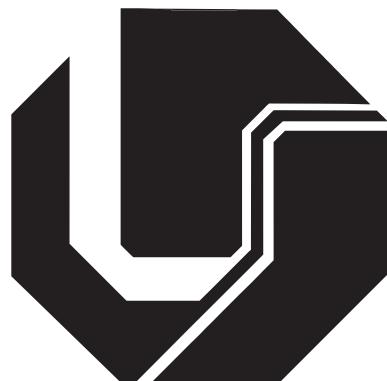


**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA  
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**



**UMA PROPOSTA DE UM PROCEDIMENTO PARA A GERAÇÃO  
SEMAUTOMÁTICA DE AMBIENTES VIRTUAIS PARA  
SUBESTAÇÕES DE ENERGIA ELÉTRICA**

**Leandro Resende Mattioli**

**Julho**

**2015**

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

---

M444p  
2015

Mattioli, Leandro Resende, 1987-

Uma proposta de um procedimento para a geração semiautomática  
de ambientes virtuais para subestações de energia elétrica / Leandro  
Resende Mattioli. - 2015.

81 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. Realidade Virtual - Teses. 3.  
Subestações elétricas - Teses. 4. Projeto auxiliado por computador -  
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

**LEANDRO RESENDE MATTIOLI**

**UMA PROPOSTA DE UM PROCEDIMENTO PARA A GERAÇÃO  
SEMAUTOMÁTICA DE AMBIENTES VIRTUAIS PARA  
SUBESTAÇÕES DE ENERGIA ELÉTRICA**

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

Banca Examinadora:

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

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

Prof. Jose Remo Ferreira Brega (UNESP)

Prof. Luciano Coutinho Gomes (UFU)

Uberlândia  
2015

**LEANDRO RESENDE MATTIOLI**

**UMA PROPOSTA DE UM PROCEDIMENTO PARA A GERAÇÃO  
SEMAUTOMÁTICA DE AMBIENTES VIRTUAIS PARA  
SUBESTAÇÕES DE ENERGIA ELÉTRICA**

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

---

Prof. Alexandre Cardoso, Dr.  
Orientador

Prof. Edgard A. Lamounier Jr, PhD.  
Co-orientador

---

Prof. Edgard A. Lamounier Jr, PhD.  
Coordenador do curso de Pós-Graduação

Uberlândia  
2015

## ***Agradecimentos***

Agradeço à minha família, pelo apoio, pelo incentivo e, principalmente, pelo exemplo.

Aos professores Alexandre Cardoso e Edgard Lamounier, pela confiança, pelas sábias orientações e pela amizade.

Aos demais colegas do Grupo de Realidade Virtual e Aumentada da UFU, pelo companheirismo e pelo profissionalismo.

À CEMIG (Companhia de Energia de Minas Gerais), pela oportunidade.

À FAPEMIG (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais), pelo suporte financeiro.

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

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

## ***Financiadores***

Este trabalho foi financiado pelo Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento – P&D CEMIG/A-NEEL – GT411, de parceria entre a CEMIG Geração e Transmissão com a Universidade Federal de Uberlândia e por bolsa de demanda social da CAPES.

## ***Resumo***

MATTIOLI, Leandro R. Uma Proposta de um Procedimento para a Geração Semiautomática de Ambientes Virtuais para Subestações de Energia Elétrica. Uberlândia, Faculdade de Engenharia Elétrica – UFU, 2015.

O uso de ambientes de Realidade Virtual em subestações de energia elétrica provê um novo paradigma para o controle supervisório. 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, 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 de campo e outros profissionais de suporte e manutenção. Entretanto, o processo de desenvolvimento destas aplicações é inherentemente complexo, envolvendo diversas atividades como programação, modelagem 3D, estudos de usabilidade e técnicas para acompanhamento e gestão de projeto. Este trabalho apresenta um procedimento, suportado por extensões de *software*, para acelerar o desenvolvimento de modelos geométricos virtuais de subestações elétricas. Providenciando uma estreita integração entre software CAD tradicional e engines 3D, as ferramentas aqui descritas são avaliadas para vários cenários virtuais correspondentes a subestações reais da CEMIG Geração e Transmissão.

**Palavras-chave:** Realidade Virtual. Subestações de Energia Elétrica. Projeto assistido por computador.

## ***Abstract***

MATTIOLI, Leandro R. A Procedure Proposal for the Semiautomatic Generation of Electric Power Substations Virtual Environments. Uberlândia, Faculty of Electrical Engineering – UFU, 2015.

The use of Virtual Reality environments in power substations offers a new paradigm for supervisory control. The existence of a virtual environment, geometrically compatible with the real substation, minimizes the difference between the mental model constructed by field operators and the control room, improving communication. Additionally, such systems may be used as information visualization interfaces for power systems simulators, or as training environment for teachers, graduate students, field operators and other professionals related to support and maintenance. Nevertheless, the development process related to these applications is quite complex, including activities as computer programming, 3D modeling, usability studies and project management and tracking. This work presents a procedure, supported by some new software extensions, to make the development of 3D virtual power substations easier. By providing tight integration between traditional CAD software and 3D engines, the tools presented here are evaluated to several scenarios associated with real substations of CEMIG Generation and Transmission company.

**Keywords:** Virtual Reality. Power Substations. Computer-aided design.

## ***Publicações***

As publicações decorrentes desse trabalho são apresentadas a seguir.

- MATTIOLI, Leandro; CARDOSO, Alexandre; LAMOUNIER, Edgard A.; PRADO, Paulo do. 2015. **Semi-automatic generation of virtual reality environments for electric power substations.** In: New Contributions in Information Systems and Technologies. Springer Science + Business Media. p. 833–842. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-16486-1\\_83](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-16486-1_83)>
- MATTIOLI, L. R. ; CARDOSO, A. ; LAMOUNIER, EDGARD ; PRADO, P. R. ; NEWTON, J. 2014. **Automatização do Processo de Criação de Ambientes Virtuais para Subestações de Energia Elétrica.** In: XIII Encontro para Debate de Assuntos de Operação – EDAO, Belo Horizonte.
- MATTIOLI, L. R. ; GAMBARDELLA, W. ; A. Cardoso ; E. Lamounier Jr. ; LIMA, G. M. ; PRADO, P. ; NEWTON, J. 2014. **Automatic Generation of 3D Environments Using Floor Plans Drawings.** In: XXXV Congresso Nacional de Matemática Aplicada e Computacional – CNMAC, Natal. Anais do XXXV CNMAC, 2014.

# **Lista de Tabelas**

Tabela 5.1	Avaliação de desempenho do reconhecedor de símbolos	54
Tabela 5.2	Tempo para a geração do relatório de posicionamento	56
Tabela 5.3	Tempo para a importação do relatório de posicionamento	56
Tabela 5.4	Tempo para a criação de cabos	57

# **Lista de Figuras**

Figura 2.1	Sistema Elétrico de Potência simplificado	6
Figura 2.2	Transformador de potência	6
Figura 2.3	Reator 500kV	7
Figura 2.4	Transformadores de Instrumentos	7
Figura 2.5	Para-Raios	8
Figura 2.6	Chave Seccionadora 500kV	8
Figura 2.7	Disjuntor 500kV	9
Figura 2.8	Caverna digital em EVL, Universidade de Illinois (Chicago)	10
Figura 2.9	Representação por <i>pattern functions</i> ou padrões de bits	15
Figura 2.10	Representação simbólica na forma de grafo	16
Figura 2.11	Possível padrão para uma moeda de 1 real	17
Figura 2.12	Segmentação em imagens rasterizadas e vetoriais	18
Figura 2.13	Treinamento supervisionado	19
Figura 3.1	Subestação com renderização dinâmica	21
Figura 3.2	Visão aérea do modelo virtual da subestação de Xochimilco (México)	21
Figura 3.3	Ambiente virtual de sala de controle de subestação	22
Figura 3.4	Simulador baseado em RV para manutenção em equipamentos	22
Figura 3.5	Modelo de equipamento gerado a partir de imagens	23
Figura 3.6	Ambiente virtual para treinamento em detecção de descargas parciais	23
Figura 3.7	Cenário construído por meio de narrativa	24
Figura 3.8	Modelo com 500 objetos distribuídos no cenário em 25 minutos	25
Figura 3.9	Fragmento de cidade gerado a partir de uma planta baixa	26
Figura 3.10	Modelo virtual do centro de Baltimore	26
Figura 3.11	Modelo tridimensional de um edifício construído de forma semi-automática	26
Figura 3.12	Junção de modelos tridimensionais dos níveis de um prédio	27
Figura 3.13	Processamento de planta-baixa com código de cores	27
Figura 3.14	Processamento de informações dispersas em desenhos arquitetônicos	28
Figura 3.15	Modelagem 3D por reconstrução topológica	28
Figura 3.16	Modelagem 3D pela interpretação de vistas ortográficas arquitetônicas	29
Figura 3.17	Reconhecimento de símbolos com base de regras manualmente inseridas	30
Figura 3.18	Comparação de formas em imagens por meio de <i>shape contexts</i>	31

Figura 3.19 Uso de descritores baseados em desfoque Gaussiano geométrico . . . . .	31
Figura 3.20 Algoritmo bioinspirado para a separação de símbolos em desenho CAD . .	32
Figura 3.21 Reconhecimento de símbolos por grafos de relações geométricas . . . . .	33
Figura 4.1 Arquitetura do Processo de Desenvolvimento . . . . .	37
Figura 4.2 Convenção para a origem do sistema de coordenadas . . . . .	37
Figura 4.3 Compatibilidade entre as orientações dos modelos e seus símbolos . . . . .	38
Figura 4.4 Equipamentos típicos de subestações . . . . .	38
Figura 4.5 Processo semi-automático de geração do cenário . . . . .	39
Figura 4.6 Fragmento de um desenho do arranjo físico de uma subestação . . . . .	40
Figura 4.7 Definição de bloco – Origem do sistema de coordenadas e subentidades	40
Figura 4.8 Primeira etapa do Reconhecimento de Símbolos . . . . .	42
Figura 4.9 Inserção de equipamentos por meio de arquivo estruturado . . . . .	44
Figura 4.10 Modelo do piso de uma subestação com gabarito . . . . .	45
Figura 4.11 Base para um equipamento (gabarito do piso) . . . . .	46
Figura 4.12 Novas ferramentas para o AutoCAD . . . . .	48
Figura 4.13 Arquitetura do pacote de persistência de equipamentos . . . . .	49
Figura 4.14 Interface para importação e exportação de equipamentos . . . . .	49
Figura 4.15 Arquitetura do pacote de desenho de condutores . . . . .	50
Figura 4.16 Interface para a construção de cabos . . . . .	50
Figura 5.1 Cenários de Subestações . . . . .	51
Figura 5.2 Definição de visibilidade das camadas . . . . .	53
Figura 5.3 Dois símbolos para um mesmo equipamento ou estrutura . . . . .	53
Figura 5.4 Símbolo complexo para um disjuntor de 500kV . . . . .	55
Figura 5.5 Símbolos que se diferenciam apenas pela escala . . . . .	55
Figura 5.6 Cabos gerados para um vão do pátio de 500kV de Bom Despacho . . . . .	57
Figura 5.7 Problemas com a localização do sistema de coordenadas . . . . .	58

# **Lista de Quadros**

Quadro 3.1	Comparação de trabalhos da Seção 3.1	34
Quadro 3.2	Comparação de trabalhos da Seção 3.2	35
Quadro 3.3	Comparação de trabalhos da Seção 3.3	35
Quadro 4.1	Modularização da solução CAD2RV	47
Quadro 4.2	Principais comandos adicionados ao AutoCAD	48

# **Lista de Abreviaturas**

API	Interface de Programação de Aplicativos (Application Programming Interface)
CAD	Desenho assistido por computador (Computer-aided Design)
CAVE	Caverna digital (CAVE Automatic Virtual Environment)
COM	Component Object Model
CSV	Valores separados por vírgulas (Comma-separated values)
ERP	Sistema integrado de gestão empresarial (Enterprise Resource Planning)
GPS	Sistema de Posicionamento Global (Global Positioning System)
GRVA UFU	Grupo de Realidade Virtual e Aumentada da Universidade Federal de Uberlândia
IDE	Ambiente de Desenvolvimento Integrado (Integrated Development Environment)
IPC	Comunicação entre processos (Inter-process communication)
LISP	LISt Processing
LOD	Nível de Detalhes (Level of Detail)
OCR	Reconhecimento Ótico de Caracteres (Optical Character Recognition)
RV	Realidade Virtual
SE	Subestação
SRV	Sistema de Realidade Virtual
XML	Linguagem de marcação extendida (eXtended Markup Language)

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Motivação	1
1.2	Benefícios da Realidade Virtual para Subestações	2
1.3	Objetivos	3
1.4	Organização da Dissertação	3
<b>2</b>	<b>Fundamentos Teóricos</b>	<b>5</b>
2.1	Subestações de Energia Elétrica	5
2.1.1	Dispositivos de alta tensão	6
2.2	Realidade Virtual	9
2.2.1	Sistemas Imersivos e Semi-Imersivos	10
2.2.2	Treinamento suportado por Realidade Virtual	10
2.2.3	Desafios da Concepção de Sistemas de Realidade Virtual	12
2.3	Reconhecimento de Padrões	14
2.3.1	Representação da Informação	14
2.3.2	Extração de Características	16
2.3.3	Segmentação	17
2.3.4	Aprendizado de máquina	17
2.4	Considerações Finais	19
<b>3</b>	<b>Trabalhos Correlatos</b>	<b>20</b>
3.1	Realidade Virtual e Subestações	20
3.2	Geração Automática de Ambientes 3D	24
3.2.1	Cidades	25
3.2.2	Edifícios	26
3.2.3	Subestações	29
3.3	Reconhecimento de Símbolos	29
3.4	Resumo Comparativo dos Trabalhos	34
3.5	Considerações Finais	35
<b>4</b>	<b>Solução Proposta e Metodologia</b>	<b>36</b>
4.1	Processo de Desenvolvimento	36

4.2	Modelagem Geométrica dos Equipamentos	36
4.3	Procedimento para a Modelagem do Cenário	39
4.3.1	Reconhecimento de Símbolos	39
4.3.2	Sistema de Posicionamento Automático	44
4.3.3	Desenho dos Condutores	46
4.4	Implementação	47
4.4.1	AutoCAD	47
4.4.2	Unity 3D	48
4.5	Considerações Finais	50
<b>5</b>	<b>Análise da Estratégia</b>	<b>51</b>
5.1	Introdução	51
5.2	Ferramentas para o ambiente CAD	52
5.2.1	Adequação de plantas antigas	52
5.2.2	Geração do Relatório de Posicionamento	55
5.3	Ferramentas para a engine 3D	56
5.3.1	Importação do Relatório de Posicionamento	56
5.3.2	Geração de Cabos	57
5.4	Convenções para novas plantas e novos modelos 3D	58
<b>6</b>	<b>Conclusões e Trabalhos Futuros</b>	<b>59</b>
6.1	Conclusões	59
6.2	Trabalhos Futuros	59
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>61</b>

# Introdução

## 1.1 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 ao mesmo, interagindo com seus objetos de maneira intuitiva e natural” ([CARDOSO et al., 2007](#)). Alternativamente, para [Tori e Siscoutto \(2006\)](#) Realidade Virtual é “uma interface avançada para aplicações computacionais que permite ao usuário a movimentação (navegação) e interação em tempo real, em ambiente tridimensional, podendo fazer uso de dispositivos multissensoriais, para a atuação ou feedback”. Dentre as aplicações tradicionais estão a medicina, notavelmente cirurgia e reabilitação, educação e entretenimento, simulações militares, sistemas de manufatura, robótica e visualização da informação.

Procedimentos de treinamento suportados por RV incluem atividades como montagem, desmontagem, manutenção e operação de equipamentos e estruturas complexas, sem expor os participantes e os equipamentos reais a riscos inerentes destas atividades ([BURDEA; COIF-FET, 2003](#)).

Ambientes de Realidade Virtual constituem valiosas ferramentas para treinamento e operação de sistemas. Por se tratar de modelos de interface homem-máquina altamente representativos, esses sistemas reduzem a discrepância entre o modelo de operação e o modelo real, propiciando aos operadores uma experiência diferenciada. Além disso, permitem a realização de treinamento à distância sem perda significativa de informação visual.

Contudo, no desenvolvimento desses ambientes, há demasiado esforço técnico e organizacional, envolvendo equipes de programação, modelagem tridimensional, utilização, gerenciamento e educação. Dentre as atividades relacionadas, estão:

1. a modelagem individual dos diferentes elementos que constituem o mundo virtual, segundo um critério de qualidade específico para cada projeto;

2. a modelagem geométrica do cenário como um todo, a partir do posicionamento e conexão desses elementos;
3. um projeto de interface com o usuário e uma análise de usabilidade e
4. a modelagem comportamental e a eventual integração dos elementos com uma base de dados.

A modelagem geométrica, em especial, requer uma grande quantidade de documentos, como fotos, desenhos CAD (*Computer-aided Design*) e diagramas unifilares. 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. Técnicas similares, no entanto, foram aplicadas com sucesso em outros contextos, como por exemplo na reconstrução de modelos tridimensionais de áreas urbanas (POULLIS; YOU, 2011).

O presente trabalho apresenta uma proposta de procedimento para o segundo item – a modelagem geométrica de cenários tridimensionais – adaptada ao caso de subestações de energia elétrica. Nesse sentido, são apresentados algoritmos e ferramentas que proporcionam certo grau de automação no processo de desenvolvimento, quando associados a um conjunto de convenções a serem respeitadas durante a fase de modelagem individual de equipamentos.

## 1.2 Benefícios da Realidade Virtual para Subestações

O setor de geração e transmissão de energia é um forte candidato a ser beneficiado pelas técnicas de RV (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 supervisório do sistema elétrico, com o potencial de reduzir tempos de manobras, facilitar a comunicação entre as salas de controle remotas e os operadores *in loco*, melhorando assim a qualidade do serviço. O uso de RV permite levar modelos geométricos realísticos das subestações aos centros de operação do sistema, complementando os modelos elétricos existentes em diagramas de operação. Ainda, quando devidamente nomeados, os equipamentos virtuais dos diferentes cenários podem ser integrados à base de dados SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*), o que faz do sistema de Realidade Virtual uma interface de monitoramento e controle alternativa.

As aplicações de tal empreitada, no entanto, vão além do controle supervisório. 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 (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. 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).

### 1.3 Objetivos

Este trabalho tem por objetivo propor métodos e técnicas para prover condições de construção de cenários tridimensionais para subestações de energia elétrica por meio do desenvolvimento, implantação e testes de ferramentas incorporadas à *engine* 3D e ao ambiente CAD, propiciando uma forte integração entre os mesmos. Nesse sentido, os objetivos específicos são:

- propor um procedimento para a modelagem em massa de cenários tridimensionais;
- desenvolver extensões de *software* destinadas ao posicionamento de objetos no cenário a partir de informações contidas em desenhos CAD de arranjos físicos;
- estender o ambiente CAD com ferramentas necessárias para a adequação de desenhos antigos ou digitalizados para o propósito anterior;
- estender o editor de cenários para prover a criação dos cabos de conexão de forma eficiente e intuitiva;
- estabelecer convenções a serem adotadas na fase de modelagem individual de equipamentos e nos artefatos decorrentes de projetos futuros de subestações;
- avaliar o impacto do uso da solução desenvolvida para a geração de modelos referentes a cenários reais.

### 1.4 Organização da Dissertação

Esta dissertação está organizada em 6 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 e Reconhecimento de Símbolos.

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

No Capítulo 5, a aplicação da solução desenvolvida é avaliada, e suas principais limitações discutidas.

Finalmente, o Capítulo 6 apresenta as considerações finais e perspectivas de trabalhos futuros.

Capítulo **2**

## Fundamentos Teóricos

Neste capítulo, serão apresentados conceitos e definições de tecnologias relacionadas ao presente trabalho. Em particular, as Subestações de Energia Elétrica, a Realidade Virtual e o Reconhecimento de Padrões serão abordados.

### 2.1 Subestações de Energia Elétrica

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 convenientemente condicionada e controlada, da saída do gerador aos centros industriais e urbanos. Nesse sentido, as subestações são atuam como importantes elementos de um sistema elétrico de potência, podendo servir, dentre outros propósitos, para:

- alterar o nível de tensão, com o uso de transformadores;
- efetuar medidas de parâmetros elétricos para fins de controle de qualidade;
- conectar-se a outras usinas geradoras e outras linhas de transmissão, para a compra ou venda de energia de terceiros;
- converter corrente alternada em corrente contínua;
- controlar ou alterar a frequência da rede e
- comutar estado de circuitos e direcionar fluxo energético.

A Figura 2.1 ilustra um Sistema Elétrico de Potência típico simplificado. Nesse sistema, subestações estariam presentes, por exemplo, para os transformadores elevador e abaixador, os clientes de transmissão e os clientes de distribuição.

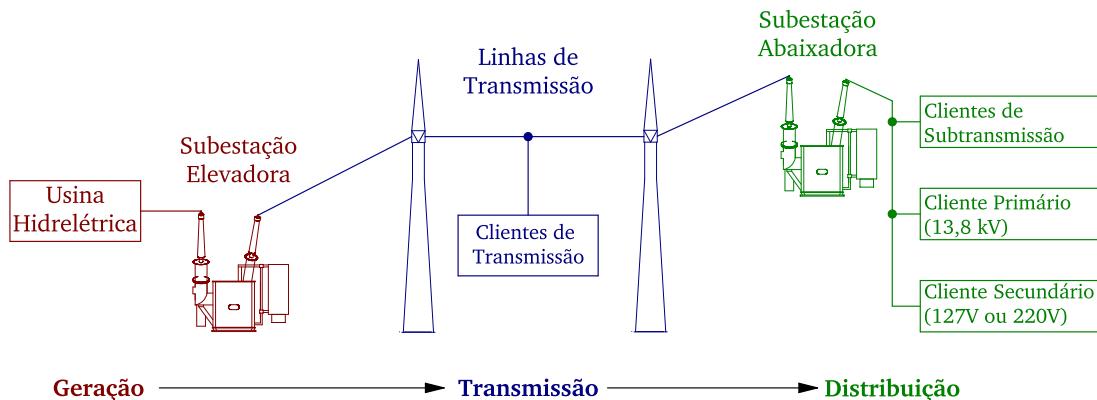


Figura 2.1: Sistema Elétrico de Potência simplificado

Fonte: Autoria Própria

### 2.1.1 Dispositivos de alta tensão

Esta seção descreve sucintamente alguns dos dispositivos tipicamente encontrados em subestações.

#### a) Transformador de Potência

O transformador (Figura 2.2) tem a função de transmitir energia ou potência elétrica de um circuito a outro, alterando valores de tensões e correntes em um circuito de corrente alternada. Também pode ser usado para modificar os valores das impedâncias de um circuito elétrico (CARVALHO; MENDES; CORREIA, 2013a).

Este equipamento é aplicado na alteração do nível de tensão, seja elevando o potencial para viabilizar a transmissão em longas distâncias ou diminuindo o mesmo para a distribuição com segurança nas comunidades. Esse tipo de transformador tem potência compreendida entre 5 e 300 MVA e opera em tensões de até 765 kV.

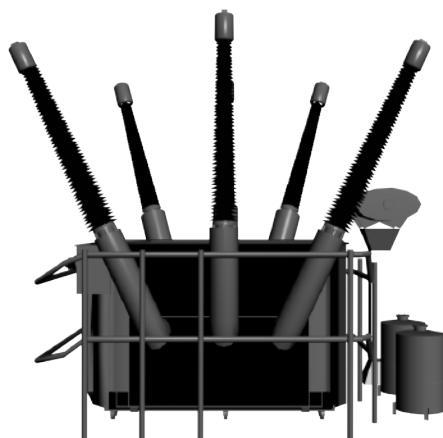


Figura 2.2: Transformador de potência

Fonte: GRVA UFU

### b) Reatores em derivação

Os reatores (Figura 2.3) reduzem ou anulam alguns efeitos indesejáveis da operação da linha, como por exemplo o efeito Ferranti ou as excessivas quedas de tensão em regime de carga elevada (CARVALHO; MENDES; CORREIA, 2013b).

As linhas de transmissão, por possuirem condutores energizados próximos mas isolados, têm valores significativos de capacitância. Os reatores em derivação indutivos compensam efeitos indesejáveis decorrentes da reatância capacitativa natural da linha.

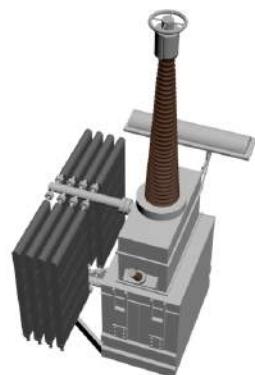


Figura 2.3: Reator 500kV

*Fonte: GRVA UFU*

### c) Transformador de Instrumentos

“Os medidores, os relés de proteção e os dispositivos de controle do tipo de corrente alternada funcionam alimentados por tensões e correntes supridas por transformadores de potencial e de corrente, respectivamente.” (CARVALHO, 2013). A Figura 2.4 ilustra alguns desses transformadores de instrumentos.



(a) Transformador de Potencial



(b) Transformador de Corrente

Figura 2.4: Transformadores de Instrumentos

*Fonte: GRVA UFU*

**d) Para-raios**

Os para-raios (Figura 2.5) são “os equipamentos responsáveis pelo controle de parte das sobretensões existentes nos sistemas elétricos de potência, contribuindo decisivamente para a sua confiabilidade, economia e continuidade de operação”. ([MARTINEZ; VAISMAN, 2013](#))



Figura 2.5: Para-Raios

*Fonte:* GRVA UFU

**e) Seccionadores**

O seccionamento de circuitos ocorre por necessidade operativa ou para isolar componentes do sistema, notavelmente os disjuntores, mas também outros equipamentos ou até mesmo as linhas de transmissão, para a realização de manutenção ([LOPES; FILHO, 2013](#)). Um modelo de uma chave seccionadora de 500kV é apresentada na Figura 2.6.

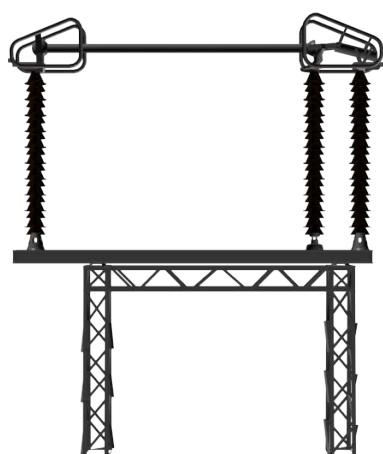


Figura 2.6: Chave Seccionadora 500kV

*Fonte:* GRVA UFU

### f) Disjuntor

Os disjuntores (Figura 2.7) têm “a função precípua de interromper correntes de curto-círcuito em curtíssimos intervalos de tempo, sendo esta uma das tarefas mais difíceis confiadas aos equipamentos instalados em sistemas de potência”. (CHWARZ; MORAIS, 2013)



Figura 2.7: Disjuntor 500kV

*Fonte: GRVA UFU*

## 2.2 Realidade Virtual

A Realidade Virtual pode ser definida como uma avançada tecnologia de interface homem-máquina que envolve simulação em tempo real e interações por meio de canais multissensoriais (BURDEA; COIFFET, 2003, tradução nossa), notavelmente pelos sentidos da visão, audição e tato. Sistemas de Realidade Virtual provêm ambientes tridimensionais sintéticos e realísticos gerados por computador, nos quais os usuários se sentem imersos.

Várias técnicas para a interação com esses ambientes são aplicadas, envolvendo o uso de avançados dispositivos de entrada e saída, o que garante que as ações e intenções dos usuários sejam captadas e influenciem, em tempo real, o estado dos elementos do mundo virtual. Finalmente, ao se sentir dentro de um ambiente virtual e poder manipulá-lo e percebê-lo de forma intuitiva e natural, graças a esses dispositivos, o usuário se sente envolvido e dotado de grande capacidade exploratória. Esses atributos são conhecidos como os três I's da Realidade Virtual – imersão, interação e imaginação (BURDEA; COIFFET, 2003). .

Os sistemas de Realidade Virtual permitem que os usuários vivenciem e naveguem dentro de ambientes artificiais de formas similares ou radicalmente diferentes das encontradas no mundo real (GRADY, 2003, tradução nossa).

### 2.2.1 Sistemas Imersivos e Semi-Imersivos

Dependendo do nível de imersão obtido com os dispositivos de entrada e saída, um sistema de RV pode ser classificado como imersivo ou semi-imersivo. Um sistema semi-imersivo normalmente utiliza dispositivos convencionais, como mouse, teclado e monitor, e a noção tridimensional das imagens é emulada pelo uso de perspectiva, da proporção e da posição relativa dos objetos do cenário. Por outro lado, um sistema de RV imersivo conta com dispositivos como luvas, *head mounted displays* (HMDs) e sensores de posição (*trackers*), ou ainda com uma sala com uma estrutura física ad hoc (Figura 2.8), tradicionalmente chamada de CAVE (acrônimo recursivo para *Cave Automatic Virtual Environment*). Nos sistemas imersivos, o que se pretende é substituir as informações reais obtidas pelos sentidos do usuário por sinais artificiais. O sentido humano mais usado é o da visão, seguido pelo da audição e, finalmente o do tato. Mesmo em sistemas imersivos, o uso do paladar e do olfato ainda é pouco explorado.



Figura 2.8: CAVE (Cave Automatic Virtual Environment) em EVL, Universidade de Illinois (Chicago)

Fonte: [http://commons.wikimedia.org/wiki/File:CAVE\\_Crayoland.jpg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:CAVE_Crayoland.jpg)

### 2.2.2 Treinamento suportado por Realidade Virtual

No que diz respeito às ferramentas e tecnologias para a educação, simuladores com técnicas de Realidade Virtual consistem em valiosas ferramentas, podendo propiciar, de forma imediata, a característica de despreendimento temporal e espacial necessária em aprendizagem ubíqua: o aluno pode realizar os experimentos em casa, no ritmo que preferir, no horário mais conveniente e quantas vezes precisar. Além disso, o conhecimento, antes pesquisado em livros, anotações e animações, passa a ser explorado em um ambiente imersivo, intuitivo e agradável. Finalmente, os instrutores podem acompanhar as ações dos aprendizes para determinar melhor as aptidões e deficiências de cada um, sem revelar a natureza avaliativa e sem que os usuários percebam o processo (monitoramento passivo). Outros aspectos que reforçam o uso de Realidade Virtual em atividades de treinamento são descritas brevemente nas seções a seguir.

#### a) Acessibilidade e disponibilidade

Ambientes virtuais representativos de ambientes reais podem ser oferecidos por *software* e *hardware*, sem a necessidade de agendamentos, e em vários computadores, sobretudo para o caso de Realidade Virtual semi-imersiva. Além disso, ambientes industriais nem sempre podem

contar com a parada de um ou mais processos para testar uma nova abordagem de operação ou controle. A aplicação de modelos virtuais, portanto, pode extrapolar o ambiente acadêmico e auxiliar nesses casos. Finalmente, em alguns domínios do conhecimento ainda é comum a prática de procedimentos de calibração empíricos, intimamente ligados à experiência do operador. É de suma importância que os aprendizes possam desenvolver as duas abordagens e compará-las, ponderando seus benefícios e limitações, de forma segura e sem ônus material.

#### **b) Colaboração**

Ambientes virtuais colaborativos podem ser concebidos para a fácil troca de informações e o trabalho em equipe. A troca de mensagens de forma síncrona e assíncrona é possível, e os participantes não precisam estar no mesmo ambiente físico para realização dos experimentos em equipe.

#### **c) Decomposição de Objetos**

Desde que previsto na fase de modelagem geométrica, aspectos construtivos dos elementos do mundo virtual podem ser explorados, em vários níveis, com os recursos de navegação do SRV (Sistema de Realidade Virtual). Isso significa que a granularidade dos objetos de estudos pode ser definida pelo próprio usuário. Com isso, várias camadas de abstração são passíveis de estudo, como a engrenagem da redução de um motor e o sistema como um todo. Objetos virtuais podem ser desmembrados, e sua estrutura interna manipulada, de acordo com os interesses do aprendiz.

#### **d) Ambientes Imaginários**

Devido à capacidade de transcender barreiras temporais e espaciais (CRAIG; SHERMAN; WILL, 2009), pode-se conceber ambientes virtuais seja na escala de um planetário ou de uma célula. A imersão propiciada por esses ambientes exploratórios imaginários contribui fortemente para a consolidação do conhecimento.

Uma desvantagem imediata dos laboratórios está na incapacidade da criação de uma arquitetura suficientemente coerente com a realidade industrial: enquanto um laboratório agrupa plantas de controle em curtas distâncias e, normalmente num mesmo ambiente, as fábricas possuem uma disposição diferenciada, envolvendo distâncias maiores e, por conseguinte, complexa fiação. Além disso, ambientes com riscos de explosão ou em condições inapropriadas para a presença dos operadores não são tratados nos laboratórios, que falham portanto na exposição e no ensino dos aspectos de segurança.

### e) Simulação de Catástrofes

Diversos são os cenários que prejudicam componentes mecânicos reais ou que acarretam riscos à segurança das pessoas nas proximidades. Como exemplo, podem-se citar restrições de um sistema de controle da produção de vapor de uma caldeira, com riscos de explosão durante a operação e a manutenção (JUNIOR, 2012). O nível deve ser controlado entre os limites especificados no manual do fabricante da caldeira, de forma que, se o nível extrapolar o limite máximo pode haver arrastamento de gotículas de água para o superaquecedor ou para as turbinas, o que danifica os equipamentos, gera onerosos custos de manutenção e afeta a disponibilidade operacional dos mesmos.

Por outro lado, caso o nível seja inferior ao limite mínimo estabelecido, pode ocorrer o superaquecimento dos tubos da parede de água que alimenta o balão superior, causando a ruptura dos mesmos, podendo acarretar, ainda, em explosão e sérios acidentes (GILMAN; GILMAN, 2010). As situações que provocam acidentes não são admissíveis num ambiente real, mas podem ocorrer no ambiente virtual para fins de aprendizado. Nesse caso, os desastres podem acontecer accidental ou intencionalmente, aumentando as possibilidades de testes efetuados pelos instrutores e aprendizes.

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

O desenvolvimento de sistemas de Realidade Virtual é inherentemente 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. 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 existem 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 a 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 imagens 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 claridade e distorção.

**6. Fidelidade em tempo real.** A fidelidade em ambientes virtuais está associada ao desempenho em tempo real. Modelos e objetos reais são contraditórios, havendo 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 comportamentos. 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 Reconhecimento de Padrões

Entende-se por padrão de um objeto seus dados espaciais ou cronológicos, normalmente captados por um ou mais dispositivos de entrada (ANZAI, 1992, tradução nossa). O campo de reconhecimento de padrões lida com a descoberta automática de regularidades nesses dados, por meio de algoritmos computacionais, e com o uso dessas regularidades na execução de determinadas ações, como por exemplo a classificação dos dados em categorias (BISHOP, 2006, tradução nossa). Os processos de reconhecimento e aprendizagem por computador também podem ser descritos como aqueles capazes de gerar uma representação apropriada para a informação e transformar esta representação em outra (ANZAI, 1992, tradução nossa), mais adequada para a análise ou processamento posterior.

Como exemplo, dois sinais de áudio distintos, descritos por listas com valores uniformemente espaçados no tempo, podem possuir algumas características semelhantes e serem convenientemente agrupados em uma mesma categoria, quando submetidos a certa operação de transformação. Com esta transformação da representação original, os sinais são comparados de forma robusta, com alta imunidade a ruídos. Uma vez concluída a etapa de extração de características, os novos padrões são submetidos a métodos matemáticos e estatísticos, por exemplo, para fins de comparação ou aprendizado.

As técnicas para reconhecimento de padrões podem ser usadas para prever um ataque de epilepsia, analisando sinais elétricos do cérebro humano e aplicando algoritmos de regressão, bem como no reconhecimento de fala em interfaces homem-máquina com comandos de voz. No campo do comércio, os reconhecedores de padrões podem ser usados em sistemas automáticos que recomendam produtos a certos clientes conforme seu perfil e histórico de compras. Podem ainda serem aplicados para agrupar dados em um sistema de visualização da informação. Finalmente, o reconhecimento de padrões é usado em processos de visão computacional para identificar as partes mais relevantes de uma imagem para uma dada aplicação ou para auxiliar na locomoção de um robô.

### 2.3.1 Representação da Informação

Diversas representações e estruturas de dados podem ser usadas para descrever e armazenar um dado padrão. Uma imagem rasterizada e em escala de cinza, por exemplo, pode ser representada formalmente por:

$$f : \mathbb{N}^2 \rightarrow \mathbb{Z} \quad \text{ou} \quad g : \mathbb{N}^2 \rightarrow \mathbb{R}$$

Ambas as funções recebem como argumentos as coordenadas  $x$  e  $y$  de um dado pixel. A imagem da função  $f$  constitui a intensidade de cor como um valor inteiro, normalmente compreendido entre 0 e  $2^n - 1$ , onde  $n$  é o número de bits<sup>1</sup>. A função  $g$ , em contrapartida, retorna

---

<sup>1</sup>Para o caso de valores com sinal, a faixa será  $[-2^n, 2^n)$

valores reais, convenientemente normalizados entre 0 e 1. Estas funções recebem o nome de *pattern functions*. Considerando que a imagem digital é armazenada por valores de 8 bits sem sinal, podemos expressar a função  $g$  como:

$$g(x, y) = \frac{f(x, y)}{255} \quad (2.3.1)$$

Dentre outras representações baseadas em funções matemáticas discretas, destacam-se as obtidas por técnicas de processamento de imagens (Figura 2.9). O termo *padrão de bits* é usado quando o valor de cada pixel é armazenado em um único bit (imagens em preto e branco).



Figura 2.9: Representação por *pattern functions* ou padrões de bits

Fonte: Autoria própria

Além da representação por funções matemáticas, um padrão pode ser caracterizado com informações simbólicas, relações entre objetos, predicados lógicos etc. Diferentes representações se associam a diferentes estruturas de dados, como grafos, árvores e listas. A Figura 2.10b ilustra a descrição de um hexágono por meio de um grafo onde os vértices representam os segmentos de reta e as arestas definem as relações entre esses segmentos, com os valores “v” significando vizinhos e “p” significando paralelos.

Alternativamente, pode-se descrever o polígono por uma lista contendo as coordenadas dos vértices, repetindo o primeiro para indicar que o polígono é fechado:

$$\text{hexágono} = ((-11;19), (11;19), (22;0), (11;-19), (-11;-19), (-22;0), (-11;19)) \quad (2.3.2)$$

Finalmente, a entidade pode igualmente ser caracterizada como um conjunto de segmentos de reta. Uma opção é armazenar, para cada segmento:

1. seu comprimento;
2. o ângulo orientado em relação à horizontal, em graus;
3. as coordenadas relativas do ponto médio em relação ao centróide.

Nesse critério, o mesmo hexágono é representado por:

$$\text{hexágono} = \{(22;0;0;19), (22;-60;16.5;9.5), (22;60;16.5;-9.5), (22;0;0;-19), (22;-60;-16.5;-9.5), (22;60;-16.5;9.5)\} \quad (2.3.3)$$

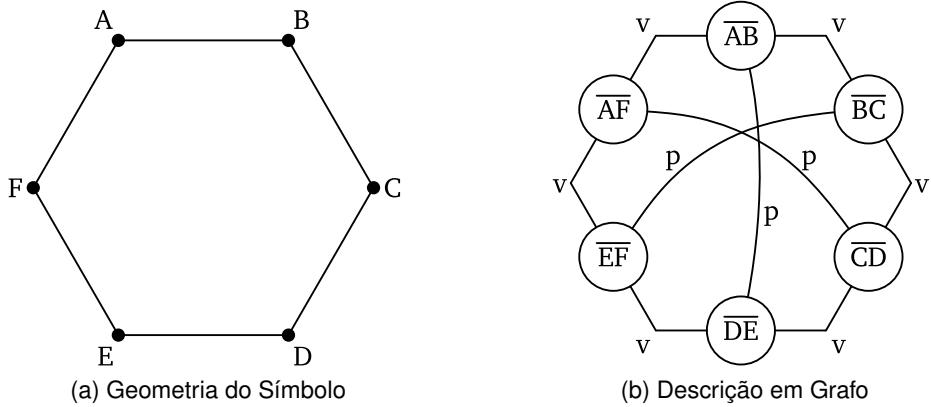


Figura 2.10: Representação simbólica na forma de grafo  
Fonte: Autoria própria

A representação mais adequada depende da aplicação e da forma original dos dados de entrada. Se o hexágono vier de uma imagem rasterizada, por exemplo, pode ser necessário aplicar um processo de vetorização, ou *image tracing*, antes de representá-lo por um grafo.

### 2.3.2 Extração de Características

Para encontrar objetos em imagens, é desejável que o padrão desse objeto seja composto de quantidades que não se modificam quando o sistema de coordenadas passa por transformações como translação, rotação, e escala. A simples comparação de valores de pixels para fins de comparação de imagens pode apresentar limitações em diversos casos. Se a moeda da Figura 2.11 for transladada, a informação de intensidade de cores nos pixels será significativamente alterada. Se não forem compensadas, diferenças na iluminação do meio também afetam negativamente as semelhanças entre imagens. A aplicação de rotinas de pré-processamento visando à extração de características mais adequadas para diferenciar corretamente imagens de moedas é, neste caso, de grande valia. Para moedas de 1 real, uma simples estratégia consiste em aplicar um algoritmo para a detecção de coroas circulares, o qual já desempenha o papel de reconhecedor de um padrão – a coroa circular, e então computar as seguintes características:

- cor média para a coroa interna;
- cor média para a coroa externa;



Figura 2.11: Possível padrão para uma moeda de 1 real

Fonte: Autoria própria

- razão entre os raios externo e interno.

Esta nova representação, por não envolver coordenadas cartesianas, é inherentemente invariante a translações. Além disso, por não conter os valores individuais dos raios, mas sim a razão entre eles, o padrão também é invariante à escala. A rotação na direção normal à moeda também não provoca alterações nessas características. Finalmente, como o glifo “1”, em relevo, não é utilizado, a moeda poderá ser reconhecida de qualquer lado.

Alternativamente, a câmera pode ser fixada em certa posição e o raio da moeda usado como uma característica. Além disso, para as outras moedas pode-se usar um detector de círculos para demarcar a região circular de raio  $r_2$  e então analisar a cor média em lugares geométricos estratégicos, como  $r < 0.5 \cdot r_2$  e  $0.75 \cdot r_2 < r < 0.9 \cdot r_2$ .

### 2.3.3 Segmentação

A segmentação em imagens objetiva partitionar uma imagem em regiões com aparência visual homogênea ou que correspondem a objetos ou suas partes (FORSYTH; PONCE, 2015, tradução nossa). A etapa de segmentação, de forma mais genérica, pode ser entendido como aquela destinada a agrupar pequenos pedaços produzidos pela digitalização em pedaços maiores, correspondentes a componentes lógicos do sinal (RICH, 1988, Cap. 10). O processo é usado, por exemplo, para separar caracteres em um texto (Figura 2.12a), etapa importante em processos de OCR (*Optical Character Recognition*). Também pode ser usado para remover o plano de fundo de uma foto ou separar símbolos gráficos em um diagrama de engenharia (Figura 2.12b). Os algoritmos de detecção de contornos ou círculos, como o detector de coroas mencionado no exemplo da seção 2.3.2, podem igualmente ser usados na segmentação de objetos em uma imagem (Figura 2.12c).

### 2.3.4 Aprendizado de máquina

Para Bishop (2006), reconhecimento de padrões e aprendizado de máquina podem ser vistos como duas facetas do mesmo campo. Ambos estão fortemente associados com estatística

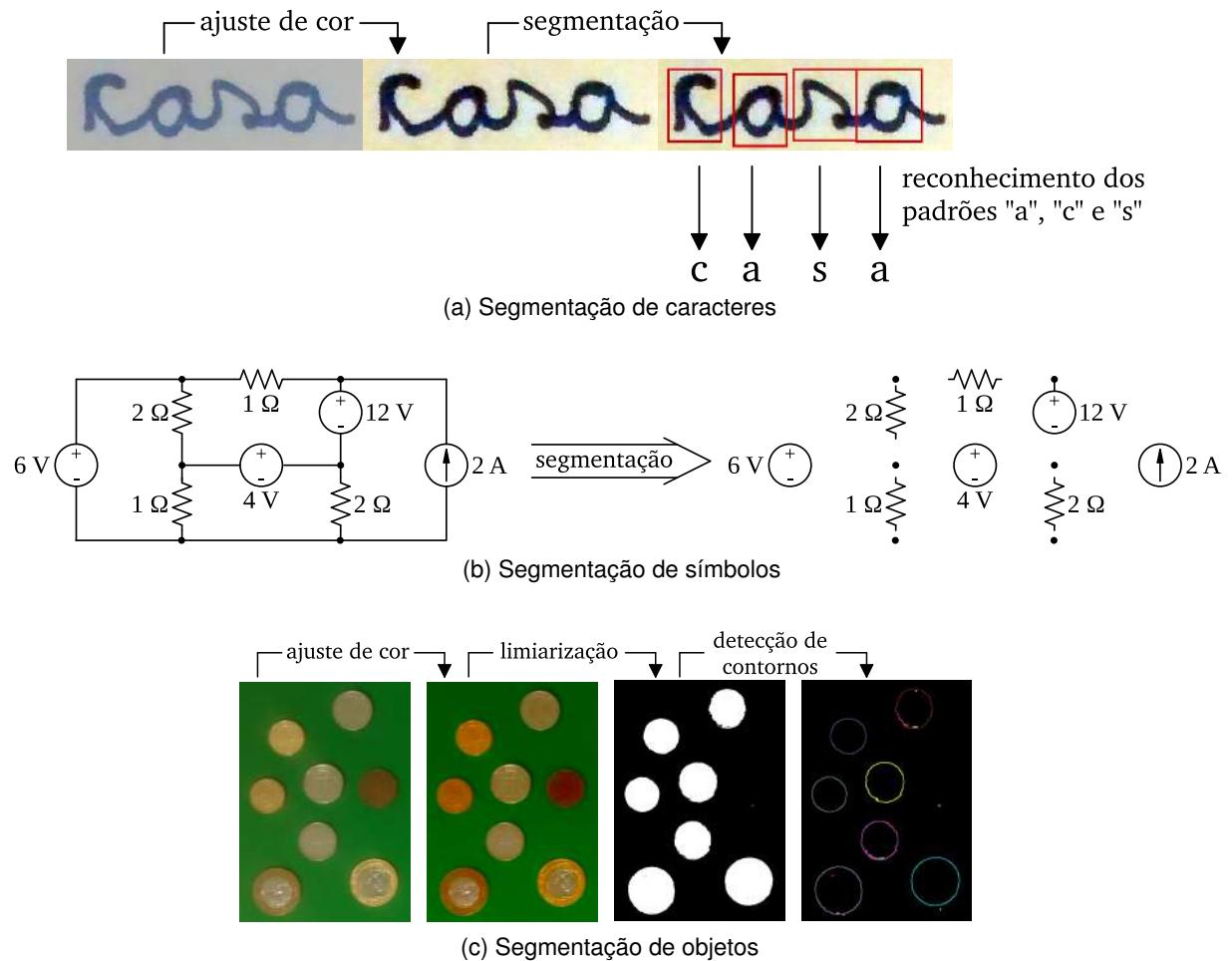


Figura 2.12: Segmentação em imagens rasterizadas e vetoriais

Fonte: Autoria própria

computacional e otimização matemática, além de algoritmos bioinspirados e outras técnicas de *soft computing* (ZADEH, 1994).

No entanto, enquanto o reconhecimento provê à máquina a capacidade de identificar padrões semelhantes aos que foram previamente informados, um sistema de aprendizado de máquina gera automaticamente novas estruturas de dados ou programas a partir de uma versões anteriores, alterando a si mesmo, com um dado propósito e por certo período de tempo (ANZAI, 1992, tradução nossa). Alternativamente, pode-se dizer que o aprendizado de máquina é um processo de generalização e transformação de representações (ANZAI, 1992, tradução nossa). O aprendizado de máquina pode ainda ser entendido como o processo de indução de uma hipótese (ou aproximação de função) a partir da experiência passada (FACELI, 2011).

Os modelos para aprendizado de máquina são classificados em preditivos ou descriptivos. Modelos preditivos estão associados ao aprendizado supervisionado, no qual o computador recebe um conjunto de padrões, denominado conjunto de treinamento, juntamente com as saídas desejadas para cada padrão, que constituem o conjunto alvo. Nesse tipo de aprendizado, o objetivo é que a máquina seja capaz de prever um padrão que caracterize um novo exemplo, extrapolando e generalizando a informação processada no conjunto de treinamento. Na proposta

do reconhecedor de moedas, com a caracterização de padrões similar à descrita ao final da seção 2.3.2, o conjunto de treinamento seria constituído de imagens de moedas, ao passo que o conjunto alvo, que constitui outra entrada do processo, mapearia cada imagem do conjunto de treinamento a uma dada moeda (Figura 2.13). Após a fase de treinamento, o computador seria então capaz de generalizar as características das moedas e reconhecer corretamente uma moeda vinda de uma imagem nova.

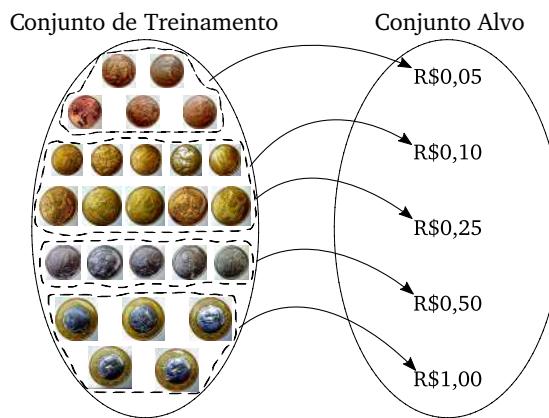


Figura 2.13: Treinamento supervisionado

Fonte: Autoria própria

Os modelos descritivos, em contrapartida, se referem ao aprendizado não supervisionado, no qual não existem saídas pré-definidas para nenhum padrão. Nessa modalidade, o objetivo é extrair características nos dados de entrada e agrupá-los automaticamente em categorias, segundo suas semelhanças, ou encontrar tendências que auxiliam na tomada de decisões.

## 2.4 Considerações Finais

Nesse capítulo foram apresentados alguns conceitos e definições das três principais áreas nas quais este trabalho se baseia. A solução desenvolvida conta com a aplicação de técnicas de reconhecimento de padrões são aplicadas a desenhos de arranjos físicos de subestações de energia elétrica visando à rápida construção dos ambientes virtuais associados. O próximo capítulo descreve um conjunto de trabalhos associados ao tema desta dissertação.

Capítulo **3**

## Trabalhos Correlatos

A construção de ambientes de Realidade Virtual para fins operação e controle de sistemas reais vem atraindo esforços de diversos pesquisadores nas últimas décadas. Este capítulo apresenta brevemente vários trabalhos sobre realidade virtual, operação e treinamento em subestações de energia, geração automática de cenários tridimensionais e reconhecimento de padrões.

### 3.1 Realidade Virtual e Subestações

A aplicação ESOPE-VR, apresentada em ([VEH et al., 1996](#)) e aprimorada em ([TAM et al., 1997](#)), contempla o treinamento de operações em subestações de energia por meio de técnicas de RV. Um sistema especialista acompanha as ações do aprendiz, juntamente com um simulador de fluxo de energia. Os ambientes tridimensionais representativos das subestações são gerados dinamicamente por meio de diagramas unifilares, com a inferência de arranjos pré-definidos (*ring bus, double-bus-double-breaker*). Normalmente, o arranjo físico dos equipamentos de uma subestação não pode ser derivado, com exatidão, do arranjo elétrico. Várias restrições de projeto e de construção tornam tal mecanismo inviável. Além disso, o arranjo elétrico não revela certos detalhes construtivos, como pórticos e estruturas metálicas e particularidades nas conexões em isoladores de pedestal. Finalmente, as distâncias reais entre os equipamentos são fundamentais para o correto planejamento de atividades de manutenção nos pátios. No que diz respeito ao treinamento de operações, a falta de correspondência geométrica entre a subestação virtual e a real pode comprometer o aprendizado, dependendo do objetivo do treinamento.

Uma abordagem similar é tratada em ([ARROYO; ARCOS, 1999](#)), com a integração de componentes de software destinados à simulação, ao treinamento e à representação em ambiente virtual. Neste sistema, o usuário descreve a subestação por meio formulários para a edição de arquivos relacionados com (i) a topologia contendo o tipo e a posição dos equipamentos, (ii) as conexões entre os equipamentos e (iii) a lista de identificadores, necessária para a comunicação com o módulo simulador.

[Guangwei e Zhitao \(2009\)](#) sugere a criação de modelos com diferentes níveis de detalhes (LOD) para cada equipamento, para fins de otimização da renderização. Além disso, aborda uma estrutura de dados hierárquica destinada à representação de um cenário de subestação, servindo de entrada para um sistema de renderização dinâmica, ilustrada na Figura 3.1.

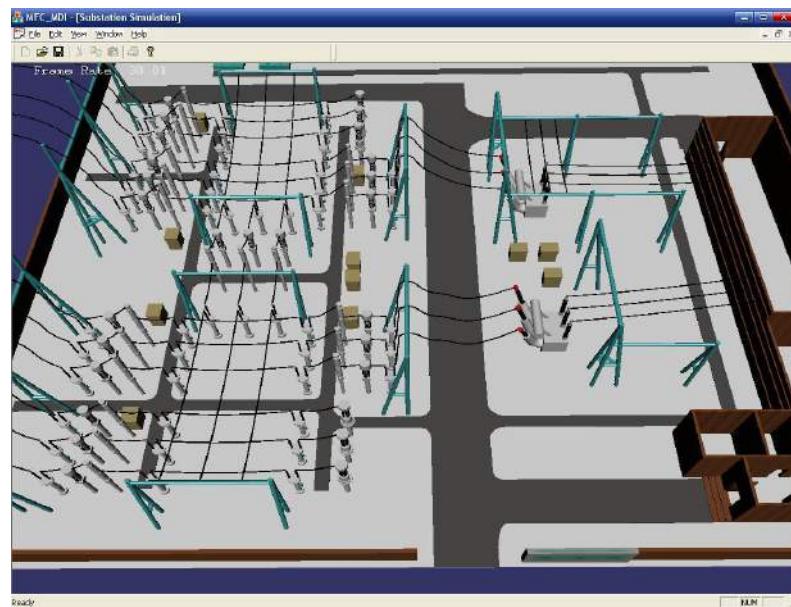


Figura 3.1: Subestação com renderização dinâmica

Fonte: ([GUANGWEI; ZHTAO, 2009](#))

Em ([QUINTANA; MENDOZA, 2009](#)) são apresentadas as etapas para a criação de um passeio virtual em subestações: (i) coleta de informações, como catálogos, fotos e desenhos, (ii) modelagem dos equipamentos, (iii) integração da instalação e (iv) renderização do passeio virtual. Neste trabalho, ressalta-se a complexidade de adequação de ambientes virtuais existentes a reformas nos pátios da subestação. O sistema foi utilizado para avaliar diferentes disposições para a inserção de novos equipamentos e verificar a viabilidade de expansão da subestação de Xochimilco (Figura 3.2).



Figura 3.2: Visão aérea do modelo virtual da subestação de Xochimilco (México)

Fonte: ([QUINTANA; MENDOZA, 2009](#))

Uma proposta de arquitetura para engines de RV voltadas à simulação de subestações é apresentada em (FANQI; TAO, 2009). A tecnologia de comunicação interprocessos COM é explorada para prover a integração dos diversos componentes do sistema. Trabalhos similares são descritos em (LI; WANG; HE, 2010), (FANQI; YUNQI, 2010) e (LI; FENGLI; HONG, 2010).

Em (WANG; LI, 2010), tem-se um sistema baseado em RV e conectado a uma base de dados, concebido para fins de treinamento de operadores em salas de controle de subestações (Figura 3.3). Propostas para questões de desempenho são apresentadas, notavelmente a troca rápida de texturas para a representação de comutações nos estados dos dispositivos.



Figura 3.3: Ambiente virtual de sala de controle de subestação

Fonte: (WANG; LI, 2010)

Um simulador destinado à manutenção é abordado em (CHANG et al., 2010). No sistema proposto, o aprendiz, diante de um dado equipamento (Figura 3.4a), seleciona regiões pré-definidas para inspeção, isolando uma parte do modelo (Figura 3.4b). Então, uma caixa de ferramentas relacionadas às diversas atividades de manutenção é apresentada como uma barra lateral e um sistema especialista analisa as ações do aprendiz.



(a) Situação de um Transformador

(b) Etapa de manutenção

Figura 3.4: Simulador baseado em RV para atividades de manutenção em equipamentos

Fonte: (CHANG et al., 2010)

O uso de imagens de equipamentos de subestações visando à rápida geração dos modelos

3D associados foi abordado em (SIMOES et al., 2012). Apesar dos importantes resultados obtidos, a solução ainda apresenta falhas severas, como a inserção de ruídos e deformações nos equipamentos e uma fraca capacidade de separação do objeto de interesse do ambiente ao redor (Figura 3.5).

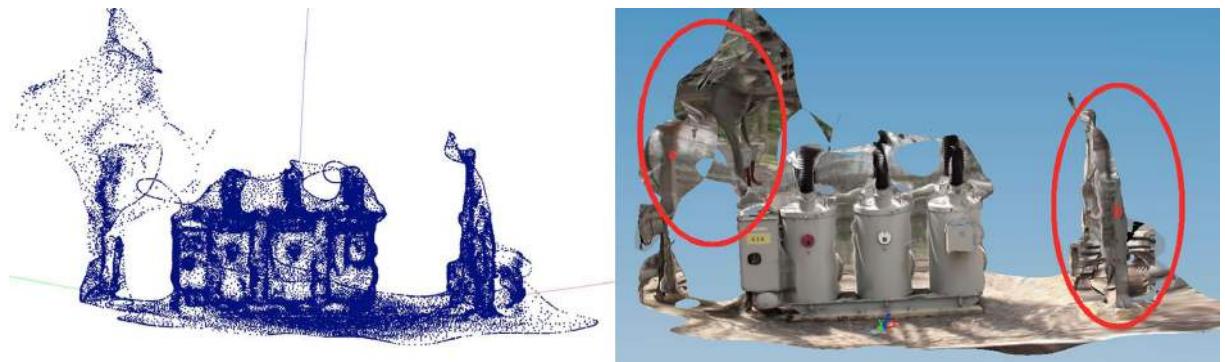


Figura 3.5: Modelo de equipamento gerado a partir de imagens

Fonte: (SIMOES et al., 2012)

Shang et al. (2013) sugerem a troca de mensagens entre o ambiente virtual e diversos subsistemas, notavelmente uma aplicação para o instrutor e os módulos para simulação e monitoramento (com interface 2D tradicionais). As ações desempenhadas pelo instrutor, como a alteração da carga ou a mudança da saída de um gerador, são repercutidas no sistema de monitoramento e no ambiente 3D, por meio do módulo de simulação. Ao mesmo tempo, ações disparadas pelo despachante aprendiz, tanto no ambiente 3D como no supervisório 2D, afetam os dados do simulador, e chegam ao instrutor para a reação adequada.

O sistema concebido em (YANG et al., 2014) é destinado ao treinamento em detecção de falhas por descargas parciais, sendo semelhante aos outros sistemas em termos de arquitetura de software. O Centro de Treinamento do Departamento de Fornecimento de Energia de Guangzhou foi beneficiado com a implantação deste sistema (Figura 3.6).

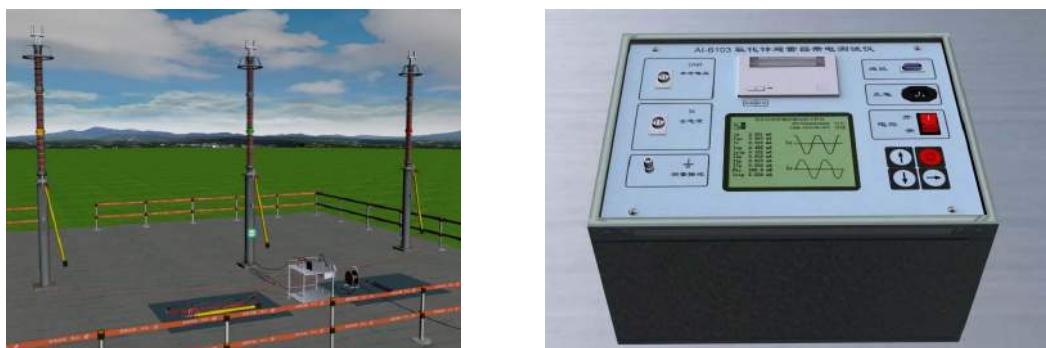


Figura 3.6: Ambiente virtual para treinamento em detecção de descargas parciais

Fonte: (YANG et al., 2014)

## 3.2 Geração Automática de Ambientes 3D

A construção automática ou semi-automática de cenários tridimensionais já foi abordada em vários trabalhos. Dentre as possíveis entradas deste processo, estão os desenhos arquitetônicos, digitalizados ou criados em ambientes CAD, as imagens obtidas com técnicas de sensoriamento remoto e dados estruturados que revelam a topologia de rede ou a posição relativa de elementos. Nesta seção serão apresentados alguns trabalhos para a construção de cenários específicos.

Alguns trabalhos relatam o processamento de informações textuais para a determinação automática das matrizes de transformação dos objetos de um cenário, ou seja, as informações referentes à posição, orientação e escala desses elementos.

O sistema *WordsEye* ([COYNE; SPROAT, 2001](#)) dispõe os modelos na cena utilizando informações semânticas extraídas a partir de uma narrativa, que contém atributos dos objetos — como escala, cor e ação realizada — e a posição relativa dos mesmos (Figura 3.7).



*John uses the crossbow. He rides the horse by the store. The store is under the large willow. The small allosaurus is in front of the horse. The dinosaur faces John. A gigantic teacup is in front of the store. The dinosaur is in front of the horse. The gigantic mushroom is in the teacup. The castle is to the right of the store.*

Figura 3.7: Cenário construído por meio de narrativa

Fonte: ([COYNE; SPROAT, 2001](#))

Um sistema similar é apresentado em ([LU et al., 2010](#)), contemplando um dialeto XML criado com o propósito de representar as informações extraídas da narrativa textual e um algoritmo para determinar a posição absoluta final dos elementos.

Finalmente, o sistema CAPS (*Constraint-based Automatic Placement System*), descrito em ([XU; STEWART; FIUME, 2002](#)), combina várias técnicas para a posicionamento em massa de modelos (Figura 3.8). Rotinas de pseudo-física garantem que cada objeto permaneça em uma

posição estável, e que dois corpos não ocupem o mesmo espaço. Além disso, várias restrições semânticas podem ser incorporadas, definindo certas relações entre os objetos. Dentre elas, estão as de proximidade, as de posição relativa ou absoluta e as de agrupamento, que lidam, por exemplo, com a ideia de que prateleiras podem suportar livros.



Figura 3.8: Modelo com 500 objetos distribuídos no cenário em 25 minutos, com pouca intervenção do usuário.

Fonte: ([XU; STEWART; FIUME, 2002](#))

As relações de agrupamento interferem inclusive na pós-edição: se as prateleiras são movidas os livros também são. Este recurso pode ser aproveitado para o caso de subestações, por exemplo, fazendo com que o movimento dos cabos seja solidário ao dos equipamentos associados.

### 3.2.1 Cidades

Em ([OR, 2001](#)), um modelo 3D de um fragmento de uma cidade é gerado partindo de uma planta baixa que descreve o posicionamento de edifícios, estradas e árvores, diferenciando estes elementos pela cor das linhas.

O uso de imagens de satélite na criação de cenários representativos correspondentes a cidades inteiras é tratado em ([POULLIS; YOU, 2009a](#)). A Figura 3.10 mostra um fragmento de um modelo virtual da cidade de Baltimore, criado usando esse processo. Trabalhos similares são apresentados em ([POULLIS; YOU; NEUMANN, 2008](#)), ([POULLIS; YOU, 2009b](#)) e ([POULLIS; YOU, 2011](#)), com o uso de dados de sensoriamento remoto nos níveis terrestre, sub-orbital (fotos aéreas) e orbital (imagens de satélite).



Figura 3.9: Fragmento de cidade gerado a partir de uma planta baixa

Fonte: ([OR, 2001](#))

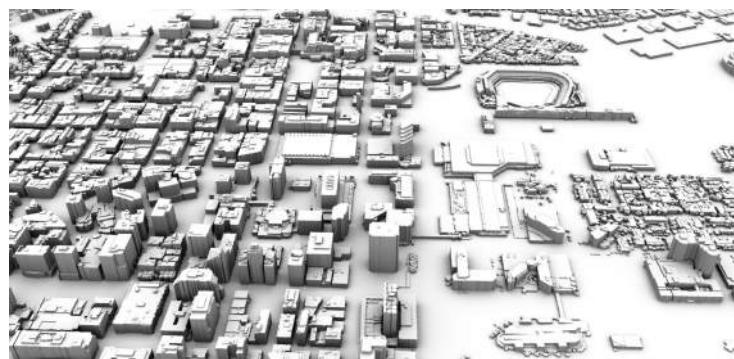


Figura 3.10: Modelo virtual do centro de Baltimore

Fonte: ([POULLIS; YOU, 2009a](#))

### 3.2.2 Edifícios

Diversos trabalhos têm explorado a extração e a interpretação de informações contidas em desenhos arquitetônicos de residências e edifícios, para fins de construção automática ou semi-automática dos ambientes 3D associados.

Em ([SO; BACIU; SUN, 1998](#)), tem-se um processo semi-automático para a geração de ambientes tridimensionais do interior de edifícios, a partir de plantas baixas. O processo é constituído pela extrusão de paredes, o mapeamento de objetos e a demarcação dos pisos e dos tetos. O mapeamento de objetos é a etapa de inserir objetos 3D pré-fabricados no mundo virtual da mesma forma que eles são especificados na planta baixa, em termos de posição, orientação e escala. Tal etapa é de suma importância na criação de mundos virtuais para subestações. No entanto, neste sistema, as primitivas 2D já devem estar agrupadas conforme os símbolos dos equipamentos, ficando a cargo do usuário a adequação da planta baixa.

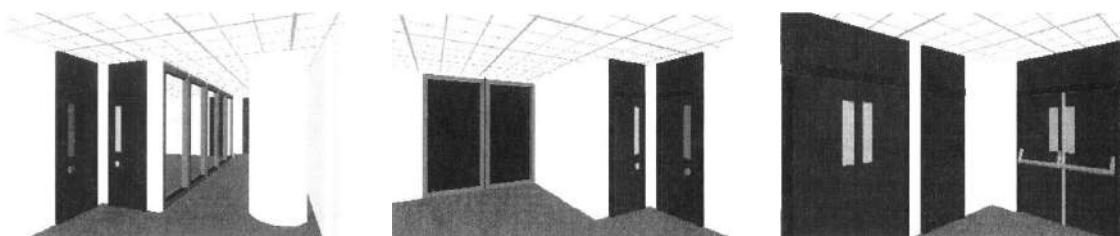


Figura 3.11: Modelo tridimensional de um edifício construído de forma semi-automática

Fonte: ([SO; BACIU; SUN, 1998](#))

O sistema apresentado em ([DOSCH; MASINI, 1999](#)), por sua vez, lida com a correta junção de modelos 3D de diferentes andares de um edifício (Figura 3.12), por meio de informações extraídas dos desenhos CAD associados. No caso dos ambientes de subestações, que possuem normalmente apenas um nível, pode-se usar de técnicas similares para unir modelos de pátios (segmentar por níveis de tensão) e prover o cenário completo. Um sistema completo para o processamento de plantas baixas rasterizadas é apresentado em ([DOSCH et al., 2000](#)).



Figura 3.12: Junção de modelos tridimensionais dos níveis de um prédio

Fonte: ([DOSCH; MASINI, 1999](#))

[Or \(2001\)](#) propõe o processamento de uma planta baixa vetorizada, eventualmente enriquecida com um código de cores que diferencia elementos como janelas, portas e luzes. O desenho arquitetônico e o modelo 3D associado são apresentados na Figura 3.13. As áreas amarelas correspondem às fontes de luz, as verdes às janelas salientes e as azuis a áreas abertas. A evolução do trabalho, no entanto, não usa mais nenhum código de cores na planta baixa ([OR et al., 2005](#)).

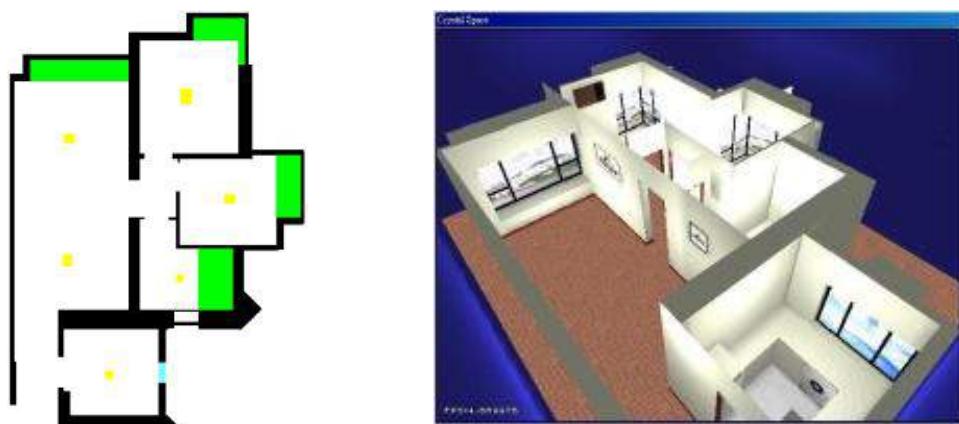


Figura 3.13: Processamento de planta-baixa com código de cores

Fonte: ([OR, 2001](#))

[Lu et al. \(2005a\)](#) fornecem sofisticados algoritmos para lidar com um pacote de desenhos arquitetônicos correlatos que unem informações dispersas em cotas, tabelas, textos anotativos,

entre outros. Uma vez processados, estes dados resultam em vistas ortogonais normalizadas, que são posteriormente usadas para a definição dos vértices e das faces do modelo 3D gerado.

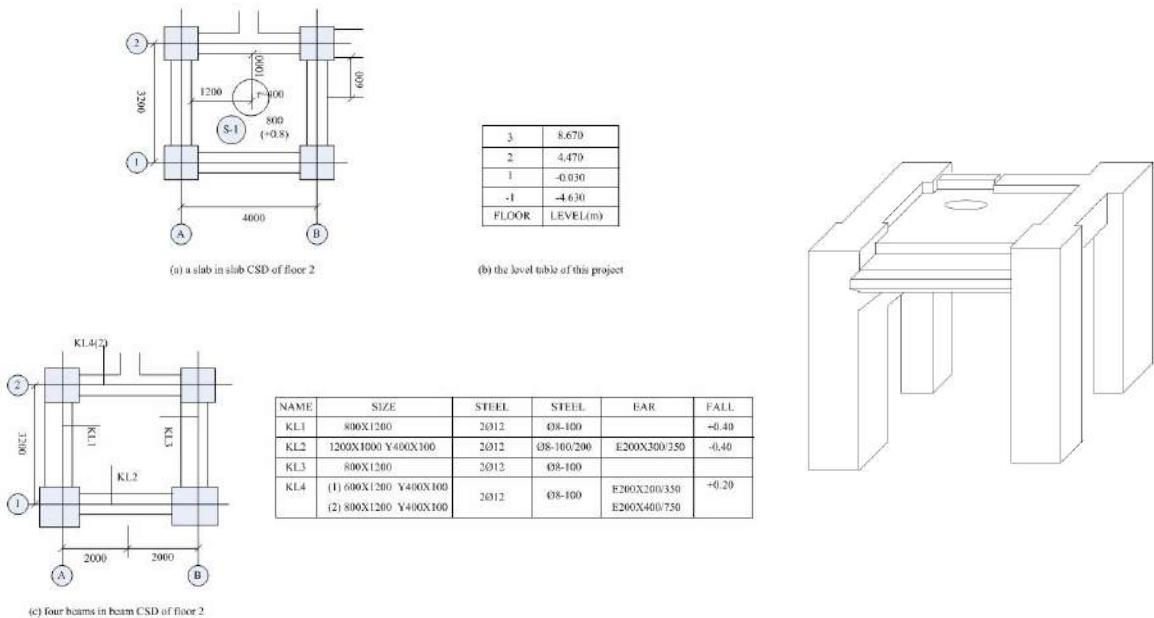


Figura 3.14: Processamento de informações dispersas em desenhos arquitetônicos

Fonte: ([LU et al., 2005a](#))

Os processos de extrusão de paredes e superposição de pisos também são tratados em ([HORNA et al., 2007](#)). Além disso, o trabalho trata da remoção de pequenas inconsistências na geometria do desenho e do levantamento de informações topológicas das estruturas do edifício. A inclusão de escadas necessita de intervenção do usuário, pois os símbolos usados para representá-las não são reconhecidos automaticamente.

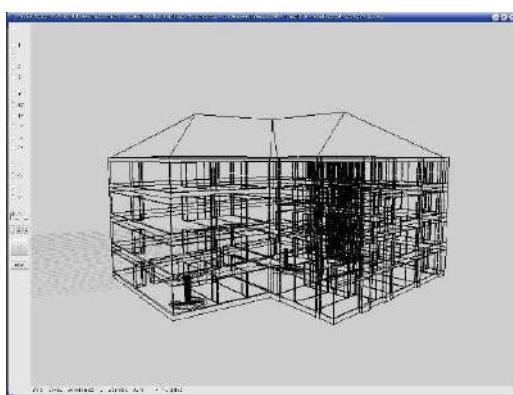


Figura 3.15: Modelagem 3D por reconstrução topológica

Fonte: ([HORNA et al., 2007](#))

A junção de modelos é igualmente abordada em ([YANG; LU; CAI, 2008](#)), onde vistas ortográficas de documentos arquitetônicos são processadas por algoritmos de reconhecimento de padrões para a modelagem do edifício. O processo conta com a extrusão de paredes e a detecção de escadas, portas e janelas.

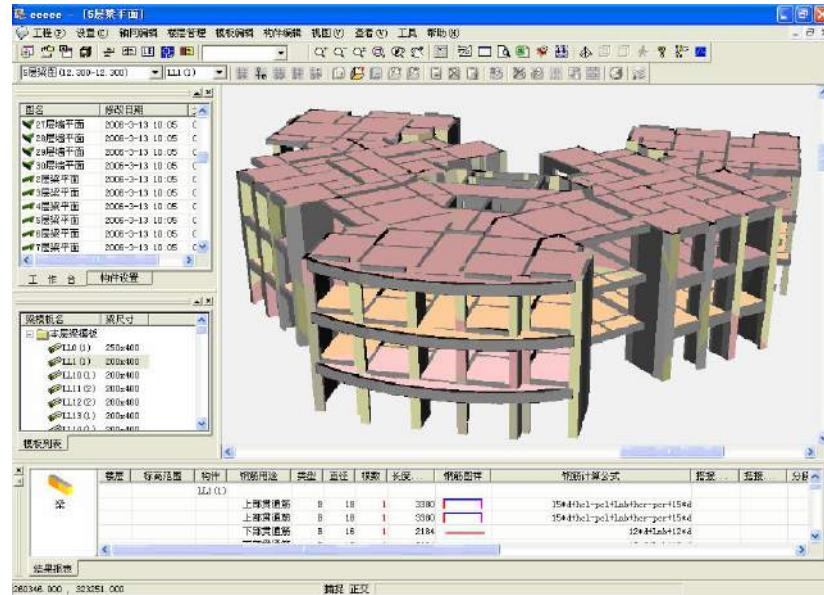


Figura 3.16: Modelagem 3D pela interpretação de vistas ortográficas arquitetônicas

Fonte: ([YANG; LU; CAI, 2008](#))

Outros trabalhos e técnicas que lidam com as diversas etapas de processamento de desenhos arquitetônicos visando à reconstrução em 3D são descritos em ([YIN; WONKA; RAZDAN, 2009](#)).

### 3.2.3 Subestações

Conforme tratado na seção 3.1, a geração semi-automática de modelos tridimensionais representativos de subestações já foi abordada em ([VEH et al., 1996](#)) e ([GUANGWEI; ZHTAO, 2009](#)). Os modelos gerados são ditos representativos, pois, apesar de respeitarem a topologia da rede elétrica, não se mantém fiéis à geometria do ambiente real, no que diz respeito às dimensões e distâncias dos equipamentos.

Já as abordagens baseadas em tratamento de imagens, como o caso apresentado em ([SIMOES et al., 2012](#)), possuem inherentemente altos níveis de ruído, o que pode ser significativamente prejudicial a algumas aplicações. Além disso, a estrutura interna dos equipamentos não é extraída nem inferida por esses processos, o que dificulta o uso em ambientes de treinamento como aquele descrito em ([CHANG et al., 2010](#)).

## 3.3 Reconhecimento de Símbolos

Diversas técnicas para o reconhecimento de símbolos em desenhos previamente vetorizados emergiram nas últimas décadas. O sistema GTX-5000, descrito em ([FILIPSKI; FLANDRENA, 1992](#)), é dotado de um sistema de inferência que processa bases de regras concebidas pelo usuário, específicas para cada símbolo. A solução adotada na época não era genérica, neces-

sitando de grande intervenção do usuário.

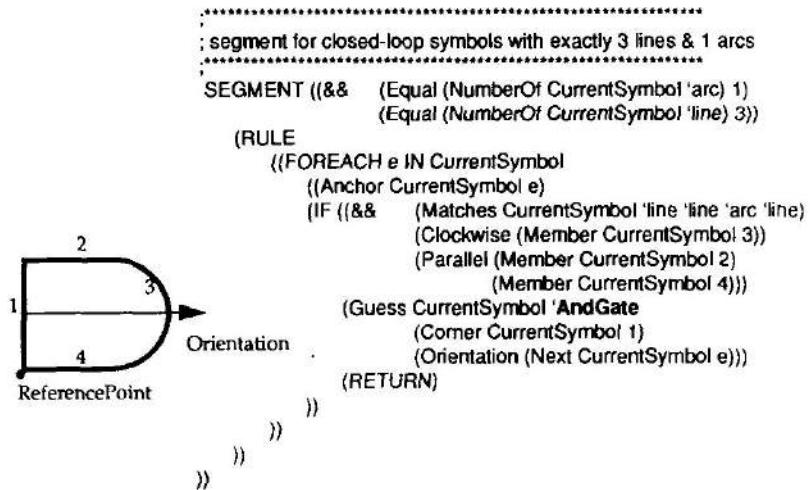


Figura 3.17: Reconhecimento de símbolos com base de regras manualmente inseridas

Fonte: ([FILIPSKI; FLANDRENA, 1992](#))

Os símbolos a serem detectados podem ser descritos em termos de invariantes algébricos, que são propriedades geométricas que permanecem inalteradas na presença de transformações no sistema de coordenadas. Para o caso de elipsóides, por exemplo, pode-se usar o comprimento dos eixos como um invariante algébrico para transformações Euclidianas, como translação e rotação. A razão entre o eixo maior e o eixo menor corresponderia, por sua vez, a um invariante imune também à operação de escala. Um método para obter os invariantes algébricos para o caso onde os objetos são representados por polinômios implícitos é descrito em ([KEREN, 1994](#)). São apresentados invariantes algébricos para polinômios implícitos de quarto grau, que representam uma vasta gama de formas geométricas.

A aplicação *Augurs* ([YANG et al., 1994](#)), desenvolvida como uma extensão ao software MicroStation®, permite a rápida inserção de símbolos em um desenho. Em vez de exibir uma tela de seleção de símbolos ao usuário, o sistema inicia automaticamente uma pesquisa com base nas ações daquele. Este é notificado quando uma porção do desenho, recém criada, se assemelha a um símbolo. As mais recentes entidades geométricas criadas pelo usuário são fornecidas a uma rede neural artificial, que levanta alternativas de símbolos pertinentes.

[Belongie, Malik e Puzicha \(2002\)](#) criaram um descritor de formas geométricas denominado *shape context*, capaz de medir a correspondência entre símbolos semelhantes. Uma forma é representada por um conjunto finito de  $n$  pontos amostrados dos contornos internos ou externos, previamente obtidos por um algoritmo de detecção de contornos. Para um dado ponto  $p$  escolido, calculam-se as coordenadas relativas dos outros  $n - 1$  pontos, devidamente normalizadas para garantir a invariância à escala. Adota-se um sistema de coordenadas log-polar, para aumentar a influência de pontos próximos e diminuir a influência de pontos distantes. A distribuição destas coordenadas é então computada em um histograma (*shape context*). O reconhecimento dos símbolos é feito pelo cálculo da comparação desses histogramas, por exemplo por meio do

teste de  $\chi^2$ . O método se mostrou eficaz e preciso no reconhecimento de letras e dígitos em imagens rasterizadas. Os trabalhos (DOSCH; MASINI, 1999) e (DOSCH et al., 2000), previamente citados, usam a técnica de *shape contexts*, que também é reutilizada e aprimorada em (SALVE; JONDALE, 2010).

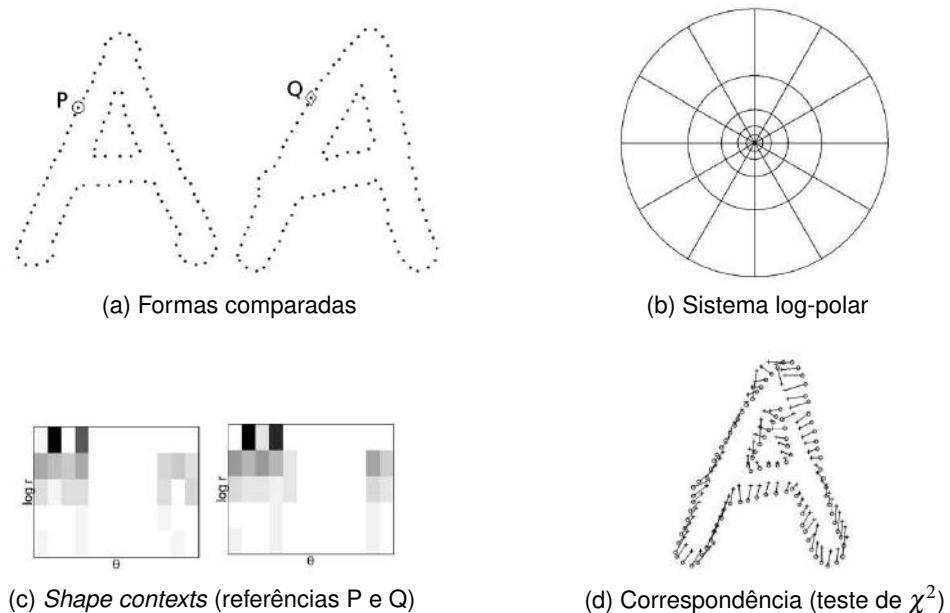


Figura 3.18: Comparação de formas extraídas de imagens rasterizadas por meio de *shape contexts*.

Fonte: Adaptado de (BELONGIE; MALIK; PUZICHA, 2002)

Para encontrar pontos correspondentes em imagens de objetos semelhantes, Berg, Berg e Malik (2005) sugerem a aplicação de descritores baseados em desfoque Gaussiano geométrico (Figura 3.19), o que confere ao sistema certa robustez a distorções geométricas. Os descritores são comparados usando normas  $L^2$ .



Figura 3.19: Uso de descritores baseados em desfoque Gaussiano geométrico  
Fonte: (BERG; BERG; MALIK, 2005)

Ah-Soon (1997), Ah-Soon e Tombre (2001) tratam do reconhecimento de símbolos tipicamente presentes em desenhos arquitetônicos, por redes de restrições. A abordagem se assemelha ao sistema GTX-5000, no sentido de que cada símbolo possui um conjunto específico de restrições, definido pelo usuário. No entanto, o processamento da rede de restrições garante ao sistema a habilidade de procurar todos os símbolos de uma vez, ao invés de testar candidatos

separadamente. A principal limitação está na linguagem de definição de restrições, inadequada para a representação de formas mais complexas. Outras técnicas para a detecção de paredes, vigas e lages são descritas em (XI et al., 2002) e (LU et al., 2005b), com a possível aplicação na reconstrução de modelos 3D, conforme discutido na seção 3.2.

Finalmente, a detecção de símbolos com invariância às três transformações básicas — translação, rotação e escala — aplicada em uma imagem vetorial, é tratada em (YANG; ZHAO; PAN, 2008). No método proposto, as entidades primitivas do desenho são inicialmente segmentadas de acordo com características como cor, tipo de linha e camada. Após o processo, são calculados descritores por momentos de Zernike para os grupos previamente separados. Estes grupos de entidades primitivas são então classificados de acordo com a semelhança das características extraídas, por meio de um algoritmo evolutivo bioinspirado denominado AntTree, que emula o comportamento de certas espécies de formigas capazes de se unir formando estruturas complexas para carregar grandes objetos ou realizar outras tarefas específicas. O trabalho também estuda o caso de desenhos arquitetônicos, visando o reconhecimento de símbolos que representam casas (Figura 3.20).

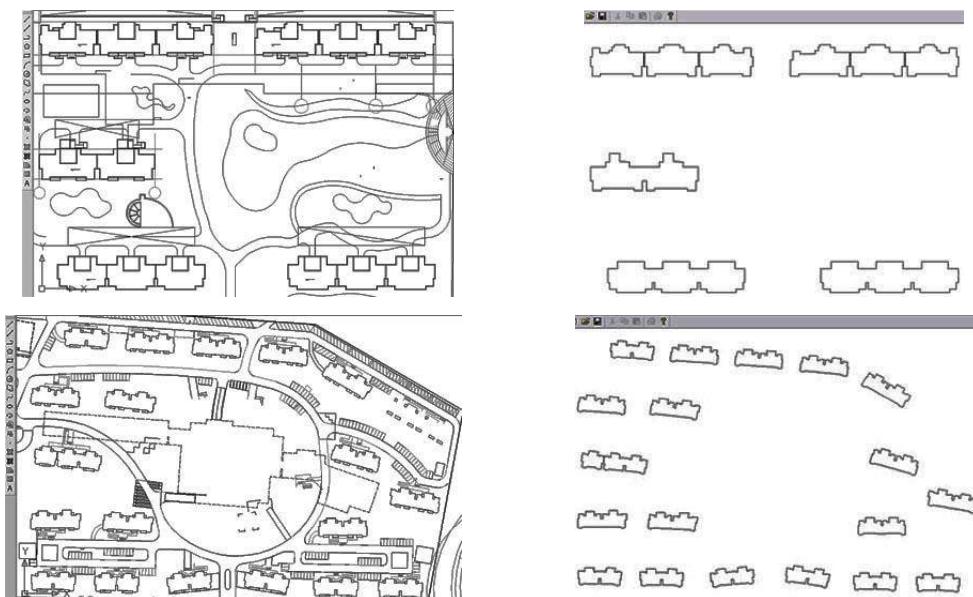


Figura 3.20: Algoritmo bioinspirado para a separação de símbolos em desenho CAD

Fonte: (YANG; ZHAO; PAN, 2008)

O processamento de desenhos CAD visando à extração de símbolos é igualmente explorado em (GUO; ZHANG; WEN, 2011) (Figura 3.21). As primitivas que compõem os símbolos são dispostas em um grafo cujas arestas representam relações para (i) interseção de linhas, (ii) paralelismo de linhas, (iii) linhas não paralelas e sem interseção<sup>1</sup>, (iv) interseção de arco e linha, (v) texto e linha e (vi) texto e arco. Para cada tipo de relação são definidos alguns atributos, como por exemplo, ângulo e razão entre comprimentos para a relação de interseção de linhas. Então, é utilizado um algoritmo de *template matching* para procurar relações similares nas entidades

<sup>1</sup>Aqui, entende-se por linha um segmento de reta

do desenho como um todo.

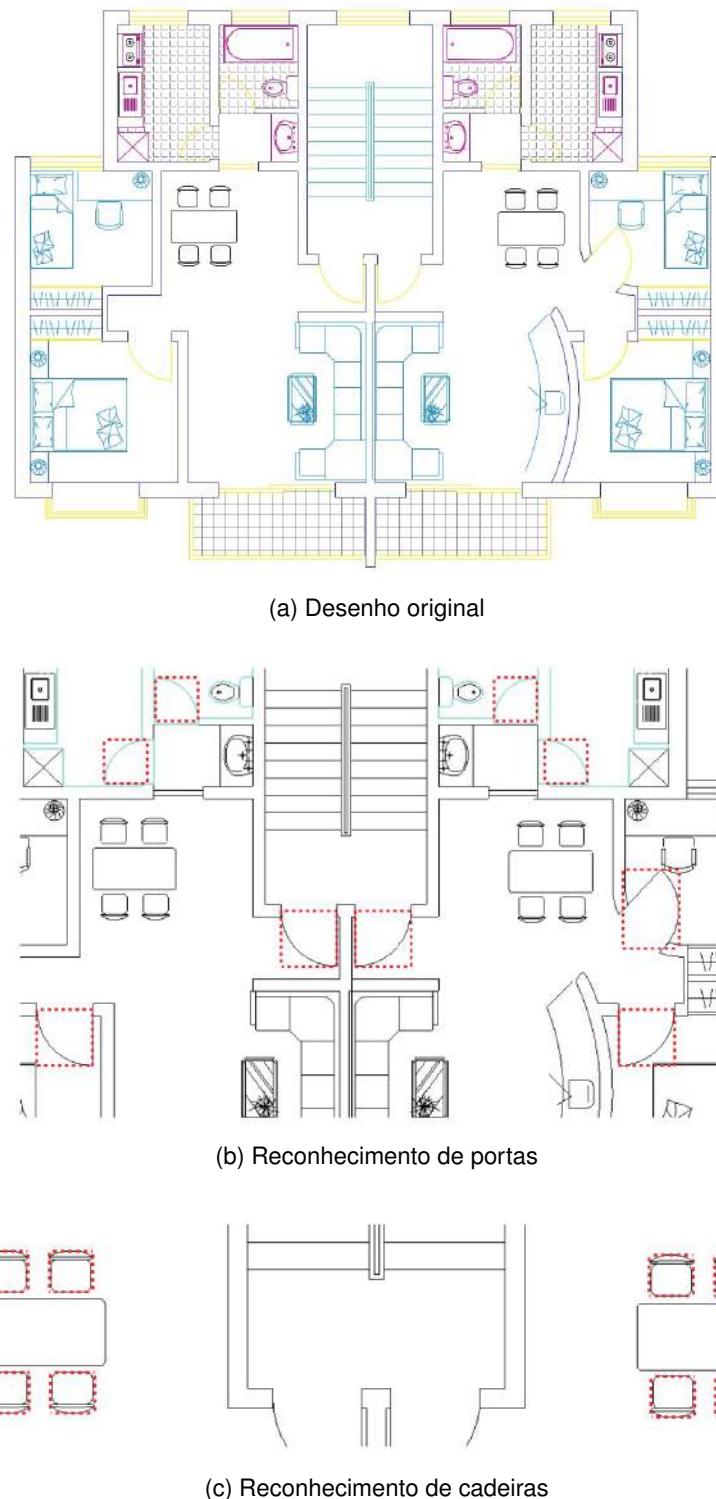


Figura 3.21: Reconhecimento de símbolos por grafos de relações geométricas  
Fonte: (GUO; ZHANG; WEN, 2011)

### 3.4 Resumo Comparativo dos Trabalhos

O Quadro 3.1 apresenta características dos principais trabalhos envolvendo a geração de modelos geométricos de subestações de energia elétrica. São elas:

- tipo de posicionamento – descreve o nível de intervenção do usuário (posicionamento manual ou semiautomático);
- documento de entrada – descreve qual artefato é usado como entrada do processo e
- fidelidade do modelo – classifica o modelo geométrico gerado quanto ao nível de compatibilidade com o modelo real

Quadro 3.1: Comparação de trabalhos da Seção 3.1

Trabalhos com ambientes virtuais para subestações			
Trabalho	Tipo de Posicionamento	Documento de Entrada	Fidelidade do Modelo
(VEH et al., 1996)	semiautomático	unifilar	representativo
(TAM et al., 1997)	semiautomático	unifilar	representativo
(ARROYO; ARCOS, 1999)	semiautomático	formulário	real
(GUANGWEI; ZHITAO, 2009)	semiautomático	grafo de cena	real
(QUINTANA; MENDOZA, 2009)	manual	nenhum	real

Alguns trabalhos que contemplam a geração automática de ambientes tridimensionais, por sua vez, são caracterizados no Quadro 3.2.

Os pontos analisados são:

- tipo de cenário – modalidade de cenários passíveis de geração;
- documento de entrada – informação de posicionamento ou relação entre objetos utilizada para o algoritmo de posicionamento e
- coordenadas absolutas – este item se refere à capacidade de inserção de coordenadas absolutas por parte do usuário ou pela interpretação de desenhos e imagens fiéis ao cenário real.

Quadro 3.2: Comparação de trabalhos da Seção 3.2

Trabalhos com a geração automática de ambientes tridimensionais			
Trabalho	Tipo de Cenário	Documento de Entrada	Coordenadas Absolutas
(COYNE; SPROAT, 2001)	genérico	narrativa textual	não
(LU et al., 2010)	genérico	narrativa textual	não
(XU; STEWART; FIUME, 2002)	genérico	lista de restrições	sim
(OR, 2001)	cidades	plantas baixas	sim
(POULLIS; YOU, 2011)	cidades	imagens de satélite	sim
(YIN; WONKA; RAZDAN, 2009)	edifícios	plantas baixas	sim

Os trabalhos referentes às diferentes técnicas de reconhecimento de símbolos são comparados pelo Quadro 3.3. As características avaliadas foram:

- estrutura da imagem – refere-se à entrada de dados, que pode ser uma imagem matricial, vetorial ou vetorizada<sup>2</sup> e
- técnica aplicada – técnica usada pelo reconhecedor.

Apenas o trabalho mais recente de cada técnica é apresentado.

Quadro 3.3: Comparação de trabalhos da Seção 3.3

Trabalhos com o reconhecimento de símbolos em imagens matriciais ou vetoriais		
Trabalho	Estrutura da Imagem	Técnica Aplicada
(SALVE; JONDHALE, 2010)	matricial	<i>shape contexts</i>
(AH-SOON; TOMBRE, 2001)	vetorizada	base de regras
(YANG; ZHAO; PAN, 2008)	vetorial	algoritmo bioinspirado
(GUO; ZHANG; WEN, 2011)	vetorial	grafo de relações

Finalmente, o presente trabalho pode ser contextualizado com as seguintes características:

- tipo de posicionamento – semiautomático (requer a definição prévia dos símbolos a serem buscados na planta);
- documento de entrada – arranjo físico (planta baixa) de uma subestação de energia elétrica em formato vetorial (CAD);
- fidelidade do modelo – real (geometricamente compatível com a subestação real associada) e
- técnica do reconhecedor – *template matching* com segmentação.

### 3.5 Considerações Finais

Este capítulo apresentou trabalhos que contemplam os seguintes tópicos:

- a aplicação de técnicas de Realidade Virtual em Subestações de Energia Elétrica para fins de treinamento ou controle supervisório;
- a geração automática de cenários tridimensionais e
- o reconhecimento de símbolos gráficos.

O procedimento proposto no presente trabalho comprehende, simultaneamente, os três tópicos supracitados, e é apresentado no próximo capítulo.

<sup>2</sup>imagem vetorial obtida a partir de uma imagem matricial, contendo um considerável nível de ruídos

Capítulo **4**

## Solução Proposta e Metodologia

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. Os componentes de *software* desenvolvidos permitem uma maior integração entre aplicações CAD e *engines* de construção de ambientes tridimensionais, bem como a rápida geração dos modelos de cabos. A aplicação do processo aqui descrito é avaliada no próximo capítulo.

### 4.1 Processo de Desenvolvimento

O processo de desenvolvimento de modelos virtuais de subestações possui várias etapas, algumas das quais consomem grande quantidade de tempo e recursos (QUINTANA; MENDOZA, 2009). A Figura 4.1 ilustra as etapas do método proposto para a construção desses ambientes, levando em consideração as ferramentas de automatização criadas.

As entradas do processo são um conjunto de fotos tiradas *in loco* e um conjunto de desenhos CAD com arranjos físicos e elétricos. O cenário completo, com alto grau de fidelidade geométrica, constitui a única saída. As principais tarefas envolvidas, bem como as ferramentas desenvolvidas para reduzir significativamente sua complexidade, são detalhadas nas seções seguintes.

### 4.2 Modelagem Geométrica dos Equipamentos

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 igualmente ser 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

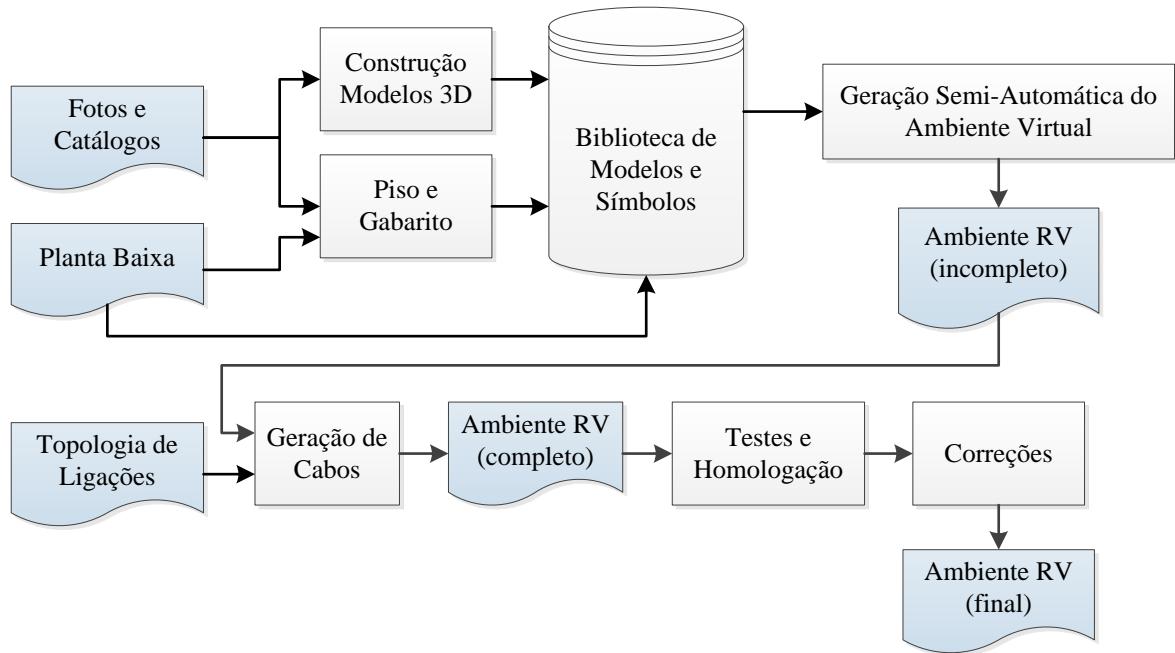


Figura 4.1: Arquitetura do Processo de Desenvolvimento

Fonte: GRVA UFU

pátios de 138 kV. Por isso, é pertinente a opção por modelagem manual realizada por equipe especializada, bem como a adoção de uma solução compromisso 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. A criação dos modelos individuais dos equipamentos visando desempenho não é o foco deste trabalho. No entanto, para o uso das ferramentas descritas nesse capítulo, algumas convenções devem ser adotadas:

**a) Escala do modelo** O *software* de modelagem deve ser configurado para utilizar o sistema métrico, com 1 unidade correspondendo a 1 metro. Uma vez que objeto for inserido na *engine* de RV, o fator de escala 1 deve corresponder ao tamanho real do equipamento.

**b) Localização do sistema de coordenadas** A origem do sistema de coordenadas (*pivot*) deve ser centralizada no plano XY (vista superior) e o nível  $z = 0$  deve corresponder ao nível do solo, conforme a Figura 4.2.

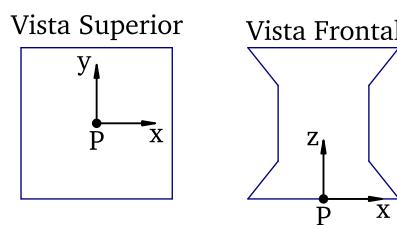


Figura 4.2: Convenção para a origem do sistema de coordenadas

Fonte: Autoria própria

**c) Orientação Padrão** Para aproveitar corretamente a informação obtida pelas plantas baixas, deve haver compatibilidade entre as noções de rotação nula no modelo 3D e no símbolo correspondente no ambiente CAD. Por omissão, considera-se como rotação zero a orientação em que o eixo longitudinal do equipamento é paralelo ao eixo  $x$ . A Figura 4.3 ilustra um dado equipamento na posição angular  $\theta = 0$ , tanto no modelo geométrico quanto no símbolo associado.

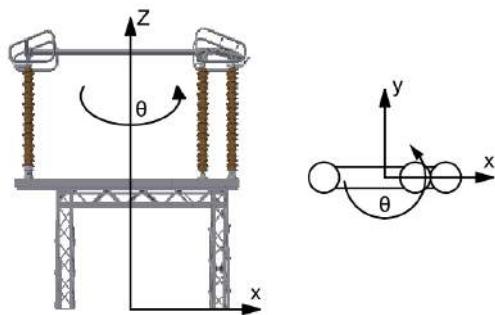


Figura 4.3: Compatibilidade entre as orientações dos modelos e seus símbolos

Fonte: Autoria própria

**d) Conexão para Cabos** Os conectores dos equipamentos são modelados simplesmente com esferas ou caixas, devidamente nomeadas segundo o formato “Conector $X$ ”, onde  $X$  é um sufixo numérico usado para diferenciar os diferentes conectores de um dado equipamento. Após a marcação dos pontos de conexão, o desenho dos condutores fica consideravelmente mais simples.

A Figura 4.4 mostra alguns dos equipamentos modelados.

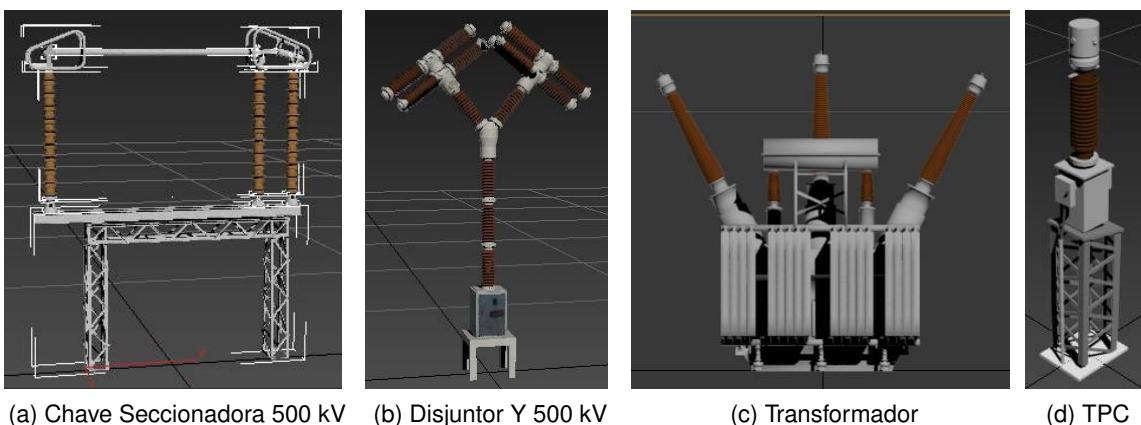


Figura 4.4: Equipamentos típicos de subestações

Fonte: GRVA UFU

## 4.3 Procedimento para a Modelagem do Cenário

A modelagem do cenário como um todo também poderia ser realizada com dispositivos *ad hoc* ou processamento de imagens, mas compartilha dos mesmos problemas e limitações. Conforme visto na seção 3.2, é possível aproveitar os desenhos dos arranjos físicos na construção de ambientes de Realidade Virtual. Isto já foi consideravelmente estudado para o caso de residências e prédios. Nesta seção será descrito um procedimento que prevê a adequação e o uso de plantas baixas no posicionamento dos equipamentos nos cenários de subestações. O processo como um todo é apresentado na Figura 4.5. Uma limitação imediata é que instâncias de um mesmo elemento, porém com alturas diferentes em relação ao solo, não são detectadas na planta baixa, a menos que a mesma já disponha de anotações ou convenções para representar essas situações. Entretanto, no caso particular de subestações, os equipamentos de um dado pátio estão, normalmente, nivelados, e a convenção para a localização da origem do sistema de coordenadas no nível do solo é suficiente.

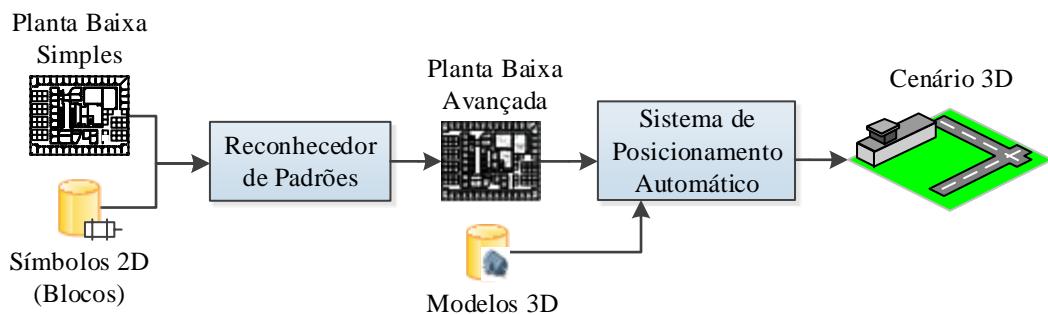


Figura 4.5: Processo semi-automático de geração do cenário

Fonte: Autoria própria

Um problema mais grave é observado em projetos antigos, digitalizados a partir de plantas em papel ou desenhadas em software CAD obsoleto. Essas imagens, por vezes, sofrem de um baixo nível de abstração, onde o documento é diretamente desmembrado como um conjunto de linhas, círculos, arcos e texto, não representando equipamentos como objetos compostos, quais sejam, blocos e símbolos. Isso dificulta consideravelmente a extração das coordenadas dos equipamentos para a inserção na cena. Um algoritmo para o reconhecimento desses símbolos é apresentado na Seção 4.3.1. Os diagramas de operação podem ser utilizados para complementar a planta baixa e prover informações como a topologia elétrica dos elementos, como abordado nos trabalhos (VEH et al., 1996; ARROYO; ARCOS, 1999). O processamento destes diagramas não está no escopo deste trabalho.

### 4.3.1 Reconhecimento de Símbolos

O primeiro passo para automatizar a construção do cenário é o processamento da planta baixa, visando à extração da posição dos equipamentos. Desenhos pouco estruturados são compostos apenas de entidades primitivas como linhas, círculos, elipses e arcos. Esta seção descreve

um algoritmo capaz de agrupar essas primitivas segundo a simbologia presente na própria planta, aumentando o nível de abstração de documentos antigos. Um fragmento representativo é apresentado na Figura 4.6, contendo algumas instâncias de disjuntores, chaves seccionadoras e transformadores de corrente.

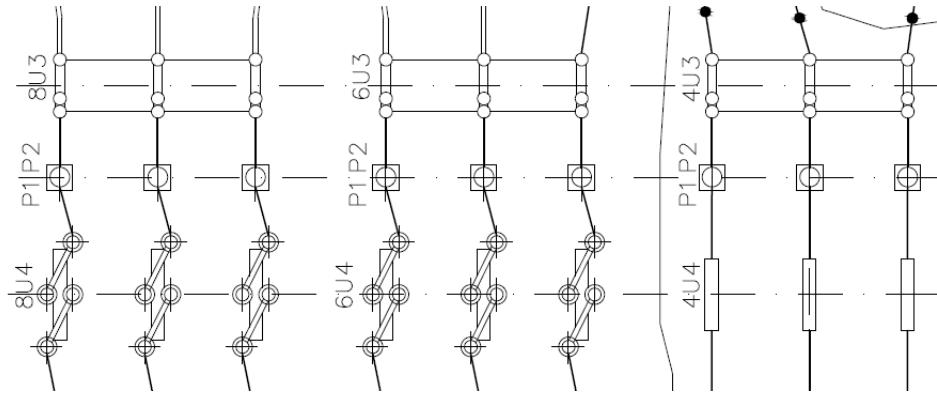


Figura 4.6: Fragmento de um desenho do arranjo físico de uma subestação

Inicialmente, um bloco (entidade composta) deve ser definido para cada elemento do conjunto de símbolos. Cada definição de bloco detém um sistema de coordenadas local, sendo a origem interpretada como ponto de inserção. Este deve ser compatível com a origem do modelo 3D associado. As entidades que compõem o bloco são descritas nesse sistema de coordenadas, conforme ilustrado na Figura 4.7 para o símbolo da chave seccionadora. O padrão é armazenado na forma de lista ordenada:

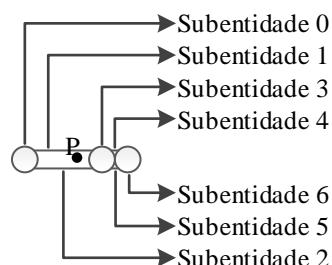


Figura 4.7: Definição de bloco – Origem do sistema de coordenadas e subentidades

Fonte: Autoria própria

O algoritmo aqui descrito itera sobre as entidades de uma região ou do desenho como um todo e as agrupa segundo as definições de bloco. O procedimento consiste, basicamente, em (i) procurar por candidatos válidos para a primeira subentidade e calcular as coordenadas do suposto ponto de inserção, (ii) iterar sobre as outras primitivas procurando pelas subentidades remanescentes, levando em consideração o ponto de inserção virtual computado previamente e (iii) substituir grupos de primitivas por instância de blocos, no caso afirmativo de reconhecimento. O algoritmo para o reconhecimento de um tipo de bloco na forma de pseudocódigo é

apresentado a seguir. Para fins de simplicidade, apenas linhas (segmentos de reta orientados) e círculos são considerados.

### variáveis

*docEntities* — lista de todas entidades da região

*blkEntities* — lista de subentidades do bloco

### procedimento RECONHECER(*docEntities*, *blkEntities*)

*matches*  $\leftarrow$  []

$\triangleright$  [] — Lista Vazia

*sub1*  $\leftarrow$  *blkEntities*[0]

**para todo** *docEntities* **como** *ent* **faça**

**se** CANDIDATOVALIDO(*ent*, *sub1*) **então**

$\triangleright$  verificação geométrica incompleta

adicone *ent* a *matches*

**se** *sub1* é círculo **então**

*x*  $\leftarrow$  *ent.center.X*  $-$  *sub1.center.X*

*y*  $\leftarrow$  *ent.center.Y*  $-$  *sub1.center.y*

**senão**

*x*  $\leftarrow$  *ent.P0.X*  $-$  *sub1.P0.X*

*y*  $\leftarrow$  *ent.P0.Y*  $-$  *sub1.P0.y*

**fim se**

**para todo** *blkEntities*[1..*last*] **como** *sub* **faça**

**para todo** *docEntities* **como** *outra* **faça**

**se** *outra*  $=$  *ent* **então**

**continue**

$\triangleright$  ignorar entidade já tratada

**fim se**

**se** COMPATÍVEL(*outra*, *sub*, *x*, *y*) **então**

$\triangleright$  verificação completa

adicone *outra* a *matches*

**sair do loop**

**fim se**

**fim para**

**fim para**

**se** *matches.length*  $=$  *blkEntities.length* **então**

inserir bloco em  $(x, y)$

remover do desenho os itens presentes em *matches*

**fim se**

limpar coleção *matches*

**fim se**

**fim para**

### **fim procedimento**

Se a primeira subentidade do bloco for um círculo, todos os círculos na planta baixa com raio compatível são considerados candidatos válidos. Transladando as coordenadas absolutas do

centro do círculo candidato, obtém-se o suposto ponto de inserção, necessário para o resto da verificação. O processo é similar para o caso de uma linha como primeira entidade da definição do bloco: são consideradas candidatas válidas todas as linhas do desenho com comprimento e direção compatíveis. Nesse último caso, no entanto, o suposto ponto de inserção é obtido transladando as coordenadas do ponto médio da linha. Trabalhando com o ponto médio ao invés de um dos extremos, o sistema fica independente da ordem em que os pontos foram armazenados na estrutura de dados associada, ou seja, não diferenciará um dado segmento  $\overline{AB}$  de um segmento  $\overline{BA}$ .

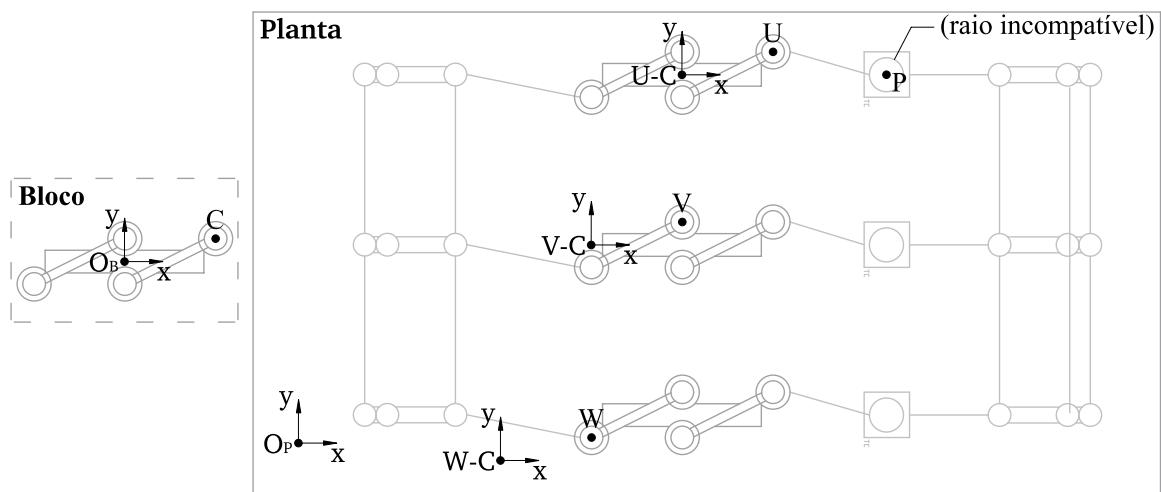


Figura 4.8: Primeira etapa do Reconhecimento de Símbolos

Fonte: Autoria própria

No exemplo da Figura 4.8, a primeira subentidade do bloco é uma circunferência centrada em  $C$ , com relação ao sistema de coordenadas posicionado em  $O_B$ . A origem do sistema de coordenadas local é também usada para definir o ponto de inserção de uma instância do bloco no desenho. A planta baixa, por sua vez, possui entidades descritas em outro sistema de coordenadas, com origem em  $O_P$ . O reconhecimento consiste no agrupamento das entidades da planta e no cálculo dos pontos de inserção associados a cada instância de bloco.

Na primeira etapa de verificação, descartam-se as linhas e as circunferências com raio incompatível, como a centrada em  $P$ . Para as entidades compatíveis (círculos correspondentes a  $U$ ,  $V$  e  $W$ ), as coordenadas do suposto ponto de inserção são então computadas ( $U - C$ ,  $V - C$  e  $W - C$ ). Uma vez que a primeira entidade foi encontrada, um novo sistema de coordenadas é estabelecido, com sua origem no suposto ponto de inserção. As entidades do desenho, então, são novamente analisadas, na expectativa de encontrar elementos compatíveis para cada subentidade remanescente. Além de verificar comprimento, direção e raio, esta segunda etapa também leva em consideração a posição do elemento. Cada grupo válido de subentidades encontrado no desenho corresponde a uma instância do equipamento. As entidades primitivas são então substituídas pelo bloco e o ponto de referência encontrado passa a ser o ponto de inserção do bloco. Os símbolos encontrados em plantas baixas possuem transformações geométricas de rotação. No entanto, devido à ortogonalidade dos arranjos, as rotações relevantes

são apenas 0, 90°, 180° e 270°. Para reconhecer elementos com rotação não nula, aplica-se a operação de rotação nas subentidades componentes do bloco antes de executar o algoritmo. Finalmente, ressalta-se que a comparação de valores do tipo ponto flutuante deve ser feita com cautela. Tendo em conta que todas as dimensões do bloco são da mesma ordem de grandeza, um limiar de erro absoluto simples pode ser usado:

$$perto(a, b) \rightarrow |a - b| < \varepsilon$$

O valor ideal de  $\varepsilon$  depende da escala do desenho. Caso a planta tenha sido obtida a partir da vetorização de imagens matriciais, este limiar deve ser alto o suficiente para corrigir erros inerentes aos processos de digitalização e vetorização.

Ainda, caso um símbolo seja subconjunto de outro, a ordem em que eles são reconhecidos passa a ser relevante. Se o símbolo menor for reconhecido primeiro, as primitivas a ele associadas serão substituídas por instâncias de bloco, o que impedirá o reconhecimento do símbolo maior posteriormente.

Finalmente, processos de segmentação (ver seção 2.3.3) podem ser aplicados para diminuir o espaço de busca, otimizando o algoritmo. Uma forma simples de segmentar símbolos alinhados horizontal e verticalmente consiste em efetuar varreduras por meio do deslocamento de uma janela. Cada varredura objetiva extrair as coordenadas de pontos estratégicos em uma dada direção. O algoritmo para a varredura vertical é apresentado a seguir.

### variáveis

$P1, P2$  — pontos com coordenadas limites da região

$h$  — altura da janela

### função SEGMENTARV( $P1, P2, h$ )

```

hasEntity ← false                                ▷ variável indicará presença de entidades
ySegs ← []                                         ▷ coordenadas extraídas
i ←  $P1_Y$                                          ▷ posição atual da janela
enquanto  $i < P2_Y$  faça
     $win_{P1} \leftarrow (P1_X, i)$                       ▷ ponto mais abaixo e mais à esquerda
     $win_{P2} \leftarrow (P2_X, i + h)$                   ▷ ponto mais acima e mais à direita
    se TEMPRIMITIVAS( $win_{P1}, win_{P2}$ ) então
        se  $\neg hasEntity$  então
             $hasEntity \leftarrow verdadeiro$                 ▷ ...mas as anteriores não
            adicione  $i$  à lista  $ySegs$ 
        fim se
    senão
        se  $hasEntity$  então
             $hasEntity \leftarrow falso$                       ▷ se a janela atual não contém primitivas...
            adicione  $i$  à lista  $ySegs$                   ▷ ...mas as anteriores sim
        fim se
    fim se

```

```

fim se
fim se
 $i \leftarrow i + h$ 
fim enquanto
 $pares \leftarrow ySegs$  tomados 2 a 2
retornar  $pares$ 
fim função

```

A função para a varredura em uma dada direção retorna pares contendo coordenadas dentro das quais existem entidades primitivas. Após a realização das varreduras vertical e horizontal, os pares coletados em cada uma são combinados para formar as regiões referentes a cada símbolo. Para que este algoritmo de segmentação tenha resultados satisfatórios, é necessário que a aplicação CAD opere apenas nas primitivas referentes aos símbolos, descartando portanto as linhas que representam cabos e conexões. Felizmente, desenhos CAD são concebidos em camadas, sendo possível trabalhar com uma camada exclusiva para os cabos.

#### 4.3.2 Sistema de Posicionamento Automático

Uma vez que a planta baixa estiver estruturada em blocos, é possível extrair a informação de posicionamento dos equipamentos para a posterior inserção no ambiente de Realidade Virtual. Isto pode ser feito por meio de um arquivo, aqui denominado *relatório de posicionamento*. Esta etapa é ilustrada pela Figura 4.9. Pode-se utilizar de formatos estruturados como o CSV (*Comma-separated Values*) ou um dialeto XML (*eXtended Markup Language*).

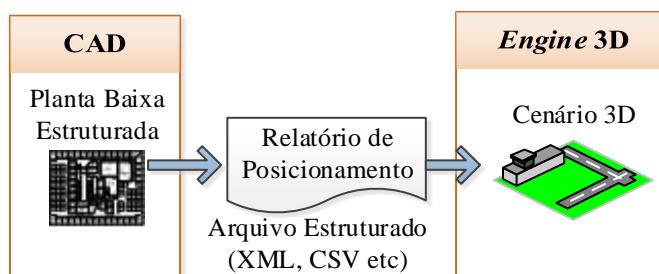


Figura 4.9: Inserção de equipamentos por meio de arquivo estruturado  
Fonte: Autoria própria

Uma possível estrutura para o arquivo CSV é:

$$NomeBloco,x,y,\theta$$

Nesse caso,  $x$  e  $y$  são as coordenadas do ponto de inserção e  $\theta$  é a orientação, conforme apresentada na Figura 4.3. Apesar desses campos serem suficientes para o processo de inserção de equipamentos na cena, a interoperabilidade com futuras aplicações pode justificar a estrutura alternativa:

$$NomeBloco,t_x,t_y,t_z,r_x,r_y,r_z,s_x,s_y,s_z$$

O relatório de posicionamento pode igualmente ser especificado com linguagens de marcação. O dialeto XML abaixo mostra uma possível estrutura:

```

1 <equipment type="NomeBloco">
2   <position x="tx" y="ty" z="tz" />
3   <rotation x="rx" y="ry" z="rz" units="degrees" />
4   <scale x="sx" y="sy" z="sz" />
5 </equipment>

```

Estes formatos compreendem todos os elementos da matriz de transformação. A translação (ponto de inserção) é dada pelos campos  $t_x, t_y, t_z$ . Se o *pivot* do modelo 3D estiver no nível do solo (Figura 4.2), teremos  $t_z = 0$  para todo o pátio. Subestações com pátios em diferentes alturas não são, portanto, tratadas no processo, necessitando de trabalho adicional no ambiente 3D. As rotações em torno dos eixos cartesianos são dadas pelas componentes  $r_x, r_y, r_z$ . A planta baixa só representa a rotação em torno do eixo  $z$ , portanto  $r_x = r_y = 0$ . Finalmente, caso a convenção de escala tenha sido respeitada, os últimos campos serão  $s_x = s_y = s_z = 1$ , supondo que tanto o ambiente CAD como a *engine* 3D trabalhem com dimensões especificadas em metros. Eventualmente, a escala pode ser usada para a facilitar a reutilização de certos modelos, como pórticos e estruturas. Enquanto a abordagem descrita na seção 4.2 do artigo (SO; BACIU; SUN, 1998) conta com a adaptação dos modelos 3D aos MODs (*Model Object Definitions*) da planta, a solução aqui proposta é baseada em convenções respeitadas tanto na atividade de definição dos blocos CAD como na modelagem tridimensional dos equipamentos.

Dispondo do arquivo estruturado, a *engine* 3D deve instanciar os equipamentos na cena apropriadamente. Para tanto, o nome atribuído a cada bloco deve ser idêntico ao nome do modelo 3D associado. A *engine* deve suportar a execução de scripts dentro do editor de cenários (não apenas em tempo de execução). Com isso, a inserção dos equipamentos se resume a iterar sobre os registros do relatório de posicionamento e aplicar a matriz de transformação com os parâmetros armazenados no arquivo. O modelo do piso é feito separadamente, mas contém um gabarito com as bases dos equipamentos (Figura 4.10).

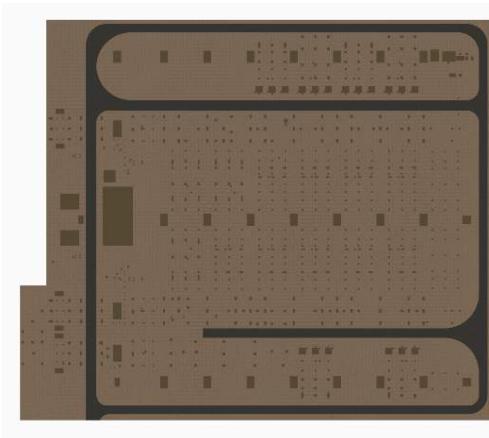


Figura 4.10: Modelo do piso de uma subestação com gabarito  
Fonte: GRVA UFU

O piso é manualmente inserido e alinhado na cena, servindo para confirmar o correto posicionamento dos mesmos. Alternativamente, o gabarito do piso propriamente dito pode aproveitar a informação do arquivo estruturado. Nesse caso, entretanto, o relatório também deve conter a largura e o comprimento total de cada bloco. Assim, cada base seria modelada como uma caixa, conforme esquematizado na Figura 4.11.

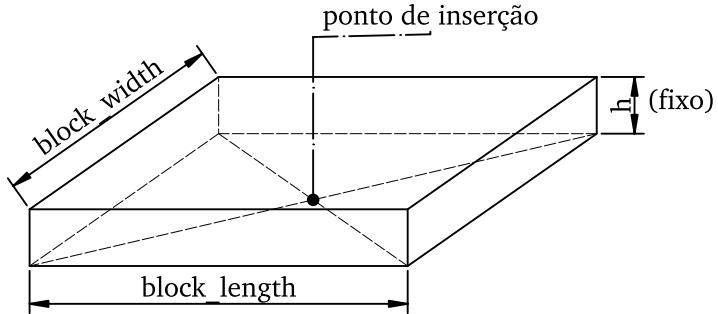


Figura 4.11: Base para um equipamento (gabarito do piso)

Fonte: Autoria própria

### 4.3.3 Desenho dos Condutores

Após a inserção dos equipamentos e o alinhamento do piso, um *script* no editor de cenários é então usado para auxiliar na criação dos cabos. Para tanto, o modelador informa dois pontos do mundo virtual para a conexão e especifica dois parâmetros: a curvatura da parábola e o diâmetro do condutor. O cabo é então desenhado e posicionado na cena. O processo é repetido até que todas as ligações elétricas tenham sido concluídas. Os pontos a serem selecionados são os conectores associados a *Dummy Objects* descritos na Seção 4.2. Isso garante a exatidão da posição dos extremos do cabo.

Com os extremos  $\vec{a}$  e  $\vec{c}$  e a curvatura  $u$  informados pelo usuário, um terceiro ponto no espaço,  $\vec{b}$  é computado. Partindo do ponto médio:

$$\vec{m} = \frac{\vec{a} + \vec{c}}{2}, \quad (4.3.1)$$

Subtrai-se da componente  $y$  uma quantidade proporcional à distância entre os pontos e à curvatura fornecida, ou seja:

$$\vec{b} = \begin{bmatrix} m_x \\ m_y - u \cdot \|\vec{c} - \vec{a}\| \\ m_z \end{bmatrix}. \quad (4.3.2)$$

A parábola é segmentada em  $n$  pontos. Para  $i \in [0, n-1]$ , um último parâmetro  $t$  é calculado:

$$t(i) = \frac{i}{n-1}. \quad (4.3.3)$$

Os pontos da parábola são finalmente definidos para cada valor de  $t$ :

$$\vec{p}(t, \vec{a}, \vec{b}, \vec{c}) = (1-t)^2 \cdot \vec{a} + 2 \cdot t \cdot (1-t) \cdot \vec{b} + t^2 \cdot \vec{c}. \quad (4.3.4)$$

O modelo do cabo é gerado com base nos pontos calculados, seja pela criação de sólidos de revolução, onde cada segmento gera um cilindro, ou por um renderizador de linha com espessura.

## 4.4 Implementação

As técnicas e algoritmos aqui apresentados foram implementados nos ambientes Autodesk AutoCAD® 2015 e Unity 3D® 4.

### 4.4.1 AutoCAD

Todo o processamento da planta baixa, notavelmente o reconhecimento de símbolos e a geração do relatório de posicionamento, ocorre dentro do pacote de software AutoCAD 2015. A programação pode ser feita em LISP (AutoLISP e VisualLISP), em C/C++ (ObjectARX) ou em qualquer linguagem suportada pela plataforma .NET da Microsoft. Para o desenvolvimento em LISP, o programa conta com um ambiente de desenvolvimento integrado, desde a versão 2000. Devido à quantidade de documentação disponível e à maturidade da API, optou-se pela codificação em LISP. A aplicação foi modularizada conforme o Quadro 4.1.

Quadro 4.1: Modularização da solução CAD2RV

Módulo(s)	Descrição
cad2rv	Inicialização do pacote
context	Armazenamento e restauração de configurações do AutoCAD
doclisp	Geração do manual do desenvolvedor
ds	Estruturas de dados simplificadas para entidades
dxf2csv e dxf2xml	Geração do relatório de posicionamento
gui	Janelas e diálogos da interface gráfica com o usuário
log	Funções para o registro de mensagens de <i>log</i> em arquivos
math	Funções matemáticas diversas
prim2blocks	Reconhecimento de símbolos
selections	Seleções personalizadas de entidades
segmentation	Segmentação de regiões
utils	Extensões diversas para o ambiente CAD
xmlwriter	Escritor de arquivos XML

Uma barra de ferramentas foi incorporada ao AutoCAD, dispondo algumas das ações necessárias para a geração do relatório de posicionamento descrito na seção 4.3.2 e a adequação de plantas antigas, em particular o reconhecimento de símbolos apresentado na

seção 4.3.1. As novas funcionalidades são acessadas tanto por comandos de teclado como pela barra de ferramentas, apresentada na Figura 4.12. O Quadro 4.2 descreve sucintamente a ação de cada comando.

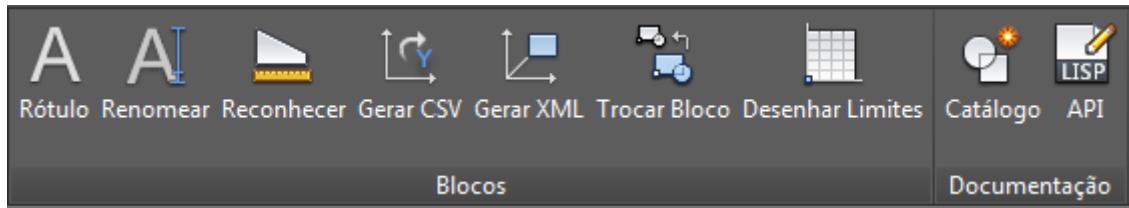


Figura 4.12: Novas ferramentas para o AutoCAD

Fonte: Autoria própria

Quadro 4.2: Principais comandos adicionados ao AutoCAD

Comando	Efeito
CRIARROTULO	Insere o nome de um bloco ao lado de seu símbolo
MUDARNOME	Fornece um novo nome para o bloco selecionado
RECONHECER	Converte primitivas em entidades compostas
EXPORTCSV	Gera o relatório de posicionamento no formato CSV
EXPORTXML	Gera o relatório de posicionamento no formato XML
TROCARBLOCO	Substitui blocos selecionados por instâncias de um outro bloco
DESENHARLIMITES	Desenha linha diagonal indicando limites de coordenadas da seleção
CATALOGO	Gera um catálogo de símbolos em HTML
NOVOEQUIP	Auxilia na criação de um novo bloco
DOCLISP	Gera ou atualiza o manual do desenvolvedor

#### 4.4.2 Unity 3D

A inserção dos equipamentos na cena, o desenho dos condutores e toda a funcionalidade oferecida pelo ambiente RV, fica a cargo da *engine* Unity 3D. Os scripts podem ser codificados em JavaScript ou C#, no ambiente MonoDevelop. Optou-se pela codificação em C#, devido à maior quantidade de ferramentas disponíveis para esta linguagem dentro da IDE.

##### Importação e Exportação de Equipamentos

A arquitetura do pacote de importação e exportação de equipamentos é apresentada na Figura 4.13. As classes EQUIPIMPORTER e EQUIPEXPORTER definem a interface padrão para os importadores e exportadores de equipamentos. A representação em XML, realizada pelas classes XMLSTATEIMPORTER e XMLSTATEEXPORTER, trabalha com outras informações além do posicionamento. Estas informações dizem respeito a outras funcionalidades do ambiente RV, como por exemplo caixas de colisão definidas para cada equipamento. O formato baseado em CSV abre ou salva apenas informações sobre posição, orientação e escala, com cada linha

correspondendo a um equipamento da cena. A persistência em CSV é implementada nas classes CSVSTATEIMPORTER e CSVSTATEEXPORTER. Todos esses elementos são instanciados e utilizados pela classe IMPORTEREXPORTERGUI, que provê a interface com o usuário. Estas classes só estão disponíveis no ambiente do editor de cenários, não acarretando em perda de desempenho em tempo de execução.

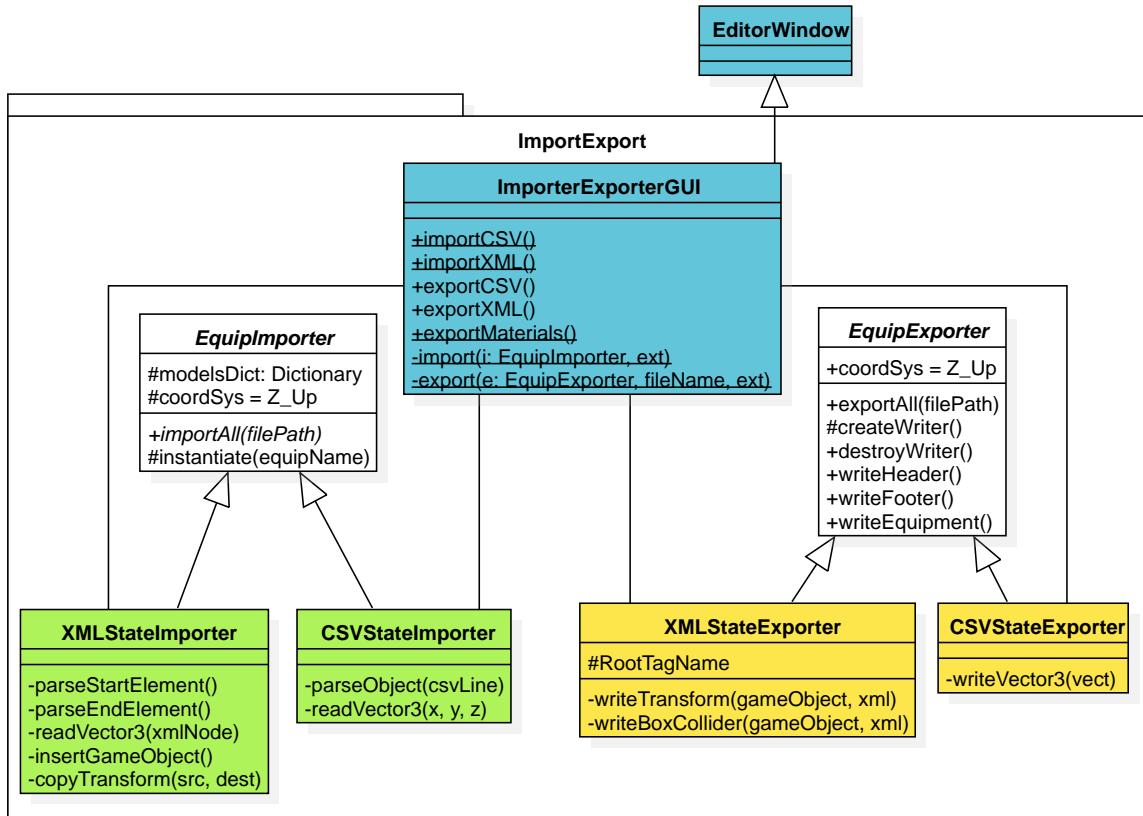


Figura 4.13: Arquitetura do pacote de persistência de equipamentos (importação e exportação)

Fonte: Autoria própria

A interface com o usuário para a importação e exportação de equipamentos se dá através da barra de menus do editor de cenários do Unity, na qual um novo menu foi incorporado (Figura 4.14). As caixas de diálogo padrão para a abertura e o salvamento de arquivos foram usadas.

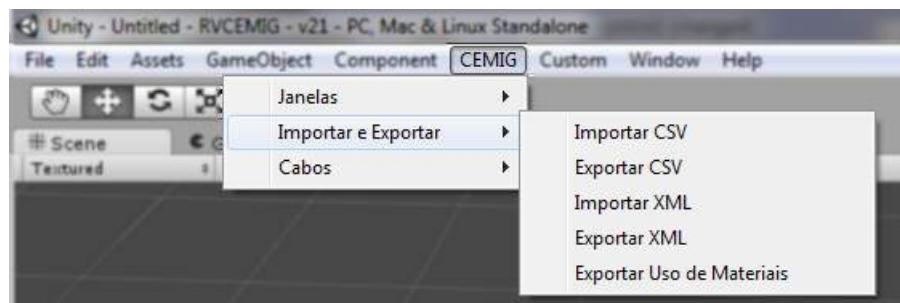


Figura 4.14: Interface para importação e exportação de equipamentos

Fonte: Autoria própria

### Desenho dos Condutores

O desenho dos condutores fica a cargo dos componentes CABLECREATORWINDOW e PARABOLA (Figura 4.15). O primeiro diz respeito à interface gráfica com o usuário para a obtenção dos parâmetros (Figura 4.16), enquanto o segundo efetua o cálculo descrito na Seção 4.3.3 e constrói o objeto com o auxílio de um LINERENDERER (tipo nativo do Unity 3D) com a espessura informada. Caso as convenções descritas na seção 4.2 tenham sido respeitadas, os objetos referentes aos conectores são selecionados para capturar as extremidades A e B de cada cabo.

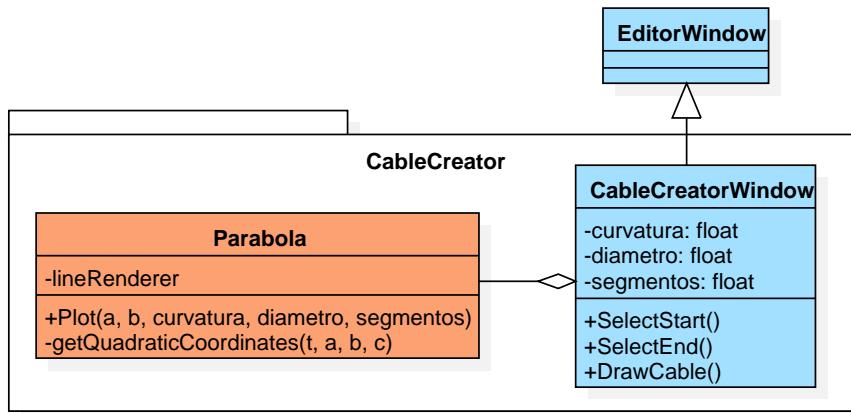


Figura 4.15: Arquitetura do pacote de desenho de condutores

Fonte: Autoria própria

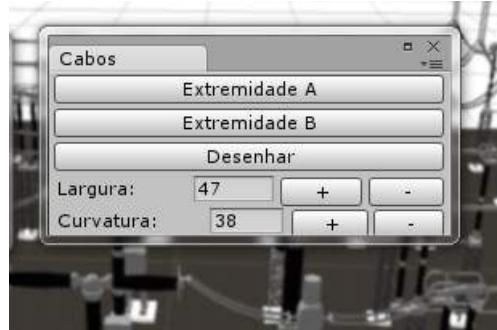


Figura 4.16: Interface para a construção de cabos

Fonte: Autoria própria

## 4.5 Considerações Finais

Neste capítulo, foi apresentado o procedimento proposto para viabilizar a construção em massa de cenários tridimensionais de subestações. O próximo capítulo descreve os resultados obtidos com a aplicação deste procedimento para alguns fragmentos de subestações reais.

# Capítulo 5

## Análise da Estratégia

### 5.1 Introdução

As extensões de *software* descritas neste trabalho foram aplicadas com sucesso na geração de diversos cenários referentes a subestações operadas total ou majoritariamente pela CEMIG Geração e Transmissão. Dentre eles, estão os de Emborcação, Jaguara, Juiz de Fora 1, Bom Despacho 3, Itabira 2, Santos Dumont, Neves, Barreiro e Nova Ponte. A Figura 5.1 mostra algumas capturas de tela dos ambientes gerados.

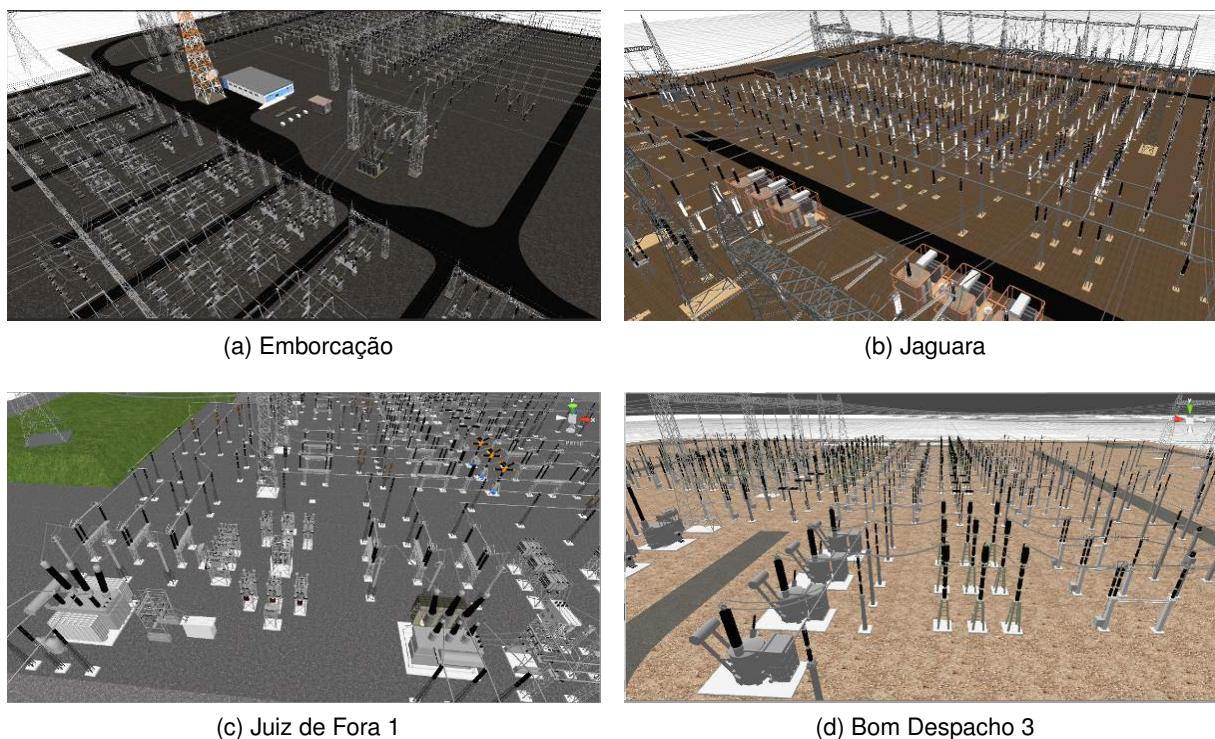


Figura 5.1: Cenários de Subestações  
Fonte: GRVA UFU

Nas próximas seções serão apresentadas as operações para a construção desses ambi-

entes, além de algumas medidas de desempenho das ferramentas concebidas e as principais limitações encontradas. Todos os testes foram realizados em um computador com a seguinte configuração:

- Processador Intel Core i5-3337U
- Memória RAM 2x4GB DDR3 1600MHz
- Sistema Operacional Microsoft Windows 7 Professional 64 bits
- AutoCAD 2015 64 bits
- Unity 3D 4.6.1
- GPU integrada Intel HD Graphics 4000

## 5.2 Ferramentas para o ambiente CAD

### 5.2.1 Adequação de plantas antigas

A adequação de desenhos antigos, com baixo nível de abstração, é feita com base nas ferramentas descritas na seção [4.4.1](#). A seguir são apresentadas as principais subetapas desta parte do processo.

#### a) Definições de Estados de Camadas

As entidades que compõem um desenho no AutoCAD são organizadas em camadas, cuja exibição pode ser convenientemente habilitada ou desabilitada. Elementos em camadas inativas não são levados em consideração pelos comandos de seleção do AutoCAD ou pelas funções definidas nos scripts de extensão. A primeira etapa na adequação de uma planta consiste em definir a exibição das camadas de modo a incluir apenas as entidades relevantes para a definição de blocos e posterior reconhecimento dos mesmos. A Figura [5.2](#) apresenta um fragmento de desenho após a redefinição da visibilidade das camadas. Este processo de configuração leva apenas poucos minutos (aproximadamente 5 min).

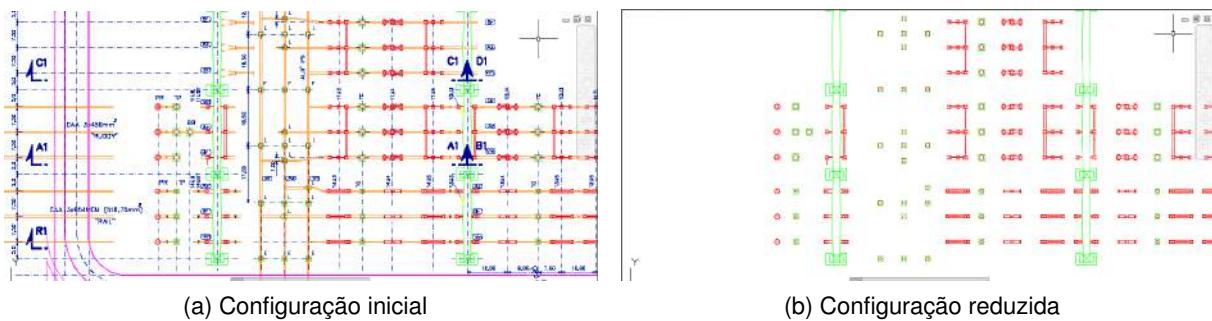


Figura 5.2: Definição de visibilidade das camadas

Fonte: Autoria própria

### b) Definição de Blocos

Para o reconhecimento de símbolos, os blocos associados devem ser previamente definidos, e para auxiliar na criação dessas definições de blocos, foi criado um comando NOVOEQUIP no AutoCAD, que opera em um conjunto de entidades selecionadas. Inicialmente, o usuário informa se deseja que uma linha diagonal seja desenhada para revelar os limites inferior esquerdo e superior direito do conjunto. O ponto médio desta linha pode ser usado como ponto de referência do bloco, respeitando à convenção da localização do sistema de coordenadas para a maior parte dos símbolos.

Em seguida, as entidades são passadas para uma camada específica “Equipamentos” e os atributos referentes às cores são modificados para que as mesmas sigam as definições da própria camada. A cor dos elementos é usada posteriormente no sistema de reconhecimento, como um retorno visual indicando o sucesso do reconhecimento dos símbolos. O bloco é então criado pela caixa de diálogo padrão do AutoCAD.

Após esta etapa, é dada ao usuário a oportunidade de criar um rótulo próximo ao equipamento, para fins de construção de uma legenda de símbolos.

Finalmente, no caso de um equipamento ser representado por mais de um símbolo, um caractere reservado (#) é adicionado ao nome dos blocos associados, permitindo que todos os símbolos correspondam ao mesmo modelo 3D (Figura 5.3).

- SAGO500kVSuporte#1
- SAGO500kVSuporte#2

Figura 5.3: Dois símbolos para um mesmo equipamento ou estrutura

Fonte: Autoria própria

O outro tipo de ambiguidade, ou seja, a existência de 2 equipamentos com um mesmo símbolo, é tratado na seção seguinte.

### c) Reconhecimento de Símbolos

O reconhecimento dos símbolos é uma fase crucial do processo de geração semi-automática dos ambientes a partir de desenhos antigos ou pouco estruturados. O desempenho do algoritmo descrito na seção 4.3.1 foi avaliado em alguns cenários de teste. O cenário número 2 foi criado pela triplicação das entidades do cenário 1, que corresponde a um dos vãos da SE de São Simão. Os outros três cenários são fragmentos das subestações de Jaguara, Nova Ponte e Barreiro.

O tempo de reconhecimento foi avaliado para o caso com menor intervenção do usuário: todos os blocos definidos no desenho são pesquisados e em todas as quatro rotações. A título de comparação, foram realizados testes com e sem segmentação, resultando nas medidas  $\Delta t_1$  e  $\Delta t_2$ , respectivamente. Observa-se que quanto maior a quantidade de blocos, maior a discrepância entre as duas abordagens. A Tabela 5.1 mostra os cenários de teste e os tempos de reconhecimento associados.

Tabela 5.1: Avaliação de desempenho do reconhecedor de símbolos

Cenário	SE (Fragmento)	Blocos	Linhas	Círculos	Arcos	$\Delta t_1$	$\Delta t_2$
1	São Simão	28	626	45	28	7,16s	17,92s
2	São Simão	84	1866	135	84	18,32s	2min 45,58s
3	Jaguara	42	397	246	0	11,24s	18,40s
4	Nova Ponte	72	735	396	0	9,71s	1min 41,62s
5	Barreiro	386	946	180	466	17,21s	3min 12,00s

A seguir, serão apresentados alguns casos específicos e limitações deste processo. O algoritmo de reconhecimento foi adaptado para certas inconsistências encontradas em alguns desenhos. Por padrão, um bloco só substitui um grupo de primitivas se sua definição geométrica for inteiramente detectada nesse grupo.

Uma opção alternativa é exigir que uma certa porcentagem da quantidade de primitivas seja detectada, ou seja, um bloco pode ser inserido mesmo se todos os elementos que o constituem não forem encontrados. A vantagem dessa abordagem é que, caso algumas entidades de um dado símbolo tenham sido corrompidas por algum motivo, ainda assim é possível aplicar o algoritmo. Em contrapartida, o método estatístico apresenta duas inconveniências:

1. se a tolerância aplicada for muito alta, o algoritmo reconhece símbolos erroneamente e
2. por não parar o laço de repetição quando um elemento do bloco não é encontrado, é significativamente mais lento que a abordagem original.

A maior limitação do algoritmo de reconhecimento, contudo, está na ineficiência ao lidar com símbolos com um número exagerado de primitivas. Um dos símbolos usados para representar um disjuntor de 500kV da SE de São Simão (Figura 5.4), por exemplo, contém 1062 linhas, 217 arcos, 6 círculos, 14 elipses e 12 *splines*. Após uma otimização por meio do comando

padrão OVERKILL do AutoCAD, o símbolo continua consideravelmente complexo: 792 linhas, 14 elipses, 5 círculos, 171 arcos e 12 *splines*. O tempo gasto para reconhecer uma única instância foi de 44 segundos para o caso não otimizado e 36 segundos para o grupo otimizado. Para esses casos, optou-se pela inserção manual dos blocos.

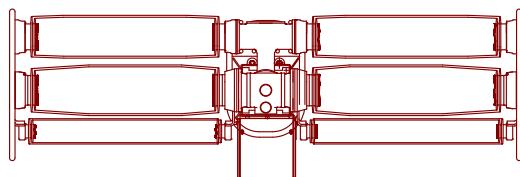


Figura 5.4: Símbolo complexo para um disjuntor de 500kV

Fonte: Autoria própria

Outra limitação significante da estratégia adotada é o caso onde a definição de um símbolo é um subconjunto de outra. Nesse caso, a ordem em que os blocos são tomados para o reconhecimento passa a ser importante. Para contornar essa limitação, durante a execução do comando RECONHECER, as definições de blocos selecionadas são processadas por ordem decrescente do número de primitivas.

Apenas a geometria dos símbolos são levados em consideração. Ao descartar informações como cores, espessura de linha ou camada original das primitivas, o reconhecedor não é afetado por eventuais inconsistências no desenho. Além disso, não foi constatado nenhum caso de símbolos que se diferenciam apenas por esses outros atributos.

Para este caso de plantas baixas de subestações, reconhecedores com invariância à escala podem não ser adequados, tendo em vista que alguns símbolos diferenciam equipamentos apenas pela escala. A Figura 5.5 mostra os símbolos correspondentes a dois transformadores de corrente extraídos da planta da SE de São Gotardo, diferenciados apenas pela escala.

- SAGO500kVTC1
- SAGO500kVTC2

Figura 5.5: Símbolos que se diferenciam apenas pela escala

Fonte: Autoria própria

Finalmente, para auxiliar no caso de dois ou mais equipamentos serem representados pelo mesmo símbolo, foi concebido um comando que efetua a troca de instâncias de blocos por outros, preservando as matrizes de transformação (posição, orientação e escala). A resolução dessas ambiguidades é feita manualmente pelo usuário.

## 5.2.2 Geração do Relatório de Posicionamento

A geração do relatório de posicionamento, por meio dos comandos EXPORTXML e EXPORTCSV, é a última parte do processo ainda dentro do ambiente CAD. Esses comandos solicitam ao

usuário uma região de interesse, sendo assim possível exportar as informações de todo o desenho ou apenas de um pátio. O tempo despendido nesta etapa é insignificante, como se pode observar na Tabela 5.2.

Tabela 5.2: Tempo para a geração do relatório de posicionamento

Subestação	Blocos	$\Delta t_{CSV}$ [ms]	$\Delta t_{XML}$ [ms]
São Gotardo	906	120	760
São Simão	438	60	360
Emborcação	806	130	700
Jaguara (500kV e 138kV)	1032	180	620

## 5.3 Ferramentas para a engine 3D

### 5.3.1 Importação do Relatório de Posicionamento

Os relatórios de posicionamento previamente gerados dentro do ambiente CAD são processados pela engine 3D para a realização do posicionamento em massa dos equipamentos. Durante essa etapa, o ambiente 3D pode ser enriquecido com outras informações, além do posicionamento. Em particular, a API do Unity 3D fornece meios de criar componentes especiais, destinados à detecção de colisões físicas, respeitando a forma do modelo 3D associado. A criação deste componente, aqui chamado *Collider*, em tempo de importação dos objetos, foi igualmente avaliada. O tempo gasto pelo Unity 3D na importação de alguns objetos é apresentado na Tabela 5.3. Como se pode observar, esta etapa é extremamente rápida para o caso sem a criação de *Colliders*, não impactando o processo de desenvolvimento do ambiente RV. Ressalta-se que o tempo de importação está fortemente associado a vários fatores, como a quantidade de modelos 3D envolvidos, a quantidade de polígonos de cada um e as definições de materiais e texturas etc.

Tabela 5.3: Tempo para a importação do relatório de posicionamento

Teste	Blocos	$\Delta t_{CSV}$	$\Delta t_{XML}$	$\Delta t_{COLLIDERS}$
1 (Emborcação)	1512	483ms	510ms	69,628s
2 (Santos Dummont)	765	210ms	240ms	8,099s
3 (Juiz de Fora)	1177	416ms	460ms	20.868s
4 (Nova Ponte)	597	190ms	200ms	9.788s

O caractere especial “#”, usado na fase da definição dos blocos para um dos casos de ambiguidade, é levado em consideração durante a importação. Para os dois isoladores de pedestal da Figura 5.3, por exemplo, são criadas duas instâncias do modelo SAGO500kVSuporte.

### 5.3.2 Geração de Cabos

Uma vez que os conectores foram modelados, conforme a convenção da seção 4.2, os cabos são criados por meio de uma ferramenta *ad hoc*. O usuário ajusta os parâmetros de curvatura e diâmetro e então seleciona os extremos do cabo, pelos métodos definidos por padrão na *engine* 3D. O processo é repetido para cada conexão. Nesta seção a criação de cabos para um vão, trifásico, é avaliada. A Figura 5.6 mostra o cenário em questão. A cor dos cabos foi propositalmente alterada para melhor visualização.

O tempo necessário na criação desses cabos é apresentado na Tabela 5.4. Os tempos foram medidos separadamente para cada fase. Não foi usado nenhum recurso para a duplicação de objetos existentes: todos os cabos foram criados individualmente pela ferramenta. O maior tempo para a fase A é justificado pela inexperiência do usuário com a ferramenta. É importante ressaltar que a planta baixa, por si só, não contém toda a informação necessária para a criação dos cabos, omitindo alguns detalhes da conexão de equipamentos com os barramentos, bem como conexões redundantes<sup>1</sup>.

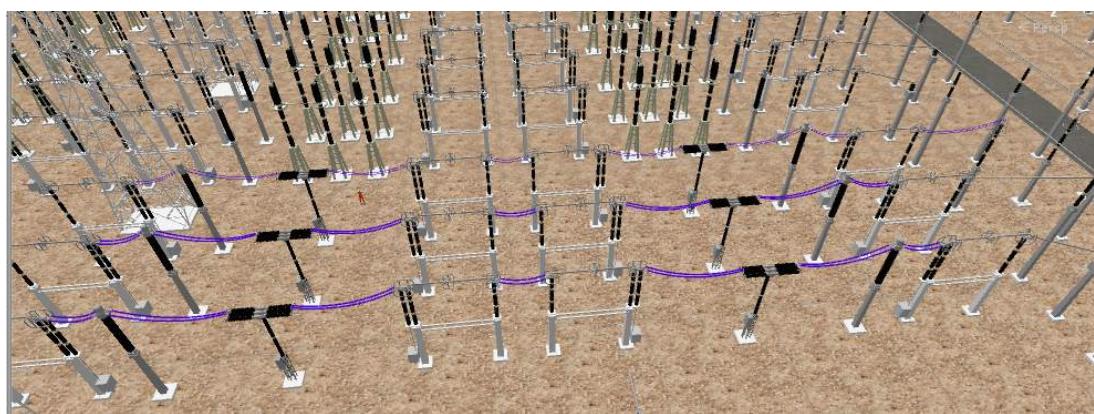


Figura 5.6: Cabos gerados para um vão do pátio de 500kV de Bom Despacho

Fonte: Autoria própria

Tabela 5.4: Tempo para a criação de cabos

Fase	Tempo
A	4min 26,54s
B	3min 22,51s
C	3min 30,09s
<b>Total</b>	<b>11min 18,14s</b>

<sup>1</sup>Sobretudo nos níveis de tensão mais elevados, as conexões são duplicadas, o que implica na divisão da corrente e, consequentemente, possibilita a redução no diâmetro dos condutores.

## 5.4 Convenções para novas plantas e novos modelos 3D

Diante da necessidade de incorporar a geração do relatório de posicionamento em novos projetos de subestações, as seguintes convenções podem ser adotadas:

- padronização da simbologia dos equipamentos, com um símbolo por equipamento e um equipamento por símbolo;
- definição de uma camada exclusiva para os símbolos dos equipamentos, sem a presença de entidades referentes à construção civil<sup>2</sup>, conexões, anotações, cotas e outros elementos textuais;
- uso de entidades compostas (blocos) para cada equipamento e
- localização do sistema de coordenadas para a definição do bloco e orientação padrão conforme exposto na seção 4.2.

Essas medidas aceleram consideravelmente o processo de construção do ambiente de Realidade Virtual, por eliminar o pré-processamento da planta. Além disso, a geração de cabos pode ser facilitada se os cabos estiverem em uma camada separada e se as espessuras das linhas no desenho forem proporcionais à espessura dos respectivos cabos.

As convenções para a modelagem individual dos equipamentos, conforme descritas na seção 4.2, foram suficientes para a maior parte dos casos. Contudo, em alguns casos, algumas adaptações foram necessárias. O ponto de inserção, por exemplo, não pode sempre ser definido como um centróide localizado no ponto médio dos limites de coordenadas envolvidos. Conforme ilustrado na Figura 5.7, em alguns casos é preferível que o ponto de inserção seja convenientemente localizado para melhores resultados no posicionamento automático. Os pontos azuis correspondem às duas abordagens para a definição do ponto de inserção.

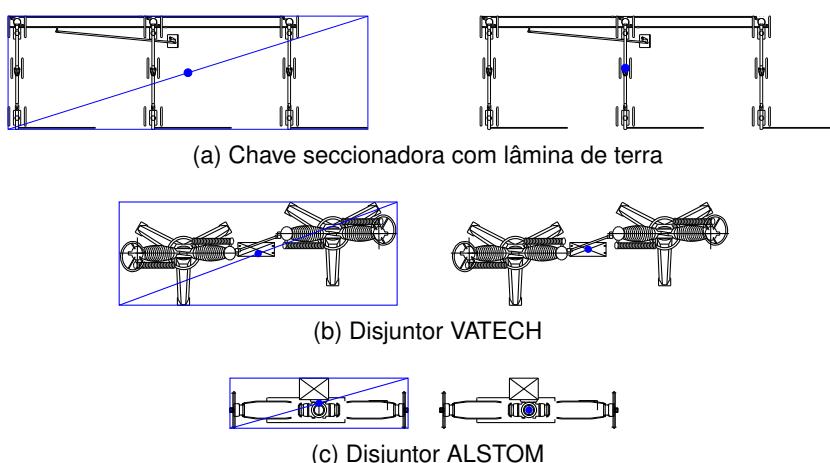


Figura 5.7: Problemas com a localização do sistema de coordenadas  
Fonte: Autoria própria

<sup>2</sup>os pórticos são uma exceção, podendo ser posicionados automaticamente, da mesma forma que os dispositivos

# Conclusões e Trabalhos Futuros

## 6.1 Conclusões

Um editor de cenários tridimensionais apresenta certa ineficiência na tarefa de posicionar corretamente equipamentos e estruturas de uma subestação. Com exceção de pórticos, barramentos e cabos, os componentes do cenário estão no nível do solo. Isto torna possível trabalhar apenas em duas dimensões, contexto no qual os ambientes CAD são mais produtivos. Ainda, a vista em perspectiva, por vezes, engana o usuário, dificultando o posicionamento exato. Finalmente, os símbolos de um diagrama constituem estruturas de dados mais leves que instâncias de modelos tridimensionais, sobretudo quando estes contém um alto número de polígonos.

As ferramentas propostas neste trabalho se mostraram satisfatórias e adequadas para a tarefa de aproveitar a informação das plantas baixas na construção dos cenários correspondentes. No entanto, estes documentos não representam integralmente todos os aspectos construtivos das subestações, notavelmente no que diz respeito às ligações entre equipamentos e barramentos. Os scripts de criação de cabos concebidos para o Unity 3D possibilitam que o cenário seja completado de forma relativamente eficiente.

## 6.2 Trabalhos Futuros

Uma vez que existem arranjos típicos para os barramentos de uma subestação, uma possível evolução deste trabalho consiste em aumentar ainda mais o nível de abstração do documento CAD da planta baixa, agrupando os equipamentos em vãos. Isto pode ser feito pela criação de blocos cujas definições fazem referência a outros blocos. Nesta abordagem, um vâo seria um bloco contendo instâncias de equipamentos posicionados segundo um dado sistema de coordenadas local e convenientemente transladados na ocasião da montagem de cena. A principal contribuição seria a possibilidade de desenhar os cabos em um vâo e então replicá-los em outros vãos, topologicamente compatíveis.

Outro estudo de relevância é a associação, tanto dos modelos 3D como dos símbolos 2D

correspondentes, com os sistemas integrados de gestão empresarial (ERP – *Enterprise Resource Planning*). Ferramentas adicionais poderiam ser incorporadas ao ambiente CAD para buscar o nome das instâncias de equipamentos no sistema de informações da companhia, o que facilitaria a conexão com o sistema SCADA. Esta extensão, apesar de não estar envolvida na modelagem geométrica do cenário, é de grande valia para a modelagem comportamental, na implementação das funcionalidades de simulação, operação e controle supervisório.

Conforme discutido na seção 4.3, os diagramas unifilares de operação podem complementar as informações da planta baixa, provendo os dados topológicos da rede elétrica e, consequentemente, possibilitando um maior nível de automação no processo de geração de cabos.

Ainda, desde que as convenções de modelagem e desenho CAD sejam respeitadas, faz-se possível conceber um maior nível de integração entre a *engine* 3D e o ambiente CAD: técnicas de comunicação entre processos (IPC – *Inter-process communication*) podem ser aplicadas, eliminando a necessidade da geração de relatórios de posicionamento e causando a impressão de que os dois ambientes são apenas editores diferentes para o mesmo projeto. Isto significa que as inserções, edições ou supressões de equipamentos efetuadas em um ambiente poderiam repercurtir automaticamente no outro, desde que as APIs o suportem.

Finalmente, as técnicas aqui descritas podem ser avaliadas ou adaptadas para outras aplicações de Realidade Virtual ou Computação Gráfica envolvendo cenários tridimensionais com elementos rigorosamente posicionados segundo alguma especificação.

# Referências Bibliográficas

- AH-SOON, C. A constraint network for symbol detection in architectural drawings. In: *Graphics Recognition, Algorithms and Systems, Second International Workshop, GREC'97, Nancy, France, August 22-23, 1997, Selected Papers*. [S.l.: s.n.], 1997. p. 80–90.
- AH-SOON, C.; TOMBRE, K. Architectural symbol recognition using a network of constraints. *Pattern Recogn. Lett.*, Elsevier Science Inc., New York, NY, USA, v. 22, n. 2, p. 231–248, fev. 2001. ISSN 0167-8655. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1016/S0167-8655\(00\)00091-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0167-8655(00)00091-X)>.
- ANZAI, Y. *Pattern recognition and machine learning*. Boston: Academic Press, 1992. ISBN 978-0120588305.
- ARROYO, E.; ARCOS, J. SRV: a virtual reality application to electrical substations operation training. In: *Multimedia Computing and Systems, 1999. IEEE International Conference on*. [S.l.: s.n.], 1999. v. 1, p. 835–839 vol.1.
- BARATA, P.; FILHO, M.; NUNES, M. Consolidating learning in power systems: Virtual reality applied to the study of the operation of electric power transformers. *Education, IEEE Transactions on*, PP, n. 99, p. 1–1, 2015. ISSN 0018-9359.
- BARCELOS, M. A. et al. Uso de realidade aumentada na visualização de componentes de subestações de energia elétrica. In: *XI Conferência de Estudos em Engenharia Elétrica*. [S.l.: s.n.], 2013. ISSN 2178-8308.
- BELONGIE, S.; MALIK, J.; PUZICHA, J. Shape matching and object recognition using shape contexts. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, v. 24, n. 4, p. 509–522, Apr 2002. ISSN 0162-8828.
- BERG, A.; BERG, T.; MALIK, J. Shape matching and object recognition using low distortion correspondences. In: *Computer Vision and Pattern Recognition, 2005. CVPR 2005. IEEE Computer Society Conference on*. [S.l.: s.n.], 2005. v. 1, p. 26–33 vol. 1. ISSN 1063-6919.
- BISHOP, C. M. *Pattern Recognition and Machine Learning (Information Science and Statistics)*. Secaucus, NJ, USA: Springer-Verlag New York, Inc., 2006. ISBN 0387310738.
- BURDEA, G.; COIFFET, P. *Virtual Reality Technology*. Wiley, 2003. (Virtual Reality Technology, v. 1). ISBN 9780471360896. Disponível em: <<http://books.google.com.br/books?id=0xWgPZbcz4AC>>.
- CARDOSO, A. et al. *Tecnologias para o Desenvolvimento de Sistemas de Realidade Virtual e Aumentada*. Recife: Ed. Universitária da UFPE, 2007.

- CARVALHO, A. C. C. de; MENDES, J. C.; CORREIA, D. de M. Equipamentos de alta tensão – prospecção e hierarquização de inovações tecnológicas. In: \_\_\_\_\_. [S.I.]: Goya Editora LTDA, 2013. cap. Transformadores de Potência, p. 188.
- CARVALHO, A. C. C. de; MENDES, J. C.; CORREIA, D. de M. Equipamentos de alta tensão – prospecção e hierarquização de inovações tecnológicas. In: \_\_\_\_\_. [S.I.]: Goya Editora LTDA, 2013. cap. Reatores em Derivação, p. 280.
- CARVALHO, F. M. S. Equipamentos de alta tensão – prospecção e hierarquização de inovações tecnológicas. In: \_\_\_\_\_. [S.I.]: Goya Editora LTDA, 2013. cap. Transformadores de Corrente, p. 352.
- CHANG, Z. et al. A training simulation system for substation equipments maintenance. In: *Machine Vision and Human-Machine Interface (MVHI), 2010 International Conference on*. [S.I.: s.n.], 2010. p. 572–575.
- CHWARZ, M. B.; MORAIS, S. de A. Equipamentos de alta tensão – prospecção e hierarquização de inovações tecnológicas. In: \_\_\_\_\_. [S.I.]: Goya Editora LTDA, 2013. cap. Disjuntores, p. 532.
- COYNE, B.; SPROAT, R. WordsEye: An automatic text-to-scene conversion system. In: *Proceedings of the 28th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*. New York, NY, USA: ACM, 2001. (SIGGRAPH '01), p. 487–496. ISBN 1-58113-374-X. Disponível em: <<http://doi.acm.org/10.1145/383259.383316>>.
- CRAIG, A. B.; SHERMAN, W. R.; WILL, J. D. *Developing Virtual Reality Applications: Foundations of Effective Design*. 1. ed. Morgan Kaufmann, 2009. ISBN 9780123749437. Disponível em: <<http://amazon.com/o/ASIN/0123749433/>>.
- DOSCH, P.; MASINI, G. Reconstruction of the 3D structure of a building from the 2D drawings of its floors. In: *Document Analysis and Recognition, 1999. ICDAR '99. Proceedings of the Fifth International Conference on*. [S.I.: s.n.], 1999. p. 487–490.
- DOSCH, P. et al. A complete system for the analysis of architectural drawings. *International Journal on Document Analysis and Recognition*, Springer-Verlag, v. 3, n. 2, p. 102–116, 2000. ISSN 1433-2833. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/PL00010901>>.
- FACELI, K. *Inteligência artificial uma abordagem de aprendizado de máquina*. Rio de Janeiro: Grupo Gen - LTC, 2011. ISBN 8521618808.
- FANQI, M.; TAO, J. Components-based VRS-engine for substation simulation. In: *Intelligent Computation Technology and Automation, 2009. ICICTA '09. Second International Conference on*. [S.I.: s.n.], 2009. v. 3, p. 529–532.
- FANQI, M.; YUNQI, K. An improved virtual reality engine for substation simulation. In: *Future Computer and Communication (ICFCC), 2010 2nd International Conference on*. [S.I.: s.n.], 2010. v. 1, p. V1–846–V1–849.
- FILIPSKI, A.; FLANDRENA, R. Automated conversion of engineering drawings to CAD form. *Proceedings of the IEEE*, v. 80, n. 7, p. 1195–1209, Jul 1992. ISSN 0018-9219.

- FORSYTH, D.; PONCE, J. *Computer Vision: A Modern Approach: A Modern Approach*. Pearson Education Limited, 2015. ISBN 9781292014081. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=pAWpBwAAQBAJ>>.
- GILMAN, G.; GILMAN, J. *Boiler Control Systems Engineering*. International Society of Automation, 2010. ISBN 9781936007202. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=N2WHNdqRb7sC>>.
- GRADY, S. *Virtual Reality: Simulating and Enhancing the World with Computers*. Facts On File, 2003. (Facts on File science library). ISBN 9780816046867. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=ta2LNQAAACAAJ>>.
- GUANGWEI, Y.; ZHITAO, G. Scene graph organization and rendering in 3D substation simulation system. In: *Power and Energy Engineering Conference, 2009. APPEEC 2009. Asia-Pacific*. [S.I.: s.n.], 2009. p. 1–4.
- GUO, T.; ZHANG, H.; WEN, Y. An example-driven symbol recognition approach based on key features in engineering drawings. In: *Computer-Aided Design and Computer Graphics (CAD/Graphics), 2011 12th International Conference on*. [S.I.: s.n.], 2011. p. 33–37.
- HORNA, S. et al. Building 3D indoor scenes topology from 2D architectural plans. In: *Proc. of 2nd International Conference on Computer Graphics Theory and Applications (GRAPP)*. Barcelona, Spain: [s.n.], 2007. p. 37–44.
- JUNIOR, A. F. *Projeto e simulação de um sistema de controle via LMIs da produção de vapor de uma caldeira aquatubular*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira, 2012.
- KEREN, D. Using symbolic computation to find algebraic invariants. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, v. 16, n. 11, p. 1143–1149, Nov 1994. ISSN 0162-8828.
- LI, G. X.; FENGLI; HONG, L. Application of the virtual reality technologies in power systems. In: *Future Computer and Communication (ICFCC), 2010 2nd International Conference on*. [S.I.: s.n.], 2010. v. 3, p. V3–41–V3–44.
- LI, M.; WANG, S.; HE, T. A transformer substation simulation engine based on virtual reality. In: *Computer, Mechatronics, Control and Electronic Engineering (CMCE), 2010 International Conference on*. [S.I.: s.n.], 2010. v. 2, p. 41–44.
- LOPES, C. F.; FILHO, O. K. Equipamentos de alta tensão – prospecção e hierarquização de inovações tecnológicas. In: \_\_\_\_\_. [S.I.]: Goya Editora LTDA, 2013. cap. Seccionadores, p. 478.
- LU, J. et al. A new framework for automatic 3d scene construction from text description. In: *Progress in Informatics and Computing (PIC), 2010 IEEE International Conference on*. [S.I.: s.n.], 2010. v. 2, p. 964–968.
- LU, T. et al. 3d reconstruction of detailed buildings from architectural drawings. *Computer-Aided Design and Applications*, v. 2, n. 1-4, p. 527–536, 2005. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1080/16864360.2005.10738402>>.

- LU, T. et al. A new recognition model for electronic architectural drawings. *Computer-Aided Design*, v. 37, n. 10, p. 1053 – 1069, 2005. ISSN 0010-4485. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0010448504002258>>.
- MARTINEZ, M. L. B.; VAISMAN, R. Equipamentos de alta tensão – prospecção e hierarquização de inovações tecnológicas. In: \_\_\_\_\_. [S.I.]: Goya Editora LTDA, 2013. cap. Para-raios, p. 352.
- OR, S. Towards automatic 3D reconstruction from 2D floorplan image. In: *Game Technology Conference*. Hong Kong: [s.n.], 2001. p. 12–20.
- OR, S. et al. Highly automatic approach to architectural floorplan image understanding and model generation. *Proceedings of 10th Fall Workshop Vision, Modeling, and Visualization*, p. 25–32, 2005.
- POULLIS, C.; YOU, S. Automatic creation of massive virtual cities. In: *Virtual Reality Conference, 2009. VR 2009. IEEE*. [S.I.: s.n.], 2009. p. 199–202. ISSN 1087-8270.
- POULLIS, C.; YOU, S. Photorealistic large-scale urban city model reconstruction. *Visualization and Computer Graphics, IEEE Transactions on*, v. 15, n. 4, p. 654–669, July 2009. ISSN 1077-2626.
- POULLIS, C.; YOU, S. 3d reconstruction of urban areas. In: *3D Imaging, Modeling, Processing, Visualization and Transmission (3DIMPVT), 2011 International Conference on*. [S.I.: s.n.], 2011. p. 33–40.
- POULLIS, C.; YOU, S.; NEUMANN, U. Rapid creation of large-scale photorealistic virtual environments. In: *Virtual Reality Conference, 2008. VR '08. IEEE*. [S.I.: s.n.], 2008. p. 153–160.
- QUINTANA, J.; MENDOZA, E. 3D virtual models applied in power substation projects. In: *Intelligent System Applications to Power Systems, 2009. ISAP '09. 15th International Conference on*. [S.I.: s.n.], 2009. p. 1–3.
- RICH, E. *Inteligência Artificial*. [S.I.]: McGraw-Hill, 1988.
- SALVE, S.; JONDHALE, K. Shape matching and object recognition using shape contexts. In: *Computer Science and Information Technology (ICCSIT), 2010 3rd IEEE International Conference on*. [S.I.: s.n.], 2010. v. 9, p. 471–474.
- SHANG, J. et al. Multifunctional dispatcher training system for substation. In: *Electricity Distribution (CIRED 2013), 22nd International Conference and Exhibition on*. [S.I.: s.n.], 2013. p. 1–4.
- SIMOES, F. et al. Challenges in 3D reconstruction from images for difficult large-scale objects: A study on the modeling of electrical substations. In: *Virtual and Augmented Reality (SVR), 2012 14th Symposium on*. [S.I.: s.n.], 2012. p. 74–83.
- SO, C.; BACIU, G.; SUN, H. Reconstruction of 3D virtual buildings from 2D architectural floor plans. In: *Proceedings of the ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*. New York, NY, USA: ACM, 1998. (VRST '98), p. 17–23. ISBN 1-58113-019-8. Disponível em: <<http://doi.acm.org/10.1145/293701.293704>>.
- TAM, E. et al. A low-cost PC-oriented virtual environment for operator training [for power stations]. In: *Power Industry Computer Applications., 1997. 20th International Conference on*. [S.I.: s.n.], 1997. p. 358–364.

- TORI, R.; SISCOUTTO, C. K. K. *Fundamentos e Tecnologia de Realidade Virtual e Aumentada*. Belém: VIII Symposium on Virtual Reality: [s.n.], 2006.
- VEH, A. Okapuu-von et al. Design and operation of a virtual reality operator-training system. *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. 11, n. 3, p. 1585–1591, Aug 1996. ISSN 0885-8950.
- WANG, W.; LI, G. Virtual reality in the substation training simulator. In: *Computer Supported Cooperative Work in Design (CSCWD), 2010 14th International Conference on*. [S.I.: s.n.], 2010. p. 438–443.
- XI, X.-P. et al. Research on automated recognizing and interpreting architectural drawings. In: *Machine Learning and Cybernetics, 2002. Proceedings. 2002 International Conference on*. [S.I.: s.n.], 2002. v. 2, p. 1000–1004 vol.2.
- XU, K.; STEWART, J.; FIUME, E. Constraint-based automatic placement for scene composition. In: *IN GRAPHICS INTERFACE*. [S.I.: s.n.], 2002. p. 25–34.
- YANG, D. et al. An intelligent symbol usage assistant for CAD systems. *IEEE Expert*, v. 9, n. 3, p. 32–41, June 1994. ISSN 0885-9000.
- YANG, R.; LU, T.; CAI, S. 3d building reconstruction based on interpretation of architectural drawings. In: *Information and Automation, 2008. ICIA 2008. International Conference on*. [S.I.: s.n.], 2008. p. 1474–1479.
- YANG, X. et al. A training simulator for PD detection personnel. *Journal of Power and Energy Engineering*, v. 2, n. 4, p. 573–578, April 2014.
- YANG, X.; ZHAO, W.; PAN, L. Graphical symbol recognition in architectural plans with an improved ant-tree based clustering algorithm. In: *Neural Networks, 2008. IJCNN 2008. (IEEE World Congress on Computational Intelligence). IEEE International Joint Conference on*. [S.I.: s.n.], 2008. p. 390–397. ISSN 1098-7576.
- YIN, X.; WONKA, P.; RAZDAN, A. Generating 3D building models from architectural drawings: A survey. *Computer Graphics and Applications, IEEE*, v. 29, n. 1, p. 20–30, Jan 2009. ISSN 0272-1716.
- ZADEH, L. A. Fuzzy logic, neural networks, and soft computing. *Commun. ACM*, ACM, New York, NY, USA, v. 37, n. 3, p. 77–84, mar. 1994. ISSN 0001-0782. Disponível em: <<http://doi.acm.org/10.1145/175247.175255>>.
- ZHAO, Q. 10 scientific problems in virtual reality. *Commun. ACM*, ACM, New York, NY, USA, v. 54, n. 2, p. 116–118, fev. 2011. ISSN 0001-0782. Disponível em: <<http://doi.acm.org/10.1145/1897816.1897847>>.

# Índice Remissivo

## A

Algoritmo, 41, 43  
API, 60  
AutoCAD, 47, 52, 53

## C

C#, 48  
Cabos, 46, 50, 57  
CAD, 24, 32, 36, 52, 53  
CSV, 44, 49

## D

Disjuntor, 9

## L

LISP, 47

## M

Modelagem, 36, 39

## P

Para-raios, 8

## R

Realidade Virtual, 1, 9, 10, 12, 20  
Reator, 7  
Reconhecimento de Padrões, 14, 29, 35, 39

## S

SCADA, 60  
Seccionadores, 8  
Subestações, 2, 5, 20, 29, 34  
Subestações (dispositivos), 6

## T

Transformador, 6, 7

## U

Unity 3D, 48

## X

XML, 44, 47, 48