Virtual (VEH et al., 1996; ARROYO; ARCOS, 1999; QUINTANA; MENDOZA, 2009). Em particular, Ambientes Virtuais de Subestações de Energia Elétrica representam uma nova abordagem para a operação e o controle supervisão do sistema elétrico. Segundo Cardoso (2014), o uso de Realidade Virtual em ambientes críticos provê novos paradigmas para as atividades rotineiras de monitoramento e controle. Assim, a existência de um modelo geométrico tridimensional, fiel às estruturas reais, minimiza a diferença entre o modelo mental da operação para operadores em campo e de salas de controle e facilita a comunicação da equipe.

O uso de RV permite apresentar modelos geométricos realísticos das subestações nos centros de operação do sistema, complementando os modelos elétricos existentes em diagramas de operação. Ainda, cada equipamento virtual possui um identificador que é associado às informações relacionadas contidas na base de dados SCADA (*Supervisory Control*

*and Data Acquisition*), o que faz do sistema de Realidade Virtual uma interface de monitoramento e controle alternativa (MATTIOLI, 2015).

As aplicações de tal empreitada, no entanto, vão além do controle supervisorio. O planejamento de reformas nos pátios ou manutenções nos dispositivos também pode ser, consideravelmente, auxiliado por cenários virtuais. Estes foram usados num estudo de viabilidade de expansão da subestação de Xochimilco no México (QUINTANA; MENDOZA, 2009).

A utilização de modelos virtuais das subestações se apresenta como uma forma estratégica de economizar tempo e investimentos, uma vez que os aprendizes podem simular operações nas diferentes subestações, a partir de um único local, como por exemplo o Centro de Operação do Sistema (COS). Como consequência, o número de deslocamentos dos operadores para treinamento em campo é reduzido e o treinamento pode ser realizado independentemente da localização ou da disponibilidade dos equipamentos reais. A contribuição de modelos virtuais de equipamentos também é observada no ensino de subestações em cursos de graduação (BARATA; FILHO; NUNES, 2015) e (BARCELOS et al., 2013).

Com o alto custo de desenvolvimento de projetos de Ambientes Virtuais, alguns recursos necessitam ser reduzidos sem diminuir a qualidade do produto. Uma das reduções plausíveis é limitar a quantidade de especialistas de construção de ambientes tridimensionais, diminuindo a mão de obra e, conseqüentemente, elevando o tempo de produção. Em decorrência, é gerado um demasiado esforço técnico e organizacional, envolvendo equipes de programação, modelagem tridimensional, montadores de Ambientes Virtuais (AV) etc. A construção de AV em especial, requer grande quantidade de documentos como fotos e desenhos CAD (*Computer-Aided Design*). Ainda que abordagens automatizadas baseadas somente no processamento de imagens ou em técnicas de sensoriamento remoto estejam disponíveis (SIMOES et al., 2012), os resultados obtidos não conferem o grau de realismo necessário e desejável para o uso em RV.

Uma empresa concessionária de energia elétrica, para suprir a demanda de eletricidade e cobrir uma área que consiga distribuir tal recurso de forma uniforme, possui o domínio de várias subestações. Perante a necessidade de desenvolver Ambientes Virtuais em

larga escala, evitar ou solucionar erros pertinentes à montagem, manter a fidelidade e qualidade na produção com equipe reduzida, o presente trabalho apresenta uma proposta de procedimento para sanar tais necessidades adaptada ao caso de Subestações de Energia Elétrica (SE). Nesse sentido, são apresentados métodos de criação automática de grupos de equipamentos virtuais que fazem parte de um seguimento de linha de monitoramento e controle de uma subestação, denominado arranjos de campo ou vãos. Para este fim, foi desenvolvido uma ferramenta com o propósito de automatizar o processo de criação dos arranjos.

## 1.2 Objetivos

O objetivo básico deste trabalho é propor uma estratégia para reduzir o tempo de fabricação em larga escala de ambientes virtuais de subestações de energia elétrica. Além disso, esta estratégia visa evitar erros e melhorar o processo de construção de AVs para Subestações de Energia Elétrica, possibilitando redução de equipes técnicas.

Para a rápida criação de arranjos, uma ferramenta de edição GUI (*Graphical User Interface*) baseada em diagramas de fluxo é proposta.

Considerando os aspectos fundamentais no desenvolvimento deste tipo de ambiente virtual, são objetivos específicos deste trabalho:

1. Propor um procedimento para a modelagem em massa de modelos virtuais de arranjos de campo;
2. Desenvolver uma estratégia para gerenciar os arranjos utilizando Grafos de Cena;
3. Estender o editor de cenários para prover uma ferramenta para criação de diagramas, cujo o objeto final é um arranjo de subestação organizado por Grafos de Cena;
4. Estender o Ambiente Virtual para prover ferramentas de auto ajuste de posicionamento, baseado na distância em que o modelo está de sua posição, para facilitar o posicionamento dos arranjos em cena e de auto deformação dos cabos condutores a medida que os equipamentos virtuais são reposicionados em cena;

5. Avaliar o impacto do uso da solução desenvolvida para a geração de Ambientes Virtuais referentes aos ambientes reais.

### **1.3 Organização da Dissertação**

Esta dissertação está organizada em 7 capítulos, descritos a seguir.

O primeiro capítulo aborda a motivação para o trabalho e delimita os principais objetivos a serem alcançados.

No Capítulo 2, os fundamentos teóricos dos principais temas associados ao trabalho e à sua aplicação são apresentados.

O Capítulo 3 apresenta o estado da arte das principais linhas de pesquisa deste trabalho, quais sejam, Uso de RV em Subestações, Geração Automática de Ambientes RV com uso de Grafos de Cena.

No Capítulo 4, a solução implementada é detalhada e contextualizada no processo de desenvolvimento de ambientes de Realidade Virtual para Subestações.

No Capítulo 5, é detalhada a implementação das ferramentas para viabilizar a construção de Ambientes de Realidade Virtual para Subestações de Energia Elétrica.

No Capítulo 6, é analisada a estratégia, avaliando os resultados obtidos com o uso da ferramenta para automatizar o processo de criação de arranjos.

Finalmente, o Capítulo 7 apresenta as considerações finais e perspectivas de trabalhos futuros.

# Capítulo 2

## Fundamentos

### 2.1 Introdução

Neste capítulo são apresentados conceitos e definições de tecnologias relacionadas ao presente trabalho, com ênfase em Ambientes de Realidade Virtual, Subestações de Energia Elétrica e Grafos de Cena.

### 2.2 Ambientes de Realidade Virtual

Muitos autores descrevem Realidade Virtual de formas e características diferentes. De acordo com Kirner & Siscouto (2007), a Realidade Virtual é uma “interface avançada do usuário” para acessar aplicações executadas no computador, propiciando a visualização, movimentação e interação do usuário, em tempo real, em ambientes tridimensionais gerados por computador. O sentido da visão costuma ser preponderante em aplicações de realidade virtual, mas os outros sentidos, como tato, audição, etc. também podem ser usados para enriquecer a experiência do usuário.

Também pode-se definir Realidade Virtual (RV) como um conjunto de tecnologias que, quando combinadas, proporcionam uma interface interativa com o usuário em um ambiente gerado pelo computador, proporcionando imersão no mundo virtual tridimensional fazendo com que o usuário sinta-se presente neste mundo. Em aplicações de RV o usuário navega e interage em tempo real com um Ambiente Virtual (AV) conseguindo realizar ações e receber estímulos, fazendo com que se sinta fazer parte dele (WIEDERHOLD; BOUCHARD, 2014).

Segundo Cardoso, Lamounier, Kirner & Kelner (2007) a Realidade Virtual é um sistema computacional usado para criar um ambiente artificial, no qual o usuário tem a impressão de não somente estar dentro deste ambiente, mas também a de estar habilitado com a capacidade de navegar no mesmo, interagindo com seus objetos de maneira intuitiva e natural.

### 2.2.1 Classificações de Realidade Virtual

Arruda et. al. (2008) afirma que a classificação da Realidade Virtual pode ser feita em função do senso de presença do usuário com o uso de uma aplicação separando a Realidade Virtual em Imersiva e Semi-Imersiva. Cardoso et. al. (2007) ainda esclarece que para se classificar os tipos de Realidade Virtual, é preciso levar em consideração o uso ou não de dispositivos multissensoriais.

### 2.2.2 Desafios da Concepção de Sistemas de Realidade Virtual

O desenvolvimento de Sistemas de Realidade Virtual é inerentemente complexo, devido a diversos fatores, tais como a quantidade de informações manipuladas, a percepção humana, as limitações de resposta dos rastreadores e dos dispositivos de visualização estereoscópica, as exigências de desempenho da renderização em tempo real, entre outros (MATTIOLI, 2015).

Zhao (2011) enumerou 10 questões que ainda devem ser trabalhadas para que sistemas RV adquiram maior maturidade industrial, discutidas a seguir.

1. **Modelos digitais:** analogamente ao caso da computabilidade, que indica se um dado problema pode ser solucionado por um computador, ainda não há estudos científicos que indicam se qualquer objeto real pode ser modelado (modelagem geométrica, física e comportamental). Nesse sentido, ressalta-se a importância do estudo de um conceito de “modelabilidade”;
2. **Complexidade:** não existe métricas satisfatórias para a medida de complexidade dos modelos, ainda que, no caso específico da geometria, seja possível analisar parâmetros como número de triângulos, polígonos ou vértices;
3. **Credibilidade dos modelos:** analogamente à complexidade, a credibilidade dos modelos virtuais gerados dificilmente pode ser medida. Para que se tenha níveis adequados de imersão, os objetos virtuais devem ser suficientemente convincentes aos usuários. Como os modelos são simplificações dos elementos reais associados, cabe aos desenvolvedores de RV encontrar o ponto ótimo, evitando a modelagem em excesso ou perda de imersão e envolvimento;



4. **Similaridade dos modelos:** Os métodos existentes para estimar a similaridade entre modelos não são satisfatórios. Isto se deve à dificuldade de estabelecer uma definição universalmente aceita da relação binária de similaridade. A similaridade é importante nos processos de reaproveitamento, classificação e reconhecimento de modelos;
5. **Qualidade da imagem:** Ainda que humanos normalmente reconheçam a similaridade entre imagem e o nível de distorção, tais processos não são triviais para o campo de visão computacional. Não há uma forma universalmente aceita de se medir níveis de clareza e distorção;
6. **Fidelidade em tempo real:** A fidelidade em ambientes virtuais está associada ao desempenho em tempo real. Existe um compromisso entre modelos e objetos reais, existindo uma dualidade, quanto mais precisa a geometria do modelo, por exemplo, maior será o tempo de renderização;
7. **Elementos básicos (meta-elementos):** Os modelos geométricos são construídos por meio de vértices, arestas e faces e suas transformações topológicas, enquanto as cores podem ser expressas como uma combinação de componentes. Os elementos básicos para a modelagem física e comportamental dos objetos, entretanto, ainda não foram identificados;
8. **Materiais e modelos comportamentais:** Não se sabe com precisão o nível necessário de entendimento do mundo natural e das forças que atuam para o seu comportamento para desenvolver modelos satisfatórios de movimentos de corpos e comportamento. Ainda, esses elementos do mundo real não são facilmente classificados como P-difíceis, NP-difíceis ou NP-completos, dificultando portanto, a análise de computabilidade dos mesmos;
9. **Integração com imagens:** A integração perfeitamente consistente de modelos baseados em computação gráfica com os baseados em imagens é um problema igualmente relevante para o desenvolvimento de sistemas RV. Da mesma forma que nos casos anteriores, não existem parâmetros satisfatórios para a medida do grau de consistência desta integração. Este problema afeta, sobretudo, sistemas de Realidade Aumentada não tratados neste trabalho;
10. **Avaliação de desempenho:** Ainda que métricas de desempenho simplificadas, baseadas na taxa de renderização em quadros por segundo, estejam disponíveis, soluções mais refinadas constituem um importante elemento de pesquisa para o

desenvolvimento de tecnologias futuras. A análise de desempenho deve levar em consideração o tempo de sensibilização dos rastreadores, o tempo gasto na comunicação com os barramentos de dados do computador, o processamento do ambiente virtual e, finalmente, a etapa de renderização.

## **2.3 Subestações de Energia Elétrica**

### **2.3.1 Conceitos Básicos**

Pode-se definir uma subestação, de forma genérica, como sendo um conjunto de sistemas específicos e independentes concebidos para atender a um objetivo comum: servir ao sistema elétrico da melhor maneira possível, atendendo aos seus requisitos no limite dos custos (VIOLIN; D'AJUZ; LACORTE, 2013).

Muzy (2012) apresenta outra definição para subestações de energia elétrica, trata-se de um conjunto de equipamentos específicos interligados entre si com o objetivo de controlar o fluxo de potência, modificar tensões e alterar a natureza da corrente elétrica assim como garantir a proteção do sistema elétrico.

A energia elétrica possui o privilégio de poder ser transmitida eficientemente a longas distâncias. No entanto, para que a transmissão e a distribuição de energia elétrica sejam viáveis, é necessário que esta seja condicionada e controlada, a partir dos geradores aos centros industriais e urbanos (MATTIOLI, 2015).

A Figura 1 representa o fluxo da energia elétrica que é produzida por geradores e enviada para uma subestação de transmissão onde sua tensão é medida e controlada para fins de qualidade. Por uma linha de transmissão até uma subestação de distribuição, a energia é transmitida e rebaixada para ser utilizada nas áreas urbanas.

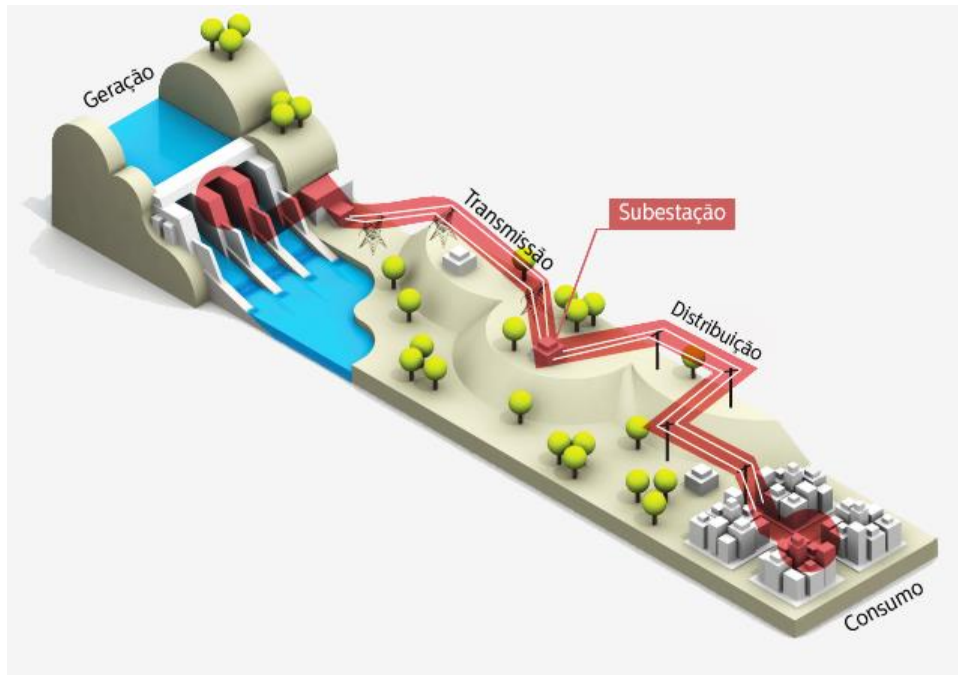


Figura 1 - Sistema de energia elétrica: fluxo de energia elétrica a partir dos geradores à áreas urbanas (CELPA, 2015).

### 2.3.2 Classificação das Subestações: Nível de Tensão e Função

Subestações de energia elétrica possuem diversas classificações, porém duas classificações são relevantes para essa dissertação: Nível de Tensão e Função.

Em relação ao nível de tensão, podem ser classificadas em Baixa Tensão, Média Tensão, Alta Tensão e Extra-alta Tensão. As subestações de baixa tensão operam com até 1kV e são utilizadas em áreas prediais, fornecendo energia elétrica para tais.

Segundo Muzy (2012), subestações classificadas como média tensão utilizam entre 1kV a 34.5kV. As tensões padrões entre esses dois valores são, 6.6kV, 13.8kV e 23kV. São utilizadas geralmente em empresas que demandam certa quantidade de energia diferente das áreas urbanas, como indústrias e fábricas.

Para subestações de alta tensão, os níveis são de 34.5kV a 230kV, com tensões padrões de: 69kV, 138kV e 230kV. Essas tensões são encontradas em subestações de distribuição e transmissão. A Figura 2 mostra o pátio de 138kV da subestação de Baguari.

Extra Alta Tensão é utilizada em subestações de transmissão que possuem tensão superior a 230kV, como: 345kV, 440kV, 500kV e 750kV.



*Figura 2 - Subestação de baguari, tensão de 138kV*

Quanto à função, pode-se dividir o sistema elétrico global em: subestações de transmissão, sub transmissão e distribuição. Esta é uma classificação em que a potência possui importância, não a tensão que passa por ela.

As subestações de transmissão são um dos principais elementos dos sistemas elétricos. A energia sai do gerador e segue para a subestação de transmissão ou usina elétrica. Utiliza grandes transformadores para elevar a tensão do gerador até tensões extremamente altas para transmissão de longa distância através de rede de transmissão (MUZY, 2012).

A rede de sub transmissão recebe energia da subestação de transmissão com o objetivo de transportar energia elétrica a pequenas cidades ou importantes consumidores industriais. Em geral, o arranjo das redes de sub transmissão é em anel para aumentar a segurança do sistema (LEÃO, 2009).

Por final, a rede de distribuição é levada diretamente ao consumidor. Recebe energia das linhas de sub transmissão e as transporta para as redes de distribuição, geralmente com abaixamento de tensão (MUZY, 2012).

### 2.3.3 Composição das Unidades Modulares de Subestação

Uma subestação é composta por todos os módulos necessários ao seu funcionamento, como módulo de entradas de linha, de conexão de equipamentos e de infraestrutura. As unidades modulares, independentemente da classe de tensão e do tipo de arranjo, subdividem-se em três tipos: Módulo de Infraestrutura, Módulo de Manobra e Módulo de Equipamento (FRONTIN; JARDINI; GABAGLIA, 2013).

- **Módulo de Infraestrutura:** Consiste no conjunto de todos os itens de infraestrutura comuns à subestação, tais como terreno, cercas, terraplanagem, grama, embritamento, arruamento, iluminação do pátio, proteção contra incêndio, abastecimento de água, redes de esgoto, malha de terra, cabos para-raios, canaletas, edificações, serviço auxiliar, área industrial e caixa separadora de óleo.
- **Módulo de Manobra:** Consiste no conjunto de equipamentos, materiais e serviços necessários à implantação dos setores de manobra.
- **Módulo de Equipamento:** É composto pelos equipamentos principais da subestação e pelos materiais e serviços necessários a sua instalação.

### 2.3.4 Configurações de Barra dos Arranjos Físicos de Subestações de Energia Elétrica

O arranjo físico de uma subestação, é um conjunto de equipamentos que fazem parte do sistema de geração, transmissão e distribuição. Estes conjuntos de equipamentos são separados por nível de tensão, localização e linha de transmissão.

Segundo Violin, D'ajuz & Lacorte (2013) podem-se dividir as configurações de barra de subestações em dois grades grupos: o primeiro grupo é das configurações com conectividade concentrada, que possuem as configurações em barra simples e barra dupla disjuntor simples. O segundo grupo é das configurações com conectividade distribuídas, que contém as configurações em anel simples e barra dupla com disjuntor e meio. Neste grupo, as contingências simples externas ou internas, normalmente, não provocam grande perda de

circuito, porém as contingências duplas podem provocar grandes perdas de circuitos, bem como a formação de ilhas elétricas no sistema.

Neste contexto, apresentam-se os principais tipos de configurações de arranjos de barras utilizados em sistemas de média, alta e extra alta tensão.

## I. Barra Simples

Barra simples (Figura 3) é o esquema de operação mais simples de uma subestação. Os circuitos e a subestação ficam desligados para a manutenção dos disjuntores. Neste esquema, devido à presença de uma única barra, a manutenção e/ou o defeito podem provocar desligamento total da subestação (MUZY, 2012).



*Figura 3 - Fotografia de um arranjo de barra simples da subestação de São Gotardo.*

A Figura 4 apresenta um diagrama unifilar de um modelo de Barra Simples.

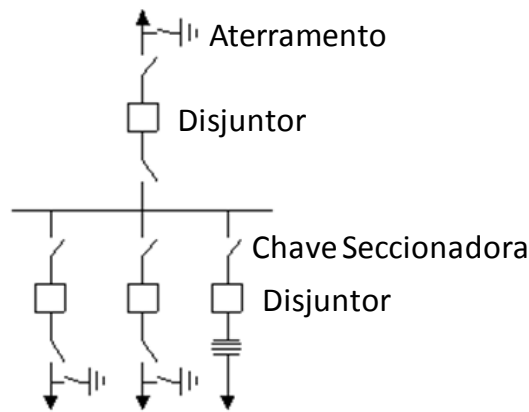


Figura 4 - Barra simples (BOZZI; SILVA, 2011).

## II. Barra Simples com By-Pass

O esquema Barra Simples pode apresentar uma melhor disponibilidade com a utilização de uma chave *By-Pass* para a alimentação dos circuitos. As características apresentadas por um sistema barra simples com a utilização de uma chave *By-Pass* é a mesma apresentada pela configuração barra simples. Esta configuração se diferencia da configuração barra simples por possuir um custo um pouco mais elevado devido à utilização de chaves *By-Pass* (MUZY, 2012).

## III. Barra Simples Seccionada

Considerando a Barra Simples, o seccionamento da mesma (Figura 5) aumenta discretamente o investimento inicial e a área necessária para implantação. A subestação continua sendo composta por apenas um barramento ao qual são interligadas duas linhas fontes e as saídas necessárias, todas dotadas de um disjuntor e duas chaves seccionadoras. No centro do barramento, há um disjuntor e duas chaves seccionadoras. Este arranjo permite manter uma parte da SE em operação no caso de falha, manutenção e ampliação (MEIRELES, 2010).

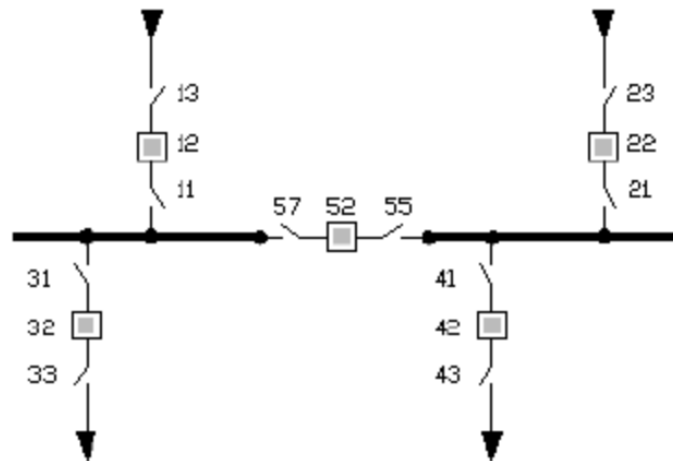


Figura 5 - Barra simples seccionada (MUZY, 2012).

#### IV. Barra Principal e de Transferência

O esquema barra principal e de transferência (Figura 6) é utilizado quando existe o requisito de não perder o circuito, durante a manutenção do disjuntor. O barramento principal da subestação é ligado a um barramento auxiliar por meio de um disjuntor (BOZZI; SILVA, 2011).

A liberação de um disjuntor é realizada com auxílio das chaves de *by-pass*, da barra e do *bay* de transferência, mantendo-se a proteção individual de cada circuito. As manobras são realizadas sem que haja desligamento e somente pode ser liberado um disjuntor de cada vez (VIOLIN; D'AJUZ; LACORTE, 2013).

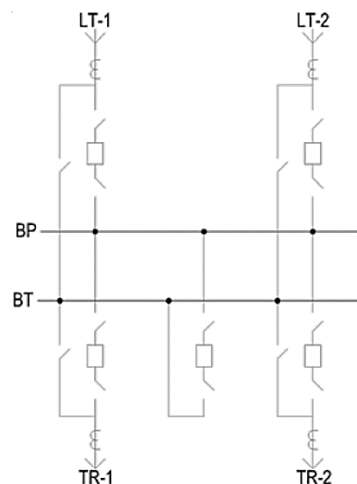


Figura 6 - Barra principal e de transferência (VIOLIN; D'AJUZ; LACORTE, 2013).



## V. Barra Dupla e um Disjuntor

Esse esquema tem dois barramentos principais ligados aos circuitos e outro que permite a transferência de circuitos entre os barramentos. Isso permite o funcionamento do sistema com qualquer barramento. No entanto, qualquer falha no disjuntor entre os barramentos causará a queda do sistema (KLEINERT, 2011). A Figura 7 apresenta o esquema de barra dupla e um disjuntor.

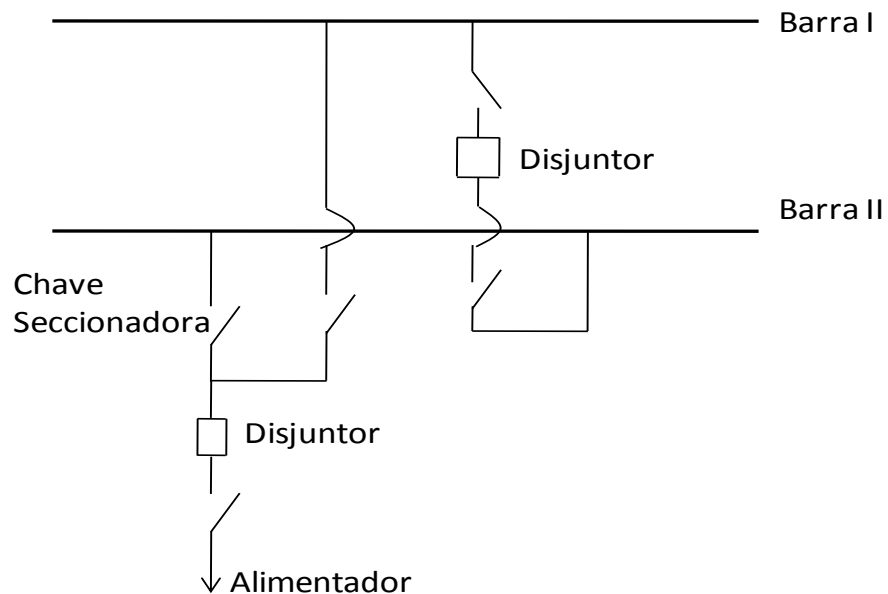


Figura 7 - Barra dupla e um disjuntor (BOZZI; SILVA, 2011).

## VI. Barra Dupla com dois Disjuntores

Apresenta a mesma vantagem do arranjo em barra principal e de transferência, permitindo a manutenção de disjuntor sem desligamento da saída. As saídas de linha são conectadas a cada uma das barras através de um disjuntor e duas chaves seccionadoras (MEIRELES, 2010). A Figura 8 apresenta o esquema da barra dupla com dois disjuntores.

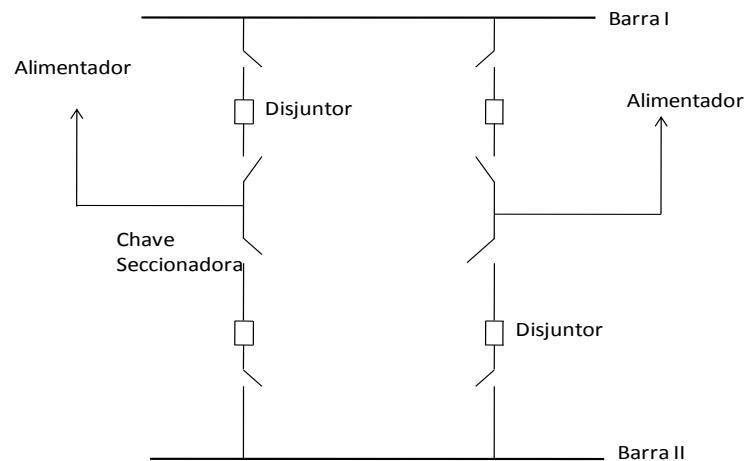


Figura 8 - Barra dupla com dois disjuntores (BOZZI; SILVA, 2011).

## VII. Barra Dupla com Disjuntor e Meio

Esta configuração (Figura 9) se torna estável com a existência do segundo laço elétrico. Mesmo com a saída das duas barras de operação, em situações envolvendo contingências duplas, a perda da configuração leva à separação dos circuitos, isto é, perda de sincronismo nesta barra do sistema, porém mantendo-se a continuidade nos circuitos. Possui boa flexibilidade operativa, facilidades para a sua expansão e fácil visualização dos equipamentos no pátio de manobras devido ao arranjo físico adotado (equipamentos instalados entre as barras).

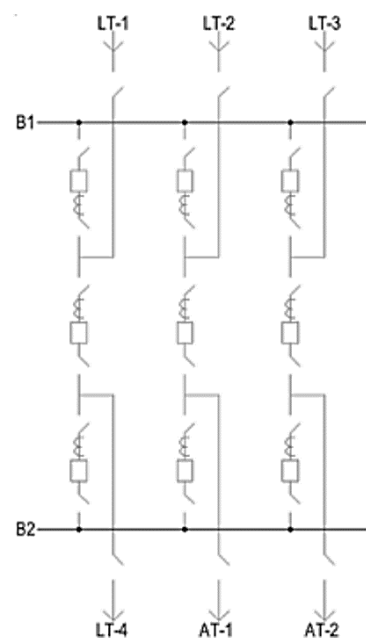


Figura 9 - Barra dupla com disjuntor e meio (VIOLIN; D'AJUZ; LACORTE, 2013)

## VIII. Barramento em Anel

Neste esquema os disjuntores estão dispostos em anel com circuitos entre os disjuntores. Quando há uma falha em um circuito, os dois disjuntores adjacentes atuam sem afetar o resto do sistema. Da mesma forma, uma falha de barramento afetará somente os disjuntores adjacentes e o resto do sistema continuará energizado. Da mesma forma, uma falha em um disjuntor fará com que os disjuntores adjacentes sejam acionados para isolar a falha (KLEINERT, 2011). A Figura 10 apresenta o esquema de barramento em anel.

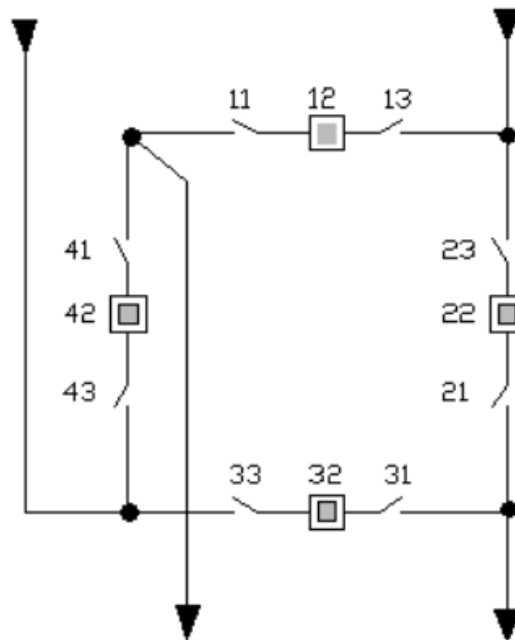


Figura 10 - Barramento em anel (MUZY, 2012).

## 2.4 Grafos de Cena

Segundo Walsh (2002), Grafos de Cena são estruturas de dados usadas para organizar o conteúdo da cena hierarquicamente, resolvendo problemas comuns na composição e gestão da cena.

Um ambiente virtual é uma representação de diversos aspectos do mundo real ou abstrato. Os aspectos que são considerados em uma aplicação de computação gráfica são: posição do objeto, forma, textura da superfície, iluminação, entre outros (FERREIRA, 1999).

Tradicionalmente ele é considerado uma estrutura com um alto nível para gerenciar dados de conteúdo 3D e cada vez mais está se tornando popular como um mecanismo de aplicação geral para gerenciar estes dados 3D (WALSH, 2002). De um modo geral, os Ambientes Virtuais representam aspectos, do mundo real ou do não real, de uma aplicação de computação gráfica. A seguir são descritos os aspectos mais importantes, segundo Ferreira (1999):

- **Descrição Geométrica:** a descrição geométrica é o modo que um modelo pode ser representado. Quanto maior o nível de detalhe da descrição geométrica, melhor a qualidade da visualização e menor é a velocidade que a imagem é gerada. Ferreira (1999) lembra que a descrição geométrica pode também ser classificada no tempo como estática ou dinâmica. A descrição geométrica estática não varia a forma de um objeto no tempo, enquanto que na dinâmica sua forma pode ser variada.
- **Câmera:** a câmera captura o ponto de vista da localização atual, orientação e perspectiva. O sistema de visualização, em seguida, mostra esse ponto de vista para o observador (Sowizral et al., 2000). Geralmente a câmera possui uma projeção perspectiva, ou seja, uma visão bidimensional de um determinado modelo tridimensional.
- **Transformação:** qualquer modelo virtual dentro de um Ambiente Virtual pode sofrer transformação de translação, rotação ou escala. A transformação ainda faz com que as coordenadas locais do modelo sejam mapeadas para as coordenadas do mundo virtual. As transformações estão fortemente relacionadas à hierarquia de objetos, pois se um nó pai for transformado, seus nós filhos relacionados também serão transformados (BAR-ZEEV, 2007).
- **Aparência:** a aparência, assim como a descrição geométrica, interfere na geração e na qualidade da imagem final. Em linhas gerais, a aparência pode ser dada de diferentes maneiras. Entre elas, aquelas que geralmente estão presentes nas aplicações de RV são: cor, material, textura, transparência, sombra, reflexão e ausência de aparência. A ausência de aparência é útil para entidades presentes no Ambiente Virtual que não podem ser visualizadas. As outras aparências (cor, material, textura, transparência,

sombra e reflexão) estão entre os diversos atributos que definem a aparência de um objeto. Pode haver também uma combinação balanceada entre as aparências (FERREIRA, 1999).

- **Comportamento:** o comportamento pode ser classificado em duas categorias distintas: determinístico e não determinístico. Nos comportamentos determinísticos, seus estados são definidos em função do tempo. Este comportamento permite que se navegue para frente e para trás no tempo, sabendo exatamente qual o estado de cada entidade em cada momento. Já o comportamento não-determinístico segue um padrão não definido, pois neste caso é impossível prever o estado de um objeto que apresente esse comportamento no futuro, não havendo a possibilidade de se restaurar seu estado no passado (ROEHL, 1995). Sem que haja próprio registro para tanto.
- **Iluminação:** em se tratando de iluminação, não há nenhuma restrição de quantidade que pode ser empregada em um AV. Há vários tipos de modelos de iluminação. Um exemplo desse tipo de modelo é o anisotrópico que pode ser visto no trabalho de Poulin e Fournier (1990). A anisotropia utiliza cilindros para calcular a direção da iluminação.

### 2.4.1 Estrutura do Grafo de Cena

Um grafo de cena é uma estrutura de dados que utiliza uma abordagem de alto nível para modelagem e gestão de cenas (VALENTE, 2014). O grafo de cena é formado, portanto, por nós conectados por arestas compondo um grafo acíclico direcionado. Cada nó possui um conjunto de atributos que podem, ou não, influenciar seus nós conectados. Os nós são organizados de uma maneira hierárquica correspondendo semântica e espacialmente com o mundo modelado (SILVA; RAPOSO; GATTASS, 2004).

Os nós podem ser divididos em três categorias: nó raiz, nós intermediários que são chamados de nós internos ou nós de agrupamento e os nós folha que estão localizados no final de um ramo. O nó raiz é o primeiro nó do grafo e todos os outros nós estão ligados a ele direta ou indiretamente. O nós internos possuem várias propriedades, sendo o uso mais comum o de representar transformações 3D (rotação, translação e escala). Os nós folha

contêm, geralmente, a representação geométrica de um objeto (SILVA; RAPOSO; GATTASS, 2004).

Tipos diferentes de nós em um grafo de cena (Figura 11) armazenam algum tipo de dado ou possuem determinadas responsabilidades:

- **Nó raiz:** Representa um nó que não possui pai. Um grafo possui um único nó raiz, que representa o pai de todos os outros nós (VALENTE, 2014).
- **Nós intermediários:** São responsáveis por estabelecer desvios que podem caracterizar sub-hierarquias dentro do grafo. Os nós de agrupamentos podem ter somente um nó pai, mas diversos nós filhos (CHEN & CHEN, 2008). Em grafos de cena que utilizam o paradigma de orientação a objetos, é comum estabelecer tipos de nós genéricos de grupo como a base para todos os nós subsequentes. Operações sobre este grupo incluem adicionar, remover e enumerar os nós filhos que são processados em uma ordem especificada ou em paralelo (SOWIZRAL et al. 2000).
- **Nós folhas:** Os nós folhas, também chamados de nós de geometria, armazenam dados necessários para descrever a forma de um objeto qualquer (BEZERRA, 2012).

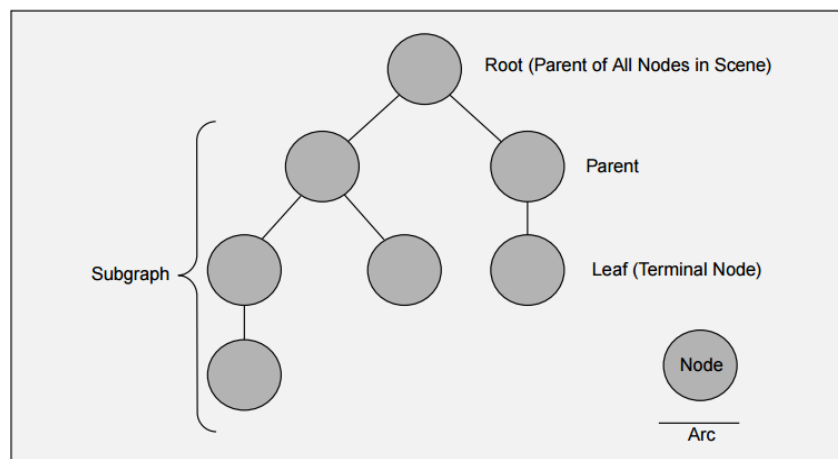


Figura 11 - Estrutura de um grafo de cena (WALSH, 2002)

## 2.4.2 Vantagens

Segundo Silva et. Al. (2004), uma vantagem direta que os grafos de cena trazem é a otimização de melhorias no desempenho de aplicações em ambientes virtuais tridimensionais. Mas essa não é a única vantagem. A seguir, Silva et al. 2004 lista outras vantagens na utilização do grafo de cena:

- **Produtividade:** os grafos de cena diminuem o trabalho de se desenvolver aplicações gráficas de alto desempenho. O grafo de cena gerencia toda a parte gráfica, reduzindo as várias linhas de código que seriam necessárias para implementar a mesma funcionalidade utilizando uma interface de programação baixo nível, como a OpenGL.
- **Portabilidade:** Os grafos de cena encapsulam todas as tarefas de baixo nível necessárias para renderizar a cena e ler e escrever arquivos, reduzindo, ou até mesmo extinguindo, a quantidade de código que é específica de alguma plataforma a ser inserido na aplicação. Sendo assim, se o grafo de cena for portátil, imediatamente toda a aplicação será portátil, sendo necessária apenas uma nova compilação ao se mudar de plataforma;
- **Escalabilidade:** os grafos de cena são feitos para funcionar em configurações simples baseadas em computadores de mesa e placas gráficas aceleradores convencionais ou em hardware complexos, tais como *clusters* de máquinas gráficas, ou sistemas multiprocessados/*multipe*. O desenvolvedor não se preocupa com a configuração em que ele irá rodar a aplicação, podendo estar focado exclusivamente no seu desenvolvimento.

## 2.5 Game Engine Unity

A *Unity 3D*, o *engine* escolhido para o desenvolvimento deste projeto, é um exemplo de *software* popular para o desenvolvimento de aplicações tridimensionais.

Assim como várias outras *engines*, oferece um ambiente de desenvolvimento com ferramentas próprias para a criação de conteúdo 3D com possibilidade de interação. Também

oferece suporte a diversas plataformas como o *iOS*, *Android*, *PS3*, *Linux*, *Web Player* com boa qualidade visual e performance, disponível em versão gratuita ou comercial. A *Unity 3D* 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 (Unity, 2013).

Um dos maiores motivos para a escolha desta *game engine* foi a sua documentação completa e a disponibilidade na comunidade *Unity*. Possui uma comunidade com milhares de membros e com uma 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 a 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 as transições de câmeras, por exemplo, trabalhando em conjunto com animações desenvolvidas no *software* de modelagem.

A Figura 12 apresenta a *engine* no processo de desenvolvimento do SRV proposto.



Figura 12 - Construção da cena referente a Ribeirão das Neves



## Capítulo 3

### Trabalhos Correlatos

#### 3.1 Introdução

A construção de Ambientes de Realidade Virtual (ARV) apresenta diversos desafios, dentre os quais, pode-se citar a necessidade de otimização e reuso de objetos de cenários, de forma a prover agilidade na concepção dos mesmos. O objetivo deste capítulo é apresentar, brevemente, diversos trabalhos relativos à elaboração de ambientes de realidade virtual, abordando a automatização e as possíveis melhorias e restrições inerentes à elaboração de ARV.

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

Guangwei (2009) apresenta o projeto de um sistema de RV para que permite os operadores da subestação, terem uma visão completa do processo que envolve o controle, simulação e treinamento em um ambiente virtual de subestação de energia elétrica. Os autores desenvolveram estratégias para confecção de ambientes virtuais de subestações de Energia Elétrica, com abordagem de desenvolvimento de grafos de cena para organização e gerenciamento dos modelos na realização do *Level of Detail* (LOD).

A estrutura do sistema de confecção é dividida em três partes: modelagem geométrica; construção do grafo de cena e renderização de cena. Para obter os modelos geométricos utilizou-se *software* de modelagem tridimensional, os modelos básicos da subestação são os equipamentos elétricos, cabos elétricos, paredes, estradas e terrenos, que foram modelados quatro vezes com diferentes níveis de detalhes.

Foi utilizado uma estrutura de dados do tipo grafos de cena para organizar hierarquicamente os modelos no ambiente de realidade virtual, esse método utiliza uma

estrutura de dados do tipo árvore acíclica direcional que suporta modelos geométricos, *scripts* e configurações. A Figura 13 mostra a construção final da subestação.

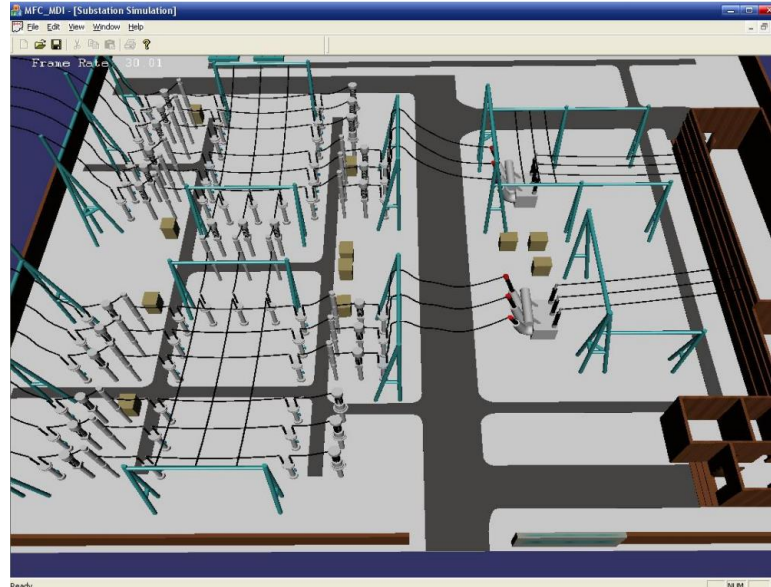


Figura 13 - Resultado da montagem do ambiente virtual da subestação (GUANGWEI, 2009)

Com relação ao método de confecção de ambientes de realidade virtual, pode-se observar os seguintes aspectos:

- Estratégia utilizando grafos de cena para realizar a técnica de *Level of Detail*, otimizando a renderização da cena a partir da distância relativa da câmera;
- Para realizar o LOD, cada equipamento necessitou ser modelado quatro vezes, portanto, para essa tarefa o tempo de modelagem pode ser um gargalo para confeccionar um ambiente virtual em um curto período de tempo.

### 3.3 Research and Implementation of the Auto-generating System of Three-dimensional Substation Simulation Scene

O trabalho de Yan, Zhang & Wang (2010) apresenta um sistema de realidade virtual de subestações de energia elétrica para simulação e treinamento de operadores. A subestação possui um ambiente virtual tridimensional que permite a simulação de comandos e ações que um operador realiza a fim de realizar treinamentos e testes. Os privilégios de se ter um

ambiente de simulação virtual é a segurança que o operador possui, por estar em local seguro e não correr os riscos corriqueiros que aparecem nos ambientes reais.

O trabalho tem como objetivo implementar um sistema auto gerador de cenas de subestações tridimensionais empregando métodos para concepção de ambientes de realidade virtual. Para tal, foi implementado uma interface bidimensional (Figura 14) para criar e editar o ambiente da subestação. Componentes bidimensionais representam simbolicamente os equipamentos do ambiente externo da subestação, podem ser inseridos e posicionados seguindo o padrão de projetos da subestação, ajustando a posição, rotação e escala de cada um, obtendo as mesmas propriedades e comportamentos dos equipamentos reais.

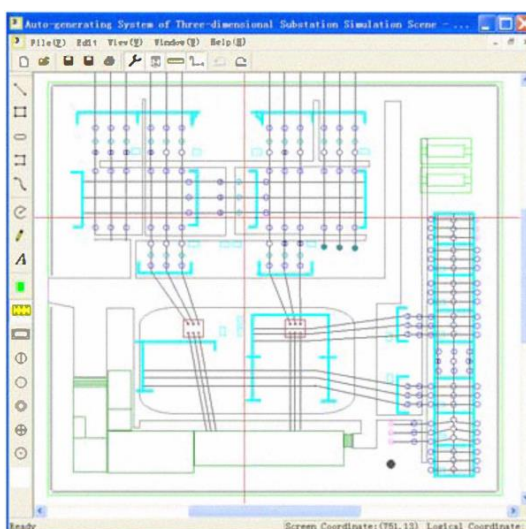


Figura 14- Representação bidimensional do projeto da subestação (YAN; ZHANG; WANG, 2010)

A estruturação do sistema é composta por três módulos que seguem um *pipeline* de execução. São eles: módulo de geração de grafos de cena bidimensional; módulo de modelagem tridimensional e módulo de renderização. O módulo de criação de grafos de cena bidimensional é encarregado por criar o ambiente virtual 2D, é gerado um arquivo que contém todas as informações que são repassadas para o módulo de modelagem 3D. O módulo de modelagem tridimensional é responsável pelas instanciações dos modelos dos equipamentos em um ambiente virtual, lê-se os dados do arquivo fornecido pelo módulo de grafo de cena bidimensional e os insere em sua posição no ambiente virtual. O módulo de renderização é responsável pelo provimento da visualização em tempo real do ambiente tridimensional.

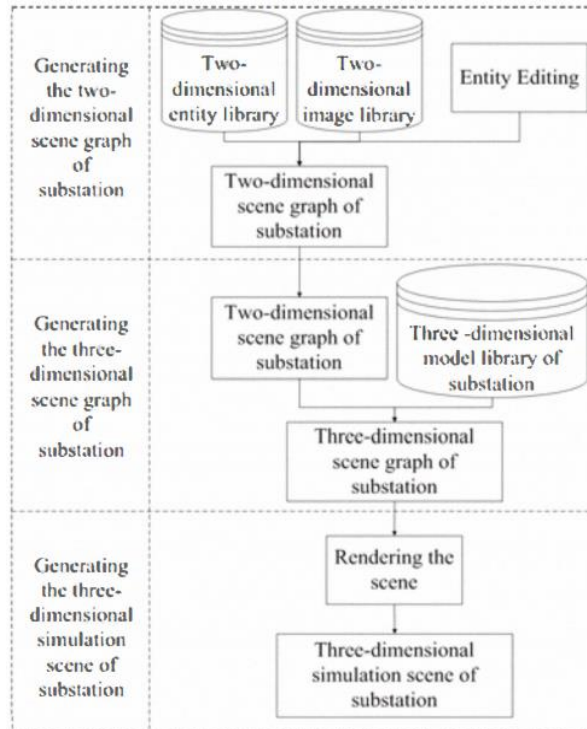


Figura 15 - Quadro do sistema de RV (YAN; ZHANG; WANG, 2010)

Uma das principais abordagens da pesquisa é o emprego de grafos de cena para gerar ambientes virtuais a partir dos elementos simbólicos criados pela ferramenta de ambiente virtual 2D, tornando a conversão do ambiente virtual bidimensional em um ambiente virtual tridimensional automático.

O sistema de geração de grafos de cena bidimensional é composto por duas bibliotecas, que armazenam entidades de elementos de subestação e as imagens simbólicas de cada componente. Após a criação do ambiente 2D os dados em forma de grafos de cena bidimensionais são enviados para o módulo de grafos de cena tridimensional para a realização da chamada para posicionamento dos modelos 3D no ambiente virtual. A Figura 16 ilustra o fluxograma de criação do grafo de cena bidimensional.

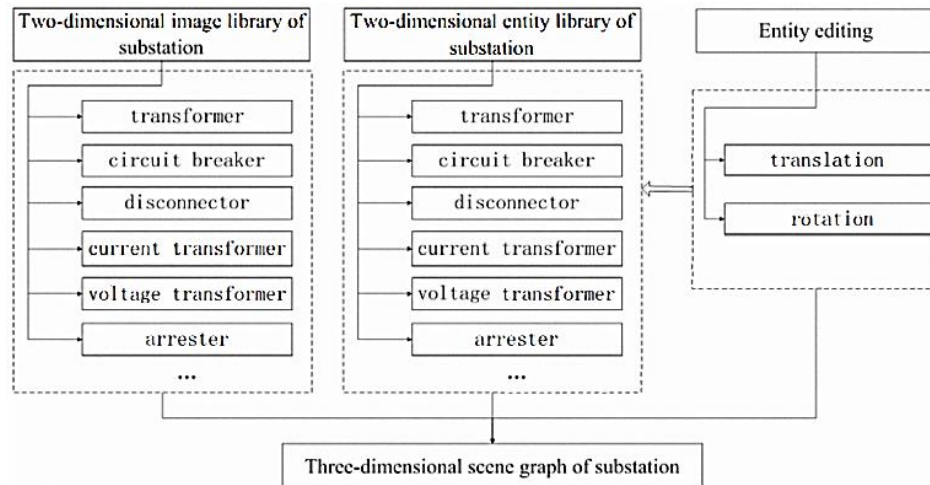


Figura 16 - Fluxograma de criação de grafos de cena bidimensional (YAN; ZHANG; WANG, 2010)

A Figura 17 mostra o resultado da criação de um ambiente virtual tridimensional para simulação de subestação de energia elétrica.

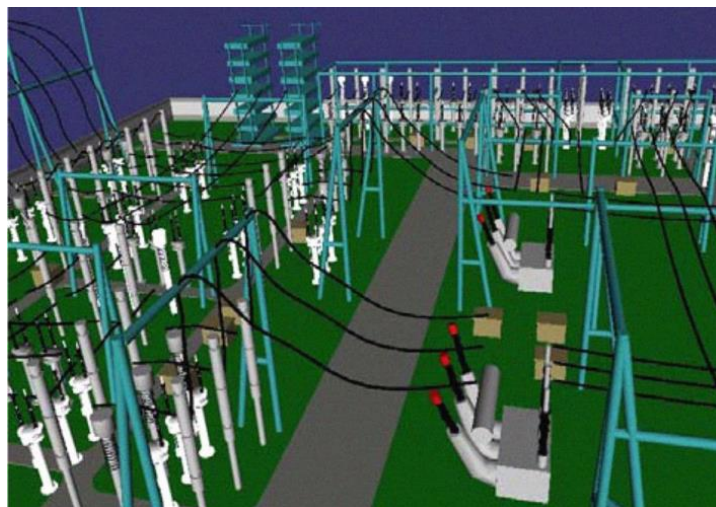


Figura 17 - Simulação de subestação tridimensional de 110kV (YAN; ZHANG; WANG, 2010)

Com relação ao método de confecção de ambientes de realidade virtual, pode-se observar os seguintes aspectos:

- Nota-se que a utilização de bibliotecas para armazenar imagens e modelos tridimensionais é um aspecto positivo com relação a criação, edição e gerenciamento do conteúdo, pois centralizar os ativos que são utilizados na

fabricação das subestações virtuais mantem o sistema organizado, acessível e possibilita a criação simultânea de subestações de energia elétrica;

- Por fim, a ferramenta de criação de grafos de cena bidimensional possui um aspecto notável na criação de ambientes virtuais tridimensionais, pois a criação de projetos em plantas possui maior facilidade quando criada em plano bidimensional e recriada tridimensionalmente, por facilitar a inserção, manuseio e visualização da cena.

### 3.4 An Improved Virtual Reality Engine for Substation Simulation

Meng & Kan (2010) apresenta a criação de subestações de energia elétrica tridimensionais para a substituição das antigas interfaces de diagramas unifilares, figuras e equipamentos, que são difíceis para os não-especialistas compreenderem os processos de funcionamento de uma subestação.

Os autores propõe um modo de desenvolvimento flexível para criar uma estrutura de ambiente de Realidade Virtual para Subestações. O foco do trabalho é desenvolver um sistema para aprimorar uma *Game Engine* de Realidade Virtual. Como a maioria das *Game Engines* não possuem módulos dedicados a confecção de subestações de energia elétrica, foi desenvolvido módulos para complementar a *Engine* e reduzir alguns gastos no momento da fabricação das SEs. Alguns problemas apresentados são os métodos básicos de concepção de um ambiente virtual que possuem baixa eficiência, consomem tempo e são muito caros.

O aprimoramento da *Game Engine* foi implementado utilizando técnicas COM (*Component Object Model*) que armazena classes independentes com base na Programação Orientada a Objetos. Utilizou-se o TGE 3D<sup>1</sup>, que é uma plataforma de desenvolvimento de código aberto. O *framework* padrão do TGE não possui módulos dedicados à concepção de ambientes virtuais para subestações de energia elétrica, em visto disso, o objetivo foi implementar e integrar à plataforma módulos para confecção específicos para sistema de

---

<sup>1</sup> O Torque Game Engine (TGE) é um motor de jogos 3D disponibilizado para a comunidade de jogos do tipo indie, fabricado pela GarageGames (MAURINA, 2006, tradução nossa).

realidade virtual de subestações. Os módulos inseridos no processo do fluxo de execução são mostrados na Figura 18.

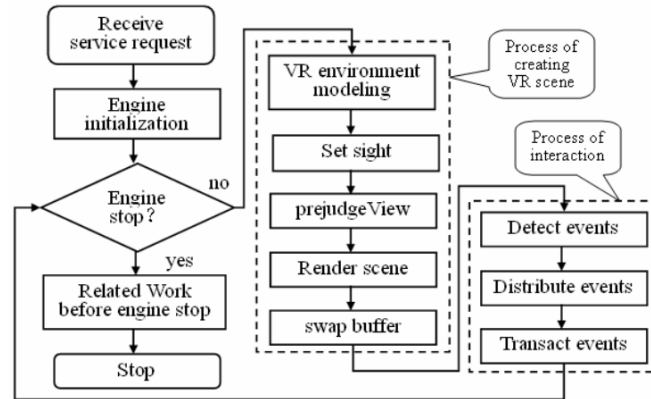


Figura 18 - Módulos do fluxo do sistema de modelagem (MENG; KAN, 2010)

O bloco *VR Environment Modeling* possui todos os elementos necessários para a modelagem dos componentes do ambiente virtual. Nele é fornecido todos os elementos para inserção na cena, a inserção dos modelos da subestação são realizadas nessa etapa. Como o *game engine* não incorpora modelos elétricos, desenvolveu-se um interface virtual para subestação onde apenas é necessário selecionar o tipo de equipamento e o local onde ele será posicionado.

Ao criar uma cena de uma subestação utilizando tal aprimoramento, pôde-se reduzir 40% do tempo de desenvolvimento em comparação a outros métodos tradicionais. A Figura 19 mostra uma cena final da subestação.



Figura 19 - Cena desenvolvida pelo sistema aprimorado (MENG; KAN, 2010)

Com relação ao método de confecção de ambientes de realidade virtual, pode-se observar os seguintes aspectos:

- A pesquisa implementou módulos complementares para uma *Game Engine* específica para desenvolvimento de ambientes de subestação elétrica;
- Nota-se com a integração dos novos módulos, a confecção dos ambientes virtuais se mostrou 40% mais rápidas que os métodos de confecções padrões, isso mostra que o desenvolvimento complementar para uma *Game Engine* melhora a eficiência na concepção de ambientes virtuais de subestação, seja em curta ou larga escala;

### **3.5 3D Virtual Models Applied in Power Substation Projects**

Quintana e Mendoza (2009) apresentam uma metodologia para criar modelos virtuais de subestações de energia elétrica para passeios virtuais, descrevendo diferentes etapas no processos de modelagem de componentes 3D. Para desenvolver modelos virtuais e conceber uma subestação, implica a execução de passos no qual implica estabelecer os objetivos a serem alcançados, os passos são: coleta de informações, modelagem de elementos e integração na cena virtual.

A coleta de informação é o recolhimento de todos os documentos necessários para a etapa de modelagem dos equipamentos. São documentos do tipo catálogos, imagens, mapas, plantas baixas, especificações de equipamentos, etc., que possam contribuir para gerar informações dos elementos a serem modelados. Um problema apresentado nesta etapa é a grande quantidade de documentos que não estão em formato digital, dificultando o fluxo de modelagem do sistema.

O passo seguinte é a modelagem dos elementos, uma vez que todos os dados e informações foram recolhidos. É a etapa mais demorada, pois a criação de modelos que representem um elemento real de subestação necessitam de alto nível de detalhamento, ao mesmo tempo é necessário equilibrar realismo com qualidade do modelo para otimizar a performance da aplicação. Os principais elementos de subestação modelados foram equipamentos primários, elementos estruturais e construções.

Após a modelagem de todos os elementos da subestação, eles são integrados a cena final. Nessa etapa os componentes são inseridos em suas posições a partir dos dados de



geoposição fornecidos pelas as plantas baixas atribuídas na primeira etapa do desenvolvimento. O passo final é a criação do passeio virtual, os autores salientaram que é importante criar caminhos predefinidos, para isso é necessário definir o local de trabalho, seleção de parâmetros do ambiente e tipo de iluminação.

Como exemplo de aplicação, a subestação de Xochimilco foi modelada e representada em um Ambiente Realidade Virtual. No verão de 2006 a grande demanda de energia elétrica fez com que novos projetos surgissem para suprir essa necessidade, um dos projetos seria expandir a subestação e incluir mais um arranjo de 230kV, por esse motivo, foi simulado virtualmente sua expansão. Com isso pode-se observar as necessidades impostas pela a área escassa. A Figura 20 exibe o modelo virtual 3D da subestação.



*Figura 20 - Vista da subestação virtual de Xochimilco (QUINTANA; MENDOZA, 2009)*

Com relação ao método de confecção de ambientes de realidade virtual, pode-se observar os seguintes aspectos:

- A pesquisa apresentou uma metodologia para criação de modelos virtuais para a concepção de subestações de energia elétrica, nota-se que o maior tempo de produção está na modelagem dos elementos 3D;
- A integração dos elementos modelados não é feita de forma automática ou semiautomática;

### 3.6 Resumo Comparativo dos Trabalhos Analisados

Apresentando diferentes tipos de estratégias, os trabalhos descritos contribuem para a elaboração desta dissertação em distintas formas. Os trabalhos são relacionados à área de concepção semiautomática de ambientes virtuais de subestações de energia elétrica, e possuem várias metodologias para tal. O trabalho de maior contribuição é o *Research and Implementation of the Auto-generating System of Three-dimensional Substation Simulation Scene*. Nele é possível perceber a preocupação em desenvolver estratégias para automatizar o processo de criação de ambientes virtuais tridimensionais, aplicando técnicas de grafos de cena para organizar e hierarquizar os componentes inseridos na cena.

Como no trabalho de (YAN; ZHANG; WANG, 2010), (GUANGWEI, 2009) utilizou grafos de cena para organização e gerenciamentos dos modelos, aplicando um modelo hierárquico para realização de *Level of Detail* (LOD).

Com relação ao trabalho *An Improved Virtual Reality Engine for Substation Simulation* pode-se levar em consideração o desenvolvimento de módulos para criação de estruturas de ambientes de realidade virtual para subestações, utilizando tecnologia COM e a *Game Engine TGE 3D*. Com a implementação dos módulos pôde-se obter 40% mais eficiência no tempo de produção de uma subestação. A Tabela 1 apresenta os tópicos abordados em cada trabalho, comparando-os entre si.

Tabela 1 - Quadro comparativo entre os trabalhos correlatos

Trabalhos \ Tópicos Abordados	Grafos de Cena	Criação Automática ou Semiautomática	Ferramenta para Auxiliar Concepção do ARV	Arranjos Pré-Fabricados
Scene Graph Organization and Rendering in 3D Substation Simulation System	✓	✗	✗	✗
Research and Implementation of the Auto-generating System of Three-dimensional Substation Simulation Scene	✓	✓	✓	*
An Improved Virtual Reality Engine for Substation Simulation	✗	*	✗	✗
3D Virtual Models Applied in Power Substation Projects	✗	✗	✗	✗
Este trabalho	✓	✓	✓	✓

✓ - Sim

✗ - Não

\* - Forma Parcial ou Aproximada

## Capítulo 4

# Arquitetura da Solução

### 4.1 Considerações Iniciais

Este capítulo apresenta um conjunto de técnicas e ferramentas concebidas para facilitar e viabilizar a construção de ambientes RV de subestações de energia elétrica em tempo hábil e eliminando alguns problemas pertinentes do processo de concepção de um Ambiente Virtual - AV. Os componentes de *software* desenvolvidos permitem uma fácil criação de arranjos elétricos de subestações aplicados na construção de ambientes tridimensionais, bem como a rápida geração de cabos e criação de *prefabs*<sup>2</sup>.

### 4.2 Montagem de Ambientes Virtuais de Subestações de Energia Elétrica

Nessa seção são apresentadas metodologias e estratégias na montagem de Ambientes Virtuais de SE de Energia Elétrica, destacando o fluxo de desenvolvimento manual e caracterizando as principais etapas no contexto de fabricação de modelos tridimensionais, dados de entradas, inserção de elementos na cena virtual e adequações finais para entrega de tal. Para finalizar, são mostrados os principais problemas pertinentes na montagem de um Ambiente Virtual para Subestações de Energia Elétrica.

---

<sup>2</sup> Brevemente descrito na seção 4.3

### 4.2.1 Estratégias de Montagem de Ambientes Virtuais de Subestações de Energia Elétrica

O processo de montagem de Ambientes Virtuais de Subestações de Energia Elétrica possui várias etapas com uma série de estratégias que são utilizadas por uma equipe de desenvolvedores que trabalham de forma síncrona (QUINTANA; MENDOZA, 2009).

A Figura 21 ilustra as etapas do método inicialmente adotado para a construção desses ambientes, levando em consideração o processo descrito no trabalho de Mattioli (2015), para montagem manual das cenas.

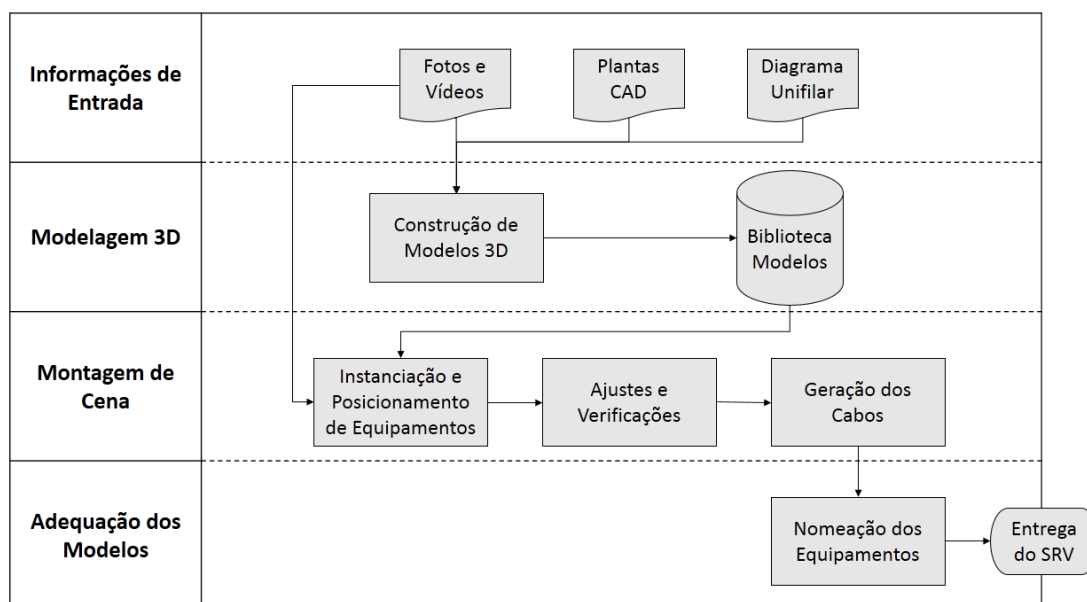


Figura 21 - Arquitetura do processo de montagem de cenas – adaptado de (MATTIOLI, 2015)

#### I. Informações de Entrada (*Input*)

As informações de entrada são dados fornecidos pela Concessionária para serem utilizados no processo de modelagem, montagem e integração do ambiente virtual. São utilizados apenas como referência para essas atividades. Cada tipo de dado de entrada possui foco em uma determinada produção do AV.

As fotos e vídeos são imagens capturadas dos ambientes reais das subestações e possuem um grande impacto para a equipe de modelagem, tal que, para se obter um modelo com características visuais similares à elementos reais, as fotos devem conter vários ângulos de captura dos elementos, como as vistas laterais e superiores. A Figura 22 ilustra um exemplo de fotografia para modelagem 3D.



*Figura 22 - Foto para modelagem de equipamentos - Subestação de Araçuaí*

As informações contidas nos arquivos do tipo CAD, são necessárias para a modelagem do terreno e para criação de bases feitas de concreto que apoiam cada equipamento da SE.

Os diagramas unifilares são destinados às informações para nomeação de equipamentos, sendo que cada equipamento possui um prefixo e um sufixo destinados à identificação pelo sistema de Webservice.

## **II. Modelagem Tridimensional**

Os modelos tridimensionais dos equipamentos podem ser fornecidos pelo próprio fabricante. Isto resulta numa economia significativa de tempo, além de uma alta probabilidade do equipamento em questão ter um modelo fortemente fiel ao real. Os modelos podem ser igualmente gerados com o auxílio de *scanners* 3D e pacotes de

*software* para o processamento de conjuntos de fotos, vistas de corte etc. Tais abordagens resultam em malhas com um número exagerado de polígonos, o que restringe o desempenho da renderização da cena. Esse impacto é ainda mais evidente em regiões com alta densidade de equipamentos, como por exemplo em pátios de 138kV. Por isso, é pertinente a opção por modelagem manual realizada por equipe especializada, bem como a adoção de uma solução entre o grau de realismo dos modelos e o nível de otimização (QUINTANA; MENDOZA, 2009). Nesta abordagem, ressalta-se que as fotos, as vistas de corte e as folhas de dados são usadas apenas como referência para a atividade de modelagem.

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

O *software* realiza a 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. É considerado como um dos softwares de modelagem tridimensional mais utilizados, oferecendo uma solução completa para modelagem, simulação, renderização, animação entre outros (Almeida, 2007). A Figura 23 apresenta uma fotografia de um disjuntor de 230kV da subestação de Taquaril-MG. Essa imagem foi utilizada como referência para a modelagem do elemento virtual representado pela Figura 24.



*Figura 23 -Fotografia de um disjuntor de 230kV da subestação de Taquaril*

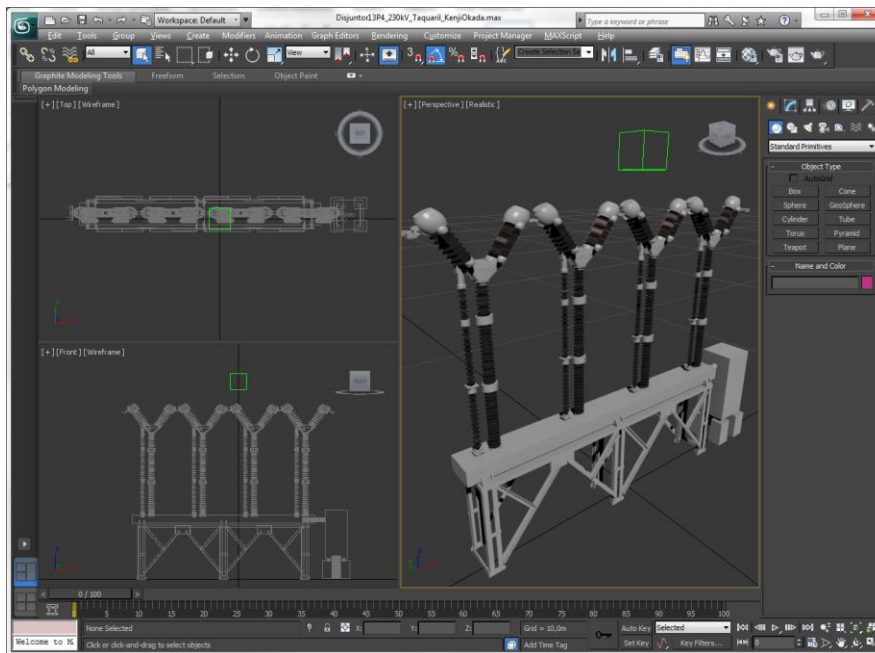


Figura 24 - Modelo 3D de disjuntor de 230kV

### III. Convenções de Geração de Modelos para a Biblioteca de Objetos Virtuais

A produção em larga escala de modelos de equipamentos de subestações de energia elétrica gera um fluxo grande de novos modelos, de modo que, para o controle do processo de produção de cenas virtuais, uma biblioteca de armazenamento de modelos foi criada. A biblioteca contém uma estrutura separada por tipo de usuários. Os usuários modeladores possuem acesso às áreas de armazenamento de modelos, onde podem incluir novos equipamentos tridimensionais inserindo uma série de informações pertinentes ao modelo, como: tipo de equipamento, nível de tensão, subestação pertencente, modelador e status de modelagem.

Após a inclusão de um novo modelo na biblioteca, a verificação e validação de modelagem é realizada por um determinado especialista. A validação é realizada para verificar os padrões de modelagem, se estão dentro da convenção especificada para a utilização dos modelos no ambiente virtual.

A aplicação da convenção na modelagem e armazenamento de modelos, garante que qualquer modelo seja compatível com os padrões de montagem de cenas. A



convenção possui padrões que incluem o nome do modelo, nome da textura, unidades de medidas, localização do *pivot*, rótulo do equipamento e conectores.

1. **Nomenclatura de modelos:** Os nomes dos modelos são definidos previamente pela equipe gerenciadora da biblioteca.
2. **Nome das texturas:** Para cada modelo, as texturas devem conter um prefixo e um sufixo, exemplo SgotMetalClaro, utilizando a notação *CamelCase*. Desta forma as texturas não entram em conflito com outras de mesmo nome.
3. **Unidade de Medida:** Por padrão foi utilizado o sistema internacional de medidas e as grandezas de distancias são medidas em metros.
4. **Posicionamento do *Pivot*:** Os objetos devem ter o ponto de origem centralizados no plano XY e com a coordenada Z correspondendo o nível mais baixo do objeto, a Figura 25 ilustra o posicionamento do *pivot* em um modelo.

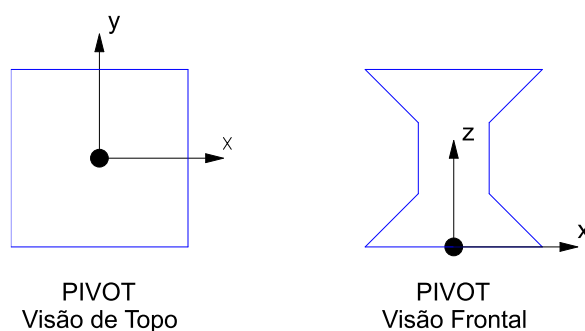


Figura 25 - Posicionamento do pivot em modelos – Fonte: GRVA UFU

5. **Rótulo do equipamento:** Todos os modelos devem possuir um elemento do tipo *Dummy* nomeados como *target*. Esse componente não é visível no ambiente virtual e é destinado ao posicionamento do rótulo de informações do equipamento em tempo de execução do SRV. Deve ser posicionado conforma a Figura 26.

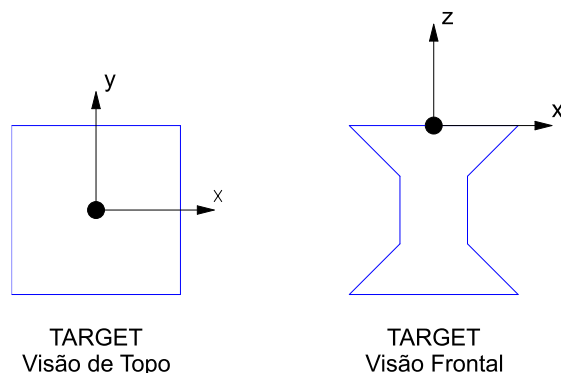


Figura 26 - Posicionamento do dummy em modelos – Fonte: GRVA UFU

6. **Conectores:** Para que seja realizada a conexão de cabos elétricos entre equipamentos, conectores são incluídos nas extremidades dos modelos seguindo fielmente sua posição e seu tamanho. Os conectores podem possuir qualquer formato, preferencialmente o formato similar ao real, podendo conter um ou mais conectores. Cada componente deve possuir o nome de “conector” para que sejam diferenciados dos objetos excedentes. A Figura 27 ilustra o formato e posicionamento do conectores que compõe um disjuntor.

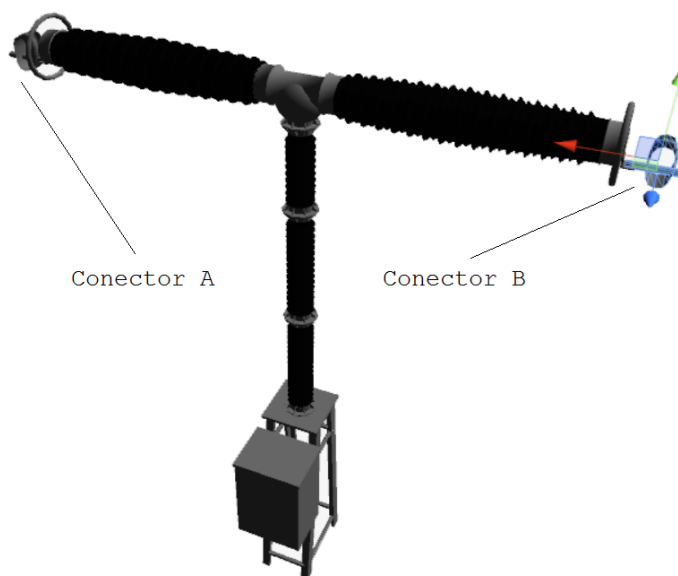
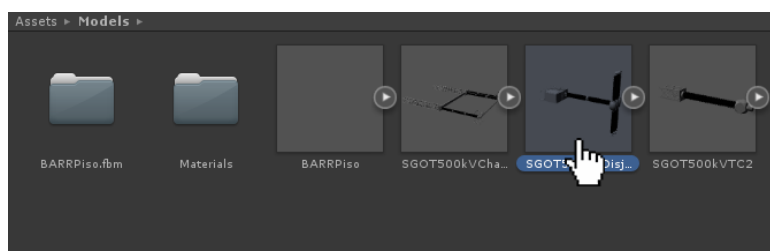


Figura 27 - Conectores de um disjuntor

## IV. Montagem de Ambiente Virtual

O processo de montagem de um ambiente virtual inclui várias etapas. Primeiramente o ambiente de desenvolvimento deve estar adequado e contendo os elementos que irão compor a subestação virtual. Isso inclui: modelos dos componentes elétricos, terrenos, animações, sons, efeitos visuais, etc. Na cena de uma nova subestação, o primeiro modelo a ser incluído é o terreno, que possui os gabaritos para posicionamento do modelos. Dessa forma facilita a inserção de modelos na cena pelo montador responsável.

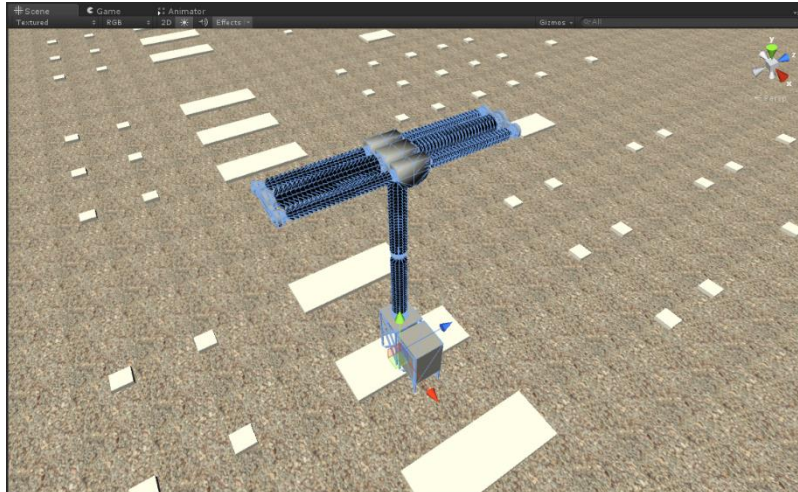
Esse processo demanda do montador de cena muito tempo para localizar e inserir o modelo em sua determinada posição. Os modelos são armazenados em um diretório próprio. A Figura 28 ilustra a seleção de um elemento virtual que será inserido na cena.



*Figura 28 - Seleção de um modelo para inserção na cena*

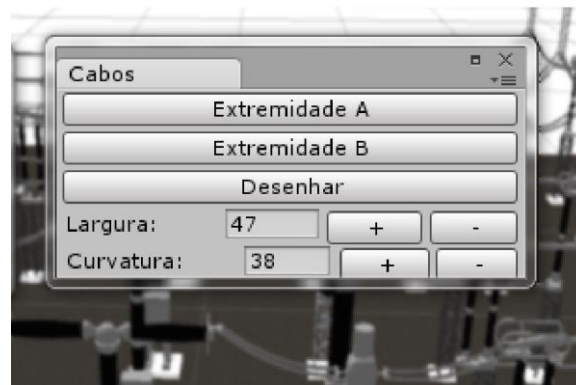
Após a seleção do modelo, o montador de cena arrasta o modelo até um determinado ponto próximo à posição final e finaliza sua inserção na cena. Um ajuste final na posição é necessário sempre que o elemento apresentar um deslocamento para fora da base localizada no terreno.

A Figura 29 ilustra a inserção e posicionamento de um disjuntor no terreno da subestação.



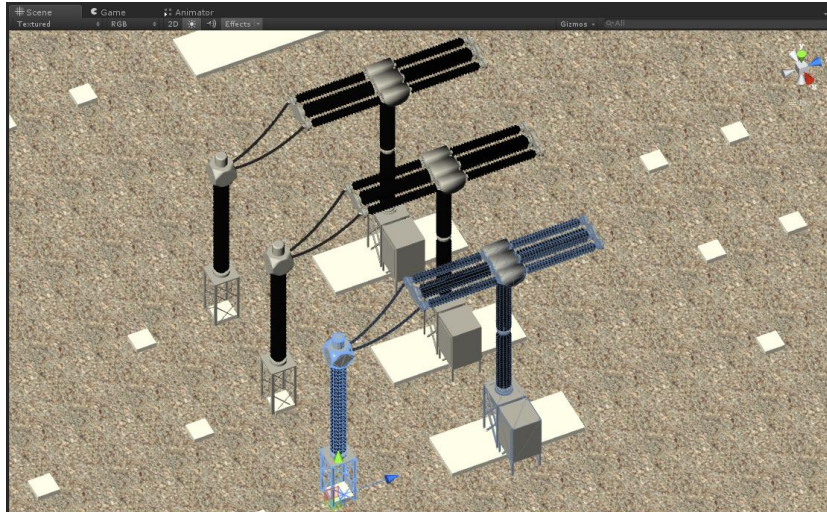
*Figura 29 - Inserção de disjuntor no terreno*

Com os elementos já inseridos em cena, a próxima etapa da montagem é a conexão de cabos elétricos entre os modelos. Os desenhos dos cabos são feitos de forma automática, selecionando os conectores do ElementoA e os conectores do ElementoB e desenhando os cabos por uma interface gráfica. A ferramenta possibilita a configuração do diâmetro e curvatura dos cabos. A Figura 30 mostra a interface utilizada para desenhar os cabos condutores.



*Figura 30 - Ferramenta para desenhar cabos*

A Figura 31 ilustra a geração de cabos condutores entre Disjuntores e TCs.



*Figura 31 - Geração de cabos condutores entre equipamentos de SE*

## V. Adequação dos Modelos

A adequação dos modelos é a última etapa na montagem de cena. Nela os modelos são nomeados seguindo o padrão de nomenclatura do protocolo de comunicação de determinado sistema. O processo de nomeação é realizado manualmente, selecionando o modelo e atribuindo um nome a ele. A nomenclatura possui um prefixo que define a qual subestação o modelo pertence e um sufixo que define a identidade do equipamento. Exemplo: SGOTT1, onde SGOT é o prefixo da subestação e T1 é o nome do equipamento.

### 4.2.2 Problemas Pertinentes do Processo de Montagem

No processo de montagem de ambientes virtuais, diversos problemas surgem à medida que os modelos são inseridos e posicionados na cena. Destacam-se:

- i. **Instanciar Modelos de Equipamentos**
  - **Descrição do processo:** Localizar no repositório de modelos o elemento correto, selecioná-lo e inseri-lo na cena.

- **Tempo de execução:** Como há uma grande quantidade de modelos armazenados no repositório, o tempo para pesquisar, localizar e inserir 4na cena é relativamente grande em relação à métodos mais atuais.
- **Erros referentes ao processo:** Selecionar e inserir em uma determinada posição um modelo equivocado.
- **Retrabalho:** No processo de validação da cena, se detectado o erro, o modelo deverá ser substituído pelo correto. Isso acarreta em realizar novamente o processo de instanciar, posicionar e desenhar os cabos.

## ii. Posicionar Modelo

- **Descrição do processo:** Após a instanciação, o modelo precisa ser posicionado no gabarito do terreno. Se necessário, aplicar uma rotação de 90°.
- **Tempo de execução:** Relativamente pequeno.
- **Erros referentes ao processo:** Posicionar em um local errado, diferença entre o centro do modelo com o centro do gabarito.
- **Retrabalho:** No processo de validação da cena, se detectado o erro, o modelo deverá ser reposicionado.

## iii. Desenhar Cabos Condutores

- **Descrição do processo:** Selecionar os conectores do Componente A e Componente B e, utilizando a ferramenta com interface do usuário, desenhar os cabos condutores de todos os componentes da SE.
- **Tempo de execução:** O tempo para desenhar os cabos é grande, pois a tarefa de selecionar os conectores demanda tempo para encontrá-los, seleciona-los e desenha-los.
- **Erros referentes ao processo:** Um dos erros mais comuns é a seleção equivocada dos conectores. Outro erro é o de desenhar os cabos entre componentes que não são conectados fisicamente no mundo real.

Também há erros pertinentes das etapas anteriores. Caso os modelos sejam instanciados e posicionados equivocadamente, os cabos que forem desenhados necessitam ser apagados e desenhados novamente.

- **Retrabalho:** Redesenhar novamente os cabos.

#### iv. Nomear Modelos

- **Descrição do processo:** Utilizar diagramas unifilares para obter informações das identidades de cada modelo em cena e posteriormente nomear cada um com seu respectivo código. Para isso, é necessário selecionar individualmente cada modelo, localiza-lo no diagrama unifilar e nomear com o prefixo e sufixo destinados a ele.
- **Tempo de execução:** O tempo de nomeação é grande e o processo exige do montador de cena muita atenção, pois para nomear um modelo é necessário localizá-lo no diagrama unifilar, visualizar o nome do elemento e nomear o respectivo modelo 3D.
- **Erros referentes ao processo:** Como a nomeação é um processo manual, um dos erros mais frequentes é o de inserir o nome do componente errado. Outro é equivocava-se de modelo e digitar o nome de outro.
- **Retrabalho:** No processo de validação da cena, se detectado o erro, é necessário renomear o modelo. Isso exige que o montador de cena refaça todo o processo de nomeação.

## 4.3 Solução Proposta

A seguir, é apresentado o conjunto de métodos desenvolvidos, visando resolver os problemas pertinentes à montagem de Ambientes Virtuais, utilizando Grafos de Cena para criação dos arranjos de Subestações de Energia Elétrica e o desenvolvimento de uma ferramenta para gerar de forma automática componentes do tipo *Prefab*<sup>3</sup> contendo armazenado o Grafo de Cena de um arranjo virtual.

### 4.3.1 Grafos de Cena para Criação Manual de Arranjos Elétricos de SE

Os grafos de cena (GC) são utilizados em uma grande escala de aplicações voltadas para computação. No contexto de estruturas e processamento de dados, os grafos de cena são utilizados para organizar de forma hierárquica os dados a serem processados, melhorando o desempenho dos *softwares*.

Em ambientes de desenvolvimento de aplicações que necessitam de processamentos gráficos de alto nível, o uso de grafos de cenas está sendo utilizado em grande quantidade. Como citado no Capítulo 2 deste trabalho, Walsh (2002) descreve os grafos de cena como estruturas de dados para organizar hierarquicamente o conteúdo do ambiente virtual, resolvendo problemas que geralmente surgem na composição do mesmo. Walsh (2002) também considera que os GC são estruturas de alto nível para gerenciar dados de conteúdo 3D.

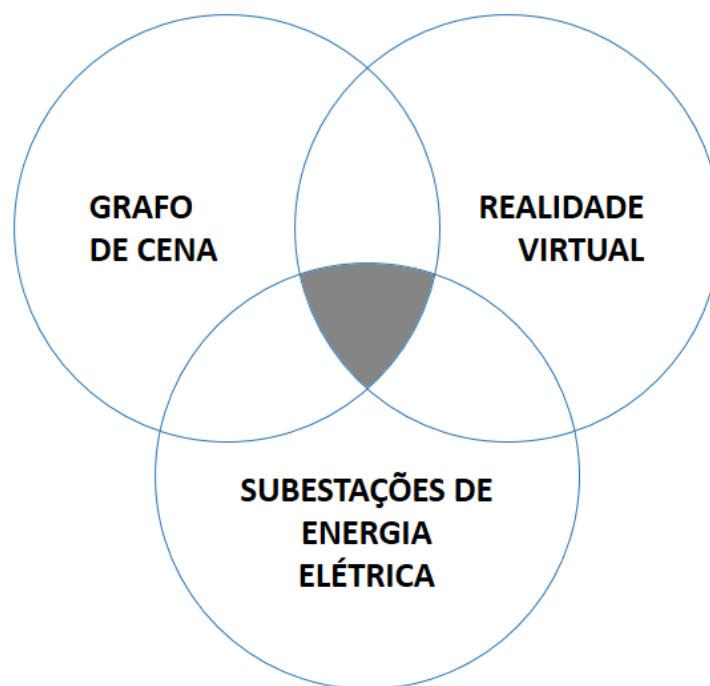
Sistemas de Realidade Virtual em que os Ambientes Virtuais possuem grandes proporções e níveis de complexidade elevado, são formados por grandes quantidades de modelos 3D. Os GCs são utilizados como estratégia para viabilizar um maior desempenho em aplicações de tempo real. Uma das estratégias para aprimorar o

---

<sup>3</sup> É um tipo de componente que permite armazenar objetos virtuais completos com características, propriedades e *scripts*. É possível criar e armazenar os *prefabs* como um novo modelo, criar instancias e realizar modificações que são imediatamente refletidas em todas as outras instancias produzidas a partir dele (UNITY3D, 2013).



desempenho de renderização de cenas foi elaborada e desenvolvida no trabalho de Guangwai (2009), onde grafos de cena foram utilizados para organizar hierarquicamente os modelos no Ambiente de Realidade Virtual, a fim de gerenciar o *Level of Detail*<sup>4</sup>. Pode-se destacar que o GC foi desenvolvido para auxiliar a renderização feita pela câmera, utilizando a estratégia de comutação de modelos por outros de menor nível de detalhes em relação à distância em que o objeto está dela. A Figura 32 mostra alguns cenários em que Grafos de Cena são utilizados, destacando a intercalação com Sistemas de Realidade Virtual aplicada a Subestações de Energia Elétrica.



*Figura 32 - Cenário que envolve o uso de grafos de cena em sistemas de realidade virtual para subestações de energia elétrica*

No trabalho de Yan, Zhang & Wang (2010), os Grafos de Cenas foram aplicados em um ambiente bidimensional, semelhante ao CAD, de montagem de subestações de energia elétrica. Todos os componentes da SE são estruturados em um GC para gerar um arquivo com dados de hierarquia e informações de conexões entre si. Tal arquivo é

---

<sup>4</sup> *Level of Detail* (Nível de Detalhe em português) é uma técnica que permite várias representações para um objeto gráfico, que são comutadas de acordo com as diferentes distâncias que a câmera está renderizando em uma determinada cena virtual. As representações são representações de um mesmo modelos, porem com quantidades de detalhes diferentes do original, quantidade de polígonos reduzidos.

importado para outro módulo que busca em uma biblioteca de modelos tridimensionais o modelo referente ao símbolo representado e o insere no Ambiente Virtual. Esta estratégia pode ser caracterizada como o uso de GC em subestações de Energia Elétrica, como mostrado na Figura 32.

Analisando os trabalhos relacionados, pôde-se chegar a uma possível estratégia para solucionar os problemas pertinentes na montagem de Ambientes Virtuais: utilizar Grafos de Cena para estruturar e gerenciar um conjunto de elementos de SE, de tal forma a permitir que tais elementos possam ser reposicionados e trocados sem perderem as características do tipo de arranjo elétrico de uma subestação.

Foi descrito no Capítulo 2, os principais tipos de configurações de barras utilizadas em SEs. São representados simbolicamente, de tal forma a fornecer informações aos engenheiros elétricos. A Barra Simples é um dos tipos de arranjo mais utilizados nos pátios de subestações de energia elétrica. Independentemente do nível de tensão e do tipos de equipamentos, esse padrão se repete em todos os projetos de SEs. Tendo isso em consideração, pôde-se reutilizar um objeto de arranjo em outras SEs apenas modificando o tipo de equipamento. Dessa forma, o tempo de elaboração de projetos pode ser reduzido significativamente.

A barra simples, mostrada na Figura 33, é composta por 6 chaves seccionadoras, 3 transformadores de corrente (TC) e 3 disjuntores. Como trata-se de um sistema elétrico trifásico, os elementos são agrupados por fases: Fase A, Fase B e Fase C. Os equipamentos da Fase A são ligados por cabos condutores conectados em suas periferias, fazendo com que a corrente elétrica seja transmitida pela fase. As outras fases seguem o mesmo padrão.

Para elaborar um Grafo de Cena referente à uma dada configuração de barra (arranjo de campo), deve-se analisar como é composto o arranjo, a quantidade de equipamentos, os tipos de equipamentos e suas interconexões. Analisando a Figura 34, pode-se observar que o arranjo possui uma hierarquia na ordem de transmissão de energia elétrica. As fases A, B e C possuem na mesma ordem 3 tipos de equipamentos que são posicionados lado a lado em determinada coordenada no espaço. Logo depois um conjunto de TCs, um conjunto de disjuntores e, finalizando, um conjunto de chaves

seccionadoras. Cada componente possui conectores que são utilizados para conexão de cabos entre equipamentos da mesma fase.

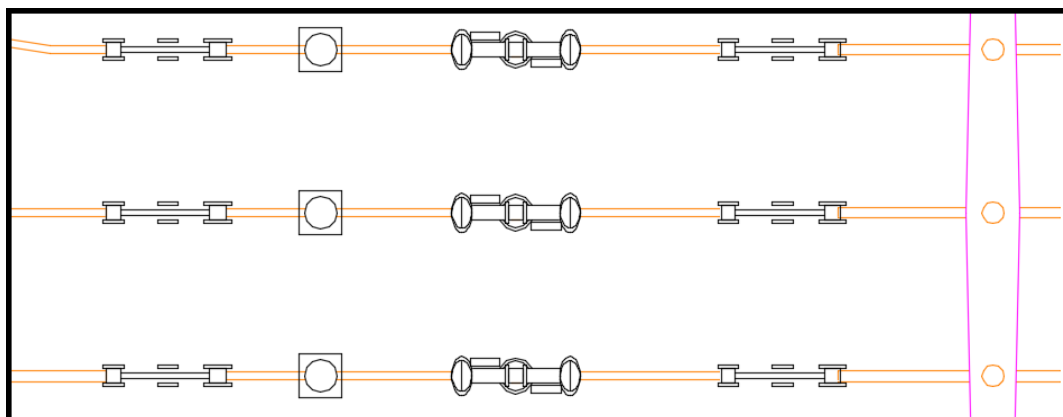


Figura 33 - Desenho de uma barra simples

Uma representação em forma de Grafo de Cena da Figura 33 é apresentada na Figura 34. A estruturação do GC foi feita tendo como o nó raiz um nó chamado Barra Simples. Todo o tipo de transformação aplicado a ele é espelhado aos nós herdeiros. Transformações como escala, posição e rotação são atribuídos da mesma forma aos nós intermediários e aos nós folhas (nós finais).

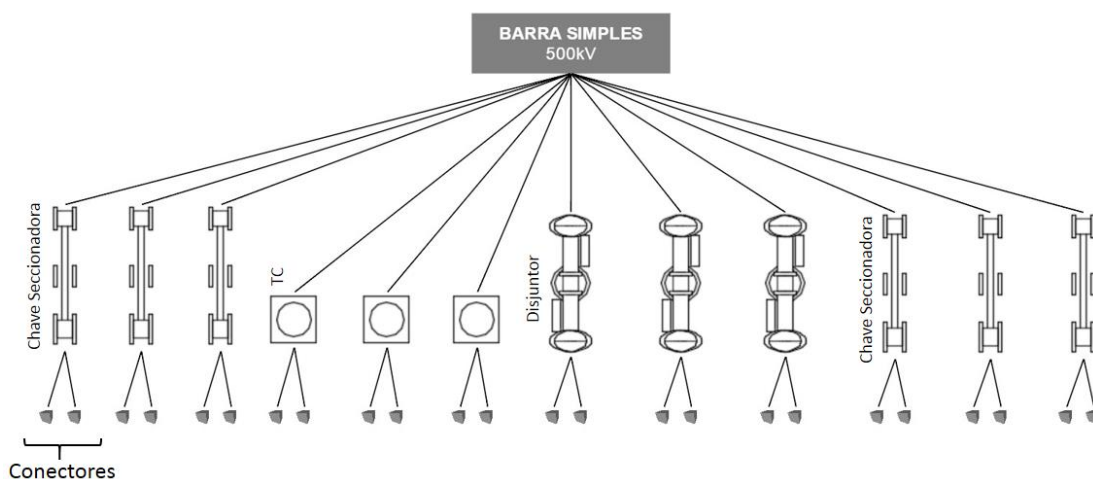


Figura 34 - Grafo de cena da barra simples apresentado na Figura 33

O nó raiz é um objeto que comporta internamente todos os outros nós do grafo e seus filhos estão em camadas hierárquicas diferentes. São nós intermediários os modelos tridimensionais (Chave Seccionadora, TC, Disjuntor) e são nós folhas os componentes que estão dentro dos modelos. No caso, são os conectores de cabos elétricos. Após representar um arranjo elétrico de subestação em forma de Grafo de Cena, é necessário transpassar a estrutura para um Ambiente Virtual na qual será montado o AV da SE.

Os *Softwares Development Kit* (SDK) utilizados em construções de AVs possuem diferentes tipos de componentes tridimensionais para serem incluídos em cena, como objetos primitivos (Cubo, Esfera, Cilindro), partículas, sons, física e objetos vazios. Cada SDK possui seus componentes e pode se diferenciar bastante da forma com que outros SDKs trabalham com os seus. Entretanto, os modelos 3D que foram desenvolvidos para um determinado tipo de aplicação possuem suas próprias características e podem ser utilizados em todos os tipos de *Game Engines*.

A conversão de Grafo de Cena para um arranjo virtual é realizado pelo montador de cena de forma manual em um determinado *Game Engine*. Para comportar todos os modelos do arranjo, o nó raiz deve ser um componente do tipo *Game Object* vazio que irá armazenar hierarquicamente todos os modelos virtuais. Os nós intermediários são compostos pelos equipamentos virtuais da subestação, de tal forma que sejam inseridos em ordem de posicionamento. Isso é definido para que o arranjo possa ser processado por ferramentas externas. A ordenação do elementos do grafo de cena é mostrada na Figura 35. A ordem é crescente e começa a ser instanciada da esquerda para direita, da fase A para a fase C e assim por diante. Os nós intermediários possuem nós folhas, no caso conectores.

A Figura 36 mostra o arranjo virtual com os equipamentos da SE, enumerados seguindo a ordem de instanciação.

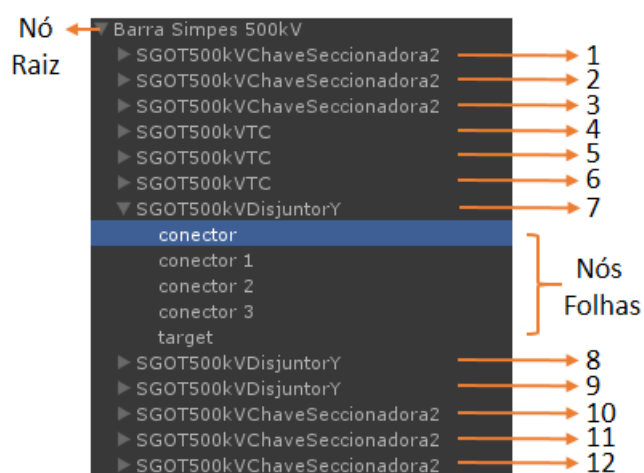


Figura 35 - Estrutura do grafo de cena em um arranjo virtual

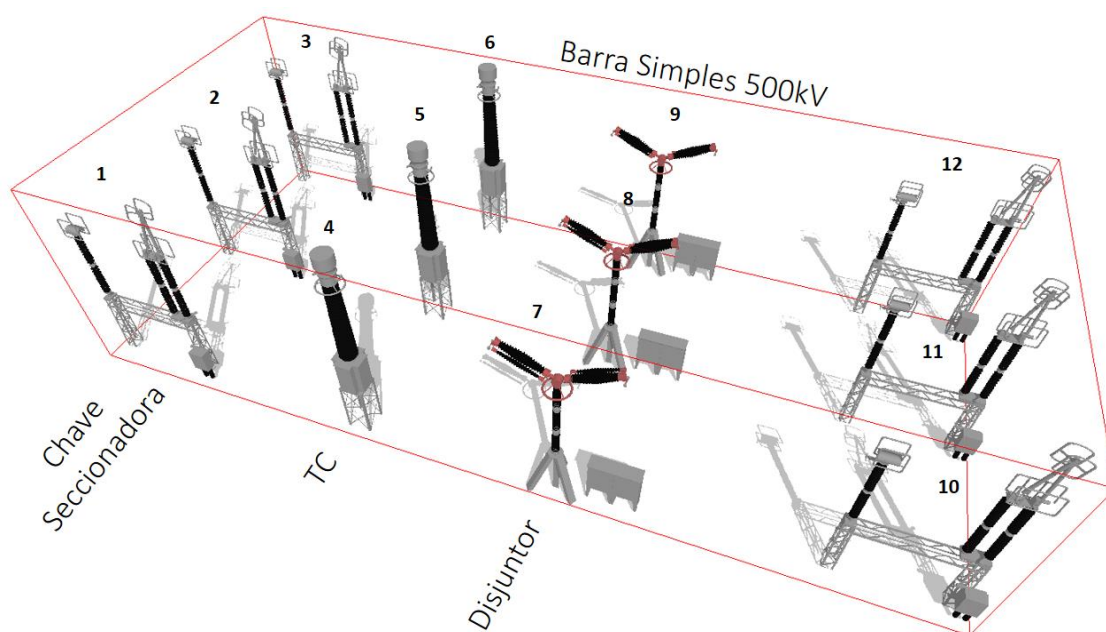


Figura 36 - Arranjo virtual barra simples sem cabos condutores

O processo de criação de arranjos virtuais a partir de um grafo de cena apresentado pode ser realizado manualmente ou por uma ferramenta de automatização de processos. A montagem manual dos arranjos virtuais não é a forma ideal de se obter *Prefabs* para uso em larga escala, uma vez que este método pode levar à mesma quantidade de tempo no processo de montagem sem a utilização dos Grafos de Cena. Um método de criação de *Prefabs* contendo a estrutura do Grafo de Cena com

todos modelos necessários utilizando uma ferramenta para automatizar este processo, é descrita na seção 4.3.3.

### 4.3.2 Desenho Automático de Cabos Condutores

A seção 4.2.1 descreve um conjunto de convenções de modelagem para a concepção de modelos para subestação de energia elétrica. O tópico 6 desta seção, descreve como são modelados, posicionados e nomeados os conectores para a utilização nos desenhos dos cabos condutores. A seguir, é apresentada uma versão adaptada para o uso neste trabalho da ferramenta desenvolvida por Mattioli (2015).

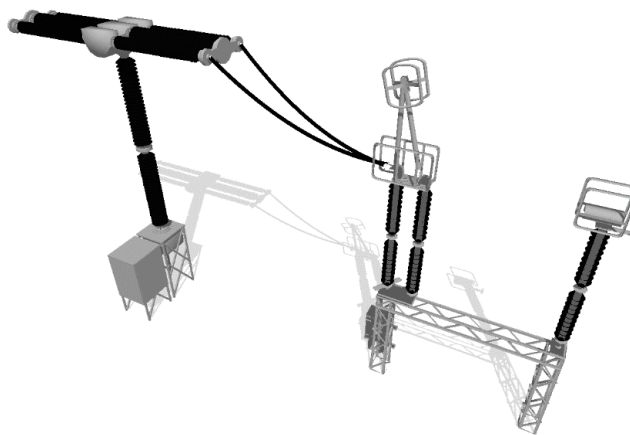
Após a inserção e alinhamento dos equipamentos virtuais no piso, um *script* contendo um algoritmo (Tabela 2) faz uma varredura, seleciona os conectores entre dois equipamentos e desenha os cabos condutores.

Tabela 2 - Algoritmo de desenho de cabos entre dois equipamentos virtuais

<p><b>Algorithm 1</b> : Conexao de Cabos</p> <pre> 1: function DRAWCABLE(GameObjectA,    GameObjectB) 2:   ConsA[] ← GameObjectA.GetConnectors 3:   ConsB[] ← GameObjectB.GetConnectors 4:   AmountConsA ← ConsA[].length 5:   AmountConsB ← ConsB[].length 6:   if AmountConsA &gt;= AmountConsB then 7:     FactorConnection ← AmountConsA 8:   else 9:     FactorConnection ← AmountConsB 10:  end if 11:  for i ← 1, n do 12:    for i ← 1, m do 13:      MatList[n][m] 14:      ← Vector3.Dist(ConsA[n], ConsB[m]) 15:    end for 16:  end for </pre>	<pre> 17:   for i ← 1, m do 18:     ArrayMinDist[COUNT] ← 19:     MatList[n][m] 20:     COUNT++ 21:   end for 22:   ARRAY.SORT(ArrayMinDist) //Sorts in 23:   ascending 24:   for i ← 1, FactorConnection do 25:     DistBuffer ← ArrayMinDist[n-1] 26:     ConnectorA ← 27:     MatList.getCol(DistBuffer) 28:     ConnectorB ← 29:     MatList.getRow(DistBuffer) 30:     INSERTCABLE(ConnectorA, 31:     ConnectorB) 32:   end for 33: end function </pre>
--	---

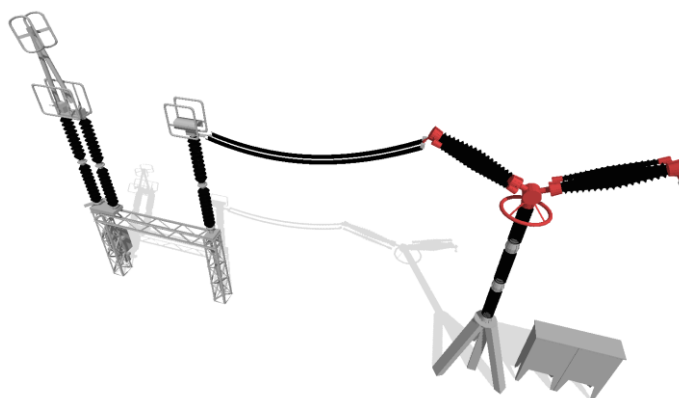
Existe vários tipos de equipamentos que possuem de 1 a 6 conectores. Há casos nos quais um equipamento possui o número de conectores diferentes de outro. Para isso, foi incluído no algoritmo um fator que delimita a quantidade de conexões de cabos

que será realizado. Um exemplo do fator de conexão, é uma dada chave seccionadora que possui 2 conectores ao ser conectada com um disjuntor que possui 4, o fator de conexão considerado é de  $\frac{1}{2}$ . Isso significa que a chave seccionadora possui dois cabos chegando de um conector e ligando em dois conector do disjuntor. A Figura 37 mostra este cenário.



*Figura 37 - Exemplo de conexão de cabos de 2 conectores para 1 conector*

Existe também o cenário em que os dois componentes possuem a mesma quantidade de conectores. A Figura 38 mostra a conexão entre uma chave seccionadora que possui 4 conectores e um disjuntor que possui 4 conectores. O fator de conexão é de  $\frac{2}{2}$ , o que motiva o desenho de dois cabos entre a chave seccionadora e os conectores do disjuntor.



*Figura 38 - Exemplo de conexão de cabos de 2 conectores para 2 conectores*

Em análise dos problemas pertinentes na montagem de um Ambiente Virtual, pode-se perceber que um descuido no momento em que um equipamento é inserido,

posicionado e os respectivos cabos desenhados, pode-se gerar um erro acarretando em um retrabalho que às vezes demanda tempo. Um dos problemas é redesenhar os cabos condutores. Para isso foi desenvolvido um algoritmo para tornar os cabos dinâmicos aos movimentos realizados nos equipamentos.

À medida que os componentes são reposicionados em cena, os cabos condutores se adaptam à nova posição. A Figura 39 mostra como os cabos condutores se adaptam à nova posição tomada em uma Bobina Carrier. O cabo se deforma e muda de curvatura à medida que o elemento é reposicionado.

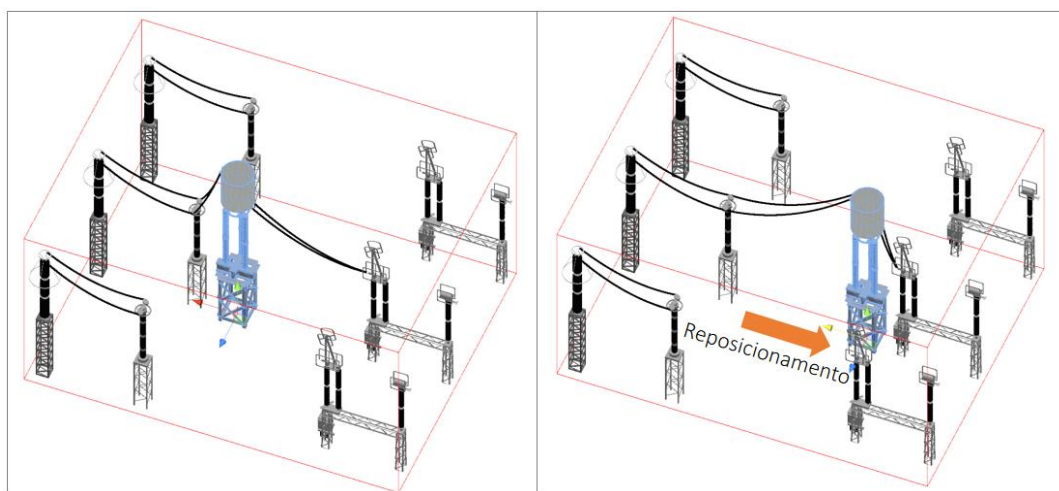


Figura 39 - Dinamismo de cabos condutores a medida que um componente é reposicionado

### 4.3.3 Ferramenta de Criação de Grafos de Cena e Prefab

A criação de um arranjos virtuais e seu armazenamento no formato *Prefab* podem ser feitos de forma manual. Entretanto, qualquer processo manual requer um período de tempo maior para que seja finalizado, igualando-se ao processo de montagem de cena totalmente manual sem o uso de GC. Outro aspecto da criação manual dos arranjos virtuais, é o surgimento de problemas e erros em sua concepção. Na produção de Ambientes Virtuais para Subestações de Energia Elétrica, existe uma grande quantidade de modelos a serem inseridos em cena. O mesmo ocorre para os arranjos virtuais que possuem contido no processo de inserção, a produção dos grafos de cena, o que pode impactar no tempo de produção.



Para simplificar o processo de criação dos grafos de cena, arranjo virtual e arquivo *Prefab*, desenvolveu-se uma ferramenta que automatiza esse processo. Como parte do desenvolvimento, elaborou-se uma interface gráfica com o usuário (Figura 40) para prover condições de rápida criação e edição dos diagramas. A interface é constituída por Menus de acesso rápido no lado direito superior da tela e exibidos com o *click* do botão direito do *mouse* no centro da tela, oferecendo opções de inserção de nós e associação entre eles. Os menus são:

- **Create:** cria um novo diagrama de grafo de cena;
- **Open:** abre um diagrama de grafo de cena;
- **Save:** salva um diagrama aberto em um arquivo existente;
- **Save As:** salva um diagrama em um novo arquivo;
- **Clear:** limpa a tela e exclui todos os nós existentes;
- **Generate:** gera um arranjo virtual em um arquivo do tipo *Prefab* e armazena-o na pasta “*Models*” do projeto.

Ao clicar com o botão direito na área de inserção de nós, um menu é exibido mostrando opções para criação e edição dos nós do grafo, as opções são:

- **Init Node:** adiciona o nó inicial do diagrama (no grafo de cena este é o nó raiz);
- **Add GameObject:** adiciona um nó do tipo *GameObject*, que comporta um objeto tridimensional, podendo ter ou não nós folhas;
- **Comment Node:** Uma opção para comentar e descrever o diagrama.

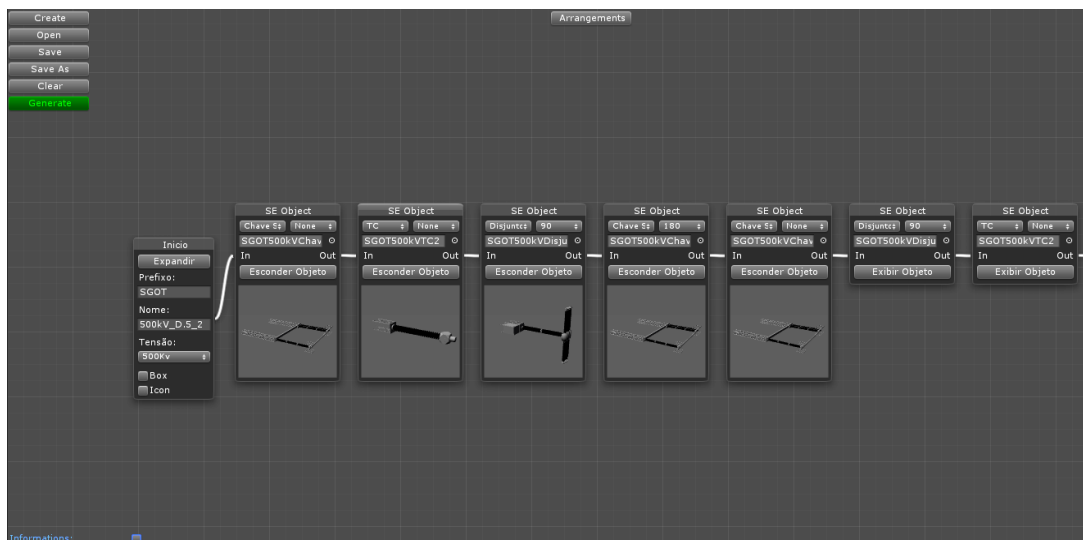


Figura 40 - Ferramenta para automatizar o processo de criação de grafos de cena para arranjos virtuais

Para criar o diagrama do grafo de cena, o usuário deve inserir, primeiramente, um nó do tipo *Init Node* (nó raiz). Ele contém campos onde as informações e características do arranjo virtual podem ser inseridas:

- **Prefixo:** o prefixo é um nome ou sigla que referencia a subestação que ele será inserido;
- **Nome:** nome atribuído ao arranjo, exemplo “BarraSimples”;
- **Tensão:** nível de tensão do arranjo virtual;
- **Box:** ativar ou desativar a caixa em torno no arranjo virtual;
- **Icon:** exibir ou não a informação do nível de tensão a partir de um ícone na parte superior do arranjo virtual.

O nó *Init Node* possui um botão que permite ele ser expandido e retraído, dependendo do tipo de informação que o usuário deseja para aquele momento. A Figura 41 apresenta o nó *Init Node* utilizado em um diagrama de grafo de cena para gerar um arranjo virtual da SE de São Gotardo, o prefixo usado por essa Subestação, a exemplo, poderia ser SGOT.

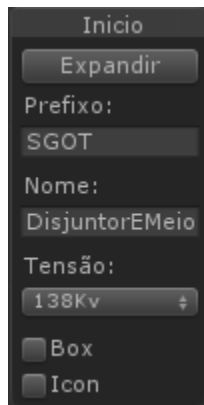


Figura 41 - Nó do tipo *init node* utilizado no grafo de cena de um arranjo virtual de São Gotardo

O segundo passo para a criação do diagrama é a inserção dos nós do tipo *GameObject Node* que correspondem aos o nós para a inserção de modelos virtuais no arranjo e que possuem campos para a configuração do modelo:

- **Campo de tipos de equipamentos:** selecionar o tipo de equipamento, como: chave seccionadora, chave pantográfica, chave semi-pantográfica, disjuntor, para raios, transformador de potencial, transformador de corrente, suportes, torre de pórtico e ponte de pórtico;
- **Campo de rotação de equipamento:** define a rotação do equipamento. Esse campo não é importante para a montagem do arranjo, desde que a modelagem do equipamento esteja dentro das convenções citadas na seção 4.2;
- **Campo de Seleção do modelo virtual:** local para selecionar o modelo que será inserido no arranjo virtual;
- **Entrada e saída do fluxo do diagrama:** conexão do nó com os outros nós indicando o sentido do diagrama;
- **Preview do modelo:** exibe de forma rápida o modelo selecionado, podendo ser habilitando ou não.

A Figura 42 apresenta um exemplo de nó do tipo *GameObject Node*. Pode-se observar que o modelo é do tipo disjuntor, e que foi aplicada uma rotação de 90 graus.



Figura 42 - Nó do tipo *gameobject* utilizado no grafo de cena de um arranjo virtual de São Gotardo

A Figura 43 mostra uma parte de um diagrama de grafo de cena para a criação de um arranjo virtual. Após a criação, é possível salvar este arranjo em um local selecionado, ou criar um *Prefab*. Essas duas formas podem ser exportadas e armazenadas para outros usuários desenvolvedores de Ambientes Virtuais.

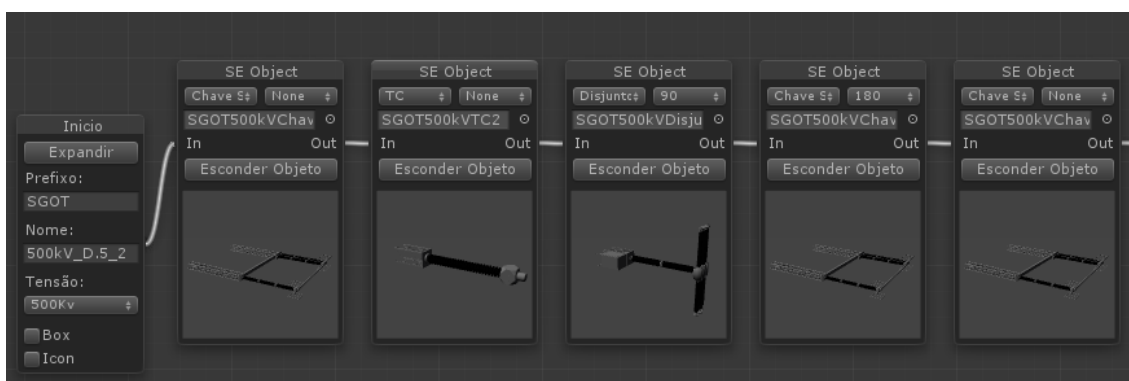


Figura 43 - Diagrama de criação de grafo de cena

Após a formulação do diagrama de GC, pode-se clicar no botão *Generate* e criar o arranjo virtual. A Figura 44 apresenta o arranjo virtual criado a partir do GC mostrado na Figura 43.

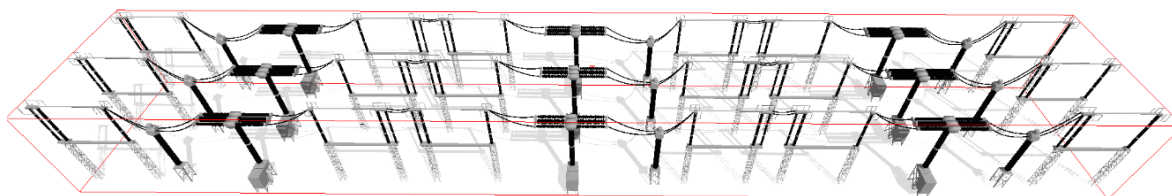


Figura 44 - Arranjo virtual criado a partir da Figura 43

#### 4.3.4 Ferramenta Auxiliar para Posicionamento de Arranjos Elétricos de SE

Um dos problemas detectados no processo de montagem de Ambientes Virtuais, descritos na seção 4.2.2, relaciona-se com erros do posicionamento dos modelos no cenário virtual. Um dos principais erros é o posicionamento impreciso em relação à base que apoia os equipamentos virtuais. Tal erro gera distâncias incorretas e altera a visualização que seria fidedigna ao ambiente real.

Para solucionar este erro, uma ferramenta foi desenvolvida para facilitar o posicionamento manual dos arranjos ou componentes individuais. É uma ferramenta que ajuda o montador de cena a posicionar em uma determinada base um equipamento virtual.

A ferramenta possui uma interface gráfica com o usuário (Figura 45), que possibilita definir a distância em que o modelo detectará a base que está por perto, assim que a base é detectada dentro do raio definido ele é automaticamente posicionado no centro exato da base.

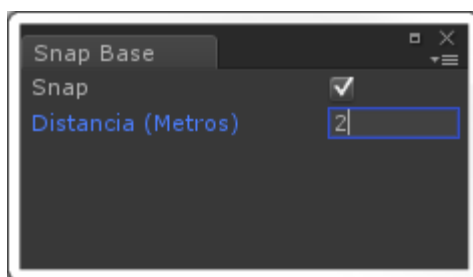
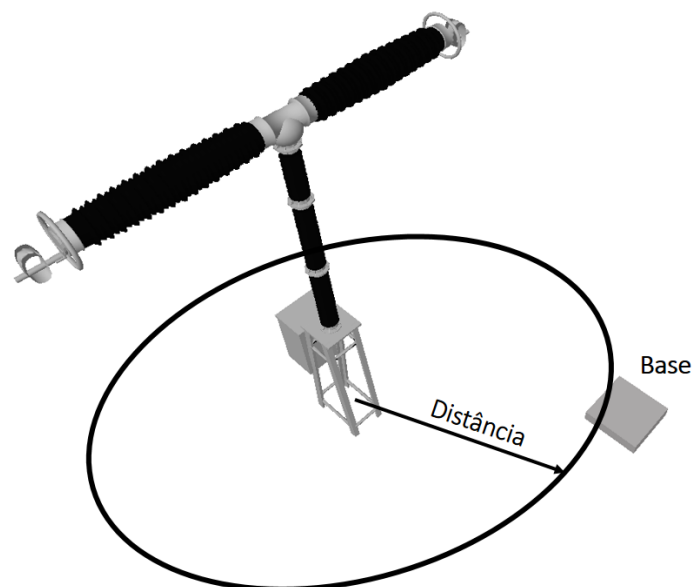


Figura 45 - Interface gráfica com usuário para definir o raio de busca de bases

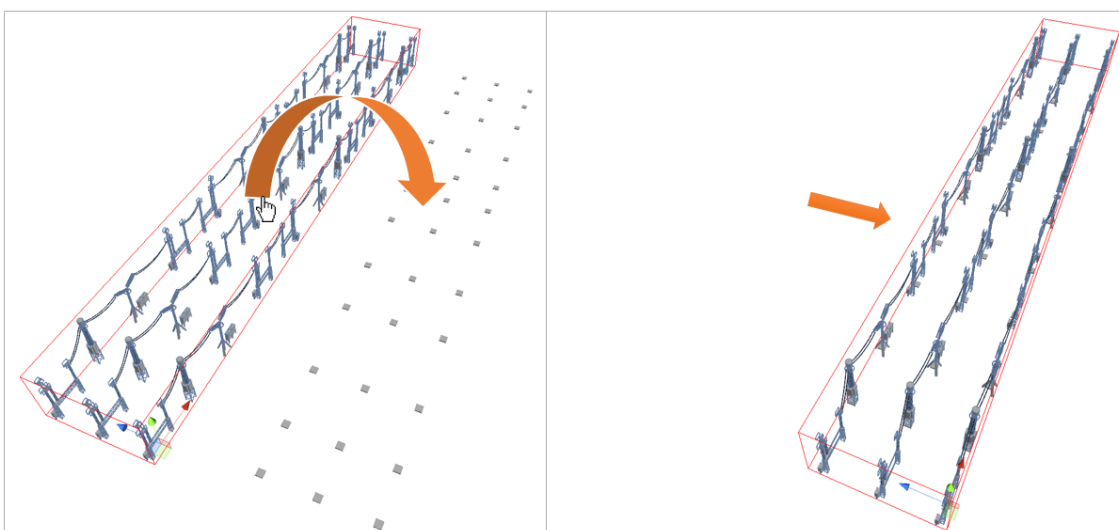
A Figura 46 apresenta como é detectado uma base próxima ao modelo virtual. Após a detecção, o modelo passa a ter a mesma posição da base e a seleção do *mouse* é retirada.



*Figura 46 - Como a base é detectada pelo equipamento virtual*

### 4.3.5 Posicionamento do Arranjo Virtual

O posicionamento do arranjo virtual é a etapa seguinte à sua criação. Para isso, a ferramenta descrita na seção 4.3.4 é utilizada. A Figura 47 apresenta como é realizado o posicionamento de um arranjo do tipo Disjuntor e Meio de 500 mil volts em um conjunto de bases de apoio.



*Figura 47 - Posicionamento de um arranjo do tipo disjuntor e meio em um conjunto de bases de apoio*

A Figura 48 apresenta o posicionamento de um arranjo virtual realizado na subestação de São Gotardo-MG. Trata-se de posicionamento por *Snap Base* em um piso de Subestação de Energia Elétrica.

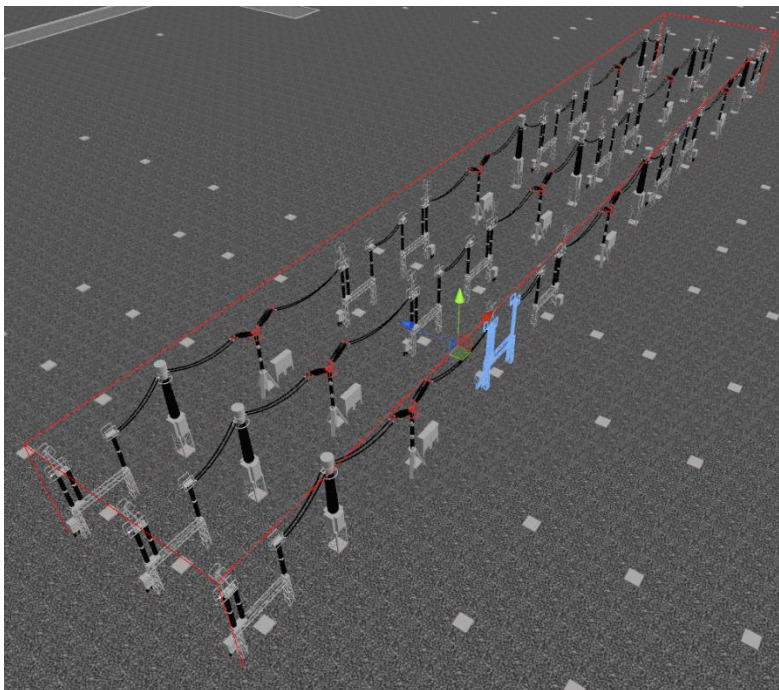


Figura 48 - Posicionamento de arranjo disjuntor e meio em um pátio de subestação de energia elétrica

#### 4.4 Considerações Finais

Este capítulo apresentou os componentes de *software* desenvolvidos que permitem uma fácil criação de arranjos elétricos de subestações aplicados na construção de ambientes tridimensionais, bem como a rápida geração de cabos e criação de *prefabs*. Foi considerada a eliminação de problemas pertinentes na montagem de Ambientes Virtuais, como erros de posicionamento e tempo de montagem. No capítulo a seguir, será apresentada a etapa de projeto e implementação das ferramentas.

# Capítulo 5

## Implementação

### 5.1 Considerações Iniciais

Este capítulo apresenta a implementação das ferramentas para viabilizar a construção de Ambientes de Realidade Virtual para Subestações de Energia Elétrica. Será descrito o desenvolvimento dos diagramas de classes, a implementação das interfaces de usuário e algoritmos utilizados para produzir os arranjos virtuais. As técnicas e algoritmos aqui apresentados foram implementados no ambiente *Unity 3D 4.6*.

### 5.2 Ferramenta de Criação de *Prefab* de Arranjos

O desenvolvimento da ferramenta foi dividido em duas partes: a primeira trata do *design* da interface gráfica e os nós do diagrama; a segunda trata da implementação dos algoritmos e códigos para gerar, a partir de diagramas, os *prefab* de arranjos de Subestações de Energia Elétrica.

#### 5.2.1 *Design* da Interface Gráfica com Usuário

Para aprimorar e reduzir o tempo de criação dos *prefab*, foi desenvolvido uma ferramenta para gerar arranjos de Subestações a partir de uma Interface Gráfica com Usuário. Pode-se criar um diagrama de fluxo representando um arranjo de subestação de Energia Elétrica com blocos gráficos caracterizando os nós do Grafos de Cena. A interface foi desenvolvida considerando as necessidades do montador de Ambientes Virtuais, para que tenha um método rápido na criação e edição dos diagramas. O estilo



em que a GUI foi desenvolvida, considera alguns aspectos de programação *drag-and-drop*, como possibilidades de selecionar um objeto da interface e arrasta-lo pela tela.

Cada bloco possui uma lista de opções. Para exibir o menu, é preciso selecionar o bloco e clicar com o botão direito sobre ele. A Figura 49 (a) mostra as opções disponíveis para uso:

- **Make Transition:** cria uma conexão a partir do bloco selecionado para o bloco seguinte. É representado por uma linha em branco que exhibe graficamente a conexão entre os blocos, a Figura 49 (b) mostra como a transição é feita a partir do nó à esquerda para o nó seguinte, à direita. A Figura 49 (c) apresenta a conexão entre os nós;
- **Duplicate:** duplica um nó mantendo suas propriedades, como: o tipo de equipamento, rotação e o objeto atrelado a ele;
- **Insert Node After:** insere um novo nó em uma determinada posição à frente, automaticamente a conexão é formada entre eles;
- **Delete Node:** exclui o nó selecionado.

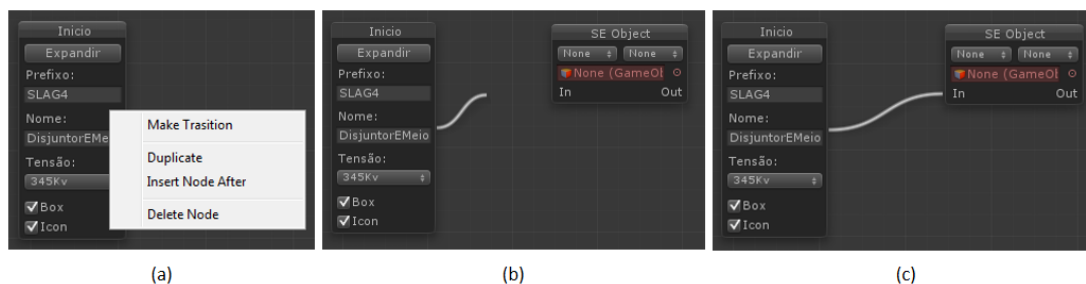


Figura 49 - (a) Menu de opções de um nó, (b) criando uma conexão entre nós, (c) conexão criada entre os nós

Os nós do tipo *GameObject* possuem em seu design opções para selecionar o tipo de equipamento e a opção de rotação, caso o modelo não seguir a convenção de rotação. Estão listados no menu os principais equipamentos que fazem parte de arranjos padronizados descritos no Capítulo 2. A Figura 50 (a) apresenta as opções para selecionar o tipo de equipamento que determinado nó representa. A Figura 50 (b) mostra as opções não cruciais na criação do arranjo para a rotação do equipamento. A Figura 50 (c) apresenta a seleção de um equipamento. Quando o componente de

seleção de objetos é clicado, uma janela mostra as opções de modelos a serem selecionados. A Figura 51 exibe a janela de opções.



Figura 50 - (a) Lista de tipos de equipamentos de um arranjo de SE, (b) lista com opções de rotação, (c) objeto selecionado sendo exibido pelo nó

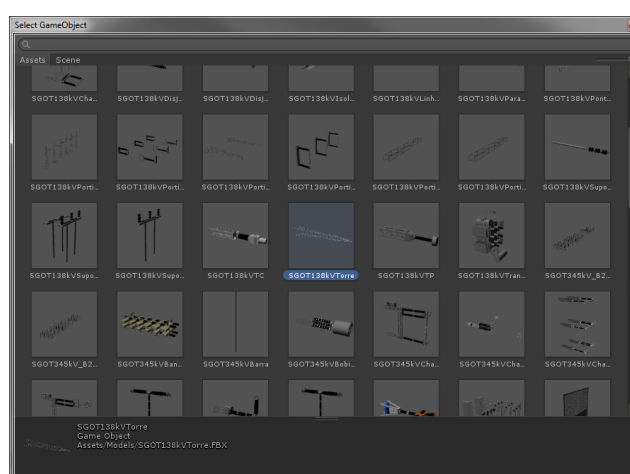


Figura 51 - Janela de modelos de equipamentos para incluir no nó do grafo

Para acesso fácil à ferramenta, implementou-se um conjunto de menus de acesso rápido localizado na barra de tarefas do *Unity 3D*. Basta selecionar o menu da ferramenta, clicar na opção *Node Editor* (editor de nós), e a janela do editor irá se abrir. A Figura 52 mostra as opções que o menu oferece.

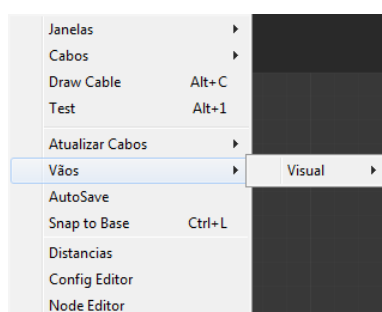


Figura 52 - Menu de seleção rápida da ferramenta

Para que os equipamentos sejam instanciados em uma posição pré-definida, foi desenvolvida uma interface para inclusão de distâncias em determinadas categorias de

tensão. Geralmente as concessionárias de Energia Elétrica padronizam as dimensões entre os equipamentos. Em vista disto, utilizou-se dessas dimensões para instanciar os modelos virtuais, para que possam chegar em uma posição próxima a desejada, necessitando apenas realizar ajustes simples com a ajuda do *Snap Base*.

A interface que engloba essas distâncias possui um menu vertical que exhibe todos os dados já armazenados. Pode-se visualizar tipos de configurações pela imagem em que cada bloco exhibe à medida com que é definido o tipo de equipamento. Pode-se selecionar o tipo de equipamento e o nível de tensão, além de definir os valores de “A” e “B” representados na imagem lateral do bloco em questão. A Figura 53 apresenta a interface e valores já incluídos na biblioteca de distâncias. Os modelos são posicionados automaticamente seguindo as distâncias em relação ao nível de tensão que foram armazenadas na biblioteca. Para definir a tensão do arranjo basta selecionar no nó inicial do diagrama a opção desejada de tensão.

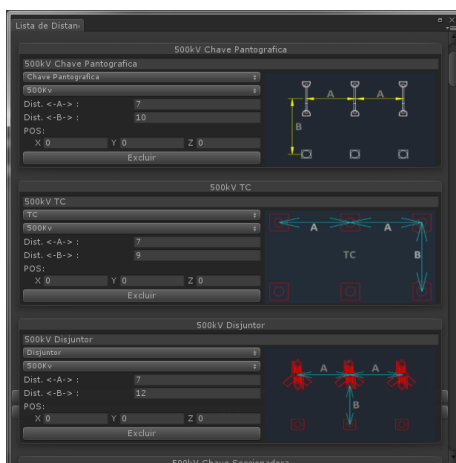


Figura 53 - Interface de definição de distâncias padrões

Os *prefabs* possuem uma tecnologia que possibilita armazenar em si um conjunto enorme de componentes de jogos. Em vista disso, é possível criar componentes que retêm *scripts* de configurações. Para facilitar a configuração de elementos envolvidos no arranjo, foram desenvolvidos dois *scripts* com GUI para configurar os parâmetros dos cabos inclusos no arranjo, inclusive no próprio arranjo. A Figura 54 (a) exhibe o *script* de interface responsável por gerenciar o arranjo. No menu é possível definir a nomenclatura do arranjo no momento em que ele for para a fase final

de desenvolvimento, definir o nível de tensão e optar por visualizar a caixa que envolve os arranjos, além do ícone do nível de tensão.

A Figura 54 (b) apresenta o menu de configuração de um cabo condutor. É possível definir sua curvatura, largura e com o uso de botões de acesso rápido, determinar se o cabo será reto ou curvo.

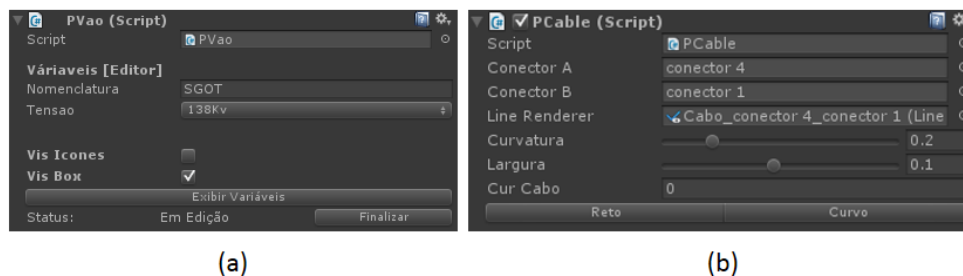


Figura 54 - Menus dos scripts de edição, (a) menu de configuração de arranjos, (b) menu de configuração de cabos condutores

## 5.2.2 Arquitetura do Sistema de Criação de Arranjos de SE

A conversão dos diagramas de Grafos de Cena, instanciação dos arranjos e toda a funcionalidade ofertada pelo ambiente de RV ficam a cargo da *engine Unity 3D*. Os *scripts* da ferramenta foram desenvolvidos utilizando a linguagem de programação C#. Optou-se por essa codificação devido à maior quantidade de ferramentas disponíveis para esta linguagem dentro da IDE.

O sistema foi dividido em dois pacotes: o primeiro é o pacote contem as classes que representam os nós do Grafo de Cena; o segundo pacote realiza a geração da interface gráfica, armazena e carrega os arquivos de Grafos de Cena e cria os modelos de arranjos de SE.

A arquitetura do pacote de nós de Grafos de Cena é descrita na Tabela 1. Este pacote possui uma classe *Base (BaseNode)* contendo todos os métodos e atributos que serão utilizados pelas classes que irão herdar suas características. As classes formam um conjunto de componentes responsáveis pela criação visual dos blocos de interface para

criar os diagramas e as regras de negócio que fazem os blocos se conectarem. A classe é utilizada pela classe “NodeEditor” que possui os requisitos de interface gráfica. A arquitetura do pacote é apresentada na Figura 55.

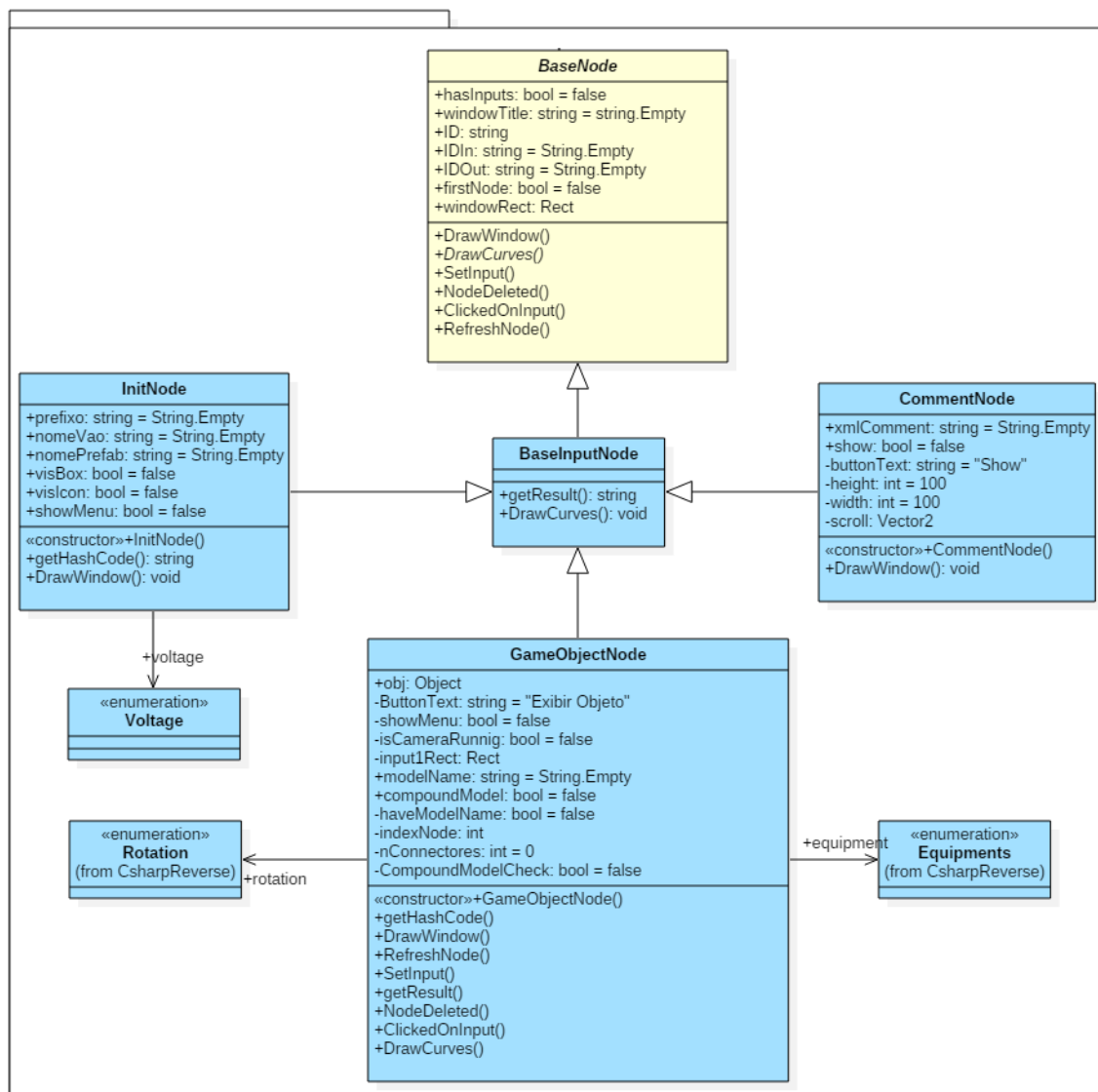


Figura 55 - Diagrama de classe da arquitetura dos blocos de nós dos grafos de cena

Tabela 3 - Descrição das classes do pacote de nós da ferramenta

Classe	Descrição
BaseNode	Classe <i>Super (base)</i> de todas as outras classes de nós, possui os atributos e métodos necessários em todas as classes de nós;
BaseInputNode	Classe responsável pelas conexões entre nós;
InitNode	Classe responsável pela criação visual do bloco “Init Node”, possui as configurações necessárias para criar o arranjo;
GameObjectNode	Classe responsável pela criação visual do bloco “SE Object”, possui configurações para definir o tipo de equipamento e objeto tridimensional atrelado a ele;
CommentNode	Classe responsável pela criação visual do bloco “Comentário”.
Enumeration: Voltage	Classe do tipo Enumeration, contém uma enumeração das tensões existentes nas SEs: 13.8kV, 69kV, 138kV, 230kV, 345kV, 500kV
Enumeration: Equipaments	Classe do tipo Enumeration, contém uma enumeração dos tipos de equipamentos mais utilizados em arranjos de SEs: Chave Seccionadora, Chave Pantográfica, Chave Semi-Pantográfica, Disjuntor, Para Raios, TP, TC, Suportes, Torre Pórtico, Ponte Pórtico;
Enumeration: Rotation	Classe do tipo Enumeration, contém uma enumeração dos tipos de rotações disponíveis: 90 graus, -90 graus e 180 graus.

A arquitetura do pacote de criação da interface gráfica, armazenamento, carregamento de grafos de cena salvos e gerador de modelos virtuais, é apresentada na Figura 56. A classe “*NodeEditor*” define a interface para gerar todos os componentes visuais apresentados em sua janela, bem como as opções de criar, abrir, salvar um diagrama. As classes “*XMLConfigEditor*” e “*Configurations*” definem a interface para configuração da classe “*NodeEditor*”, armazenam as configurações informadas pelo usuário, como local de armazenamento dos Modelos, *Scripts* e Texturas.

A classe “*NodeCompiler*” é responsável pela conversão dos diagramas criado em um ambiente bidimensional (Interface Gráfica) em arquivos do tipo *Prefab* contendo todos os modelos virtuais em suas posições pré-definidas. Para gerar os cabos automaticamente, é utilizada a classe “*DrawCable*” que contém o algoritmo que realiza uma busca de conectores em dois componentes, calcula as menores distancias entre eles e geram os cabos. A geração dos cabos é realizado em todas as fases do arranjo. A classe “*Parábola*” contém os cálculos para gerar a curvatura do cabo condutor em relação às distâncias dos conectores.

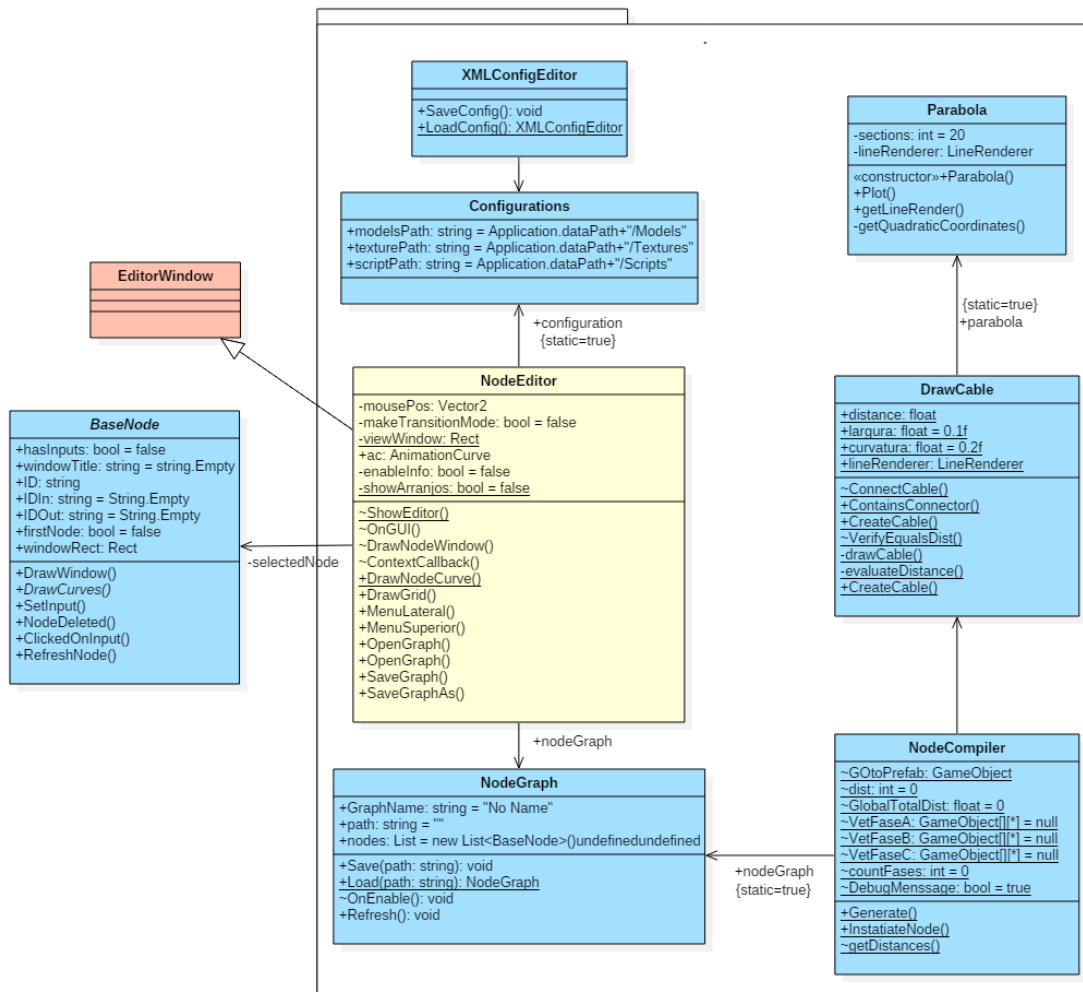


Figura 56 - Diagrama de classe da arquitetura da interface gráfica (NodeEditor) e mecanismo de criação dos arranjos de SE

Por fim, a classe “NodeGraph” é a responsável pelas as funções que criam, abrem e salvam os diagramas em formato XML em uma pasta definida pelo usuário. A classe possui uma lista contendo todos os nós do diagrama e suas relações. A Tabela 4 descreve de forma sucinta as classes do pacote.



Tabela 4 - Descrição das classes do pacote da interface gráfica e mecanismo de criação de arranjos de SE

Classe	Descrição
NodeEditor	Classe responsável pela criação da interface gráfica com usuário, gera todos os componentes gráficos, como: blocos de nós, linhas de conexão, botões e caixas de informações. Gerencia a criação dos arranjos;
NodeGraph	Classe responsável por armazenar em formato XML em um local definido pelo usuário, os diagramas criados;
NodeCompiler	Classe responsável por interpretar o diagrama criado na interface gráfica e transmuta-lo para modelos tridimensional no formato <i>prefab</i> , levando em consideração a configuração realizado no nó raiz, como a nomenclatura e nível de tensão;
DrawCable	Classe responsável por desenhar os cabos condutores automaticamente entre os equipamentos de SE;
Parabola	Classe contendo os cálculos de curvatura e largura dos cabos condutores;
Configurations	Classe responsável por realizar configurações do NodeEditor, como o local de armazenamento dos modelos virtuais, <i>scripts</i> e texturas;
XMLConfigEditor	Classe responsável por armazenar em formato XML as configurações do NodeEditor.

### **5.3 Considerações Finais**

Este capítulo apresentou a implementação das ferramentas para viabilizar a construção de Ambientes de Realidade Virtual para Subestações de Energia Elétrica. O próximo capítulo descreve os resultados obtidos com a aplicação destes procedimentos para algumas subestações reais.

# Capítulo 6

## Análise da Estratégia

### 6.1 Considerações Iniciais

Neste capítulo apresenta-se os critérios de análise da estratégia, que tem como intuito relatar os resultados obtidos com o uso da ferramenta de geração de modelos de arranjos elétricos na construção de Subestações de Energia Elétricas, ao considerar aspectos relacionados à qualidade, à fidelidade do AV com o real e ao seu tempo de construção.

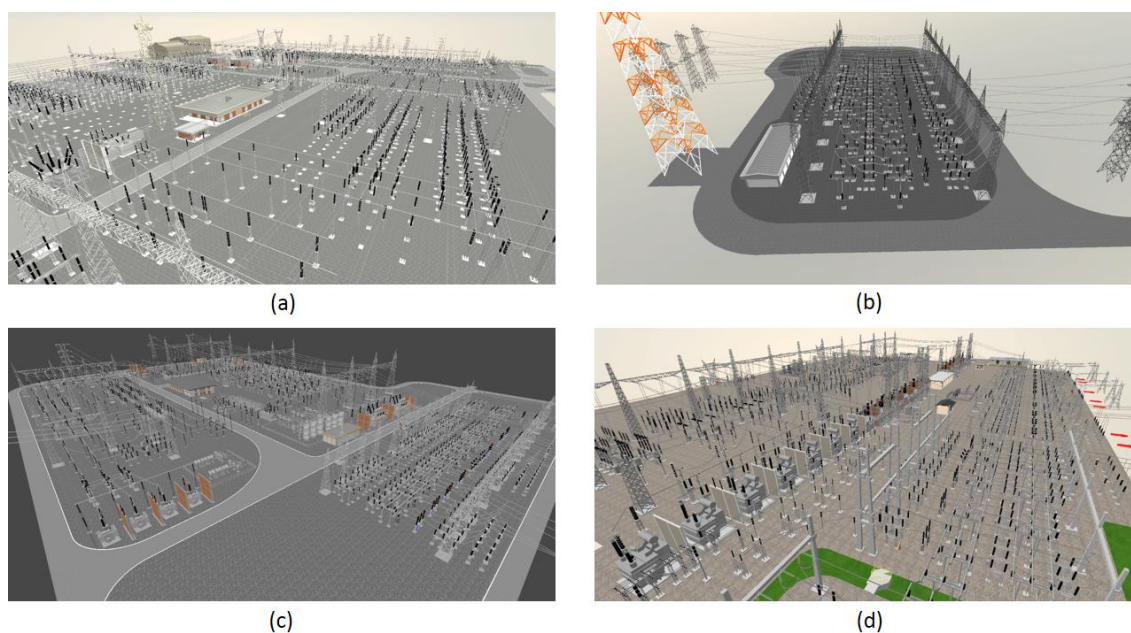
### 6.2 Estudo de Caso Aplicado ao Projeto RVCemig

O RVCemig é um projeto de Pesquisa & Desenvolvimento entre a Companhia Energética de Minas Gerais (Cemig) e a Universidade Federal de Uberlândia (UFU) com o intuito de aproximar as duas entidades para trocas de conhecimento, pesquisa e produção científica, por meio do desenvolvimento do Sistema de Realidade Virtual para Subestações de Energia Elétrica.

O objetivo específico do projeto é desenvolver um Ambiente de Realidade Virtual que contemple todas subestações (SEs) de geração e de transmissão de energia elétrica, operadas, total ou majoritariamente pela Cemig no estado de Minas Gerais. A previsão é o desenvolvimento de 53 Subestações.

O Sistema de Realidade Virtual de Subestações de Energia Elétrica é um Ambiente Virtual para simulação de subestações. Trata-se de um *software* com informações visuais tridimensionais que representa virtualmente de forma fidedigna o ambiente real com interações correlatas ao processo de operação e controle da operação. A Figura 57 apresenta quatro ambientes de RV construídos para o sistema

RVCemig. No arranjo real, cada elemento que compõe a subestação (ativo ou estrutural) possui informações importantes para o operador do sistema. Sendo assim, é necessário que o SVR contemple a organização da mesma e acesse o sistema SCADA (System Control and Data Acquisition) em tempo real. Assim, foi desenvolvida uma arquitetura específica para acesso aos dados.



*Figura 57 - Ambientes virtuais de subestações de energia elétrica desenvolvidos para o projeto RVCemig: (a) SE Ribeirão das Neves, (b) SE da usina hidrelétrica Capim Branco II, (c) SE de Ouro Preto, (d) SE de Barreiro*

Devido à reconstrução virtual ser fiel ao ambiente real, há a possibilidade de utilizar-se do 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 a sua integridade física e o sistema elétrico.

Por meio de uma arquitetura interna elaborada para a *game 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*. Disposto dessas informações o ambiente virtual é atualizado para representar fielmente o estado dos dispositivos (SILVA, 2014).

Com essa arquitetura, é possível fornecer uma abordagem para controlar e operar dispositivos da subestação de energia por meio do uso das técnicas de 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 (SILVA, 2014).

A Figura 58 apresenta o sistema durante a operação de consulta do estado de um dos componentes da subestação.

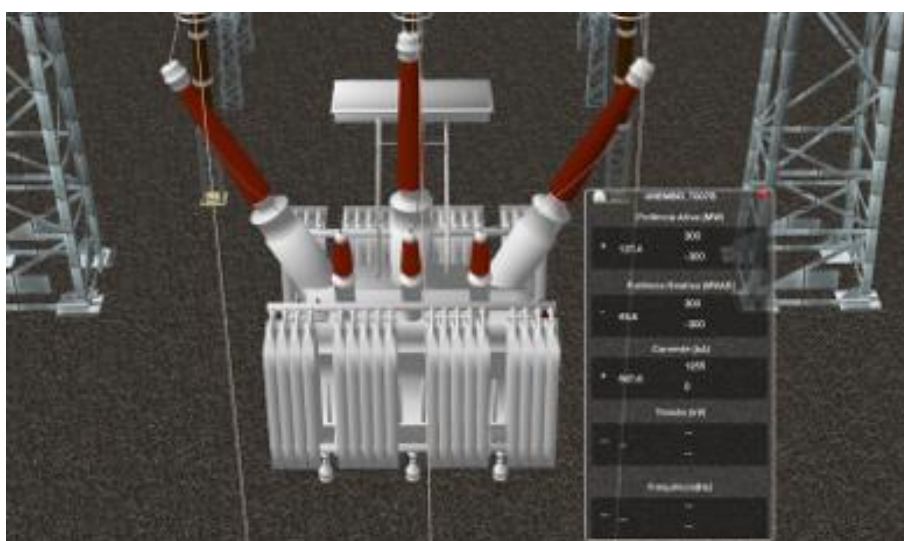


Figura 58 - Consulta das informações de estado de um transformador via Webservice (SILVA, 2014).

### 6.2.1 Arquitetura de Atualização do SRV

O sistema proposto deve representar uma subestação real apresentando informações corretas dos equipamentos. Neste sentido, torna-se viável a elaboração de uma arquitetura interna que se adeque à *engine de jogos*. 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 (SILVA, 2014).

A Figura 59 apresenta o fluxo bidirecional de aquisição e envio de dados. Por meio de um 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 (SILVA, 2014).

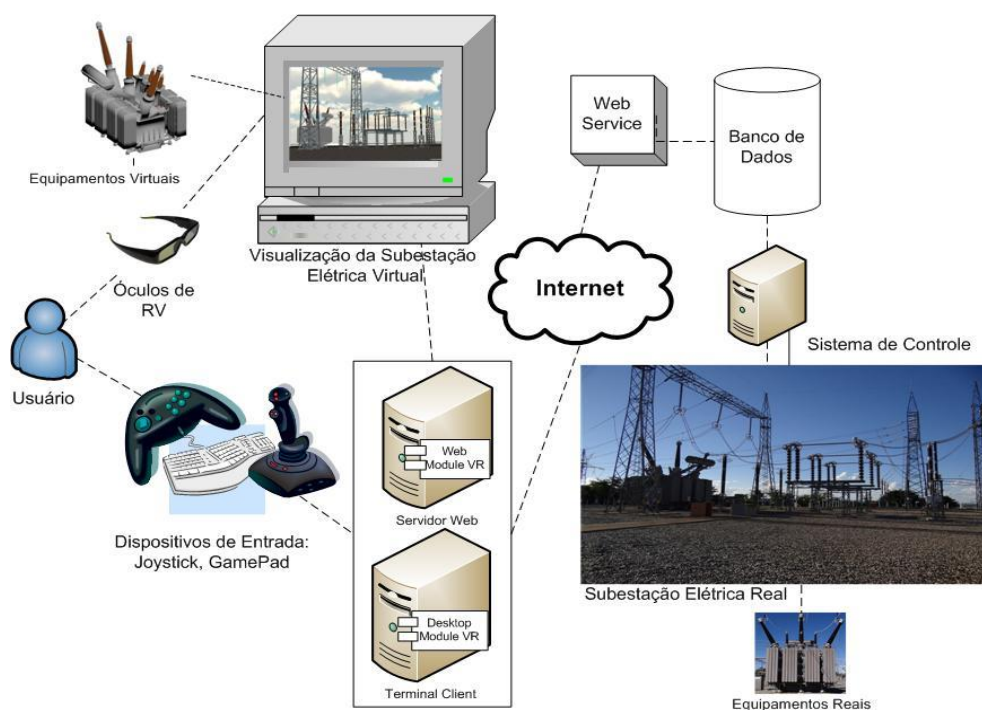


Figura 59 - Diagrama de componentes (SILVA, 2014).

### 6.2.2 Aplicação da Ferramenta na Construção de Ambientes Virtuais de Subestações de Energia Elétrica

Para obter resultados da metodologia proposta neste trabalho, foram aplicados testes na geração de subestações virtuais (SEs), por meio da ferramenta proposta para a criação de arranjos de SEs baseados em Grafos de Cena. Os testes de construção foram realizados em duas SEs da Cemig: a subestação de São Gotardo e a de Sete Lagoas.

A Tabela 5 apresenta informações construtivas sobre as subestações utilizadas no procedimento de testes.

*Tabela 5 - Características construtivas das SEs de Sete Lagoas e São Gotardo*

<b>Subestação</b>	<b>Níveis de Tensão (kV)</b>	<b>Quantidade de Ativos<sup>5</sup></b>	<b>Outros Equipamentos<sup>6</sup></b>
Sete Lagoas	230	87	102
São Gotardo	138, 345, 500	511	679

A construção das SEs foram separadas em duas modalidades, a construção manual e a semiautomática:

- **Processo manual de construção:** é a criação de ambientes virtuais sem a utilização de recursos que facilitam a montagem. Todos os equipamentos e cabos condutores são posicionados de forma manual.
- **Processo semiautomático de construção:** é a criação de ambientes virtuais com a utilização de recursos que facilitam e realizam parte da montagem, como: *scripts*, ferramentas de posicionamento de equipamento, ferramenta de criação de arranjos e criação automática de cabos condutores. A maior parte dos equipamentos é posicionada de forma semiautomática.

Levando em consideração as duas modalidades de construção de cena, foram selecionados dois especialistas em construção de ambientes virtuais de subestações de energia elétrica. Um especialista dedicou-se na montagem do processo manual e o outro dedicou-se na montagem do processo semiautomático. A primeira subestação a ser construída foi Sete Lagoas. Optou-se por esta subestação pelo fato de ser uma subestação de pequeno porte e por conter apenas um nível de tensão de energia

<sup>5</sup> Equipamentos gerenciáveis: são equipamentos monitorados e controlados pelo sistema da Cemig. São: chaves seccionadoras, disjuntores, chaves pantográficas, chaves semi-pantográficas, transformadores de corrente, transformadores de potencial, trafos, transformadores, indutores, entre outros.

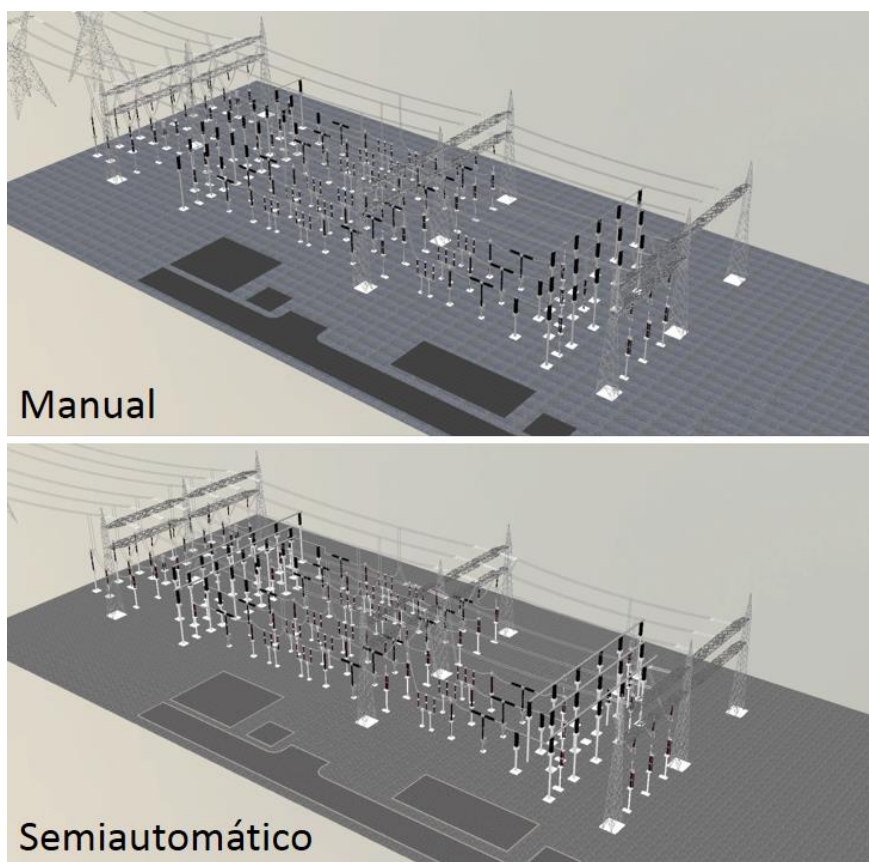
<sup>6</sup> Equipamentos Estruturais: são equipamentos que fazem parte da estrutura da SE, como: pontes, torres, pórticos, suportes, bases, isoladores de cabos condutores, entre outros.

elétrica, tendo em vista a comparação dos resultados de uma SE pequena em relação a uma SE grande.

### I. Construção da Subestação Sete Lagoas

Visando avaliar a otimização provida pelo uso da ferramenta, a subestação de Sete Lagoas foi construída por dois meios distintos: processo manual e semiautomático, por dois montadores de cenas virtuais.

A Figura 60 apresenta a subestação após sua conclusão, na forma manual e semiautomática. A observação do resultado final, a princípio, identifica ambientes virtuais muito semelhantes. Entretanto, há muitas diferenças com o refinamento da observação, principalmente no que tange ao posicionamento dos componentes, a curvatura dos cabos condutores e a inserção correta de modelos, advindos da biblioteca de modelos, dos equipamentos virtuais. Os resultados e críticas do processo da construção da SE de Sete Lagoas são apresentados na próxima seção.



*Figura 60 - Construção da subestação de energia elétrica Sete Lagoas: processo manual e semiautomático*

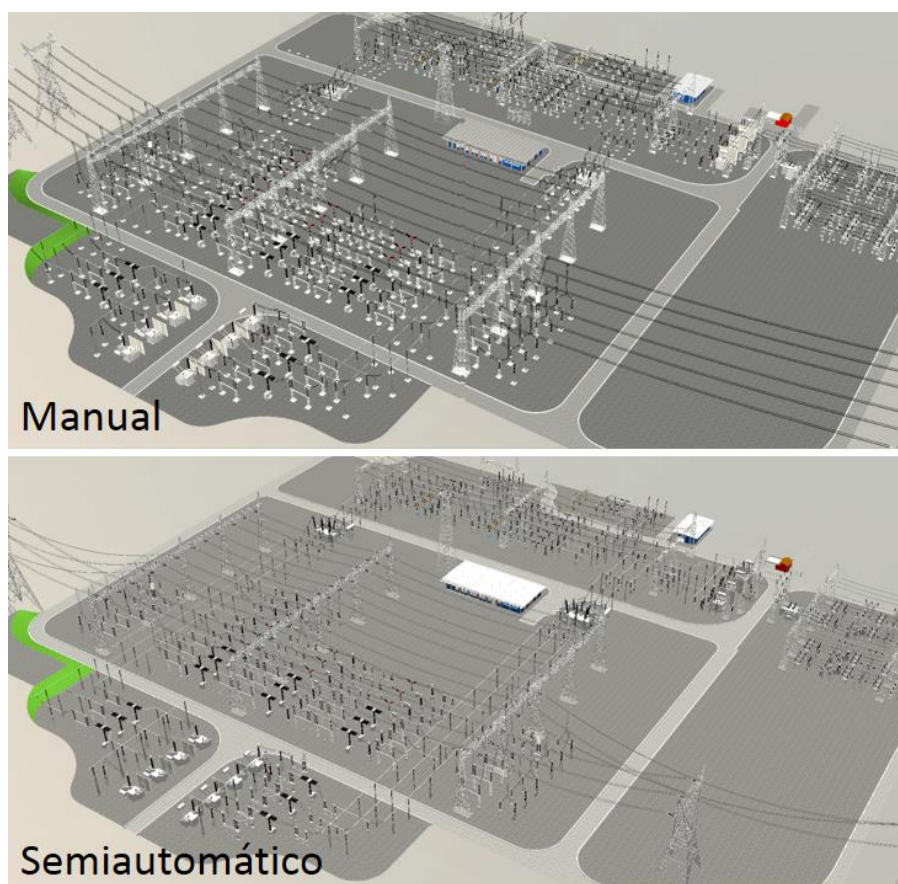


## II. Construção da Subestação de São Gotardo

A subestação de São Gotardo foi construída pelo processo manual e semiautomático por dois montadores de cenas virtuais. A Figura 61 apresenta telas correlatas aos modelos da mesma subestação, após a construção pelas duas estratégias.

Ao observar a imagem, pode-se notar que o processo manual apresenta uma certa diferença em relação a SE construída com a ferramenta de criação de arranjos de campo, isso se deve a textura aplicada nos cabos condutores e bases de cimento que apoiam os equipamentos virtuais.

Além disso as duas possuem muitas diferenças de detalhamento, com refino da observação.



*Figura 61 - Construção da subestação de energia elétrica São Gotardo: processo manual e semiautomático*

## 6.3 Análise da Construção de Ambientes Virtuais de Subestações de Energia Elétrica

Nessa seção, será apresentado a análise e resultados inerentes ao processo de construção de Ambientes Virtuais de SEs. Serão destacados os resultados obtidos relacionados aos principais problemas de construção de AV de Subestações, descritos na seção 4.2.2.

### 6.3.1 Critérios de Análise

Ao comparar Ambientes Virtuais com ambientes reais, ainda que muita tecnologia tenha sido desenvolvida, é difícil obter comparações precisas entre os mesmos. Segundo Zhao (2011), não existe métricas satisfatórias para medir o quanto um modelo virtual é suficientemente convincente aos usuários. O autor destaca que os métodos existentes, para estimar a similaridade entre modelos virtuais com modelos reais, não são satisfatórios, pois há dificuldade de se estabelecer uma definição universalmente aceita da relação binária e similaridade.

Em vista disto, os critérios de avaliação aqui aplicados, visam obter resultados das melhorias entre os problemas encontrados na montagem de ambientes virtuais, descritos na seção 4.2.2, e da aplicação da metodologia proposta por este trabalho.

As análises que foram realizadas são: comparações entre modelos virtuais e modelos reais; se os modelos inseridos em determinadas posições são similares aos modelos reais; se o posicionamento está correto; qual a fidelidade do modelo virtual com o modelo real (arranjos e cabos); e tempo de construção dos AVs, resumidos nos seguintes tópicos:

**1. Equivalência de Equipamentos Virtuais:** critério que analisa o equipamento virtual inserido em uma posição. Leva em consideração os seguintes critérios de análise:

1.1. Equipamento virtual correto inserido em uma posição;

- 1.2. Similaridade do equipamento virtual com o equipamento real.
- 2. Precisão do Posicionamento dos Equipamentos Virtuais:** critério que analisa a precisão do posicionamento do equipamento virtual. Leva em consideração os seguintes critérios de análise:
  - 2.1. Posicionamento centralizado na base de apoio;
  - 2.2. Posicionamento do arranjo em sua área correta.
- 3. Fidelidade com o Ambiente Real:** critério que analisa o se ambiente virtual satisfaz aos usuários e a equivalência geral com o ambiente real. Leva em consideração os seguintes critérios de análise:
  - 3.1. Conjunto de arranjos representam de forma satisfatória o ambiente real de uma subestação;
  - 3.2. Curvas e espessuras de cabos condutores condiz com o ambiente real.
- 4. Tempo de Construção:** critério que analisa o tempo total em que os especialistas construíram os ambientes virtuais, levando em consideração os seguintes critérios:
  - 4.1. Tempo de construção de ambientes virtuais em modo manual;
  - 4.2. Tempo de construção de ambientes virtuais em modo semiautomático.

### **6.3.2 Análise da Construção da SE de Sete Lagoas**

#### **I. Equivalência de Equipamentos Virtuais**

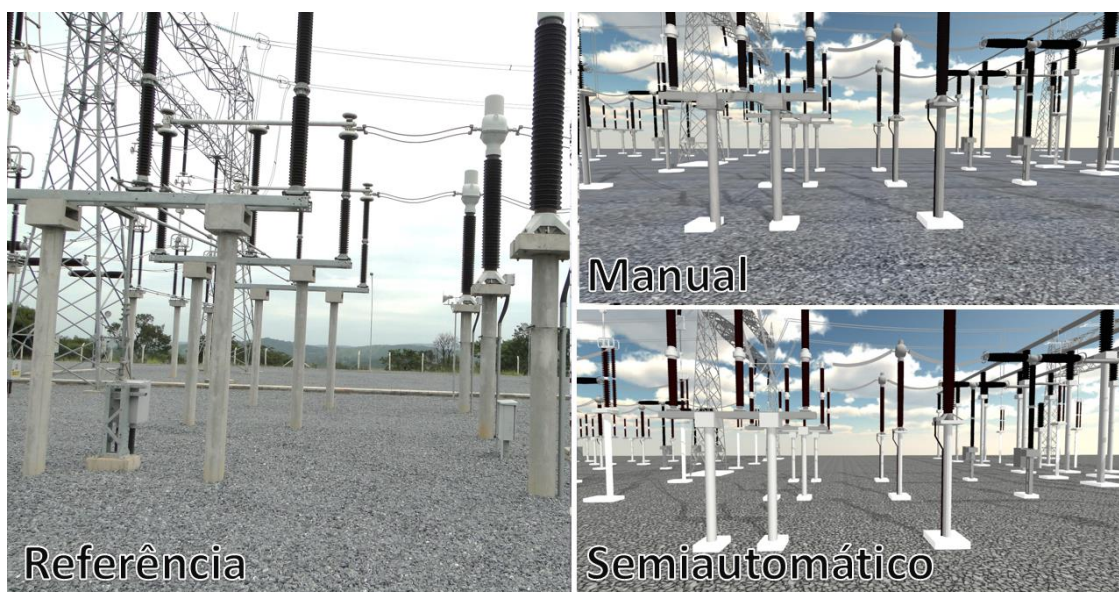
A Figura 62 apresenta a análise da equivalência de equipamentos virtuais com equipamentos reais. Uma fotografia foi selecionada aleatoriamente e foram comparados os modelos dos Ambientes Virtuais criados de forma manual e semiautomática. Em nenhum dos ambientes virtuais houve a inserção equivocada de modelos virtuais. Por se tratar de uma subestação de pequeno porte, os erros equivalentes podem ser bem reduzidos ou não existir.



*Figura 62 - ambientes virtuais da SE Sete Lagoas construídas de forma manual e semiautomática comparando a equivalência com os modelos reais*

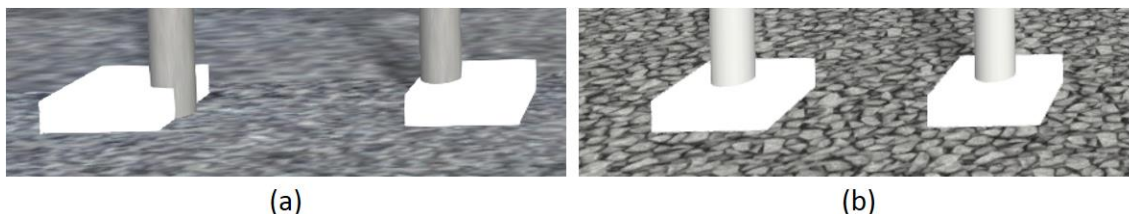
## II. Precisão do Posicionamento dos Equipamentos Virtuais

A Figura 63 apresenta os resultados do posicionamento de equipamentos nos Ambientes Virtuais em uma rápida visualização no ambiente final. Nota-se que há vários erros no posicionamento de equipamentos virtuais.



*Figura 63 - Ambientes virtuais da SE Sete Lagoas construídos de forma manual e semiautomática comparando o posicionamento dos equipamentos virtuais com os equipamentos reais*

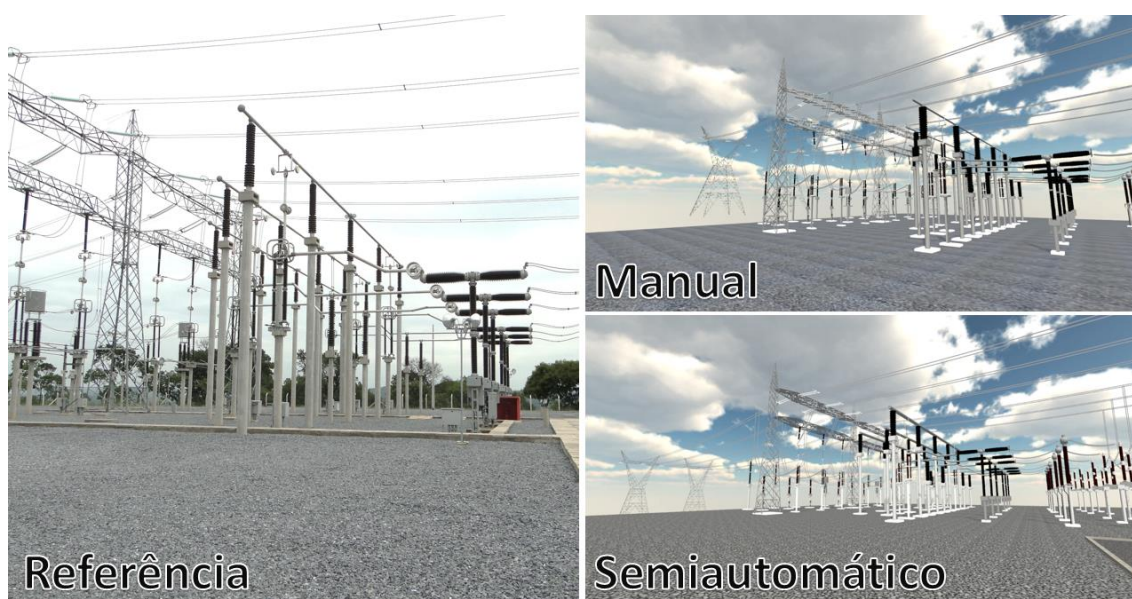
A Figura 64 (a) mostra o erro no posicionamento de uma chave seccionadora à sua base de apoio no AV construído manualmente. A Figura 64 (b) apresenta o posicionamento correto no AV construído com a ferramenta de criação de arranjos.



*Figura 64 - Posição de equipamento virtual à base de apoio, (a) erro no posicionamento, (b) posicionamento correto*

### III. Fidelidade com o Ambiente Real

A Figura 65 apresenta a comparação visual entre os ambientes construídos de forma manual e semiautomático em relação ao ambiente real. Tanto o AV desenvolvido manualmente quanto o desenvolvido automaticamente possuem um grande nível satisfatório de fidelidade com o ambiente real. Como estas análises são subjetivas, os resultados finais podem ter valores diferentes ao alternar-se a equipe de montadores de AVs.

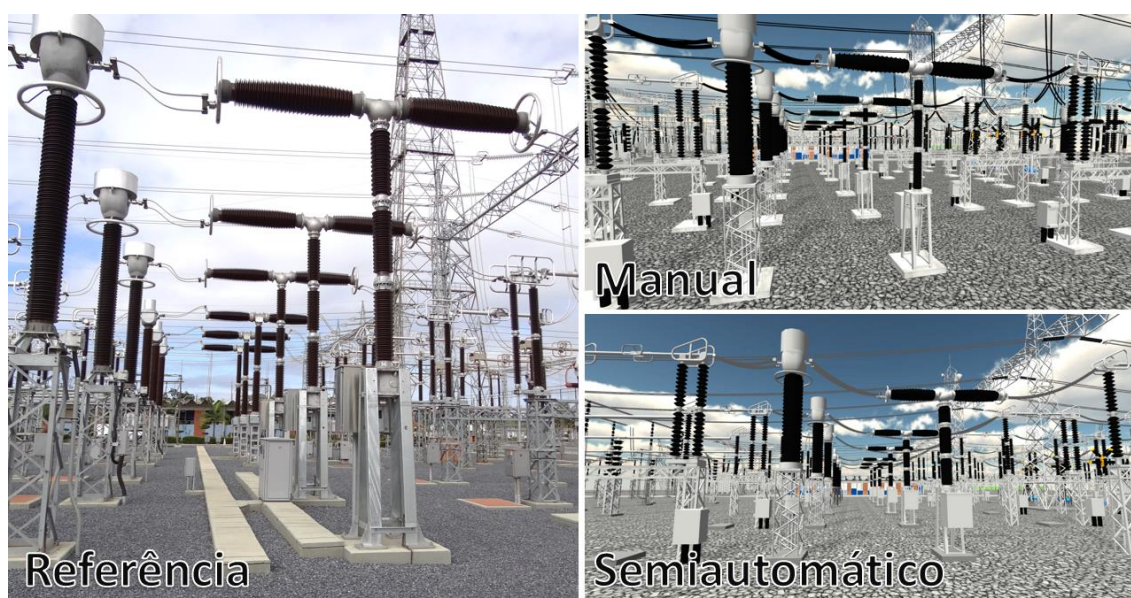


*Figura 65 - Ambientes virtuais da SE Sete Lagoas construídas de forma manual e semiautomática comparando a fidelidade com o ambiente real*

### 6.3.3 Análise da Construção da SE de São Gotardo

#### I. Equivalência de Equipamentos Virtuais

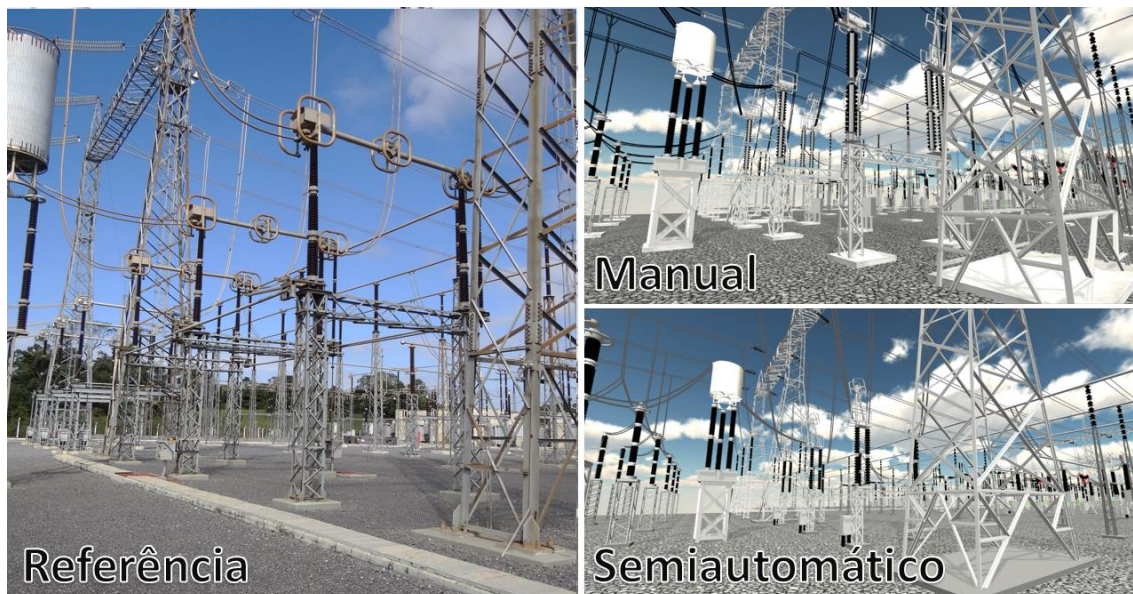
A Figura 66 apresenta a análise da equivalência de equipamentos virtuais com equipamentos reais. Para tal, uma fotografia foi selecionada aleatoriamente e a mesma foi comparada com os modelos presentes nos Ambientes Virtuais criados de formas manual e semiautomática. Em alguns modelos houve rotação equivocada. Por se tratar de uma subestação de grande porte, os erros equivalentes podem ser comumente encontrados.



*Figura 66 - Ambientes virtuais da SE São Gotardo construídas de forma manual e semiautomática comparando a equivalência com os modelos reais*

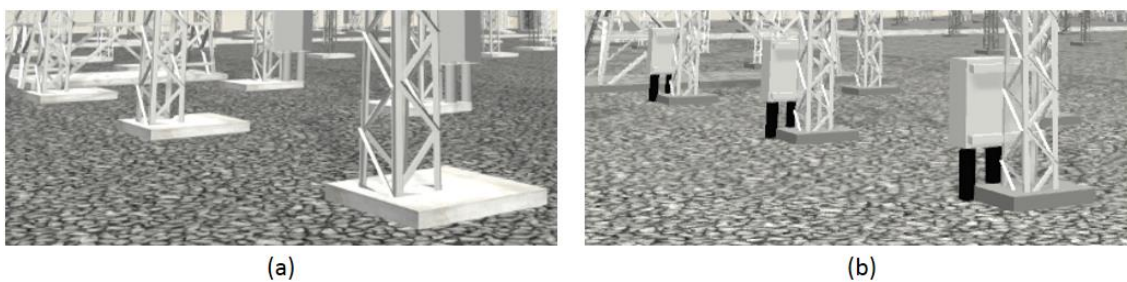
#### II. Precisão do Posicionamento dos Equipamentos Virtuais

A Figura 67 apresenta os resultados do posicionamento de equipamentos nos Ambientes Virtuais. Em uma rápida visualização no ambiente final, nota-se que há um erro no posicionamento de uma chave seccionadora em suas bases de apoio.



*Figura 67 - Ambientes virtuais da SE São Gotardo construídos de forma manual e semiautomática comparando o posicionamento dos equipamentos virtuais com os equipamentos reais*

A Figura 68 (a) mostra o erro no posicionamento de uma chave seccionadora à sua base de apoio no AV construído manualmente, a Figura 68 (b) apresenta o posicionamento correto no AV construído com a ferramenta de criação de arranjos.

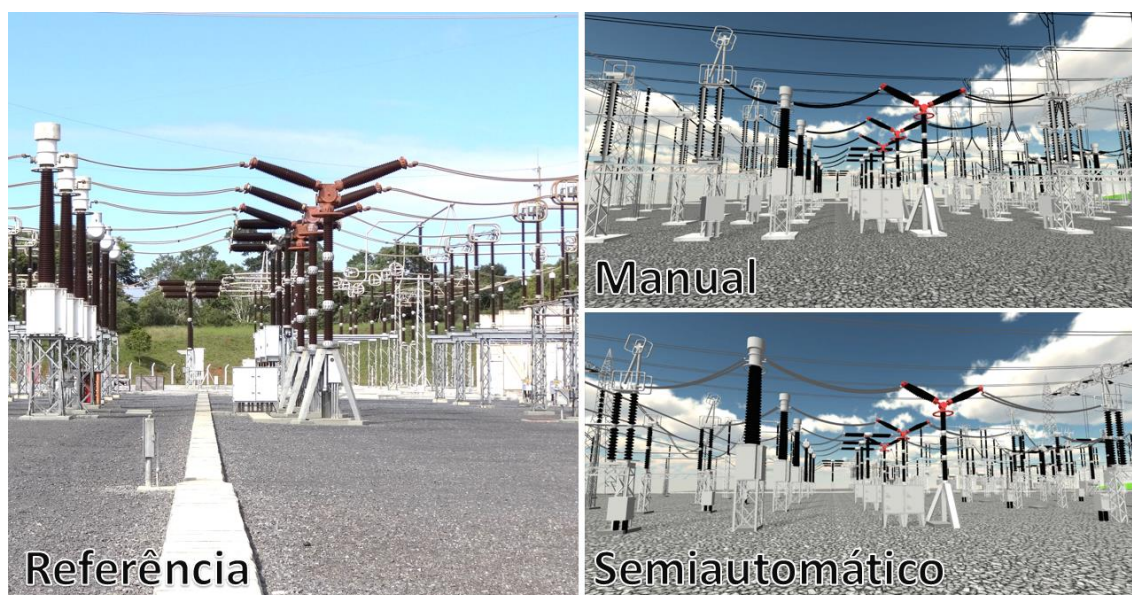


*Figura 68 - Posição de equipamento virtual à base de apoio, (a) erro no posicionamento, (b) posicionamento correto*

### III. Fidelidade com o Ambiente Real

A Figura 69 apresenta a comparação visual entre os ambientes construídos de formas manual e semiautomática em relação ao ambiente real. Tanto o AV desenvolvido manualmente quando o automaticamente possuem um grande nível satisfatório de

fidelidade com o ambiente real. Como estas análises são subjetivas, os resultados finais podem ter valores diferentes ao alternar-se a equipe de montadores de AVs



*Figura 69 - Ambientes virtuais da SE São Gotardo construídas de forma manual e semiautomática comparando a fidelidade com o ambiente real*

### 6.3.4 Tempo Total de Construção dos Ambientes Virtuais

O tempo de construção engloba todas as ações feitas pelos montadores de Ambientes Virtuais, tais como: interpretação do ambiente real, localização dos equipamentos virtuais na pasta do projeto, inserção em cena, posicionamento e ajustes, desenho dos cabos condutores e nomeação dos elementos.

Para contabilizar o tempo de trabalho de cada especialista em construção de AVs, utilizou-se o *software Toggl*<sup>7</sup> que estima início e fim do desenvolvimento, com métricas das tarefas executadas e deságio do tempo ocioso.

<sup>7</sup> <https://www.toggl.com>



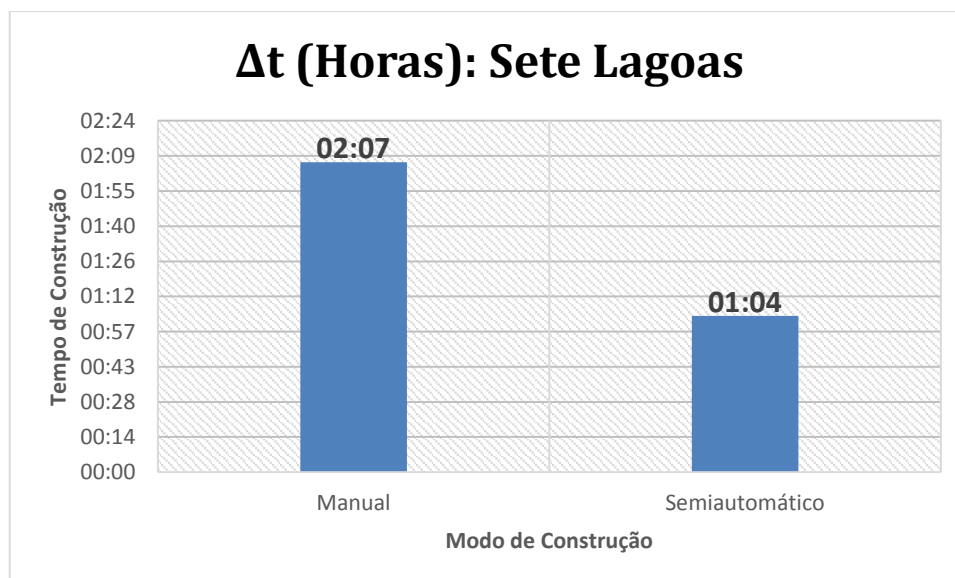
Após a construção do AV, os valores finais são disponibilizados, separados por projetos e tipos de tarefas. A Tabela 6 apresenta os resultados do tempo de cada subestação elétrica concebida nesta prova de conceito.

Tabela 6 - Quantidades de equipamentos, arranjos e tempo total de construção dos AVs

Subestação	Equipamentos <sup>8</sup>	Outros Equipamentos <sup>9</sup>	Arranjos	$\Delta t$ Manual	$\Delta t$ Auto
Sete Lagoas	87	102	6	02h07	01h04
São Gotardo	511	679	29	15h17	09h14

Analisando os dados do Gráfico 1, podemos observar que a subestação de Sete Lagoas foi construída no modo manual em 2 horas e 7 minutos, utilizando a ferramenta o tempo foi de 1 hora e 4 minutos, resultando em uma redução no tempo de 49,7%.

Gráfico 1 - Tempo total de construção da SE de Sete Lagoas

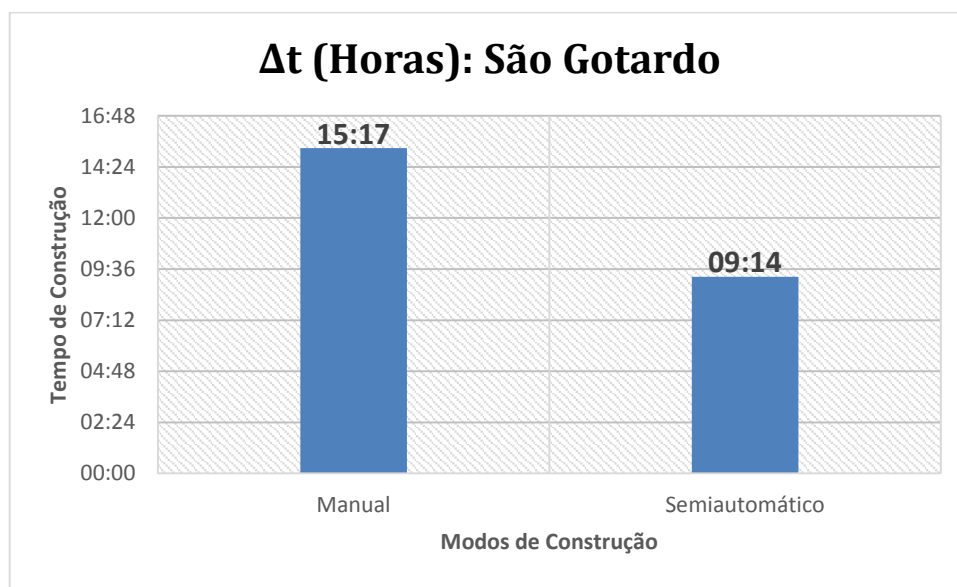


<sup>8</sup> Equipamentos gerenciáveis: são equipamentos monitorados e controlados pelo sistema da Cemig. São: chaves seccionadoras, disjuntores, chaves pantográficas, chaves semi-pantográficas, transformadores de corrente, transformadores de potencial, tráfós, transformadores, indutores, entre outros.

<sup>9</sup> Equipamentos Estruturais: são equipamentos que fazem parte da estrutura da SE, como: pontes, torres, pórticos, suportes, bases, isoladores de cabos condutores, entre outros.

Observando os dados do Gráfico 2, podemos reparar que a subestação de São Gotardo foi construída no modo manual em 15 horas e 17 minutos. Utilizando as ferramentas, o tempo foi de 9 hora e 14 minutos, resultando em uma redução no tempo de 40%.

Gráfico 2 - Tempo total de construção da SE de Sete Lagoas



A diferença de 10% no tempo de construção semiautomática da SE de Sete Lagoas e a de São Gotardo deve-se à concentração de áreas com o níveis de complexidade muito elevados, motivadas por conexões de arranjos com estruturas de transformadores, barramentos, bancos de capacitores, conjunto de reatores e pórticos. A montagem desses grupos de componentes demanda mais labor, seja na colocação dos mesmos em cena, seja na conexão deles.

A Figura 70 (a) apresenta as conexões realizadas em um pórtico com nível de tensão 230kV. Essas áreas apresentam dificuldades ao desenhar cabos condutores. A Figura 70 (b) apresenta a conexão por barras dos disjuntores à chaves pantográficas.

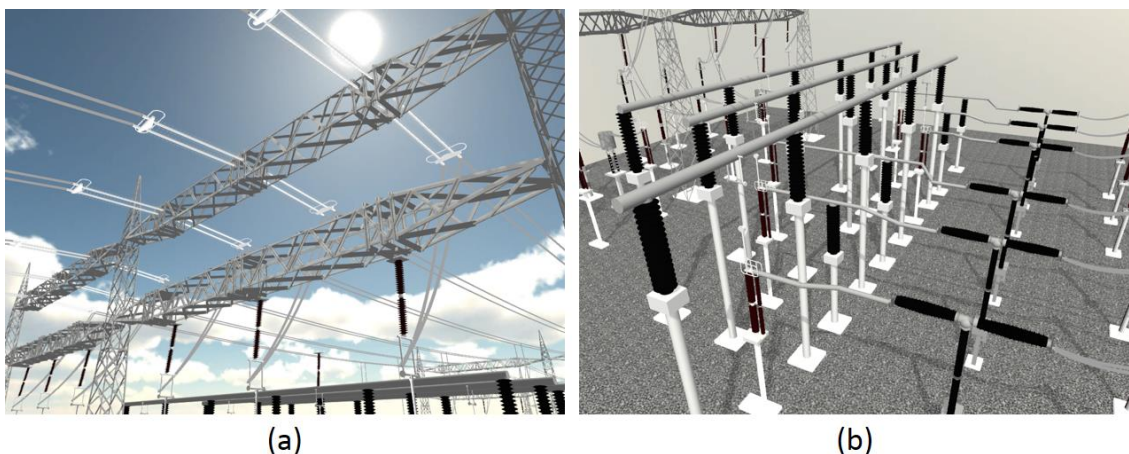


Figura 70 - Áreas de construção complexas da SE de Sete Lagoas, (a) cabos e suportes de um pórtico, (b) conexão por barramento entre disjuntor e chave pantográfica

A Figura 71 apresenta as áreas de construção complexas da SE de São Gotardo. Trata-se de barramentos que ligam chaves seccionadoras e disjuntores aos transformadores. Como existe um transformador, ou indutor de *backup*, é necessário interligar todos de forma que quando um falhar o outro possa ser ligado. Para isso, essa estrutura de conexão utiliza barras.

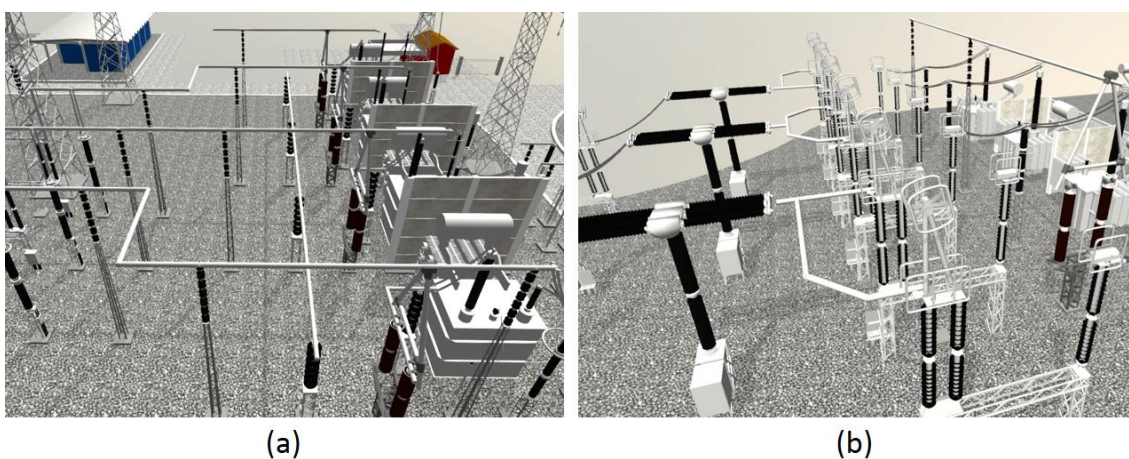


Figura 71 - Áreas de construção complexas da SE de São Gotardo, (a) barramento de seleção de reatores 500kV, (b) barramento para seleção de reatores 345kV

## **6.4 Considerações Finais**

Neste capítulo apresentou-se o conteúdo relacionado à análise da estratégia desenvolvida e seus resultados. De acordo com os resultados, percebe-se que metodologia proposta neste trabalho melhorou a qualidade e o tempo dedicado para a construção de Ambientes Virtuais de Subestação.

# Capítulo 7

## Conclusões e Trabalhos Futuros

### 7.1 Introdução

Neste capítulo, destacam-se os aspectos da pesquisa e conclusões do trabalho apresentado nesta dissertação. Além disso, são apresentadas algumas sugestões para trabalhos futuros e a contribuição científica do presente trabalho.

### 7.2 Conclusões

O objetivo deste trabalho consistiu em elaborar estratégias para solucionar problemas inerentes à construção de Ambientes Virtuais de Subestações de Energia Elétrica, oriundos da produção manual de cenas que apresentam ineficiências na tarefa de posicionar corretamente equipamentos e estruturas e inserir equipamentos virtuais equivalentes a equipamentos reais no tempo de entrega final do Ambiente Virtual.

Desta forma, este trabalho apresentou o desenvolvimento de uma estratégia para aprimorar e evitar problemas na confecção de Ambientes Virtuais de subestações. Essa estratégia é baseada no uso de Grafos de Cena (GC) para criar modelos de arranjos de campo similares aos reais, de tal forma a prover simplicidade na construção de SEs Virtuais. Para facilitar a produção de arranjos baseados em GCs, uma ferramenta de Interface Gráfica com Usuário (GUI) foi desenvolvida baseada em diagrama de blocos para produzir arranjos virtuais.

As estratégias aqui propostas contribuíram para o método de construção de Ambientes Virtuais de SEs, de tal forma a melhorar a qualidade e a fidelidade em relação ao ambientes reais. Foram obtidos resultados satisfatórios no posicionamento correto dos equipamentos virtuais, na redução da inserção equipamentos virtuais equivocados,

uma melhor fidelidade com o ambiente real e uma considerável redução de tempo na construção de Ambientes Virtuais de Subestações de Energia Elétrica.

Os valores de tempo obtidos entre a confecção manual e semiautomática tiveram resultados relevantes, tendo em vista que existem áreas nos pátios de SEs com densidades e complexidades elevadas. O tempo final da construção da SE de Sete Lagoas foi de 2 horas e 7 minutos para montagem manual e 1 hora e 4 minutos para montagem semiautomática, uma redução no tempo de montagem de 49,7%. O tempo final da construção da SE de São Gotardo foi de 15 horas e 17 minutos para montagem manual, 9 horas e 14 minutos para montagem semiautomática, uma redução de 40% no tempo de montagem.

Considerando o tamanho do Ambiente Virtual, quantidade de modelos tridimensionais, a complexidade e a redução considerável no tempo de produção de Sistemas de Realidade Virtual para subestações, a utilização da estratégia proposta mostrou-se significativamente importante para uma produção em larga escala havendo uma pequena equipe de desenvolvimento.

Em suma, pode-se concluir que o uso de Grafos de Cena e ferramentas geradoras de arranjos virtuais correspondeu com eficiência e eficácia nos requisitos envolvidos na construção de Ambientes Virtuais de Subestações de Energia Elétrica, se mostrando aderente à construção de SEs da concessionária de energia elétrica Cemig, melhorando assim a qualidade do AV e reduzindo o seu tempo de produção.

### **7.3 Trabalhos Futuros**

A estratégia desenvolvida neste trabalho apresenta várias outras possibilidades de aplicação em diferentes tipos de ambientes virtuais. Como trabalhos futuros, pretende-se elaborar novos componentes de interface gráfica para inclusão no conceito desenvolvido, para viabilizar a utilização da estratégia elaborada em diversos projetos.

Uma vez que existem diversos tipos de arranjos de campo para os barramentos de uma subestação, uma possível evolução deste trabalho consiste em aumentar ainda

mais o nível de abstração para a criação dos arranjos virtuais, visto que há diversos tipos de subestações e níveis de tensão distribuídas pelo país.

Também, um estudo de relevância é a associação dos equipamentos selecionados no diagrama de blocos com modelos armazenados em uma biblioteca remota, tendo em vista uma integração com o sistema de modelagem de modelos tridimensionais, que disponibiliza os dados sobre cada modelo, e o sistema de gerenciamento para o desenvolvimento de Ambientes Virtuais.

Outra proposta, é evoluir o trabalho para uso em outras áreas da engenharia, ampliando as possibilidades de melhorias. Uma possibilidade é a criação de edificações com visualização de diversos níveis de camadas estruturais, visando fornecer informações adicionais ao usuário.

Por fim, um aspecto de suma importância para um sistema crítico, como o RVCemig, é a representação fiel do fluxo de energia elétrica pelos equipamentos virtuais. A ideia é mostrar visualmente como a energia é conduzida pelos cabos condutores e gerenciada e melhorada pelos equipamentos de controle e retificação. Com base nisso, o trabalho aqui proposto, poderia além de integrar aos arranjos virtuais dados pertinentes de servidores de concessionárias, conectar entre si os arranjos para que possa mostrar de forma visual o comportamento da rede elétrica da subestação.

## Referências Bibliográficas

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

ARRUDA, R. V.; SILVA, W. A.; LAMOUNIER, E. A; RIBEIRO, M. W; CARDOSO, A. & FORTES, N. **Realidade virtual não-imersiva como tecnologia de apoio no desenvolvimento de protótipos para reconstituição de ambientes históricos para auxílio ao ensino**. V Workshop de Realidade Virtual e Aumentada – WRVA 2008, Unesp-Bauru, 2008.

BARCELOS, M. A. et al. **Uso de Realidade Aumentada na Visualização do Componentes de Subestações de Energia Elétrica**. In: XI Coferência de Estudos em Engenharia Elétrica. [S.l.: s.n.], 2013. ISSN 2178-8308.

BAR-ZEEV, A. **Scene Graphs – Past, Present and Future**. Disponível em: <<http://www.realityprime.com/blog/2007/06/scenegraphs-past-present-and-future/>>. Acesso em: 20 de Maio de 2016.

BEZERRA, A. **Critérios de Teste Baseados em Grafo de Cena para Aplicações de Realidade Virtual**. Dissertação de Mestrado, Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação, Universidade de São Paulo, Março de 2012.

BOZZI, F. A.; SILVA, R. F. **Trabalho de Subestações**. Universidade do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

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.



CELPA. **Subestação Móvel em Plena Operação**. Disponível em: <<http://www.portaleducacao.com.br/pedagogia/artigos/48764/referencias-bibliograficas-tiradas-na-internet-como-colocar-no-trabalho>>. Acesso em 15 de julho de 2016.

FERREIRA, A. G. **Uma Arquitetura para a Visualização Distribuída de Ambientes Virtuais**. Dissertação de Mestrado, PUC/RJ, 1999.

FRONTIN, S. O.; JARDINI, J. A.; GABAGLIA, C. P. R. **Equipamentos de Alta Tensão – Prospecção e Hierarquização de Inovações Tecnológicas: Planejamento e Custos dos Equipamentos de Alta Tensão**. Brasília: Teixeira, 2013.

GUANGWEI, Y. A. N. **Scene Graph Organization and Rendering in 3D Substation Simulation System**. n. 200622020, 2009.

KIRNER, C.; SICOUTO, R. **Realidade Virtual e Aumentada: Conceitos, Projeto e Aplicações**. Rio de Janeiro: IX Symposium on Virtual and Augmented Reality, 2007. 292 p.

KIRNER, C.; SISCOOTTO, R. **Fundamentos de Realidade Virtual e Aumentada**. In \_\_\_\_\_. (Ed.). Realidade Virtual e Aumentada: Conceitos, Projeto e Aplicações. Petrópolis-RJ, 28 de Maio de 2007.

KLEINERT, P. H. B. **Estudo e Projeto Elétrico Básico de uma Subestação**. Projeto de Diplomação, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

LEÃO, R. GTD – **Geração, Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica**. Universidade Federal do Ceará. Departamento de Engenharia Elétrica, 2009.

MATTIOLI, L. R. **Desenvolvimento de Ferramentas para Geração Semi-Automática de Ambientes de Realidade Virtual para Subestações de Energia Elétrica**. Dissertação de

Mestrado, Laboratório de Computação Gráfica, Universidade Federal de Uberlândia, 2015.

MAURINA, E. **The Game Programmer's Guide to Torque: Under the Hood of the Torque Game Engine**. p. cm. GarageGames book, 2006.

MEIRELES, D. **Aplicabilidade de Subestações Compactas Isoladas a Gás em Grandes Centros Urbanos**: Proposta de Procedimento Aplicado à Expansão do Sistema Elétrico. Tese de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

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.

MUZY, G. **Subestações Elétricas**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2012.

PINHO, M. S. **Realidade Virtual: Introdução**. Faculdade de Informática – PUCRS.

POULIN, P. FOURNIER, A. **A Model for Anisotropic reflection**. In SIGGRAPH '90: Proceeding of the 17th anual conference on Computer Graphics and interactive techniques, New York, NY, USA: ACM, 1990, p. 273-282.

QUINTANA, J.; MENDOZA, E. **3D virtual models applied in power substation projects**. 2009 15th International Conference on Intelligent System Applications to Power Systems, ISAP '09, p. 1–3, 2009.

ROEHL, B. **Some Thoughts on Behavior in VR Systems**. Disponível em: <<https://sune.uwaterloo.ca/~broehl/behav.html>>. Acesso: 20 de Maio de 2016.

SILVA, A. C. **Uma Proposta de Camadas de Objetos de Interface para Realidade Virtual**. Dissertação de Mestrado, Laboratório de Computação Gráfica, Universidade Federal de Uberlândia, 2014.

SILVA, R. J. M.; RAPOSO, A. B.; GATTASS, M. **Grafo de Cena e Realidade Virtual**. Departamento de Informática. PUCRJ, Rio de Janeiro, abril de 2004.

SOWIZRAL, H. RUSHFORTH, K. DEERING, M. **The Java 3rd API Specification With cdrom**. Boston, MA, USA: Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc, 2000.

TORI, R.; KIRNER, C. **Fundamentos de Realidade Virtual, Fundamentos e Tecnologias de Realidade Virtual e Aumentada**. Pp 9-28, maio 2006.

UNITY3D. **Game Engine, tools and multiplatform**. Disponível em: <<http://unity3d.com/unity>> Acesso em: 27 de novembro de 2013.

VALENTE, L. **Representação de Cenas Tridimensionais: Grafo de Cenas**. Instituto de Computação, Universidade Federal Fluminense, 2014.

VIOLIN, A; D'AJUZ, A.; LACORTE, M. **Equipamentos de Alta Tensão – Prospecção e Hierarquização de Inovações Tecnológicas: Subestações de Alta Tensão**. Brasília: Teixeira, 2013.

WALSH, A. E. **Dr. Dobb's Journal**, 27:7.17-26, 2002.

WIEDERHOLD, B.; BOUCHARD, S. **Advances in Virtual Reality and Anxiety Disorders**. New York: Springer, 2014.

YAN, G.; ZHANG, L.; WANG, Y. **Research and Implementation of the Auto-generating System of Three-dimensional Substation Simulation Scene**. p. 768–771, 2010.