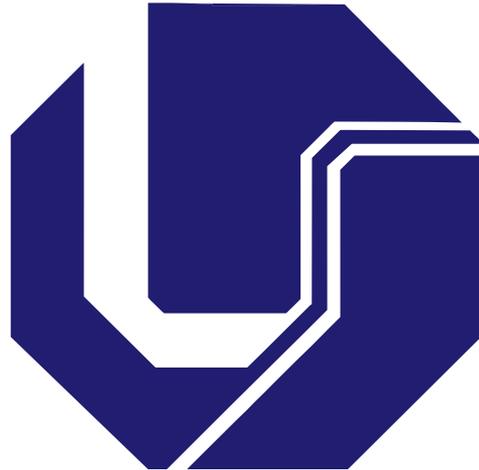


**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**



**Uma Proposta de Sistema de Autoria Baseado em Plantas
Baixas para Projetar Ambientes de Realidade Virtual:
Metodologia e Estudo de Caso Aplicados a Subestações de
Energia Elétrica**

Camilo de Lellis Barreto Junior

**Uberlândia/MG
Novembro/2022**

Camilo de Lellis Barreto Junior

**Uma Proposta de Sistema de Autoria Baseado em Plantas
Baixas para Projetar Ambientes de Realidade Virtual:
Metodologia e Estudo de Caso Aplicados a Subestações de
Energia Elétrica**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Ciências.

Área de concentração: Processamento da informação.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Cardoso.

Uberlândia/MG

Novembro/2022

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

B273 Barreto Junior, Camilo de Lellis, 1991-
2022 Uma Proposta de Sistema de Autoria Baseado em Plantas
Baixas para Projetar Ambientes de Realidade Virtual:
Metodologia e Estudo de Caso Aplicados a Subestações de
Energia Elétrica [recurso eletrônico] / Camilo de Lellis
Barreto Junior. - 2022.

Orientador: Alexandre Cardoso.

Coorientador: Edgard Afonso Lamounier Júnior.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Pós-graduação em Engenharia Elétrica.

Modo de acesso: Internet.

Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.te.2022.636>

Inclui bibliografia.

Inclui ilustrações.

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

CDU: 621.3

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:
Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074

Camilo de Lellis Barreto Junior

**Uma Proposta de Sistema de Autoria Baseado em Plantas
Baixas para Projetar Ambientes de Realidade Virtual:
Metodologia e Estudo de Caso Aplicados a Subestações de
Energia Elétrica**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Ciências.

Banca Examinadora:

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

Prof. Arnaldo J. P. Rosentino Junior, Dr. (UFTM)

Prof. José Remo Ferreira Brega, Dr. (UNESP)

Prof. Luciano Coutinho Gomes, Dr. (UFU)

Prof. Renato Aquino Lopes, Dr. (UFU)

Uberlândia/MG

Novembro/2022



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



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Elétrica				
Defesa de:	Tese de Doutorado, 310, PPGEELT				
Data:	Vinte e cinco de novembro de dois mil e vinte e dois	Hora de início:	14:00	Hora de encerramento:	17:00
Matrícula do Discente:	11623EEL008				
Nome do Discente:	Camilo de Lellis Barreto Junior				
Título do Trabalho:	Uma Proposta de Sistema de Autoria Baseado em Plantas Baixas para Projetar Ambientes de Realidade Virtual: Metodologia e Estudo de Caso Aplicados a Subestações de Energia Elétrica				
Área de concentração:	Processamento da Informação				
Linha de pesquisa:	Computação Gráfica				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Coordenador do projeto: Alexandre Cardoso Título do projeto: GT618 – ADEQUAÇÃO DO SISTEMA DE REALIDADE VIRTUAL DA CEMIG PARA A INTEGRAÇÃO COM RECURSOS DE INSPEÇÃO POR IMAGENS EM TEMPO REAL E TREINAMENTO CONJUNTO DAS EQUIPES DE CAMPO E DO COS Agência financiadora: CEMIG GT - Aneel Número do processo na agência financiadora: 4020000798 - FEELT.CEMIG.0009 GT0618 Vigência do projeto: 01/11/2018 - 30/06/2022				

Reuniu-se por meio de videoconferência, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, assim composta: Professores Doutores: Luciano Coutinho Gomes - FEELT/UFU; Renato Aquino Lopes - FACOM/UFU; José Remo Ferreira Brega - UNESP; Arnaldo J. P. Rosentino Júnior - UFTM; Alexandre Cardoso - FEELT/UFU, orientador(a) do(a) candidato(a).

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

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

Aprovado(a).

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

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

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



Documento assinado eletronicamente por **Luciano Coutinho Gomes, Professor(a) do Magistério Superior**, em 25/11/2022, às 16:19, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **JOSE REMO FERREIRA BREGA, Usuário Externo**, em 25/11/2022, às 16:23, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Alexandre Cardoso, Professor(a) do Magistério Superior**, em 25/11/2022, às 16:23, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Arnaldo José Pereira Rosentino Junior, Usuário Externo**, em 25/11/2022, às 16:23, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Renato de Aquino Lopes, Professor(a) do Magistério Superior**, em 25/11/2022, às 17:08, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site

[https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?](https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0)

[acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0](https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **4041039** e o código CRC **96281A32**.

Agradecimentos

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

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

A minha avó Eugênia pelas orações.

Às minhas avós, Julieta e Julita (in memorian), aos meus avôs, Ary e José Lourenço (in memorian), pelas orações,

pelos cuidados e por estarem sempre perto de mim.

Ao meu irmão, Henrique Barreto pelo apoio, companheirismo e bons momentos.

À minha família, por torcerem por mim.

Aos meus tios, Maria do Carmo Sekita e Tamio Sekita, pelo carinho e apoio aos recursos para produção científica.

À minha amada, Rafaela Barreto, por todos os momentos que passamos juntos.

Aos meus amigos do Grupo de Realidade Virtual e Aumentada (GRVA-UFU), por todo companheirismo, compartilhamento de conhecimento, bons e maus momentos, viagens e comemorações.

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

Ao meu coorientador Professor Doutor Edgard Afonso Lamounier Júnior, por sua sabedoria e coerência durante as orientações.

Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia pelo suporte prestado.

Ao Instituto Federal do Triângulo Mineiro - IFTM e todos os professores, pelo apoio, companheirismo, compartilhamento de conhecimento e toda a experiência que adquiri durante minha jornada como professor.

Meus sinceros agradecimentos!

*“Primeiro, lembre-se de olhar para as estrelas e não para seus pés.
Segundo, nunca desista do trabalho. O trabalho dá a você significado e propósito para a vida.
Terceiro, se você tiver a sorte de encontrar o amor, lembre-se que está por aqui e não o jogue fora.”*
(Stephen Hawking)

Financiadores

Este trabalho foi parcialmente financiado pelo projeto de Pesquisa e Desenvolvimento – P&D Cemig/Aneel – GT0411/GT0618, de parceria entre a CEMIG-GT, Universidade Federal de Uberlândia e pela bolsa de demanda social da CAPES. Sinceros agradecimentos, da equipe de desenvolvedores e deste pesquisador.

Publicações

São publicações relacionadas a este trabalho:

1. CARVALHO, Alexandre; CARDOSO, Alexandre; BARRETO, Camilo; LAMOUNIER, Edgard; LIMA, Gerson; MATTIOLI, Leandro; MIRANDA, Milton; PRADO, Paulo. **A methodology for reducing the time necessary to generate virtual electric substations**. In: 2016 IEEE Virtual Reality (VR), 2016, Greenville. 2016 IEEE Virtual Reality (VR), 2016. p. 163.
2. BARRETO, Camilo; CARDOSO, Alexandre; LAMOUNIER, Edgard; CARVALHO, Alexandre; MATTIOLI, Leandro. **Strategy to optimize the creation of arrangements in virtual electric power substations**. In: 2017 XLIII Latin American Computer Conference (CLEI), 2017, Córdoba. 2017 XLIII Latin American Computer Conference (CLEI), 2017. p. 1.
3. PRADO, Paulo; RAMOS, Daniel; LIMA, Gerson; SILVA, Alexandre; CARDOSO, Alexandre; LAMOUNIER, Edgard; BARRETO, Camilo; MATTIOLI, Leandro. **Sistema de Planejamento de Intervenções no Sistema Elétrico de Transmissão Baseado em Realidade Virtual**. In: XXIV SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, 2017, Curitiba - PR. Anais do XXIV SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, 2017.
4. BARRETO JUNIOR, Camilo; CARDOSO, Alexandre; LAMOUNIER, Edgard; PRADO, Paulo; DUBOC, Nicholas. **A Strategy to Improve 3D Arrangement Modeling on Virtual Electrical Substations**. In: 2017 SIAM Conference on Computational Science and Engineering, 2017, Atlanta. Anais of 2017 SIAM Conference on Computational Science and Engineering. Atlanta-GA: Atlanta GA USA, 2017. v. 01. p. 01-02.
5. BARRETO, Camilo; CARDOSO, Alexandre; LAMOUNIER, Edgard; YAMANAKA, Keiji. **Genetic Algorithm-Based Strategy for Routing in Virtual Electrical Substations Aiming for Security**. In: XLIV CLEI - Conferência Latino-americana de Informática, 2018, São Paulo. XLIV Latin American Computer Conference, 2018.

6. CARDOSO, Alexandre; BARRETO, Camilo; SILVA, Alexandre; LIMA, Gerson; RAMOS, Daniel. **Uma ferramenta para geração de ambientes de realidade virtual de subestações de energia elétrica.** In: XVIII Encontro Regional Ibero-americano do CIGRE, 2019, Foz do Iguaçu. Anais do XVIII Encontro Regional Ibero-americano do CIGRE, 2019.
7. SILVA, Alexandre; CARDOSO, Alexandre; LAMOUNIER JR., Edgard; BARRETO, Camilo. **Virtual Reality for Monitoring and Control of Electrical Substations.** Annals of the Brazilian Academy of Sciences, Rio de Janeiro, v. 93, n. 1, e20200267, 2021.
8. BARRETO, Camilo; CARDOSO, Alexandre; LAMOUNIER, Edgard; SILVA, Paulo; SILVA, Alexandre. **An Integration Strategy Between CAD Floor Plans and Virtual Reality: Case Study Applied to Electric Power Substations.** Research, Society and Development, 10 (14):e221101421765, 2021.
9. BARRETO, Camilo; CARDOSO, Alexandre; LAMOUNIER, Edgard; SILVA, Paulo; SILVA, Alexandre. **Designing Virtual Reality Environments through an Authoring System Based on CAD Floor Plans: A Methodology and Case Study Applied to Electric Power Substations for Supervision.** Multidisciplinary Digital Publishing Institute - Energies, 2021.
10. CYRINO, Gabriel F. ; BARRETO, Camilo; MATTIOLI, Leandro; CARDOSO, Alexandre; LAMOUNIER, Edgard; LIMA, Gerson; RAMOS, Daniel. **An Intuitive VR-based Environment for Monitoring and Control of Electrical Power Substations.** Procedia Computer Science, v. 201, p. 551-558, 2022.
11. FERREIRA, Angel; SILVA, Alexandre; BARRETO JUNIOR, Camilo; LIMA, Diogo ; SOUSA, Ligia. **Revisão da literatura: Uso do Conceito BIM em Projetos do Setor Elétrico nos Cenários (Inter)Nacional.** Research, Society and Development, v. 11, p. e37211629144, 2022.

Resumo

A aplicação de técnicas de Realidade Virtual (RV) potencializou numerosos processos da engenharia, beneficiando diversos setores da indústria. É amplamente atribuída ao treinamento de usuários, prototipagem, simulação, arquitetura, educação e ferramenta de auxílio. Ela proporciona um alto nível de imersão e fidelidade na representação das informações. No entanto, o desenvolvimento de sistemas de RV é uma tarefa complexa, que envolve equipes especializadas em desenvolvimento de códigos de baixo nível, modelagem 3D e elaboração de Ambientes Virtuais (AVs) para a computação gráfica. Diante dessas adversidades, o objetivo deste estudo é apresentar uma metodologia de concepção de subestações de energia elétrica virtuais através de um Sistema de Autoria (SA) baseado em *Computer-Aided Design* (CAD), associado com a RV e aplicada na supervisão de ativos em campo. A metodologia apresentada proporciona uma integração automática entre um Editor CAD de plantas baixas e a aplicação de RV por uma arquitetura de *software* centralizada. A disposição dos componentes da arquitetura permite que a edição dos AVs, o gerenciamento dos insumos e o uso do *software* de RV aconteçam paralelamente e em qualquer localidade. Desta forma, para que a integração entre os componentes aconteça de forma automática, foram propostas convenções de modelagem geométrica e de símbolos CAD para adequação dos ativos virtuais ao sistema. A metodologia foi avaliada por um estudo de caso aplicado na concepção de SEs como parte de um projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) para treinamento e supervisão de ativos. Os resultados demonstraram paridade com o projeto em planta baixa, evidenciando a estratégia de integração e reconstrução do AV. Foi possível analisar a credibilidade visual em relação ao real e qualidade de apresentação das informações gráficas. Outro resultado considerável é a precisão do Ambiente Virtual produzido pelo Sistema de Autoria quando comparado com o processo de desenvolvimento manual, o qual evidenciou erro no posicionamento dos ativos virtuais quando produzidos manualmente. Desta forma, foi possível obter maior acurácia com o SA, algo importante quando aplicado ao planejamento da construção, tomada de decisão e simulação.

Keywords: sistema de autoria; realidade virtual; computer-aided design; CAD; subestação de energia elétrica; informações espaciais; supervisão; treinamento.

Abstract

The application of Virtual Reality (VR) techniques has enhanced numerous engineering processes, benefiting several sectors of the industry. It is widely attributed to user training, prototyping, simulation, architecture, education and aid tool. It provides a high level of immersion and fidelity in the representation of information. However, the development of VR systems is a complex task, involving teams specialized in low-level code development, 3D modeling and the development of Virtual Environments (VEs) for computer graphics. In view of these adversities, the objective of this study is to present a methodology for designing virtual EPS through an Authoring System (AS) based on Computer-Aided Design (CAD), associated with VR and applied to field asset supervision. The methodology presented provides automatic integration between the floor plan CAD Editor and VR application through a centralized software architecture. The arrangement of architecture components allows editing of VEs, management of the assets, and the use of VR software to take place in parallel and by separate instances in any workplace. Thus, in order for the integration between the components to happen automatically, geometric modeling and CAD symbol conventions were proposed to adapt the virtual assets to the system. The methodology was evaluated by a case study applied in the design of EPS as part of a Research and Development (R&D) project for training and supervision of assets. The results showed parity with the project in a floor plan, evidencing the strategy of integration and reconstruction of the VE. It was possible to analyze the visual credibility in relation to the real and presentation quality of the graphic information. Another considerable result is the accuracy of the Virtual Environment produced by the Authoring System when compared to the manual development process, which showed an error in the positioning of virtual assets when produced manually. Thus, it was possible to obtain greater accuracy with the AS, something important when applied to construction planning, decision making and simulation.

Keywords: authoring system; virtual reality; computer-aided design; CAD; electric power substation; spatial information; supervision; training.

Lista de Figuras

2.1	Diagrama conceitual do Sistema Elétrico de Potência.	10
2.2	Exemplo de barra dupla com disjuntor e meio.	12
2.3	Topologia típica de um sistema de supervisão.	13
2.4	Dispositivo de visualização e supervisão do Centro de Operações do Sistema da CEMIG.	14
2.5	Principais diagramas utilizados em projetos de subestações.	15
2.6	Grafo de cena de um Ambiente Virtual composto por sete elementos em grupos.	18
2.7	Projeto CAD de uma ferramenta representada em espaços dimensionais distintos.	20
2.8	Diagrama conceitual de um Sistema de Autoria baseado em cliente-servidor para produção de conteúdo.	21
2.9	Exemplos de Sistemas de Autoria baseados em telas.	22
2.10	Exemplos de Sistemas de Autoria baseados em ícones.	22
2.11	Software Camtasia: exemplo de Sistema de Autoria baseados em linha do tempo.	23
2.12	Tecnologias envolvidas na proposta do trabalho.	24
3.1	Arquitetura proposta e validação de protótipo.	29
3.2	Modelo conceitual da arquitetura proposta por Freeman et al. (2017).	30
3.3	Sistema de Realidade Virtual - Ambiente de Testes.	31
3.4	Fluxo de trabalho de conversão para um sistema CAD arbitrário.	32
3.5	Processos de integração utilizando metamodelo.	34
3.6	Processo de reconhecimento e posicionamento de símbolos.	36
3.7	Integração de sistemas para <i>design</i> rápido de variantes de produtos.	37
4.1	Arquitetura simplificada do Sistema de Autoria.	47
4.2	Arquitetura detalhada do Sistema de Autoria.	48
4.3	Etapas de produção de AVs utilizando o Sistema de Autoria.	51

4.4	Equipamento elétrico do tipo disjuntor.	54
4.5	Demonstração das convenções de modelagem 3D.	55
4.6	Exemplo de convenção de pontos de referência.	55
4.7	Exemplo de convenção para as dimensões dos símbolos onde a representação simbólica mantém as proporções do modelo 3D.	56
4.8	Modelo cliente-servidor em três camadas.	57
4.9	Diagrama conceitual do acesso ao GAV por <i>softwares</i> externos.	58
4.10	Etapas de concepção de um arranjo físico de SE com o SA.	60
4.11	Diagrama conceitual da ferramenta de criação de símbolos e atribuição a modelos 3D.	61
4.12	Diagrama conceitual da ferramenta de inserção de símbolos.	62
4.13	Diagrama conceitual da ferramenta para inserção de condutores.	63
4.14	Exemplo de um símbolo de modelo 3D com metadados atribuídos.	65
4.15	Diagrama conceitual do processo de integração de plantas baixas entre Editor CAD e o <i>software</i> de Realidade Virtual.	66
4.16	Diagrama conceitual do processo de recuperação e reconstrução do cenário de uma SE no <i>software</i> de Realidade Virtual e no Pré-Visualizador 3D.	69
4.17	Detalhes do processo de reconstrução de cenários 3D.	71
4.18	Exemplos de inserção de cabos.	73
5.1	Diagrama de casos de uso do Editor CAD.	80
5.2	Diagrama de casos de uso do pré-visualizador 3D de plantas baixas.	81
5.3	Diagrama de casos de uso do Gerenciador de Ambientes Virtuais.	82
5.4	Diagrama de casos de uso do Módulo de Reconstrução de Ambientes Virtuais.	84
5.5	Modelagem de um transformador trifásico utilizando 3Ds Max.	86
5.6	Projeto de uma subestação em planta baixa utilizando AutoCAD.	87
5.7	Motor de Jogos Unity.	88
5.8	Hierarquia de objetos em um documento CAD do AutoCAD.	89
5.9	Diagrama de atividades da sequência de comandos no Editor CAD.	92
5.10	Menus de acesso rápido de comandos do ECAD no AutoCAD.	92
5.11	Exemplos de interfaces gráficas do Editor CAD.	93
5.12	Ferramenta de implantação de projetos CAD com o Sistema de Realidade Virtual.	99
5.13	Versões de projetos CAD e integração com o SRV.	99
5.14	Formas de navegação no pré-visualizador 3D.	101
5.15	Informações visuais do cenário virtual no pré-visualizador 3D.	102
5.16	Pré-visualizador 3D de projetos de subestações em planta baixa.	102
5.17	Processo contínuo de atualização dos elementos no Ambiente Virtual do pré-visualizador 3D.	103

5.18	Diagrama conceitual na visão de módulos do SRV, com destaque para o módulo de reconstrução de subestações virtuais de energia elétrica.	104
5.19	Menus do sistema de autenticação e recuperação de subestações virtuais implantadas no GAV.	104
5.20	Visão geral dos serviços do Gerenciador de Ambientes Virtuais.	106
5.21	Exemplo de comunicação cliente-servidor utilizando os <i>endpoints</i> da API do Gerenciador de AVs.	107
5.22	Renderização de imagens em 360° de modelo cadastrado.	110
5.23	Diagrama de sequência do processo de cadastro e renderização de modelos 3D.	110
5.24	Galeria de modelos 3D do Gerenciador de Ambientes Virtuais.	111
5.25	Galeria de símbolos do Gerenciador de Ambientes Virtuais.	112
5.26	Projetos de SEs do Gerenciador de Ambientes Virtuais.	112
5.27	Diagrama de implantação do protótipo de sistema.	114
6.1	Projetos das subestações SLAG4 e hipotética cadastrados no Gerenciador de Ambientes Virtuais.	117
6.2	Subestação SLAG4 com destaque para área de concessão.	118
6.3	Atualizações do projeto da subestação SLAG4.	119
6.4	Planta baixa da subestação hipotética.	120
6.5	Atualizações do projeto da subestação hipotética.	120
6.6	Modelos utilizados para a concepção dos AVs.	122
6.7	Símbolos utilizados para a concepção das plantas baixas.	123
6.8	Ambiente Virtual da subestação SLAG4.	124
6.9	Subestação real e virtual de SLAG4.	125
6.10	Ambiente Virtual da subestação hipotética.	126
6.11	Reconstrução das torres e pórticos.	127
6.12	Conexões por cabos condutores.	128
6.13	Conexões por barramentos condutores.	128
6.14	Detalhes nos pátios das subestações SLAG4 e hipotética.	129
6.15	Supervisão simulada da subestação SLAG4.	130
6.16	Erros de posicionamento manual de equipamentos em comparação com a metodologia do Sistema de Autoria.	131
6.17	Gráfico espacial mostrando a altura do equipamento e os erros de posicionamento da metodologia de projeto manual.	132
B.1	Diagrama de classe do gerenciamento de projetos.	173
B.2	Diagrama de classe da implantação de projetos no Sistema de Realidade Virtual.	174
B.3	Diagrama de classe da manipulação de plantas baixas em CAD.	175
B.4	Diagrama de classe dos comandos CAD.	176

B.5	Diagrama de classes do Módulo de Reconstrução de Ambientes Virtuais para SRV.	177
B.6	Diagrama de entidade e relacionamento do Gerenciador de Ambientes Virtuais.	178
C.1	Benchmark dos processadores e aceleradores gráficos.	181
C.2	Tempo de transferência de modelos 3D no software de Realidade Virtual.	183
C.3	Amostras do tempo de reconstrução de AVs no pré-visualizador 3D.	185
C.4	QPS das subestações de testes.	187

Lista de Tabelas

2.1	Comparação de diagramas utilizados para projetos de subestações.	17
3.1	Lista de questões de pesquisa.	26
3.2	Resultados por bibliotecas digitais e filtros.	28
3.3	Questões de pesquisas extraídas por trabalhos relacionados.	38
3.4	Tabela de características relacionadas com a elaboração e integração de projetos de engenharia e Ambientes Virtuais de RV.	39
3.5	Extensões de modelos 3D e suas especificações.	42
3.6	Extensões de modelagem 3D utilizadas nos trabalhos científicos.	43
3.7	Tabela de características relacionadas a modelos 3D e o Ambiente Virtual gerado.	43
4.1	Informações e relacionamentos dos insumos armazenados no Gerenciador de Ambientes Virtuais.	58
4.2	Informações complementares de elementos de subestações de energia elétrica.	64
5.1	Tecnologias de apoio utilizadas no desenvolvendo do Sistema de Autoria.	85
5.2	Comandos implementados para o Editor CAD.	91
5.3	Lista de <i>endpoints</i> do Gerenciador de Ambientes Virtuais.	109
5.4	Configurações de <i>software</i> e <i>hardware</i> das máquinas virtuais do Gerenciador de AVs.	113
7.1	Comparação entre o presente trabalho e trabalhos relacionados, abordando questões sobre a elaboração e integração de projetos CAD com <i>software</i> Realidade Virtual.	136
7.2	Comparação entre o presente trabalho e trabalhos relacionados, abordando questões visuais dos Ambientes Virtuais gerados.	138
A.1	Documentação do Caso de Uso UC-EC01 - Autenticação no Gerenciador de Ambientes Virtuais.	152
A.2	Documentação do Caso de Uso UC-EC02 - Gerenciar projeto de subestações.	153

A.3	Documentação do Caso de Uso UC-EC03 - Gerenciar símbolos de modelos.	154
A.4	Documentação do Caso de Uso UC-EC04 - Buscar modelo.	155
A.5	Documentação do Caso de Uso UC-EC05 - Associar símbolo à modelo.	155
A.6	Documentação do Caso de Uso UC-EC06 - Criar símbolo.	156
A.7	Documentação do Caso de Uso UC-EC07 - Gerenciar condutores.	157
A.8	Documentação do Caso de Uso UC-EC08 - Visualizar subestação em 3D.	158
A.9	Documentação do Caso de Uso UC-EC09 - Implantar projeto para RV.	158
A.10	Documentação do Caso de Uso UC-EC10 - Validar projeto.	159
A.11	Documentação do Caso de Uso UC-VT01 - Navegar pelo Ambiente Virtual.	159
A.12	Documentação do Caso de Uso UC-VT02 - Selecionar tipo de navegação.	160
A.13	Documentação do Caso de Uso UC-VT03 - Visualizar identificação dos modelos.	160
A.14	Documentação do Caso de Uso UC-VT04 - Visualizar informações da reconstrução do Ambiente Virtual.	161
A.15	Documentação do Caso de Uso UC-VT05 - Baixar ativos necessários.	161
A.16	Documentação do Caso de Uso UC-VT06 - Reconstruir o cenário 3D.	162
A.17	Documentação do Caso de Uso UC-GA01 - Gerenciar modelos 3D.	163
A.18	Documentação do Caso de Uso UC-GA02 - Visualizar modelos em 3D.	164
A.19	Documentação do Caso de Uso UC-GA03 - Gerenciar símbolos.	164
A.20	Documentação do Caso de Uso UC-GA04 - Gerenciar projetos de subestações.	165
A.21	Documentação do Caso de Uso UC-GA05 - Gerenciar versões históricas.	165
A.22	Documentação do Caso de Uso UC-GA06 - Gerenciar documentos de subestações.	166
A.23	Documentação do Caso de Uso UC-GA07 - Gerenciar configurações globais.	166
A.24	Documentação do Caso de Uso UC-GA08 - Gerenciar usuários.	167
A.25	Documentação do Caso de Uso UC-GA09 - Atribuir grupo.	167
A.26	Documentação do Caso de Uso UC-MR01 - Autenticar usuário.	168
A.27	Documentação do Caso de Uso UC-MR02 - Gerenciar arquivos de integração.	168
A.28	Documentação do Caso de Uso UC-MR03 - Reconstruir o cenário 3D.	169
A.29	Documentação do Caso de Uso UC-MR04 - Gerenciar <i>download</i> de ativos.	170
A.30	Documentação do Caso de Uso UC-MR05 - Gerenciar ativos.	170
A.31	Documentação do Caso de Uso UC-MR06 - Gerenciar diretórios.	171
B.1	Lista de diagramas de classes.	172
C.1	Informações sobre quantidades de modelos 3D distintos e suas cópias.	179
C.2	Especificações técnicas dos computadores utilizados nos testes.	180
C.3	Desempenho por <i>benchmark</i> dos processadores e aceleradores gráficos.	181
C.4	Informações sobre os provedores utilizados nos testes.	182

C.5	Amostras de tempo para transferência de conjuntos de modelos 3D em diferentes provedores de <i>internet</i> (em segundos).	183
C.6	Tempo de reconstrução de Ambientes Virtuais (em segundos).	184
C.7	Dados sobre a atualização da informação visual (QPS).	187

Abreviaturas

2D	Bidimensional
3D	Tridimensional
API	<i>Application Programming Interface</i> - Interface de Programação de Aplicativos
AV	Ambiente Virtual
CAD	<i>Computer-aided Design</i> - Desenho Assistido por Computador
CE	Critério de Exclusão
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais
CG	Computação Gráfica
CI	Critério de Inclusão
CNC	Comando Numérico Computadorizado
COS	Centro de Operações do Sistema
CS	Critérios de Seleção
DUO	Diagrama Unifilar Operacional
ECAD	Editor CAD
GAV	Gerenciador de Ambientes Virtuais
GIV	Gerenciador de Insumos Virtuais
HTTP	<i>Hypertext Transfer Protocol</i> - Protocolo de Transferência de Hipertexto
HUD	<i>Heads-up Display</i> - Monitor de Alerta (tradução livre)
JSON	<i>JavaScript Object Notation</i> - Notação de Objeto JavaScript

O&M	Operação e Manutenção
ORM	<i>Object-Relational Mapping</i> - Mapeamento Objeto-Relacional
PCF	<i>Piping Component File</i> - Arquivo de Componente de Tubulação
PDM	<i>Product Data Management</i> - Gerenciamento de Dados do Produto
QP	Questões de Pesquisa
RA	Realidade Aumentada
RBS	Revisão Bibliográfica Sistemática
REST	<i>Representational State Transfer</i> - Transferência de Estado Representacional
RTE	Reconstrução em Tempo de Execução
RV	Realidade Virtual
SA	Sistema de Autoria
SAP	<i>System Applications and Products in Data Processing</i>
SC	Sistema de Controle
SCADA	<i>Supervisory Control and Data Acquisition</i> - Controle Superv. e Aquisição de Dados
SE	Subestação de Energia
SGBD	Sistema de Gerenciamento de Banco de Dados
SRV	Sistema de Realidade Virtual
STL	<i>Stereolithography</i> - Estereolitografia
UC	Caso de Uso
UML	<i>Unified Modeling Language</i> - Linguagem de Modelagem Unificada
URL	<i>Uniform Resource Locator</i> - Localizador Uniforme de Recursos
VM	Máquina Virtual
WYSIWYG	<i>What You See Is What You Get</i> - O que Você Vê é o Formato Final
XML	<i>Extensible Markup Language</i> - Linguagem de Marcação Extensível

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Contextualização e Motivação	1
1.2	Hipótese e Objetivos	3
1.3	Organização da Tese	5
2	Fundamentação Teórica	6
2.1	Realidade Virtual	6
2.1.1	Desafios da Concepção de Sistemas de Realidade Virtual	7
2.1.2	Elaboração de Ambientes Virtuais para Sistemas Elétricos	8
2.2	Subestações de Energia Elétrica	9
2.2.1	Funções do Sistema Elétrico e Níveis de Tensão	10
2.2.2	Unidades Modulares de Subestação	11
2.2.3	Configurações de Arranjos Físicos	11
2.2.4	Supervisão de Subestações de Energia Elétrica	12
2.2.5	Representações Diagramáticas	14
2.2.5.1	Grafos de Cena da Representação Diagramática	17
2.3	Computer-Aided Design	18
2.3.1	Ambiente Bidimensional e Tridimensional	19
2.4	Sistemas de Autoria	20
2.4.1	Categorias de Sistemas de Autoria	21
2.5	Considerações	23
3	Trabalhos Correlatos	25
3.1	Metodologia da Revisão Bibliográfica Sistemática	25
3.2	Apresentação dos Trabalhos Científicos	28
3.2.1	3D CAD Data Extraction and Conversion for Application of Augmented/ Virtual Reality to the Construction of Ships and Offshore Structures	28
3.2.2	CAD Integration in Virtual Reality Design Reviews for Improved Engine- ering Model Interaction	29

3.2.3	<i>CAD to VR - A Methodology for the Automated Conversion of Kinematic CAD Models to Virtual Reality</i>	31
3.2.4	<i>Meta-model for VR-Based Design Reviews</i>	32
3.2.5	<i>Semi-automatic Generation of Virtual Reality Environments for Electric Power Substations</i>	34
3.2.6	<i>Virtual Reality and CAD Systems Integration for Quick Product Variant Design</i>	36
3.3	Análise Comparativa	38
3.3.1	Análise das Metodologias de Integração	39
3.3.2	Análise da Geração de Ambientes Virtuais	41
3.4	Considerações	43
4	Metodologia	45
4.1	Arquitetura do Sistema de Autoria	45
4.2	Etapas da Produção de Ambientes Virtuais com o Sistema de Autoria Proposto	50
4.3	Metodologia do Sistema de Autoria	52
4.3.1	Modelagem Geométrica de Ativos e de Símbolos	52
4.3.2	Gerenciador de Ambientes Virtuais	57
4.3.2.1	Registro de Ativos no Gerenciador de Ambientes Virtuais	59
4.3.3	Manipulação da Planta Baixa	60
4.3.3.1	Criação de Símbolos	61
4.3.3.2	Inserção de Símbolos	62
4.3.3.3	Inserção de Condutores Elétricos	63
4.3.4	Definição dos Metadados dos Ativos Virtuais	63
4.3.5	Integração entre Editor CAD e o <i>Software</i> de Realidade Virtual	66
4.3.5.1	Metamodelo do Arquivo de Integração entre <i>Softwares</i>	67
4.3.6	Recuperação dos Dados de Integração e Reconstrução de Cenários	69
5	Desenvolvimento	74
5.1	Requisitos de <i>Software</i>	74
5.1.1	Requisitos Funcionais	74
5.1.2	Requisitos Não Funcionais	78
5.2	Modelagem UML do Sistema	78
5.2.1	Casos de Uso	79
5.2.2	Diagramas de Classe e de Entidade e Relacionamento	84
5.3	<i>Softwares</i> e Tecnologias de Apoio	85
5.3.1	<i>Software</i> de Modelagem 3D	86
5.3.2	AutoCAD	87

5.3.3	Motor de Jogos Unity	87
5.3.4	Biblioteca Trilib para Unity	88
5.4	Detalhes de Implementação do Editor CAD	88
5.4.1	Implementação das Funcionalidades com API AutoCAD	88
5.4.2	Comandos Implementados para o Sistema de Autoria	90
5.4.3	Interface Gráfica de Acesso Rápido às Ferramentas do	
	Editor CAD	92
5.4.4	Interface Gráfica das Ferramentas do Editor CAD	93
5.4.5	Persistência de Dados entre Editor CAD e Gerenciador de	
	Ambientes Virtuais	93
5.4.5.1	Recuperação de Projetos de Subestações	93
5.4.5.2	Recuperação e Inserção de Símbolos	96
5.4.5.3	Cadastro de Símbolos	97
5.4.5.4	Atualizações de Projetos	98
5.4.6	Implantação do Projeto em Planta Baixa no <i>Software</i>	
	de Realidade Virtual	98
5.5	Detalhes de Implementação do Pré-Visualizador 3D	100
5.5.1	Navegação	100
5.5.2	Informações Visuais	101
5.5.3	Reconstrução do Ambiente Virtual do Pré-Visualizador	102
5.6	Integração do Módulo de Reconstrução no <i>Software</i> de Realidade Virtual	103
5.7	Detalhes de Implementação do Gerenciador de	
	Ambientes Virtuais	105
5.7.1	Arquitetura do Gerenciador de Ambientes Virtuais	105
5.7.1.1	Processos Internos (<i>backend</i>)	106
5.7.1.2	Renderizador de Imagens 360°	109
5.7.1.3	Base de Dados	111
5.7.1.4	<i>Website (frontend)</i>	111
5.8	Implantação do Sistema Proposto	112
6	Avaliação Experimental	115
6.1	Estudo de Caso	116
6.2	Análise da Produção de Ambientes Virtuais de	
	Subestações Elétricas	116
6.2.1	Concepção dos Projetos pelo Sistema de Autoria	117
6.2.1.1	Planta Baixa da Subestação SLAG4	117
6.2.1.2	Projeto da Subestação Hipotética	119
6.2.2	Modelagem 3D e de Símbolos	120
6.2.3	Análise Visual dos Ambientes Virtuais Concebidos	123

6.2.3.1	Análise Visual da Subestação SLAG4	123
6.2.3.2	Análise Visual da Subestação Hipotética	125
6.2.4	Detalhes dos Ambientes Virtuais	126
6.3	Sistema de Supervisão	130
6.4	Precisão dos Elementos dos Ambientes Virtuais	130
6.5	Desempenho do Processo de Reconstrução de Ambientes Virtuais	133
7	Conclusões e Trabalhos Futuros	134
7.1	Principais Contribuições	135
7.2	Conclusões	138
7.3	Trabalhos Futuros	140
	APÊNDICE A - Documentação dos Diagramas de Casos de Uso	152
	APÊNDICE B - Diagramas UML	172
	APÊNDICE C - Análise de Desempenho	179

Introdução

1.1 Contextualização e Motivação

A aplicação de técnicas de Realidade Virtual (RV) potencializou numerosos processos da engenharia e beneficiou diversos setores da indústria, como, por exemplo, sua aplicação nos procedimentos de revisão e tomada de decisão em projetos de engenharia associados ao *Computer-Aided Design* (CAD) (WOLFARTSBERGER, 2019). Além disso, como citado por Silva et al. (2021), estas técnicas são abordadas por companhias de energia elétrica a fim de prover interfaces avançadas de usuário, complementando os diagramas convencionais para supervisão dos ativos de subestações.

A RV é uma interface avançada para aplicações computacionais que permite ao usuário navegar e interagir, em tempo real, nos ambientes tridimensionais (3D) sintetizados pelo computador usando dispositivos multissensoriais (MEIGUINS et al., 2006). Logo, propicia um alto nível de imersividade e fidelidade na representação das informações (ISO, 2020).

O *Software* de RV (SRV) é uma das tecnologias emergentes mais importantes da atualidade (ROLDÁN et al., 2019). Está se tornando amplamente utilizada em processos de treinamento, testes industriais, arquitetura, engenharia, educação, simulação e prototipagem (KOVAR et al., 2016; KUTS et al., 2018; PESSOA et al., 2017; CIPRIAN FIRU et al., 2021). Para Coiffet (2003), os ambientes tradicionais de treinamento e manutenção, formados em sua maioria por aulas teóricas, vídeo-aulas e conteúdo impresso, vêm apresentando limitações em suas práticas e com um alto custo de amparo. Por esta razão, a RV é uma tecnologia com potencial para oferecer recursos a baixo custo e ser empregada extensivamente em diversos contextos.

Como exemplo, os autores Alexandre Cardoso et al. (2016), Liao et al. (2017), Nasyrov e Excell (2018, 2020), Barata, Filho e Nunes (2015), Ribeiro et al. (2014) e Gonzalez Lopez et al. (2019) aplicam as técnicas de RV associadas ao treinamento, simulação e supervisão de sistemas críticos na indústria de energia elétrica, abordando paradigmas de otimização dos processos de produção, maximização do desempenho dos operadores e prevenção de acidentes de operação. Esses sistemas possuem baixo custo de operação, com procedimentos para treinamentos flexí-

veis, com ambientes customizáveis e com altos níveis de interações e percepções pelo usuário (WANG; LI, 2010).

Ambientes Virtuais (AVs) 3D suportados por RV são associados aos sistemas de supervisão por apresentarem recursos visuais que sistemas convencionais não possuem. Segundo Cardoso, Lamounier Júnior e Barcelos (2014), o uso de RV em ambientes críticos provê novos paradigmas para as atividades rotineiras de monitoramento e controle. Assim, a existência de um modelo geométrico tridimensional, fiel às estruturas reais, minimiza a diferença entre o modelo mental de operação em campo e facilita a comunicação entre equipes.

O desenvolvimento de SRV baseados em desenhos CAD envolve processos complexos de implementação e manutenção, pois demanda equipes especializadas em projetos de engenharia, modelagem de cenários tridimensionais e interfaces gráficas por meio de ferramentas de Computação Gráfica (CG). Esses processos são abordados nos trabalhos de Romo et al. (2019), Kersten, Tschirschwitz e Deggim (2017), Chiluisa, Mullo e Andaluz (2018) e Pereira e Ellman (2020), onde tais questões evidenciadas são amplificadas quando se trata de produção em larga escala. O desenvolvimento exige um trabalho especializado, acarretando um alto custo de implementação, o que de certa forma dificulta os processos de concepção e atualização dos Ambientes Virtuais (AVs) (ISO, 2019).

Da mesma forma, os processos de desenvolvimento de RV para supervisão de Subestações de Energia Elétrica (SEs), apresentam níveis de complexidade semelhantes aos descritos. Geralmente, os SRV no contexto da engenharia elétrica, são desenvolvidos por motores de jogos, como os *softwares* Unity Technologies (2022), Unreal Epic Games (2022) ou Lumberyard Amazon (2022). São ferramentas que os usuários possuem profundo conhecimento e experiência. Por exemplo, Moreno et al. (2020) apresenta um sistema de treinamento criado com Unity utilizando bibliotecas, *softwares* e *plugins*, como WorldComposer, Adobe Fuse, SolidWorks e 3Ds Max. Como consequência, essas ferramentas podem ser impraticáveis por usuários finais.

Por outro lado, há os Sistemas de Autoria (SA) especializados na produção de conteúdo que viabiliza a um grupo não-restrito de usuários finais, elaborarem outros sistemas sem a necessidade de conhecimento em linguagens de programação ou ferramentas específicas.

Segundo Kearsley (1982), Jim Ong e Ramachandran (2000) e James Ong e Ramachandran (2003), os SAs facilitam e agilizam a produção de conteúdo digital por meio de ferramentas apropriadas. Locatis et al. (1991) complementa: “os SAs fornecem interfaces gráficas, menus, *prompts* e ícones que ajudam os usuários inserirem conteúdo ao projeto em desenvolvimento”. Desta forma, o paradigma dos SAs é relevante neste trabalho, pois evidencia um modelo associado a metodologias que facilitam o desenvolvimento de RV aplicado a engenharia.

Apesar dos avanços obtidos no desenvolvimento de SRV na engenharia ao longo das últimas décadas, existem ainda muitos desafios a serem vencidos. Portanto, a motivação deste trabalho baseia-se no leque de possibilidades de tecnologias e metodologias para produção de RV aplicadas às subestações elétricas virtuais. Esta pesquisa fundamenta-se na busca por novas estratégias de elaboração de ambientes de RV a partir de processos de criação e integração

automática entre *software* editor de cenários e o SRV. O propósito é favorecer o desenvolvimento de RV através de ferramentas facilitadoras, visando o uso por profissionais com pouca experiência em *softwares* de computação gráfica. Desta forma, a partir da associação de plantas baixas com elementos geométricos, pretende-se reduzir a complexidade do processo de fabricação de AVs para uso em treinamento e supervisão remota de subestações elétricas.

Uma condição importante para o desenvolvimento de AVs a partir de desenhos CAD, é a integração automática entre o SA e o SRV. Esse processo, focado no usuário final, facilita e dispensa os trabalhos manuais como a programação de código-fonte e ajustes de modelos para uso compatível em motores de jogos. Além disso, a metodologia de integração automática possibilita a execução de manutenções nos AVs sem a necessidade de criar novas versões do *software* de RV.

Na literatura atual, alguns trabalhos correlatos propõem técnicas e metodologias de integração para unificar projetos de engenharia com a RV, como demonstrado por [Mattioli et al. \(2015\)](#). Esse trabalho apresenta um método semiautomático de reconhecimento de símbolos, extração de dados e posicionamento espacial por um editor de cenas no motor de jogo Unity.

Outra estratégia de integração de desenhos de engenharia foi apresentada por [Gebert et al. \(2017\)](#). Ele usa um conceito de metamodelo que define uma estrutura de dados combinando informações de modelos 3D e sistema de gerenciamento de produtos em um arquivo de integração. Este arquivo pode ser interpretado e usado por um SRV.

Sob outra perspectiva, [Freeman et al. \(2017\)](#) propõe o uso de modelos paramétricos e integração com RV por meio de um *plugin* do *software* Siemens NX. O *plugin* processa os dados (malha 3D, hierarquia, etc.) do modelo 3D e o serializa, compartilhando-os com o SRV por meio de uma estrutura de rede.

Uma Revisão Bibliográfica Sistemática (RBS) foi realizada abordando questões de pesquisa pertinentes a metodologias de elaboração de AVs associados a desenhos CAD e sua integração com SRV. A RBS apresenta trabalhos relacionados ao tema do presente trabalho, evidencia metodologias e resultados que os autores obtiveram aplicando suas estratégias.

Nenhum desses estudos evidenciados na RBS apresentam uma solução de integração automática por meio de um SA para reprodução de projetos CAD de engenharia em RV. Além disso, esses estudos carecem de metodologias de desenvolvimento que facilitem a criação e compartilhamento por usuários com pouco ou nenhum conhecimento em *softwares* de computação gráfica.

1.2 Hipótese e Objetivos

Considerando as premissas do processo de desenvolvimento de projetos de engenharia para subestações elétricas virtuais e as potencialidades das técnicas de Realidade Virtual, esta pesquisa se orienta na seguinte hipótese: É possível conceber, por um Sistema de Autoria baseado em *software* CAD e associado a biblioteca de ativos 3D, Ambientes Virtuais de Subestações de

Energia Elétrica fieis aos arranjos de campo, assegurando acurácia no geoposicionamento dos componentes em sua representação final, visando apoio às fases de engenharia, supervisão e manutenção do domínio da aplicação.

Assim, esta pesquisa tem como objetivo central, elaborar e avaliar uma metodologia para um Sistema de Autoria baseado em desenhos de engenharia em plantas baixas que viabilize conceber e customizar subestações de energia elétrica (SEs) para Realidade Virtual, com a capacidade de apresentar informações sobre os ativos em campo visando a supervisão remota. Neste sentido, são enumerados os seguintes objetivos específicos:

1. Conceber mecanismos suportados por técnicas de Sistemas de Autoria para possibilitar seu uso por usuários comuns, visando criar, durante a fase de projeto, desenhos de subestações elétricas em plantas baixas CAD;
2. Elaborar métodos e modelos de interface para o Sistema de Autoria, para facilitar, criar e customizar desenhos em plantas baixas através da manipulação de símbolos armazenados em biblioteca;
3. Estabelecer convenções de modelagem geométrica e de símbolos para padronizar as características dos ativos virtuais. Assim, visando o correto uso durante a manipulação dos elementos na planta baixa e durante o processo de integração com o SRV, garantindo que as configurações dos arranjos desenhados em CAD sejam reproduzidos corretamente no AV;
4. Desenvolver uma estratégia de integração entre Sistema de Autoria e Sistema de Realidade Virtual visando automatizar o processo de transferência das informações do espaço bidimensional da planta baixa para o AV tridimensional do SRV. Neste sentido, o processo de integração automático abstém o usuário de tarefas manuais;
5. Depreender sobre os resultados da metodologia proposta para o Sistema de Autoria, avaliando o sistema por meio de um Estudo de Caso utilizando um exemplo real de subestação elétrica e um exemplo hipotético. Assim, visa-se analisar:
 - a capacidade de reutilização dos objetos geométricos entre diferentes projetos,
 - a estratégia de integração,
 - credibilidade em relação ao ambiente real,
 - qualidade visual,
 - aplicação como ferramenta auxiliar para supervisão, e
 - acurácia do cenário virtual em relação ao posicionamento dos equipamentos, comparando uma metodologia de concepção manual e pelo Sistema de Autoria proposto.

1.3 Organização da Tese

Este trabalho está estruturado em sete capítulos distribuídos da seguinte forma:

O primeiro capítulo refere-se à contextualização do tema, hipóteses e objetivos.

O segundo capítulo apresenta os conceitos fundamentais sobre Ambientes de Realidade Virtual, Subestações de Energia Elétrica, *Computer-Aided Design* e Sistemas de Autoria.

O terceiro capítulo apresenta uma RBS e apresentação de trabalhos relacionados ao tema proposto, comparando as tecnologias utilizadas e seus resultados.

O quarto capítulo relata a metodologia utilizada para atender a proposta apresentada.

O quinto capítulo apresenta o desenvolvimento do trabalho descrevendo os requisitos funcionais, modelagem de software e tecnologias empregadas.

O sexto capítulo refere-se à avaliação experimental da estratégia, relatando resultados do desenvolvimento.

E finalmente, no sétimo capítulo, são apresentadas as principais contribuições, conclusões e futuros trabalhos relacionados com esta pesquisa.

Fundamentação Teórica

Neste capítulo são apresentados os conceitos e definições de tecnologias relacionadas ao presente trabalho, dando ênfase aos Ambientes de Realidade Virtual, Subestações de Energia Elétrica, *Computer-Aided Design* e Sistemas de Autoria.

2.1 Realidade Virtual

A RV é descrita com conceitos e características distintos por autores. De acordo com Kirner e Siscoutto (2007), a Realidade Virtual é uma interface avançada de usuário para acessar aplicações executadas no computador, propiciando a visualização, movimentação e interação do usuário em tempo real, nos ambientes tridimensionais (3D) gerados por computador. O sentido da visão costuma ser preponderante em aplicações de Realidade Virtual, mas os outros sentidos também podem ser usados para enriquecer a experiência do usuário, como tato e audição.

Segundo Wiederhold e Boucharde (2014), a RV é um conjunto de tecnologias que, quando combinadas, proporcionam uma interface interativa com o usuário em um ambiente gerado pelo computador, proporcionando imersão no ambiente virtual tridimensional, fazendo com que o usuário se sinta presente neste mundo. Nesse sentido, em aplicações de RV, o usuário navega e interage em tempo real com um AV, conseguindo realizar ações e receber estímulos, os quais proporcionam a tal usuário sentimento de fazer parte deste ambiente.

Alexandre. Cardoso et al. (2007) define Realidade Virtual como um sistema computacional usado para criar um ambiente artificial, onde o usuário tem a impressão de não somente estar dentro deste ambiente, mas também a de estar habilitado com a capacidade de navegar nele, interagindo com seus objetos de maneira intuitiva e natural.

Desta forma, várias técnicas para a interação com esses ambientes são aplicadas, envolvendo o uso de dispositivos avançados de entrada e saída, os quais garantem 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 capacidade exploratória. Esses atributos são conhecidos como os três I's da Realidade Virtual: Imersão, Interação e Imaginação (COIFFET, 2003).

2.1.1 Desafios da Concepção de Sistemas de Realidade Virtual

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

Ciente de tais desafios, Zhao (2011) listou dez questões que ainda devem ser trabalhadas para que os SRV adquiram maior maturidade industrial. São elas:

- **Modelos digitais:** Análogo 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), pois está relacionado a fatores como a compreensão do desenvolvedor desse mundo e a complexidade. Nesse sentido ressalta-se a importância do estudo de um conceito de “modelável”.
- **Complexidade:** Não existem métricas satisfatórias para a medida de complexidade de modelos, ainda que, no caso específico da geometria seja possível analisar parâmetros como número de triângulos, polígonos ou vértices.
- **Credibilidade dos modelos:** Analogamente à complexidade, a credibilidade dos modelos virtuais gerados dificilmente pode ser medida. Para se ter níveis adequados de imersão, os objetos virtuais devem ser suficientemente convincentes aos usuários. Sendo assim, como os modelos são simplificações dos elementos reais associados, cabe aos desenvolvedores de RV encontrar o ponto ótimo, evitando a modelagem em excesso ou perda de imersão e envolvimento.
- **Semelhanças dos modelos:** Os métodos existentes para estimar a similaridade entre modelos não são satisfatórios. Isto se deve à dificuldade em estabelecer uma definição universalmente aceita da relação binária de similaridade. A similaridade, por sua vez, é importante nos processos de reaproveitamento, classificação e reconhecimento de modelos.
- **Qualidade da imagem:** Ainda que humanos normalmente reconheçam a similaridade entre imagem e o nível de distorção, tais processos não são triviais para o campo de visão computacional. Não há uma forma universal aceita de se medir níveis de clareza e distorção.

- **Fidelidade em tempo real:** A fidelidade em ambientes virtuais está associada ao desempenho em tempo real. Existe um compromisso entre modelos e objetos reais, existindo uma dualidade, quanto mais precisa a geometria do modelo, por exemplo, maior será o tempo de renderização.
- **Elementos básicos (meta-elementos):** Os modelos geométricos são construídos por vértices, arestas, faces e suas transformações topológicas, enquanto as cores podem ser expressas como uma combinação de componentes. Entretanto, os elementos básicos para a modelagem física e comportamental dos objetos ainda não foram identificados.
- **Materiais e modelos comportamentais:** Não se sabe com precisão o nível necessário de entendimento do mundo natural e das forças que atuam em seu comportamento, para desenvolver modelos satisfatórios de movimentos de corpos e comportamento. Ainda, esses elementos reais não são facilmente classificados como P-difíceis, NP-difíceis ou NP-completos, dificultando, portanto, a sua análise de computabilidade.
- **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.
- **Avaliação de desempenho:** Ainda que métricas de desempenho simplificadas, baseadas na taxa de renderização em quadros por segundo, estejam disponíveis, soluções refinadas constituem um importante elemento de pesquisa para o desenvolvimento de tecnologias futuras. A análise de desempenho deve considerar 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.

É importante salientar que os desafios descritos foram mitigados durante o desenvolvimento do Sistema de Autoria para Realidade Virtual focada no domínio de concepção de SEs. Portanto, destaca-se a possibilidade de ampliação do domínio de aplicação através da biblioteca de modelos geométricos e de arranjos.

Os principais tópicos abordados no desenvolvimento são: credibilidade, semelhança, fidelidade em tempo real e avaliação de desempenho.

2.1.2 Elaboração de Ambientes Virtuais para Sistemas Elétricos

Novos paradigmas para monitoramento e atividades de controle que consideram sistemas críticos na engenharia têm sido providenciados com o uso da Realidade Virtual. A importância

da utilização de modelos tridimensionais é relevante neste contexto, pois contribui consideravelmente para o modelo mental e sobre o ambiente real dos profissionais que atuam em salas de controle remoto (CARVALHO et al., 2016).

Desta forma, é importante considerar que a reprodução 3D de ambientes relacionados a geração elétrica envolve a utilização de objetos em larga escala, espaços populados, vegetação, entre outros elementos que devem ser considerados para ser possível alcançar uma solução dotada de qualidade e alto desempenho (SIMÕES et al., 2012).

Além disso, Simões et al. (2012) infere que diante do cenário favorável da RV no setor elétrico, a reconstrução de objetos tridimensionais representa uma etapa fundamental para a concepção de soluções digitais que podem contribuir com o processo de produção. Para tanto, existem técnicas acessíveis, eficientes e baratas na geração de modelos necessários na indústria.

Contudo, quando aplicada na construção 3D de dispositivos elétricos, apresenta limitações como a dificuldade de se isolar os objetos alvos para a modelagem, o acesso a equipamentos devido ao protocolo de segurança e a qualidade do modelo final. Como alternativa, tem-se a elaboração de objetos tridimensionais a partir de fotos e informações de referência, a qual ainda representa uma alternativa viável, se comparada a outras técnicas caras de reprodução tridimensional, como o uso de *lasers* e *scanners* (SIMÕES et al., 2012).

2.2 Subestações de Energia Elétrica

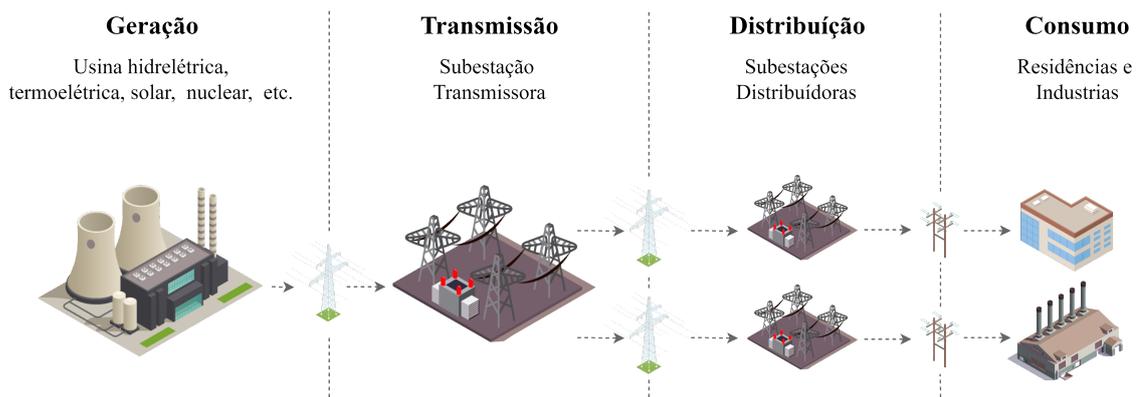
Pode-se definir uma subestação, de forma genérica, como sendo um conjunto de sistemas independentes concebidos para atender a um objetivo comum: servir ao sistema elétrico da melhor maneira possível, atendendo aos seus requisitos no limite dos custos (VIOLIN; D'AJUZ; LACORTE, 2013). Muzy (2012) acrescenta de forma técnica: “trata-se de um conjunto de equipamentos específicos interligados entre si, visando controlar o fluxo de potência, modificar tensões e alterar a corrente elétrica assim como garantir a proteção do sistema elétrico”.

A Figura 2.1 representa resumidamente os setores do sistema elétrico de potência. A energia elétrica é produzida por sistemas geradores e transmitida para uma subestação primária onde sua tensão é medida, controlada e elevada para fins de qualidade e transmissão. Sendo assim, por uma linha de transmissão a energia é transportada até uma subestação de distribuição e rebaixada para ser utilizada em indústrias e sistemas urbanos. Nesse sentido, as subestações 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 compra ou vendas de energia de terceiros;

- converter corrente alternada em corrente contínua, ou vice-versa;
- controlar ou alterar a frequência da rede;
- comutar estado de circuitos e direcionar fluxo energético, e;
- proporcionar proteção e confiabilidade ao Sistema Elétrico de Potência.

Figura 2.1: Diagrama conceitual do Sistema Elétrico de Potência.



Fonte: Adaptação de (LOPES et al., 2012).

2.2.1 Funções do Sistema Elétrico e Níveis de Tensão

As subestações podem ser classificadas em baixa tensão, média tensão, alta tensão e extra alta tensão. Nessa lógica, as de baixa tensão operam com até 1kV sendo utilizadas em áreas prediais, fornecendo energia elétrica para tais. Subestações classificadas como média tensão utilizam entre 1kV a 34.5kV, as tensões padrões entre esses dois valores são, 6.6kV, 13.8kV e 23kV, utilizadas geralmente em empresas que demandam certa quantidade de energia diferente das áreas urbanas, como indústrias e fábricas.

Subestações de alta tensão, no que lhe concerne, possuem níveis entre 34.5kV e 230kV, com tensões padrões de: 69kV, 138kV e 230kV, essas tensões são encontradas em subestações de distribuição e transmissão. Por fim, a Extra Alta Tensão é utilizada em subestações de transmissão que possuem tensão superior a 230kV, como: 345kV, 440kV, 500kV e 750kV.

Quanto às funções, pode-se dividir o sistema elétrico global em: subestações de transmissão, sub-transmissão e distribuição. Esta é uma classificação onde a potência possui importância.

As subestações de transmissão são um dos principais elementos dos sistemas elétricos. A energia é gerada em uma usina elétrica e segue para a subestação primária de transmissão. São utilizados transformadores para elevar a tensão do gerador até tensões extremamente altas para transmissão de longa distância através da rede de transmissão (MUZY, 2012).

A rede de sub-transmissão recebe energia da subestação de transmissão visando transmitir energia elétrica às pequenas cidades ou importantes consumidores industriais. Em geral, o arranjo das redes de sub-transmissão é em anel para aumentar a segurança do sistema (LEÃO, 2009). Já a rede de distribuição é levada diretamente ao consumidor. Ela recebe energia das linhas de sub transmissão e as transporta para as redes de distribuição, geralmente com abaixamento de tensão (MUZY, 2012).

2.2.2 Unidades Modulares de Subestação

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

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

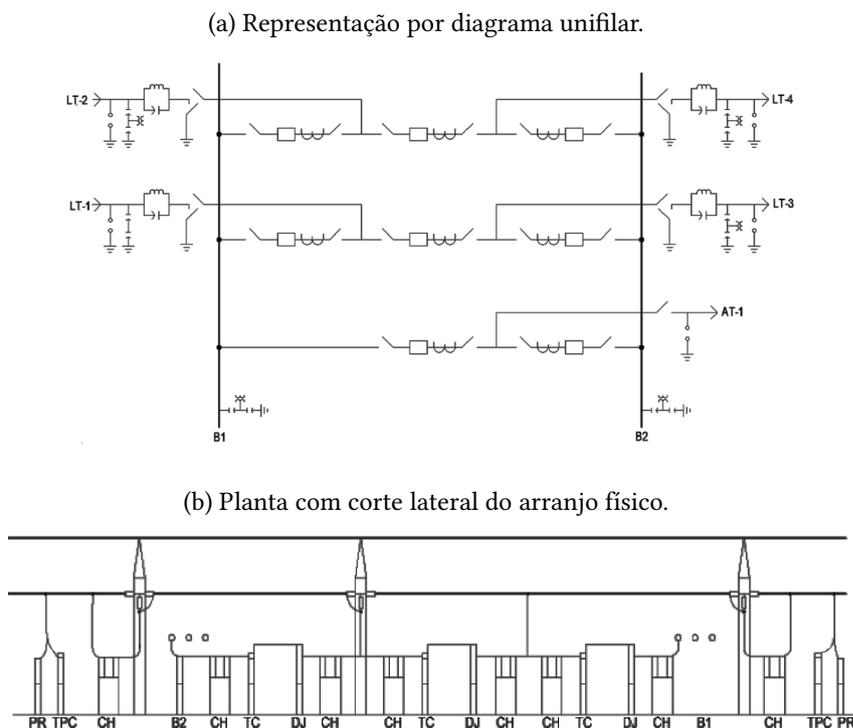
2.2.3 Configurações de Arranjos Físicos

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

Segundo (Violin, D’Ajuz e Lacorte (2013)) pode-se dividir as configurações de barra de subestações em dois grupos. O primeiro grupo é o das configurações com conectividade concentrada, que possuem barra simples e barra dupla com disjuntor simples. O segundo grupo é o das configurações com conectividade distribuídas, que contém anel simples e barra dupla com disjuntor e meio.

A Figura 2.2a exemplifica a configuração de barra dupla com disjuntor e meio em pátio de manobras, por intermédio de diagrama unifilar. O termo “configuração de barra” pode ser entendido como sendo a maneira pela qual os equipamentos do pátio de manobras estão conectados, ou seja, a conectividade elétrica da subestação (VIOLIN; D’AJUZ; LACORTE, 2013).

Figura 2.2: Exemplo de barra dupla com disjuntor e meio.



Fonte: Adaptação de (VIOLIN; D'AJUZ; LACORTE, 2013).

A Figura 2.2b mostra uma planta de corte típico (projeto) do arranjo físico da configuração da Figura 2.2a. O termo “arranjo físico” pode ser entendido como sendo a maneira pela qual os equipamentos do pátio de manobras estão dispostos fisicamente de forma a atender, entre outras coisas, a configuração de barra previamente definida. Entretanto, alguns autores utilizam o termo “arranjo físico” tanto para a conectividade elétrica da subestação como para a disposição física dos equipamentos no pátio da subestação (VIOLIN; D'AJUZ; LACORTE, 2013).

2.2.4 Supervisão de Subestações de Energia Elétrica

Os equipamentos de alta tensão das subestações, tais como transformadores de potência, reatores de derivação, transformadores de corrente, transformadores de potencial capacitivos, disjuntores de alta tensão e seccionadores são os ativos de produção das concessionárias de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. Como tal, são de fundamental importância para a operação segura e continuidade do fornecimento de energia elétrica. Quando operados em condições adequadas e gerenciados precisamente, estes ativos tornam-se um dos principais fatores de eficiência operacional, econômica e de competitividade das concessionárias do setor (ALVES, 2013).

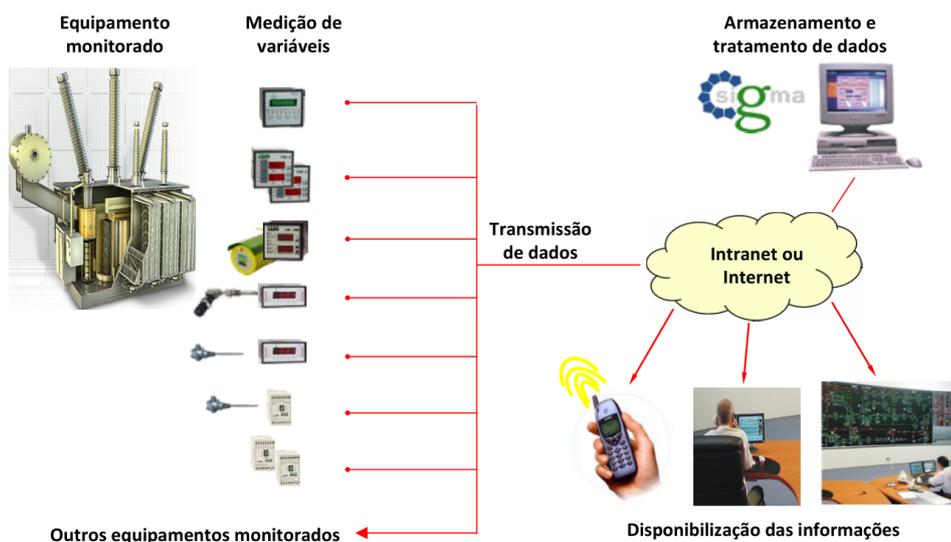
Visando garantir uma maior confiabilidade e disponibilidade desses equipamentos, bem como a redução de custos de operação, manutenção e aumento da eficiência da manutenção, os sistemas para monitoramento e diagnóstico *on-line* do estado dos ativos têm se disseminado na

última década. Desta forma, proporcionando uma ferramenta para a migração da manutenção preventiva para preditiva e para a filosofia de manutenção centrada na confiabilidade (AMON et al., 2003).

Tipicamente, os sistemas de monitoração *on-line* de transformadores de potência adotam a topologia mostrada no diagrama de blocos da Figura 2.3, onde se observa as quatro partes principais, detalhadas a seguir:

- medições de grandezas;
- transmissão de dados;
- armazenamento e tratamento de dados;
- interface com os usuários.

Figura 2.3: Topologia típica de um sistema de supervisão.



Fonte: (ALVES, 2013).

Um sistema integrado de energia elétrica é complexo devido às interconexões entre subestações, interação entre sistemas de concessionárias distintas, diversos equipamentos que requerem supervisão e gerenciamento. Portanto, a ideia de ter um sistema *on-line* e centralizado para gerenciar os ativos é importante. Os sistemas SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*) permite que um operador faça mudanças de ajustes em controladores a distância, abra ou feche válvula, ou interruptores, monitore e colete informações de medições (BOYER, 2010). Bailey e Wright (2003) acrescentam que o

SCADA refere-se à combinação de telemetria e aquisição de dados [...] abrange a coleta da informação, a transferência para a central, a análise e o controle necessários e a exibição

dessas informações em várias telas ou displays. As ações de controle necessárias são então transmitidas de volta ao processo.

O Centro de Operações do Sistema (COS) é um ambiente de controle centralizado de todos os conjuntos de subestações de uma concessionária. Com um sistema seguro, o COS se comunica com as subestações por meio da *intranet* e sistemas SCADA, gerenciando e supervisionando os dados aferidos em campo, gerenciando todos os aspectos críticos do sistema. A Figura 2.4 mostra o COS da Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG) com telas de *software* de supervisão integrado com o sistema SCADA.

Figura 2.4: Dispositivo de visualização e supervisão do Centro de Operações do Sistema da CEMIG.



Fonte: o autor.

2.2.5 Representações Diagramáticas

Diagrama é uma forma de representação gráfica utilizada por diversas áreas da ciência e engenharia para demonstrar um esquema simplificado ou resumo sobre um produto. Segundo Waldring (2001), diagramas descrevem os componentes individuais e os relacionamentos que todos compartilham simultaneamente.

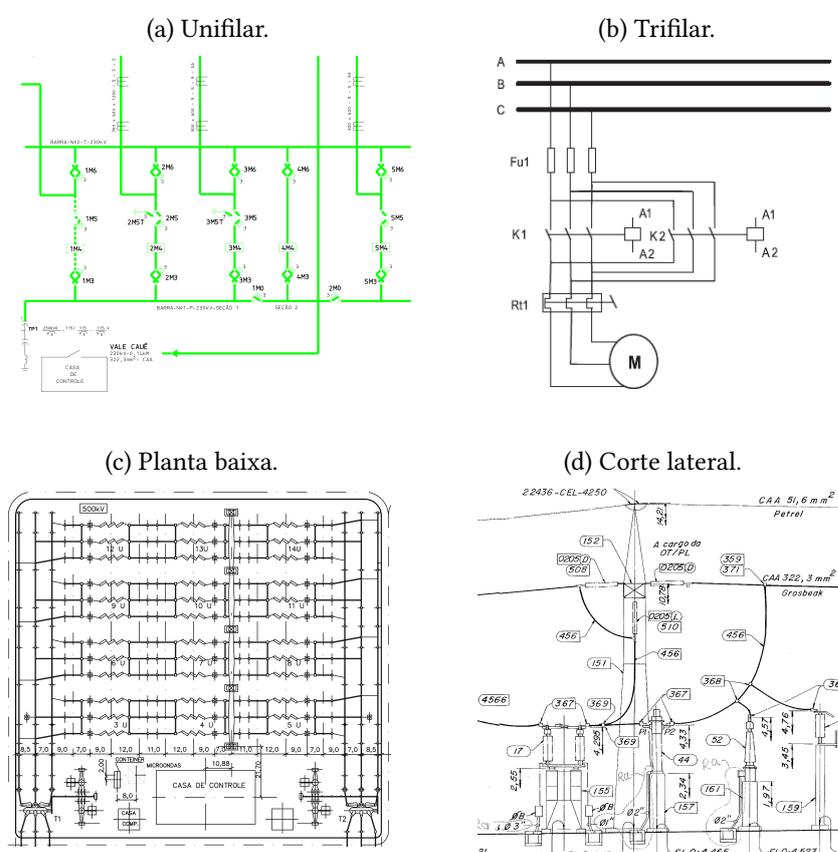
Segundo Downing e Thomas (1986), os diagramas facilitam apreender ideias e organizá-las em um campo visual. Como meio e método, a diagramação pode ser caracterizada como uma estratégia de visualização que desfruta de uma vantagem distinta sobre os métodos analíticos verbais.

Na engenharia de *software* o diagrama utilizado para representar arquiteturas e especificar comportamentos de sistemas é denominado *Unified Modeling Language* (UML), que possui diversas categorias de diagramas para representar os aspectos internos dos *softwares*. Na engenharia elétrica, são utilizados, por exemplo, os diagramas lógicos para representar circuitos

eletrônicos, os diagramas unifilares ou trifilares para representarem sistemas elétricos de potência e as plantas baixas para representar as disposições dos arranjos físicos de subestações elétricas. Em sua multiplicidade, os diagramas são representações gráficas de um sistema, descrevendo etapas de desenvolvimento, ilustrando um processo de negócio e explanando dados complexos.

Em projetos de subestações de energia elétrica, pode-se retratar os seguintes tipos diagramas: unifilar (Figura 2.5a), trifilar (Figura 2.5b), planta baixa (Figura 2.5c) e corte lateral (Figura 2.5d). São diagramas utilizados em diferentes etapas de projetos, para fins específicos, como, por exemplo, a concepção, orçamento, planejamento e execução.

Figura 2.5: Principais diagramas utilizados em projetos de subestações.



Fonte: o autor.

Cada categoria de diagrama possui aplicações em diferentes contextos em projetos de subestações, por exemplo, alguns são adequados para documentação e outros para a execução do projeto.

Os diagramas unifilares são diagramas ortogonais que não seguem, necessariamente, a localização geoespacial dos equipamentos de energia. São representados por linha e baseados na relação da conexão elétrica entre os equipamentos, são geralmente usados na operação do sistema elétrico (HUSSAIN; ASLAM; ARIF, 2018).

Em alternativa, o diagrama trifilar representa o circuito elétrico considerando suas três fases. Seu diagrama, além de representar as informações evidenciadas no diagrama unifilar, contém outros detalhes como a representação de cada fase por uma linha e símbolos representativos dos comandos elétricos do sistema.

Os tópicos a seguir são características dos diagramas apresentados, abordando as necessidades primordiais para projetar fidedignamente, no aspecto virtual e real, uma subestação de energia elétrica, considerando as formas de representação, informações, visualizações:

- **Projetos da subestações:** diagramas utilizados em projetos de SEs pelas concessionárias de energia elétrica, pertinentes ao planejamento, documentação, execução e supervisão;
- **Operação do sistema elétrico:** diagramas utilizados para a supervisão e operação do sistema elétrico. Utilizado em conjunto de *softwares* de supervisão;
- **Disposição física dos elementos em relação ao ambiente real:** alguns diagramas podem representar subestações por meio de símbolos e conexões, porém, não representando a disposição dos elementos fielmente em relação ao posicionamento e escala. A representação gráfica da disposição dos elementos é imprescindível quando se trata de reprodução fidedigna em um ambiente real;
- **Representação simbólica similar ao elemento real:** aparência do símbolo representativo é semelhante ao modelo 3D. Esse item é importante para o processo cognitivo do usuário durante a manipulação dos elementos do diagrama;
- **Documento completo do projeto:** visualização geral do diagrama em um único documento, sem a necessidade de utilizar outros arquivos complementares;
- **Visualização de topo (vista superior):** visualizar todo o diagrama representando a visualização de cima para baixo do AV.

A Tabela 2.1 apresenta a comparação entre os diagramas utilizados em projetos de SEs e os pré-requisitos necessários nos diagramas para o desenvolvimento do presente trabalho. Dentre os diagramas apresentados na tabela, o Diagrama de Planta Baixa se destacou dos outros em relação às características.

A planta baixa é adotada em projetos de planejamento e execução, é a partir dela que se tem ideia das dimensões e proporções de todos os espaços e distribuições de elementos no ambiente, sendo possível reconstruir e analisar circunstâncias antes mesmo da execução do produto.

O método de elaboração e visualização da planta baixa é feita por meio da representação simbólica de um ambiente real. Os símbolos representam os itens reais e a planta baixa representa o ambiente pela composição dos símbolos.

Tabela 2.1: Comparação de diagramas utilizados para projetos de subestações.

	Unifilar	Trifilar	Planta Baixa	Corte Lateral
Projetos de SEs	Sim	Sim	Sim	Sim
Operação do sistema	Sim	Sim	Não	Não
Disposição física dos elementos	Não	Não	Sim	Sim
Símbolo similar ao real	Não	Não	Sim	Sim
Documento completo	Sim	Sim	Sim	Não
Visualização de topo	Sim	Sim	Sim	Não

Fonte: o autor.

2.2.5.1 Grafos de Cena da Representação Diagramática

Um grafo de cena é uma estrutura de dados que define o relacionamento espacial e lógico de um cenário, para gerenciamento e renderização de dados gráficos. Geralmente é representado como um grafo hierárquico, que contém uma coleção de nós, incluindo um nó raiz de nível superior e vários nós de grupo. Cada um podem ter qualquer quantidade de número de nós filhos e um conjunto de nós folhas, os quais possuem zero nós filhos e servem juntos como a camada inferior da árvore. Um grafo de cena típico não permite um ciclo direcionado (onde alguns nós estão conectados em uma cadeia fechada) ou um elemento isolado dentro de si (WANG; LI, 2010).

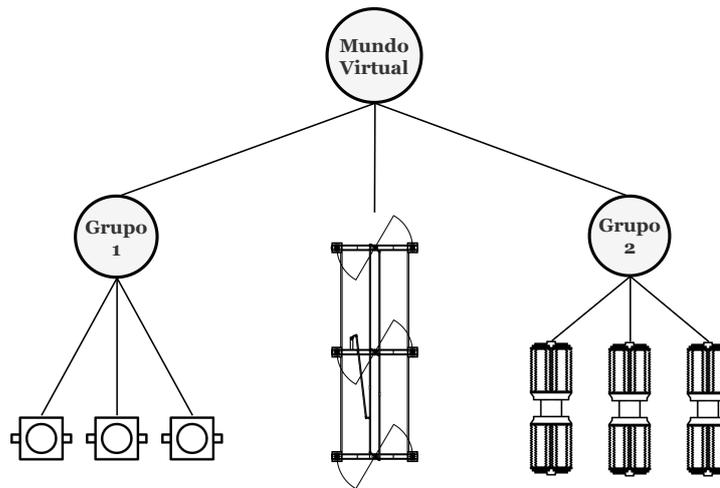
Segundo Wang e Li (2010), o conceito de grafo de cena tem sido amplamente aplicado em softwares e aplicativos modernos, como AutoCAD, Maya, CorelDraw, VRML e Open Inventor.

O grafo de cena, no contexto do software CAD, é gerado ao concluir três etapas do desenho, são elas: quando inserido elementos simbólicos no desenho; quando elementos são identificados com o mesmo código identificador e quando são relacionados.

Ao inserir novo símbolo no desenho, é atribuído um código global para sua identificação, cada elemento possui identificação única. Os símbolos podem carregar outras informações no formato de atributos (dados extras), como a identificação do modelo 3D que ele representa ou a relação com outro elemento do desenho. O desenho CAD pode ser representado como grafo de cena tendo nós filhos com vários níveis de profundidade.

A Figura 2.6 representa um Grafo de Cena de um Ambiente Virtual representado com símbolos CAD, o mundo virtual possui sete elementos sendo agrupados pelo Grupo 1 e Grupo 2. O Grupo 1 possui três elementos identificados com um código em comum, tornando eles uma representação trifásica, com o mesmo objetivo, o Grupo 2 possui três elementos com identificações iguais.

Figura 2.6: Grafo de cena de um Ambiente Virtual composto por sete elementos em grupos.



Fonte: o autor.

As identificações de elementos para o tipo trifásico são necessárias para o entendimento do sistema ao coletar e gerenciar informações consumidas, onde três equipamentos representam um.

2.3 *Computer-Aided Design*

O CAD, em português Desenho Assistido por Computador, envolve qualquer atividade de desenho que utiliza o computador para desenvolver, analisar ou modificar um projeto de engenharia. Os sistemas CAD são baseados em computação gráfica interativa, no qual o computador é empregado para criar, transformar e exibir dados em formas de figuras e símbolos. Em parte dos CADs, os desenhos são construídos a partir de elementos geométricos primitivos como pontos, linhas, arcos e círculos. Por meio de manipulações nas formas geométricas, os detalhes necessários dos desenhos são formulados (SARCAR; RAO; NARAYAN, 2008).

Sarcar, Rao e Narayan (2008) listaram quatro razões para utilizar *softwares* CAD em projetos de engenharia:

- **Aumento da produtividade:** o uso de CAD ajuda o projetista a visualizar o produto e seus subconjuntos de peças, reduzindo o tempo necessário para sintetizar, analisar e documentar o projeto. Além disso, também há a redução de custos e tempo de conclusão do projeto;
- **Melhor qualidade do projeto:** um sistema CAD permite uma análise minuciosa da engenharia em um curto período. Os erros pertinentes são reduzidos pela precisão incorporada ao sistema e por meio de verificações. Tais fatores elevam a qualidade e precisão do projeto;

- **Melhor comunicação e documentação:** o uso de *softwares* CAD fornece melhores desenhos de engenharia, padronização nos desenhos, melhor documentação, menos erros de desenho e maior legibilidade, e;
- **Criação de banco de dados:** o processo de criação de projetos gera um grande número de desenhos com informações e dados pertinentes, os quais podem ser utilizados para outros projetos. Com isso, um banco de dados é criado e pode ser aplicado para fabricação integrada por computador, como planejamento de processos e outros.

Em outros contextos, [Adeleke \(2019\)](#) cita alguns benefícios em importantes aplicações práticas do CAD, como o desenvolvimento de réplicas de personagens para jogos e filmes, unindo tecnologia de captura de movimentos e *software* CAD para gerar animações de alta qualidade; projetos de construções para redução de emissão de carbono em Abu Dhabi que foi projetada em CAD e possibilitando correções e simulações estruturais; montagem e simulações de um avião Airbus A380 para encontrar e resolver problemas durante o desenvolvimento em CAD em 3D. Além disso, [Adeleke \(2019\)](#) complementa as justificativas de [Sarcar, Rao e Narayan \(2008\)](#) adicionando os seguintes benefícios:

- **Flexibilidade no *design*:** os sistemas CAD interativos oferecem a vantagem da fácil edição do projeto para atender os requisitos do cliente;
- **Simulações:** testes virtuais possibilitam análises de comportamentos em diferentes ambientes, proporcionando recriar fielmente situações complexas e obter resultados para investigação;
- **Fabricação:** após o projeto auxiliado por computador, os produtos podem ser utilizados em manufatura jussante, como fabricação de componentes em máquinas de Comandos Numéricos Computadorizados (CNC), inspeção assistida por computador, preparação de listas de montagem e listas de materiais para produção e prototipagem rápida.

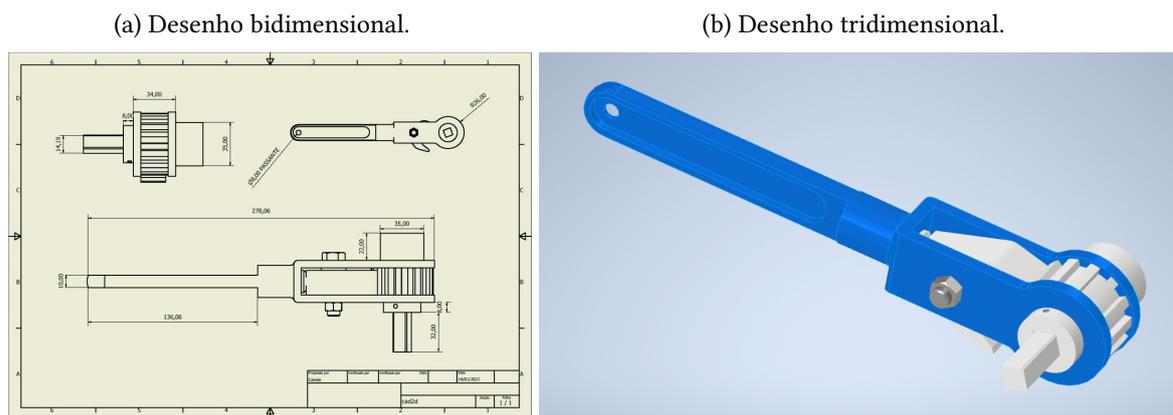
2.3.1 Ambiente Bidimensional e Tridimensional

Os projetos CAD são concebidos em planos 2D (linhas, elipses, polígonos) ou espaços 3D (formas geométricas, objetos sólidos). Segundo [Sarkar \(2014\)](#), a definição da representação do desenho CAD é atribuída ao tipo de produto que está em desenvolvimento, nível de detalhes, etapas de produção e documentação. É comum que produtos usem os dois espaços e sejam abordados em diferentes etapas do projeto e produção.

A concepção de um projeto de construção civil, por exemplo, pode ser realizado em 2D e 3D. Os responsáveis podem optar pelo desenho de uma planta baixa com objetivo de documentar e compartilhar informações com os operários durante a obra e, posteriormente, recorrer a um desenho 3D para simulações estruturais, projetos hidráulicos, iluminação e arquitetura.

Exemplificando os desenhos CAD em 2D e 3D, a Figura 2.7 apresenta o projeto de uma ferramenta. A Figura 2.7a demonstra o projeto em um plano 2D, onde a vista superior, frontal e lateral são evidenciadas e detalhadas com cotas, pertinentes aos aspectos construtivos e dimensionais de cada parte do objeto. Desta forma, os responsáveis pela fabricação tem um esboço detalhado e apropriado.

Figura 2.7: Projeto CAD de uma ferramenta representada em espaços dimensionais distintos.



Fonte: o autor.

A Figura 2.7b apresenta o projeto da ferramenta no espaço 3D com as mesmas dimensões apresentadas no espaço 2D. O desenvolvimento é realizado por componentes geométricos sólidos modificados até obterem a forma do produto final, podendo ser realizados testes e simulações de resistência dos materiais e das peças.

2.4 Sistemas de Autoria

Segundo Kearsley (1982), Jim Ong e Ramachandran (2000) e James Ong e Ramachandran (2003), um SA refere-se a um sistema de computador ou conjunto de programas que viabiliza, a um grupo não-restrito de usuários, criar outro sistema sem utilizar conhecimentos de linguagens de programação convencionais.

Segundo Kirner e Santin (2008), são sistemas para facilitar e agilizar o trabalho de produção de conteúdo digital, como, por exemplo, multimídia, materiais didáticos, animações e ambientes 3D. De acordo com Leffa (2006), é um *software* utilizado para a produção de arquivos digitais, incluindo textos, imagens sons e vídeos.

Geralmente, utilizam interfaces gráficas para associar operações computacionais a elementos visuais, visto que os apelos visuais são estimulantes e reforçam a percepção do usuário (KIRNER; SANTIN, 2008).

Os SAs fornecem ferramentas na tela, menus, *prompts* e ícones que ajudam os usuários a inserir conteúdo, compor gráficos, prescrever ramificações e assim por diante. Desta forma, o

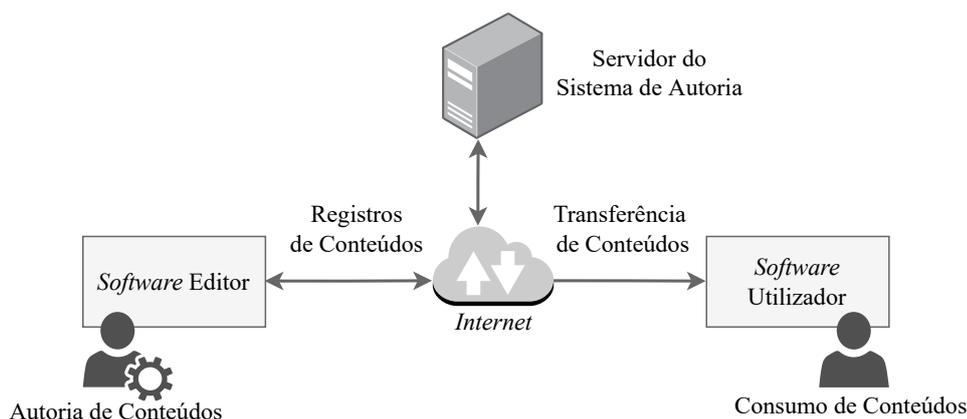
programa gera os códigos subjacentes e os requisitos de estruturação do programa estão implícitos nos procedimentos de autoria, nenhum conhecimento de comandos, sintaxe ou convenções de codificação é necessário (LOCATIS et al., 1991).

Os usuários de um SA geralmente alcançam muita produtividade. Se a programação por códigos não for necessária, não há necessidade de contratar programadores. A eficiência também pode aumentar porque não é necessário tempo para criar ou depurar o código, visto que o código gerado está livre de erros, a menos que os próprios sistemas estejam "com erros" (KEARSLEY, 1982). A principal vantagem dos SAs está nos editores acionados por menus, que reduzem a quantidade de programação necessária (MERRILL; TWITCHELL, 1994).

A Figura 2.8 apresenta um diagrama conceitual adaptado do trabalho de Berena et al. (2015), que descreve um SA baseado na arquitetura cliente-servidor na *internet*. A implementação de SAs seguindo essas características permite que o conteúdo produzido pelo autor seja compartilhado com usuários consumidores. Todo o material produzido pode ser armazenado no servidor e disponibilizado para acesso a qualquer momento e em qualquer lugar. Desta forma, o autor utiliza as ferramentas facilitadoras do SA para produzir o conteúdo abstratamente e o usuário recebe o conteúdo editado e pronto para ser utilizado.

A arquitetura abordada por Berena et al. (2015) é relacionada com este trabalho. Suas características são benéficas em questão de compartilhamento e disponibilidade do material produzido.

Figura 2.8: Diagrama conceitual de um Sistema de Autoria baseado em cliente-servidor para produção de conteúdo.



Fonte: Adaptado de Berena et al. (2015).

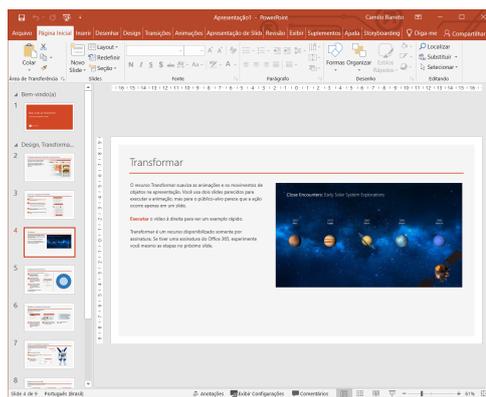
2.4.1 Categorias de Sistemas de Autoria

Segundo Souza (1997), o SA pode ser classificado em três grupos distintos: (a) baseados em telas; (b) baseados em ícones ou dirigidos a eventos; e (c) baseados em linha do tempo. Nos

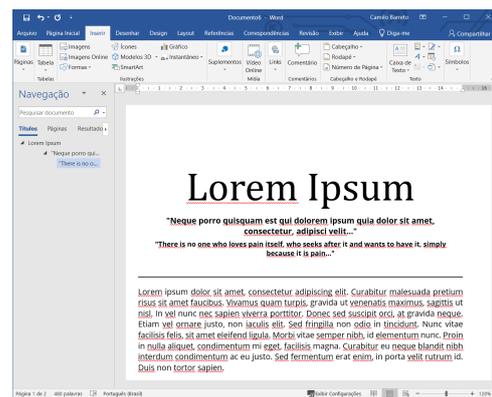
pacotes baseados em telas o autor trabalha em painéis do tipo WYSIWYG (*What You See Is What You Get*, em português “o que você vê é o formato final”), ou seja, as telas durante a concepção do conteúdo são reproduções exatas das telas que compõe o conteúdo que está sendo desenvolvido pelo SA. Nesta categoria se enquadram o Microsoft PowerPoint e Word, apresentados na Figura 2.9.

Figura 2.9: Exemplos de Sistemas de Autoria baseados em telas.

(a) Microsoft PowerPoint.



(b) Microsoft Word.

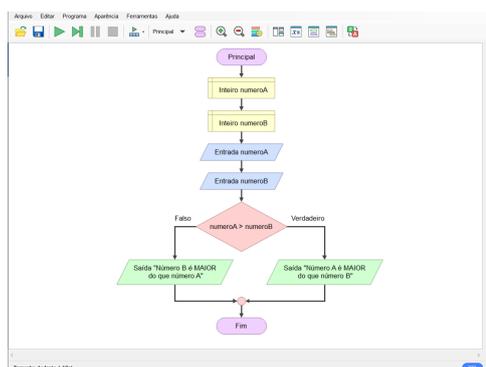


Fonte: o autor.

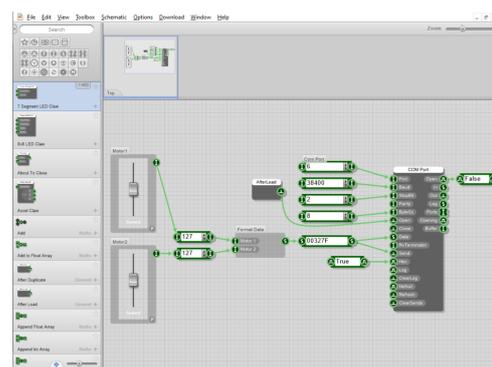
Exemplos de SAs baseados em ícones são os *softwares* Flowgorithm e FlowStone, apresentados na Figura 2.10. Nestes *softwares* a construção de um conteúdo é feito através de um fluxograma contendo diagramas e ícones, e não por *scripts*. Desta forma, os sistemas fornecem ao usuário uma abstração das funcionalidades, que quando programados por códigos podem gerar demora na produção. Nos exemplos apresentados, o autor pode buscar e inserir os ícones e componentes de diagramas para formar uma estrutura lógica, executando um fluxo de funções para alcançar um objetivo.

Figura 2.10: Exemplos de Sistemas de Autoria baseados em ícones.

(a) Flowgorithm.



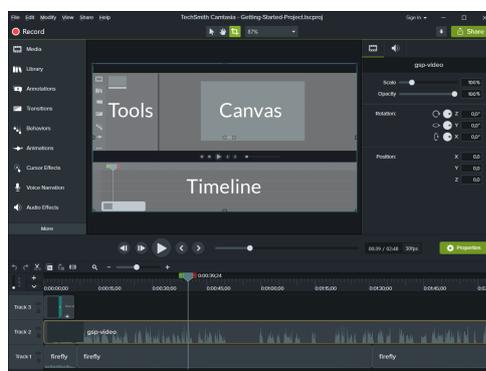
(b) FlowStone.



Fonte: o autor.

Os SAs baseados em linha do tempo são otimizados para trabalharem com mídias dinâmicas, como animações, vídeos e áudios. A Figura 2.11 apresenta o *software* Camtasia, um editor de vídeos e áudio para produção de conteúdo audiovisual. A autoria do conteúdo é realizada em janelas com ferramentas que facilitam a manipulação das mídias. Por uma linha do tempo, o usuário pode controlar a exibição do conteúdo com base no tempo, permitindo elementos serem apresentados e ocultados a medida que o fluxo de apresentação é continuado. Desta forma, é possível editar o conteúdo e disponibiliza-lo de uma forma definitiva para apresentação.

Figura 2.11: *Software* Camtasia: exemplo de Sistema de Autoria baseados em linha do tempo.



Fonte: o autor.

2.5 Considerações

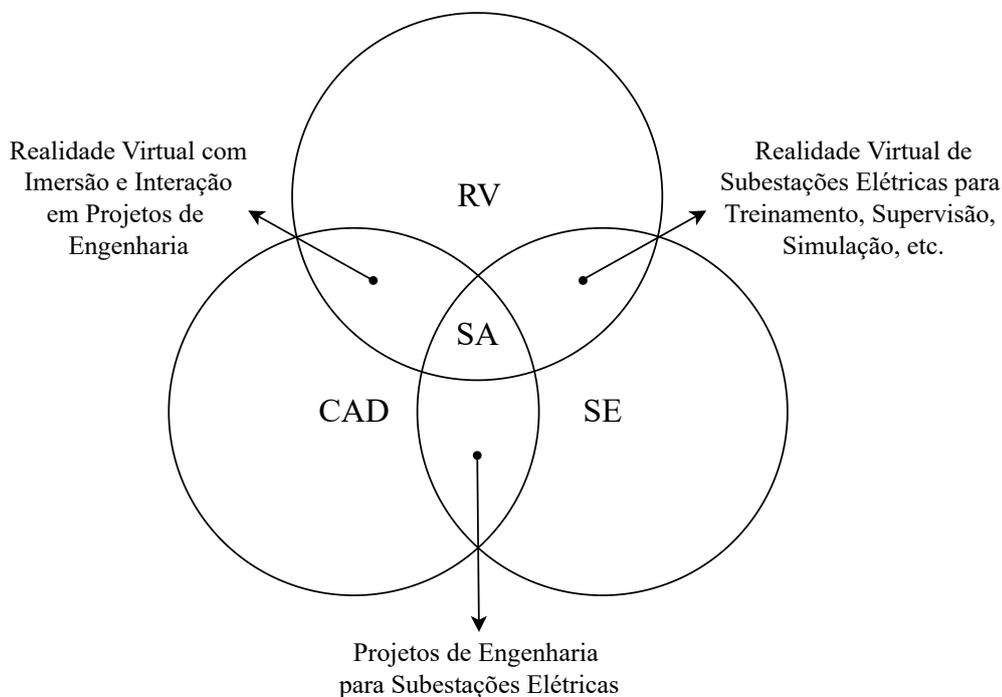
Com base nos fundamentos apresentados, é importante posicioná-los em relação a este trabalho. Neste sentido, o trabalho é composto por tecnologias e conceitos que juntos constituem a metodologia desenvolvida. As principais tecnologias abordadas, mas não limitadas a elas, são a RV e CAD. Do mesmo modo, foram utilizados os conceitos de subestações elétricas e projetos de engenharia. A Figura 2.12 exemplifica a agregação de cada tecnologia para o enriquecimento do trabalho.

Utilizar *softwares* CAD em conjunto com RV promove amplas possibilidades de aplicações no contexto das engenharias. A RV aplicada em projetos CAD permite que usuários tenham alto nível de imersão e interação com os elementos virtuais, proporcionando distintos graus de liberdade, ângulos de visão e maior detalhamento da informação. Além disso, é possível trabalhar em cooperação dentro de um mesmo Ambiente Virtual. Algo difícil de se alcançar utilizando apenas o *software* CAD. Essa combinação é uma das principais encontradas nos trabalhos relacionados, apresentados no Capítulo 3.

Atualmente as subestações elétricas são projetadas e construídas a partir de *softwares* CAD, pois permite aos projetistas maior agilidade no manuseio das ferramentas CAD, controle de

versões, gerenciamento de materiais de construção, lista de equipamentos, planejamento da construção e outros. Com isso, destaca-se a importância do *software* CAD aplicado ao trabalho.

Figura 2.12: Tecnologias envolvidas na proposta do trabalho.



Fonte: o autor.

Como apresentado no Capítulo de Introdução, a RV é utilizada em muitos contextos da engenharia. Ela proporciona aos usuários novas funcionalidades quando comparada com as tecnologias não imersivas. Ao utilizar técnicas de RV em subestações elétricas, criam-se paradigmas que possibilitam novas formas de aplicações em treinamentos, operações do sistema elétrico, simulações, etc.

Desta forma, esta pesquisa científica se relaciona com todas as tecnologias apresentadas. Ela utiliza a tecnologia CAD para projetar desenhos de engenharia de subestações elétricas e, simultaneamente, gerar os cenários 3D para Realidade Virtual.

Por fim, segundo as categorias apresentadas por Souza (1997), o trabalho corresponde a categoria de Sistema de Autoria baseado em ícones, pois a construção do conteúdo final (RV) é realizada pela manipulação de símbolos e desenhos em uma planta baixa. Há uma abstração ao produzir o conteúdo para o usuário final, não há programação, apenas ferramentas que auxiliam o usuário durante a produção.

Trabalhos Correlatos

Este capítulo apresenta uma Revisão Bibliográfica Sistemática (RBS) de trabalhos científicos relacionados a este. Os trabalhos a seguir apresentam metodologias, ferramentas e resultados no contexto de produção e integração de desenhos em CAD para aplicação em sistemas de Realidade Virtual. A RBS foi baseada nas metodologias apresentadas por [Munzlinger, Narcizo e Queiroz \(2012\)](#) e [Conforto, Amaral e Luis \(2011\)](#).

3.1 Metodologia da Revisão Bibliográfica Sistemática

Os autores [Conforto, Amaral e Luis \(2011\)](#) e [Munzlinger, Narcizo e Queiroz \(2012\)](#) sugerem que a RBS seja realizada em três etapas:

- **Planejamento:** identificação do estudo focalizando um tema ou resolução de um problema. Definição dos filtros de seleção de trabalhos, critérios de inclusão e exclusão, bem como a definição das questões de pesquisa que envolvem os diversos aspectos de interesse que permeiam o tema e o problema;
- **Condução:** definição da expressão de busca utilizada para realizar pesquisas em bibliotecas digitais, execução das buscas e filtragem de trabalhos. Nesta etapa, os trabalhos passam por filtros e são selecionados para compor um conjunto final dos aprovados;
- **Análise dos resultados:** organização de trabalhos por indicadores quantitativos e qualitativos de interesse da pesquisa. Extração dos dados e informações pertinentes as questões de pesquisas definidas da etapa de planejamento.

O objetivo da RBS é revisar e analisar nas publicações científicas, o Estado da Arte das metodologias, estratégias, ferramentas e resultados aplicados na elaboração de Ambientes Virtuais utilizando desenhos de engenharia (CAD) e sua integração com SRV.

Desta forma, foram definidas Questões de Pesquisa (QP) para auxiliar na extração de informações dos trabalhos selecionados. A Tabela [3.1](#) apresenta as QPs pertinentes ao trabalho.

Tabela 3.1: Lista de questões de pesquisa.

Código	Questões
QP 1	Estratégias de integração de artefatos de engenharia (CAD) com SRV.
QP 2	Tecnologias utilizadas na produção de AVs para RV.
QP 3	Limitações encontradas na produção de AVs para RV.
QP 4	Resultados da estratégia/metodologia adotada.

Fonte: o autor.

Posteriormente, durante o processo de leitura para filtragem, foi aplicando três filtros com critérios de inclusão e exclusão para obter trabalhos científicos relevantes:

Filtro 1 (F1) - Leitura do título e palavras-chave:

- Critérios de inclusão (CI):
 - CIF1-1: Apresentam contextos pertinentes ao tema;
 - CIF1-2: Apresentam duas ou mais palavras-chave pertinentes ao tema;
- Critérios de exclusão (CE):
 - CEF1-1: Não apresentam nenhuma característica pertinente ao tema;
 - CEF1-2: Não contem duas ou mais palavras-chave pertinentes ao tema;

Filtro 2 (F2) - Leitura do título e resumo (*abstract*):

- Critérios de inclusão:
 - CIF2-1: Apresentam metodologia ou ferramenta no processo de produção de AVs para RV;
 - CIF2-2: Abordam o uso de CAD para produção de AVs para RV;
 - CIF2-3: Apresentam estratégia(s) para integração CAD com RV;
- Critérios de exclusão:
 - CEF2-1: Não apresentam clareza sobre objetivos, metodologia e resultados;
 - CEF2-2: Não apresentam metodologia ou ferramentas no processo de produção de AVs para RV;
 - CEF2-3: Não utilizam Realidade Virtual ou Realidade Aumentada;

Filtro 3 (F3) - Leitura completa do trabalho científico:

- Critérios de seleção (CS):
 - CS-1: Acesso aos artigos completos;
 - CS-2: Apresentam resultados na produção de AVs para RV;
 - CS-3: Apresentam análise de limitações ao utilizar estratégias para a produção de AVs para RV;
 - CS-4: Apresentam uma arquitetura para a solução da integração de artefatos de engenharia e AVs para RV;
 - CS-5: Apresentam informações relacionadas a elementos teóricos;

A busca por bibliotecas digitais teve como pré-requisito alguns aspectos técnicos e qualitativos como: bibliotecas internacionais, disponibilidade de adaptação do sistema de filtragem, expressões personalizáveis e possibilidade de acesso e transferência das informações referentes a um conjunto de trabalhos em formato *bibtex*. Sendo assim, as bibliotecas digitais selecionadas foram: a) Web Of Science; b) IEEE Xplore; c) Science Direct; d) Scopus e e) Engineering Village.

Um propósito pela escolha de bibliotecas internacionais é por sua ampla procura, engajamento, visibilidade e apoio da comunidade global. Desta forma, a RBS prioriza os trabalhos publicados internacionalmente, que adotam os requisitos exigidos pelas editoras, onde os textos em sua maioria são padronizados na língua inglesa.

Sendo assim, as buscas foram realizadas utilizando as seguintes palavras-chave:

- **Relacionadas com Realidade Virtual:** *virtual reality, vr, immersive environment;*
- **Relacionadas com CAD:** *cad; computer-aided design;*
- **Relacionadas com integração:** *integration, integrate, incorporation, e;*
- **Relacionadas com subestações:** *substation, eletric substation, eletric power substation, electrical substation.*

Resultando, portanto, na seguinte *string* de busca: ("*virtual reality*" OR *vr* OR "*immersive virtual environment*") AND (*substation* OR "*electric substation*" OR "*electric power substation*" OR "*electrical substation*") AND (*cad* OR "*computer-aided design*") AND (*integration* OR *integrate* OR *incorporation*). A *string* foi adaptada para as sintaxes de cada mecanismo de pesquisa.

Logo a Tabela 3.2 apresenta os resultados das buscas por trabalhos científicos e aplicação dos filtros com critérios. Os motores de pesquisa de cada biblioteca possuem limitações e com isso algumas inconsistências aconteceram, por exemplo, a quantidade total da busca na base Science Direct que retornou 828 trabalhos, onde a maioria não tem relação e não são pertinentes ao interesse em questão. Nesse sentido, a linha "Redução por Filtro" exibe a quantidade de trabalhos rejeitados durante a aplicação dos filtros.

Tabela 3.2: Resultados por bibliotecas digitais e filtros.

Biblioteca Digital	Resultados	Filtro 1	Filtro 2	Filtro 3
Web Of Science	3	3	2	1
IEEE Xplore	8	0	0	0
Science Direct	828	12	1	0
Scopus	76	16	6	2
Engineering Village	146	32	10	3
Redução por Filtros	-	-998	-44	-13
Total	1061	63	19	6

Fonte: o autor.

3.2 Apresentação dos Trabalhos Científicos

Nesta seção são apresentados, em síntese, os trabalhos selecionados pela RBS, abordando as questões de pesquisa definidas na etapa de planejamento.

3.2.1 *3D CAD Data Extraction and Conversion for Application of Augmented/Virtual Reality to the Construction of Ships and Offshore Structures*

Han et al. (2019) contextualiza o mercado de projetos e manufatura de estruturas marítimas, como navios e plataformas de petróleo, enfatizando que todas as estruturas projetadas possuem diversas quantidades de tubulações complexas, utilizadas para diversas funcionalidades e fins. Durante a fase de projeto de estruturas de tubulações, a necessidade de revisão do *design* é extremamente relevante para validação, tomada de decisões e refinamento da solução. Nesse sentido, os autores propõem o desenvolvimento de uma ferramenta de Realidade Aumentada/Virtual para realizar análises e revisões de arranjos de tubulação de estruturas marítimas.

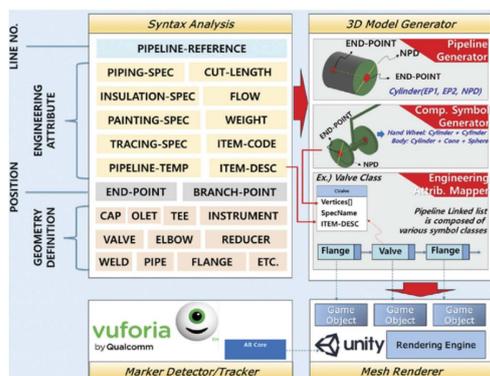
Os projetos de arranjos de tubulações são realizados em um *software* CAD aplicado às tubulações no formato PCF (Piping Component File - Arquivo de Componente de Tubulação), um arquivo de modelagem CAD não convencional para aplicações de RV/RA. Para ser possível utilizar modelos CAD-PCF em aplicativos RA/RV, os autores propõem o desenvolvimento de camadas de *softwares* para analisar, converter e gerar modelos virtuais com todas as informações.

A arquitetura proposta é apresentada na Figura 3.1a. O Analisador de Sintaxe é responsável pela validação do modelo de entrada e aquisição dos atributos do arquivo, dados necessários para durante a revisão virtual, como: diâmetro, ponto inicial, final e componentes da tubulação. Em seguida o Módulo Gerador de Modelos 3D constrói as malhas das tubulações inserindo-os no espaço interligando os componentes adicionais e aplicando os atributos. Por fim o novo objeto 3D é utilizado dentro da *Game Engine* Unity (2022), com a *Application Programming*

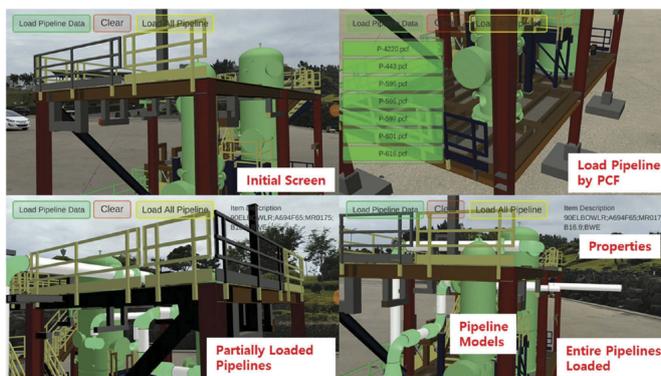
Interfaces (API¹) de RA do Vuforia, para criar a aplicação.

Figura 3.1: Arquitetura proposta e validação de protótipo.

(a) Conceito de analisador e gerador de modelos paramétricos.



(b) Execução e validação do protótipo.



Fonte: (HAN et al., 2019)

Segundo os autores, os testes de implementação e do protótipo evidenciam que a estratégia adotada pode ser aplicada na conversão e integração de *softwares* CAD para modelos de tubulações, facilitando a utilização dos modelos em aplicativos de RV/RA sem a necessidade de retoque manual em um *software* de modelagem 3D. Para realizar os testes, foi utilizado uma planta de compressores com conjuntos de tubulações, a Figura 3.1b demonstra a execução do aplicativo, mostrando na tela os dados das tubulações com seus atributos.

3.2.2 CAD Integration in Virtual Reality Design Reviews for Improved Engineering Model Interaction

Em *designs* de engenharia mecânica as revisões dos projetos têm sido uma área de interesse significativo para os pesquisadores desde o advento da Realidade Virtual moderna. Interagir de maneira significativa com os modelos 3D de engenharia nessas revisões de projeto em RV é uma capacidade importante, embora muitas vezes possa haver um desalinhamento, devido a dificuldades de executar as conversões de dados entre CAD e formatos de arquivo compatíveis com RV.

Segundo Freeman et al. (2017), os sistemas de revisão de projeto de RV estudados até o momento exigem que o usuário realize uma conversão do arquivo manualmente antes de submeter para revisão de projeto em RV. Acerca disso, o objetivo do trabalho é desenvolver um

¹API significa interface de programação de aplicativo. Segundo Jacobson, Brail e Woods (2012), uma API pode fornecer para desenvolvedores acesso à funções, dados e serviços para construir aplicativos a partir de uma biblioteca de códigos.

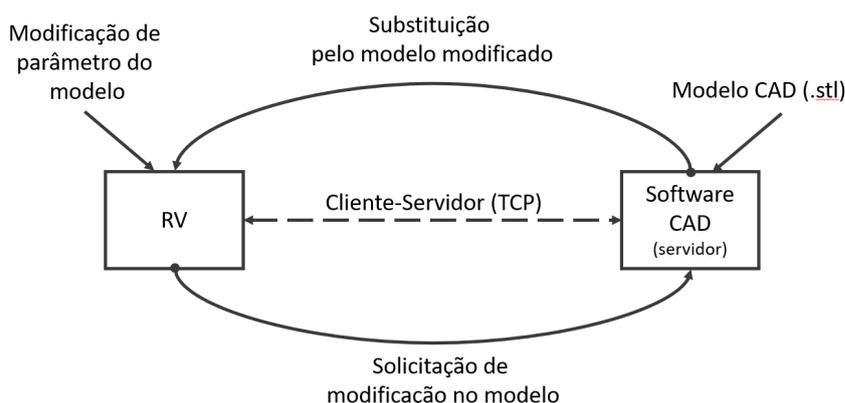
sistema de RV que possibilite o carregamento de modelos CAD parametrizado com possibilidades de manipulação de objetos e seus atributos, sem perder o realismo e as características que possuem no *software* CAD.

Sendo assim, os autores propõem o desenvolvimento de um conjunto de ferramentas para realizar a integração: a implementação de um *plugin* para o *software* CAD e um *software* de Realidade Virtual (SRV) interconectados.

O *plugin* CAD foi desenvolvido para o *software* Siemens NX utilizando sua API. O intuito é que o NX trabalhe como um servidor, utilizando o protocolo TCP-IP, recebendo solicitações do SRV para realizar modificações nos parâmetros do modelo, respondendo com um novo modelo com as novas parametrizações. O NX trabalha com diversos formatos de modelos 3D, neste caso os autores optaram por trabalhar com a extensão “.stl”. Em primeiro lugar, o modelo CAD é carregado no NX, logo o *plugin* disponibiliza o *software* para novas conexões. A Figura 3.2 exemplifica como a proposta de Freeman et al. (2017) foi implementada.

Sendo assim, o *software* de RV foi implementado utilizando a *Game Engine* Unity (2022), uma ferramenta que está sendo utilizada amplamente pela comunidade acadêmica, a qual tem suporte a variados formatos de modelos 3D, exceto CAD nativo. O sistema foi desenvolvido para que um usuário possa interagir com o modelo 3D alterando atributos e visualizando as modificações. Quando algum atributo é alterado, uma mensagem é enviada ao servidor solicitando a mudança, logo uma resposta é recebida contendo um novo modelo 3D. A troca de mensagens entre cliente-servidor é feito por pacotes de dados serializados, tanto a solicitação de alteração quanto o modelo 3D, são imediatamente convertidos em um modelo inteligível.

Figura 3.2: Modelo conceitual da arquitetura proposta por Freeman et al. (2017).

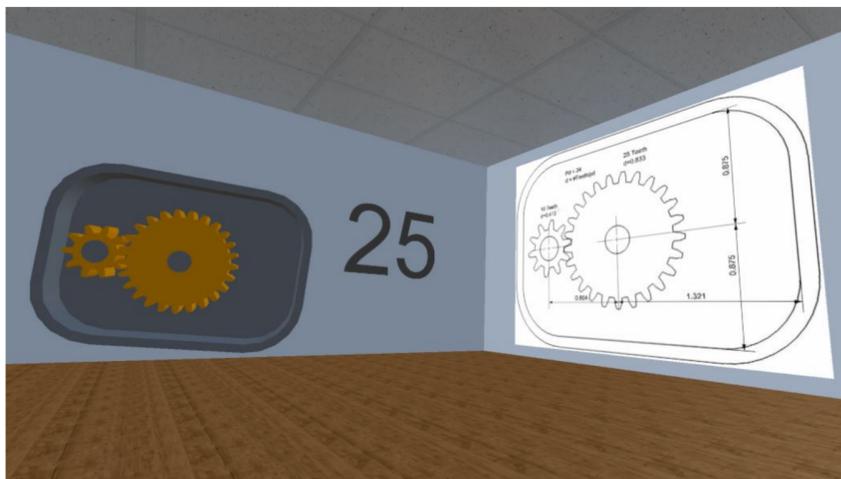


Fonte: Adaptado de Freeman et al. (2017).

Os resultados apresentados pelos autores sugerem que o desenvolvimento da solução, permitiu sincronizar *software* CAD parametrizado, e possibilitou a revisão de projetos de engenharia mecânica com Realidade Virtual, tornando-a intuitiva e atrativa. Foram também aplicados testes com usuários para validar a solução (Figura 3.3), os resultados sugerem que a aplicação

RV melhorou a capacidade do usuário de entender a geometria e obter confiança nas tomadas de decisões.

Figura 3.3: Sistema de Realidade Virtual - Ambiente de Testes.



Fonte: (FREEMAN ET AL., 2017).

3.2.3 CAD to VR - A Methodology for the Automated Conversion of Kinematic CAD Models to Virtual Reality

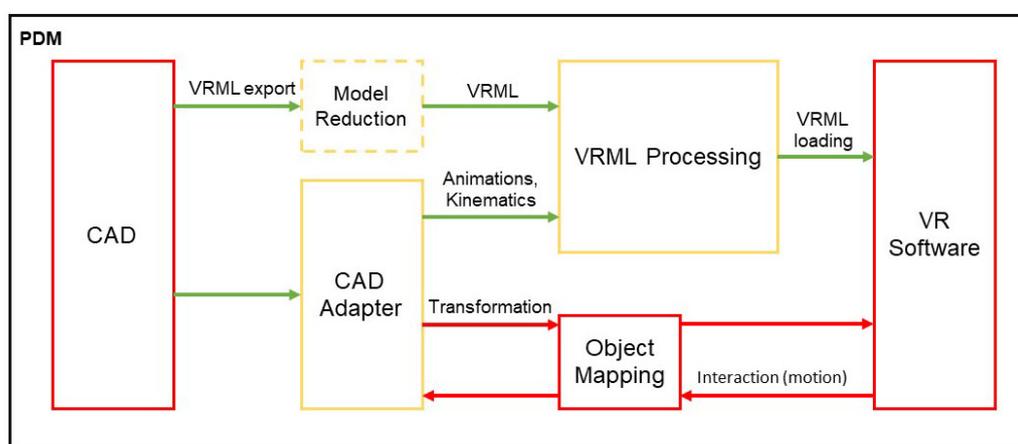
Impulsionada pelos desafios da indústria 4.0, a integração contínua de várias plataformas de dados se torna um tópico ainda mais premente do que já foi no passado. Nesse contexto, as tecnologias de RV e RA exercerão um papel fundamental quando se trata de planejamento e desenvolvimento de novos produtos. A principal tecnologia que permite propiciar esse desenvolvimento é a integração contínua e automatizada dos dados de produtos CAD em sistemas de RV/RA. Ainda existe uma lacuna neste processo que vai além da geometria do modelo, visto que alguns modelos CAD possuem atributos, animações e cinemática advindos de simulações, que na maior parte possuem importância quando se trata de revisão de projeto.

Lorenz et al. (2016) propõem o desenvolvimento de uma metodologia de conversão automatizada de modelos CAD em um formato amplamente utilizado por aplicações de RV/RA, que disponha de informações adicionais pertinentes a modelos CAD, como dados de simulações, animações e cinemática.

Os objetivos do trabalho são: (i) geração de um modelo RV com um clique, incluindo redução de polígonos, (ii) geração de um modelo RV com configurações para definir a porcentagem de qualidade de redução de polígonos, (iii) construção automática no modelo em RV das animações definidas no *software* CAD, (iv) construção da cinemática interativa definida no CAD e com base na funcionalidade do mecanismo, e (v) economia no armazenamento do sistema PDM em relação aos dados gerados durante o processo de conversão.

A Figura 3.4 mostra um diagrama conceitual do fluxo de trabalho de conversão. Em um primeiro momento o *software* CAD alimenta o processo de redução de malha com o modelo 3D. As animações são construídas em um conversor implementado no *software* CAD, sendo melhoradas com dados para obter uma cinemática interativa. Os fluxos de execução representados por seta em verde são apenas executados no início, antes do carregamento do modelo em RV. A interação com o modelo no ambiente virtual é gerenciada pelo mapeador de objeto, ele realiza mudanças na cinemática do modelo por meio do adaptador CAD que retorna as animações por meio das transformações dos componentes do modelo 3D.

Figura 3.4: Fluxo de trabalho de conversão para um sistema CAD arbitrário.



Fonte: Adaptado de Lorenz et al. (2016).

Algumas limitações foram evidenciadas, uma importante é a falta de arquivos compatíveis com CAD e RV. Segundo Lorenz et al. (2016) o melhor formato estudado foi o VRML, pois conseguia comportar a maioria das informações. Entretanto, o formato não é compatível com animações e a cinemática dos modelos CAD, necessitando da metodologia de conversão citada acima.

Os autores aplicaram testes para analisar os benefícios da metodologia proposta, e comprovaram que o conceito apresenta um método funcional, capaz de fornecer modelos CAD com animações e cinemáticas a um ambiente de Realidade Virtual, sem a necessidade de processos manuais complexos para tal.

3.2.4 Meta-model for VR-Based Design Reviews

Compartilhando as mesmas ideologias de Freeman et al. (2017), o trabalho de Gebert et al. (2017) propõe o desenvolvimento de ferramentas que possibilitam a integração de modelos CAD em Sistemas de Realidade Virtual. Segundo os autores, as revisões de modelos virtuais na engenharia mecânica são uma parte vital do desenvolvimento do produto, fornecem

aos usuários um *feedbacks* fundamentado sobre a maturidade do produto momentos antes da fabricação de protótipos reais. A Realidade Virtual é, assim, uma candidata para interface entre os usuários e o ambiente virtual tornando o processo de revisão intuitivo, apresentando possibilidades que em modelos virtuais em CAD não seriam possíveis. Segundo [Bowman e McMahan \(2007\)](#), a vantagem de sistemas de projeção virtual é a possibilidade de representação do tamanho real dos modelos 3D, incluindo interação rápida e natural com o observador.

No escopo do projeto, um dos requisitos é que os modelos digitais de produtos devem ser visualizados em paralelo com o desenvolvimento, apresentando dados de simulação, cálculo e PDM (*Product Data Management*). Em uma ferramenta de visualização, todos os dados devem ser representados de maneira compreensível, para poderem ser experimentados e estudados por engenheiros, usando técnicas de RV.

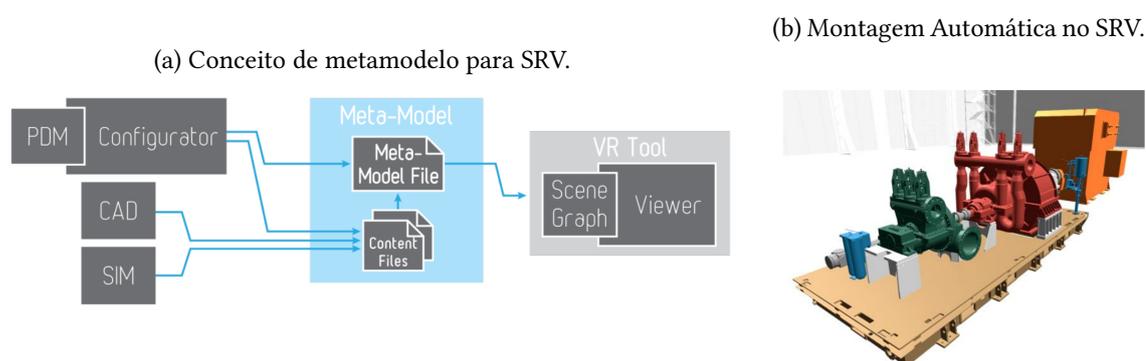
Sendo assim, os autores apresentam a metodologia de integração utilizando o conceito de metamodelo, o qual define uma estrutura de dados que integra diversas informações advindas de diferentes sistemas, com o intuito de criar um único arquivo capaz de ser interpretado por outro sistema. Dessa forma, os autores elaboraram um metamodelo reunindo informações do Sistema PDM, modelo 3D, CAD e simulações no formato representado em arquivo XML, uma vez que o XML suporta hierarquia de informações, possibilitando a criação de grafos de cena com peças de modelos 3D. As informações binárias foram disponibilizadas por *links* definindo o local de transferência do modelo geométrico.

O *software* CAD utilizado fornece modelos com formato STL, porém, o *software* escolhido para construir o SRV ([Unity \(2022\)](#)) não suporta o formato STL. Sendo assim foi necessário desenvolver um conversor de arquivos CAD STL para OBJ, já que tal formato é suportado pelo [Unity \(2022\)](#) e com possibilidade de reconstrução da malha em tempo de execução. Nesse contexto, foi utilizado o *software* de modelagem [Blender \(2020\)](#) com *scripts* de automatização para realizar o processo de conversão de arquivos. Durante o processo o modelo passa por redução de malhas poligonais a um ponto onde a redução não deforma os objetos e mantém a qualidade visual do produto.

A Figura [3.5a](#) apresenta o conceito de metamodelo. O PDM é o sistema responsável por reunir todos os dados do modelo, incluindo a geometria, e gerar o metamodelo final.

Foram encontradas algumas limitações que podem ser resolvidas em trabalhos futuros, como: a conversão de arquivos STL acabam gerando o modelo OBJ com tamanho superior ao original. Nos testes realizados um arquivo STL de 23,7Mb produz 48,9Mb de dados em OBJ, desta forma pode gerar uma sobrecarga ao sistema de gerenciamento e na utilização do objeto pelo *software* RV. Outra limitação está relacionada ao tempo de carregamento do SRV, nos testes a conversão de modelos levou 98 segundos e a iniciação do sistema levou cerca de vinte e dois segundos.

Figura 3.5: Processos de integração utilizando metamodelo.



Fonte: (GEBERT et al., 2017).

Segundo os autores, a metodologia abordada possibilitou o carregamento de modelos CAD em um Sistema de Realidade Virtual sem necessidades de ajustes manuais e permitiu a revisão de modelos virtuais por uma equipe de engenheiros. A Figura 3.5b mostra uma montagem teste de equipamentos em um sistema de Realidade Virtual. Essa abordagem torna a integração entre CAD e RV confortável e de fácil exportação para sistemas que necessitam visualizar essas categorias de informações.

3.2.5 *Semi-automatic Generation of Virtual Reality Environments for Electric Power Substations*

Os ambientes de RV são ferramentas valiosas para operações e treinamento do sistema. Sendo uma interface homem-máquina altamente representativa, esses sistemas reduzem a diferença entre o modelo de operação e o ambiente real, proporcionando uma experiência singular para os operadores. Além disso, tais ambientes permitem treinamento remoto sem perda significativa de informações visuais.

Segundo Mattioli et al. (2015), o posicionamento exato do equipamento é essencial para o sucesso de projetos de RV relacionados ao treinamento e operação de subestações de energia. Enquanto fotos, *scanners* 3D e plantas baixas podem ajudar na modelagem, alguns pesquisadores trabalharam na geração de ambientes virtuais de edifícios por meio do processamento de desenhos arquitetônicos. No caso particular de subestações de energia, algumas soluções foram desenvolvidas para extrair informações de topologia de diagramas elétricos de uma linha e criar ambientes representativos. Logo, os autores propõem o desenvolvimento de ferramentas para estender o *software* CAD e Unity (2022)-Editor, com objetivo de criar uma integração entre eles.

O trabalho possui um diferencial dentre os outros apresentados acima, a modelagem CAD é realizada utilizando o sistema 2D, diferente dos demais que utilizam a modelagem 3D e integram com o SRV utilizando os próprios modelos tridimensionais. O intuito de realizar o dese-

nho 2D é extrair as informações de posicionamento e rotação dos blocos inseridos no desenho CAD, para que posteriormente o *software* Unity (2022)-Editor possa ler os dados de posicionamento CAD e montar um ambiente virtual de Subestações de Energia Elétrica (SE). Essa estratégia é interessante quando se trata de modelagem de ambientes virtuais para SEs, pois é possível utilizar desenhos, especialmente plantas e diagramas de operação. Visto que todos os modelos de equipamento já foram criados, esses planos podem ser usados como entradas para um processo de geração automática.

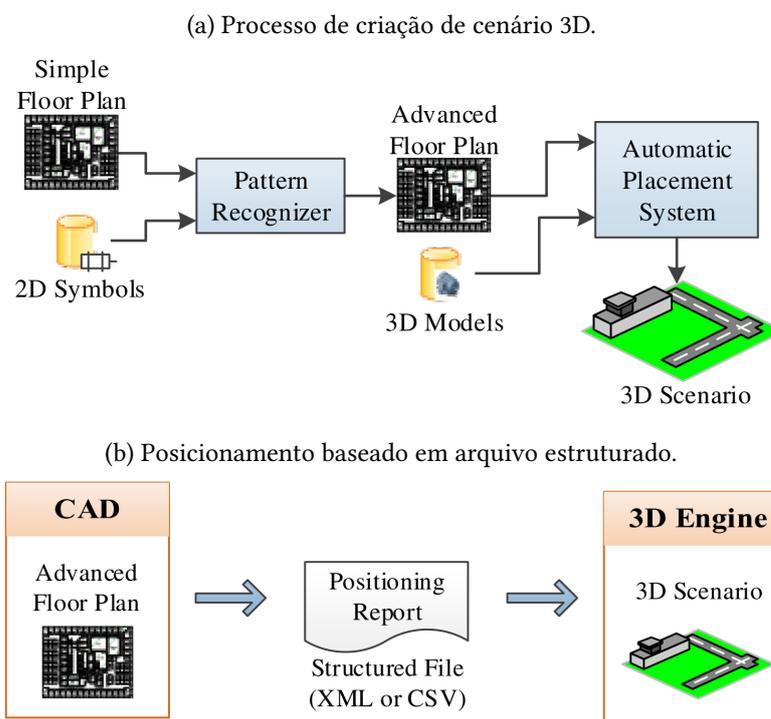
O processo conta com etapas de modelagem de equipamentos de SE, a modelagem é realizada por *software* como o 3Ds Max (2020) e Blender (2020). Como não são modelagens CAD os autores propuseram convenções para manter uma padronização homogênea.

Desenhos e plantas baixas CAD de subestações possuem representações de equipamentos com nível de padronização, sendo assim, os autores sugeriram o desenvolvimento de um Reconhecedor de Padrões para detectar desenhos de equipamentos iguais e os substituir por blocos compostos. Cada bloco composto simboliza um modelo com informações de identificação, posição e rotação em um plano, possibilitando a utilização desses dados para a construção do ambiente virtual. A Figura 3.6a exemplifica o processo de reconhecimento de padrões para gerar um arquivo CAD com informações de símbolos compostos representando modelos 3D.

As coordenadas de transformação dos blocos da planta baixa são armazenadas em um arquivo estruturado por um *script* executado no aplicativo CAD. Uma estrutura possível para esse arquivo é um CSV simples com o formato: *BlockName; x; y; rot*. A Figura 3.6b mostra um diagrama conceitual do fluxo de execução para criar o relatório de posicionamento e a construção do cenário. O relatório serve como entrada direta para o *script* editor no Unity (2022), que realiza a inserção dos modelos dinamicamente e aplica as matrizes de transformação. Para que o *script* execute os passos descritos anteriormente, os modelos devem estar armazenados em um diretório específico, onde o Unity (2022) busca por eles.

Para realizar os testes, os autores executaram a construção de um cenário sem utilizar a metodologia aqui descrita. Dado que todos os modelos de equipamentos foram criados e validados, a tarefa de colocar o equipamento em cena e nomear objetos levou cerca de vinte horas/homem. Para avaliar o potencial das ferramentas de automação desenvolvidas, o mesmo cenário foi construído usando o processo baseado em planta baixa CAD. Toda a tarefa de processar a planta demorou cerca de seis horas-homem, a etapa de gerar o relatório de posicionamento e enviá-lo ao editor de cenário levou menos de três minutos e, finalmente, a atividade de nomeação foi realizada em duas horas/homem.

Figura 3.6: Processo de reconhecimento e posicionamento de símbolos.



Fonte: (MATTIOLI et al., 2015).

3.2.6 Virtual Reality and CAD Systems Integration for Quick Product Variant Design

O trabalho de Zawadzki et al. (2018) descreve um processo integrado para *design* de produtos configuráveis que inclui dois processos: configuração de uma variante de produto com a participação do cliente e preparação de documentação técnica apropriada no departamento de projetos de uma empresa.

Os autores propõem o desenvolvimento de uma ferramenta de Realidade Virtual integrando o conceito de produtos configuráveis aplicado à configuração de um ônibus urbano, com recursos para ajustes de arranjos de poltronas, corrimão e outros aspectos internos do produto. Para tal solução optou-se por modelar produtos em CAD com a tecnologia CAD Generativo, uma estratégia de criação de modelos contendo regras de modelagem e lógicas que possibilitam desenvolver um modelo base com componentes modificáveis seguindo regras pré-definidas. O modelo CAD Generativo do interior do ônibus foi descrito por cerca de quarenta regras de projeto e cerca de novecentos parâmetros geométricos, dimensionais e lógicos.

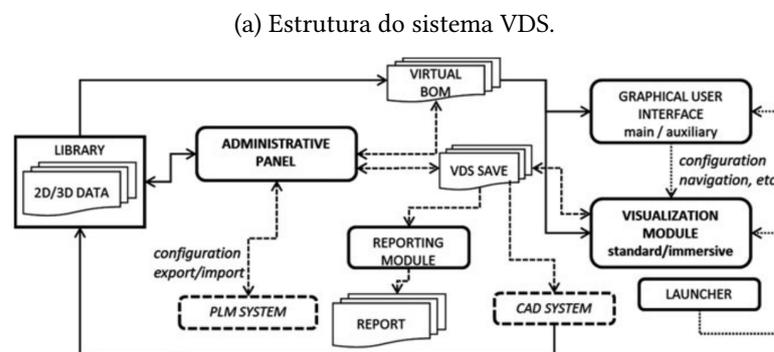
Para gerenciar todas as operações, foi implementado o *Virtual Design Studio* (VDS) utilizando a *game engine* EON Studio (2020). O sistema foi implantado em uma empresa que realiza ofertas e demonstrações como tecnologia extra, possibilitando o cliente realizar suas próprias configurações.

O sistema VDS consiste nos módulos:

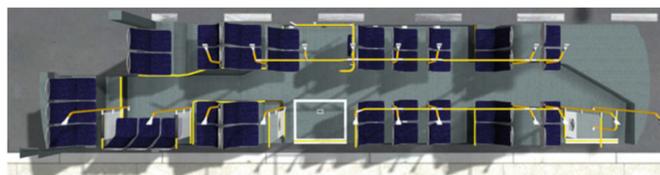
- **Módulo de visualização:** exibe o produto virtual 3D;
- **Interface gráfica principal do usuário:** contém as interfaces gráficas para aplicar as configurações desejáveis;
- **Interface gráfica auxiliar:** interface simplificada baseada em tecnologias da Web, possibilitando acesso a vários dispositivos;
- **Aplicativo administrativo:** módulo independente dos módulos básicos, usado para gerenciar o conteúdo da biblioteca e processar a troca de dados entre o sistema e outras ferramentas, como o *software* CAD;
- **Biblioteca:** conjunto de dados 3D, 2D (texturas, fotografias, filmes) e metadados lógicos.

A Figura 3.7a mostra um diagrama conceitual dos processos do sistema VDS. A Figura 3.7b, por sua vez, exemplifica uma configuração aplicada por um usuário a um ônibus urbano, aplicando o número de assentos, tipos e posições: quatro direções angulares possíveis (frente, traseira, esquerda e direita), localização no espaço interior selecionando os locais fisicamente possíveis dentro de um intervalo pré-definido.

Figura 3.7: Integração de sistemas para *design* rápido de variantes de produtos.



(b) Configuração da posição dos assentos no sistema VDS.



Fonte: (ZAWADZKI et al., 2018).

Algumas configurações devem ser realizadas por um engenheiro do departamento dos projetos, pois o sistema desenvolvido não é capaz de desenhar de forma automática os corrimãos devido à limitação técnica do modelo CAD Generativo. Segundo os autores, os testes do Sistema VDS confirmam a possibilidade de integração de modelos CAD com sistemas de RV

utilizando a metodologia proposta, tendo como vantagem a redução do tempo necessário para a preparação do *design* e documentação técnica.

3.3 Análise Comparativa

Os resumos dos trabalhos científicos foram realizados descrevendo as QPs definidas no planejamento. A Tabela 3.3 sintetiza as QPs presentes neles.

Tabela 3.3: Questões de pesquisas extraídas por trabalhos relacionados.

Autores	QP1	QP2	QP3	QP4
Han et al. (2019)	✓	✓		✓
Freeman et al. (2017)	✓	✓		✓
Lorenz et al. (2016)	✓	✓	✓	✓
Gebert et al. (2017)	✓		✓	✓
Mattioli et al. (2015)	✓	✓		✓
Zawadzki et al. (2018)	✓	✓	✓	✓

Fonte: o autor.

Analisando as propriedades dos trabalhos e seus contextos, foi possível identificar características que evidenciam metodologias para elaboração e integração de projetos de engenharia com RV. Além das tecnologias e metodologias apresentadas, foram evidenciadas outras características desejáveis que não foram descritas nos trabalhos relacionados, como a utilização de grafos de cenas aplicado na estruturação da topologia de sistemas de energia elétrica e extensões de modelos 3Ds. Foram extraídas e analisadas as seguintes características e tecnologias:

Categoria do desenho CAD: espaço bidimensional ou tridimensional utilizado pelos autores nos projetos CAD;

Gerenciador de Insumos Virtuais (GIV): sistema de gerenciamento de insumos virtuais utilizados nos AVs, como dados dos modelos 3D (classe, tipo, fabricante, etc.), dados AV (*status* de desenvolvimento, modelos 3D utilizados, projetistas, versões históricas, etc.), projeto CAD, usuários e controle de acesso;

Metamodelo: abstração do sistema que descreve os aspectos estruturais e/ou comportamentais do *software*, é uma definição da estrutura de dados do arquivo de integração entre os *software* CAD e de RV;

Grafos: estrutura de dados que define a hierarquia dos elementos do modelo 3D e do cenário virtual. Utilizado também em elementos com partes móveis para animar ações e estados físicos;

Método de integração: forma como o sistema realiza a integração entre *software* CAD e SRV. O método de integração entre CAD e RV pode ser manual, semiautomático (envolve parcialmente tarefas manuais) e automático;

Topologia: definição das relações lógicas entre os elementos do projeto. Utilizado para rastrear o fluxo de corrente elétrica em arranjos físicos para representar, por meio de simulações ou supervisão, o estado elétrico e funcionamento da SE;

Versões históricas: armazenar no GIV as versões históricas de atualizações realizadas nos projetos CAD. Gerenciar versões de projetos em uma base de dados e fornecer acesso aos arquivos, possibilitando o resgate de versões passadas para análise ou visualização das evoluções dos desenhos;

Reconstrução em tempo de execução (RTE): o SRV executa a reconstrução do AV durante sua inicialização, com maior probabilidade de carregar rapidamente. Isso garante que ao acessar o GIV e obter a atualização recente da subestação, o sistema a reconstrua e apresente a versão atual do projeto.

3.3.1 Análise das Metodologias de Integração

A partir das características extraídas dos trabalhos relacionados, a Tabela 3.4 foi elaborada apresentando as tecnologias e metodologias utilizadas no processo de integração entre os projetos de engenharia e SRV.

Vale salientar que para os objetivos dos trabalhos relacionados, as estratégias utilizadas pelos autores apresentaram resultados satisfatórios dentro contexto de cada problema. Desse modo, a seguir é apresentada uma análise das estratégias em relação à proposta deste trabalho.

Tabela 3.4: Tabela de características relacionadas com a elaboração e integração de projetos de engenharia e Ambientes Virtuais de RV.

Autores	CAD	GIV	Metamodelo	Grafos	Integração	Topologia	Versão	RTE
Han et al. (2019)	3D	Não	Não	Não	Automática	Não	Não	Sim
Freeman et al. (2017)	3D	Não	Não	Não	Automática	Não	Não	Sim
Lorenz et al. (2016)	3D	Não	Não	Não	Automática	Não	*	Sim
Gebert et al. (2017)	3D	*	Sim	Não	Automática	Não	Não	Não
Mattioli et al. (2015)	2D	Não	Não	Não	Semiautomática	Não	Não	Não
Zawadzki et al. (2018)	3D	Não	Não	Não	Semiautomática	Não	*	Não

(*) Parcialmente ou aproximado.

Fonte: o autor.

Os trabalhos de [Han et al. \(2019\)](#), [Freeman et al. \(2017\)](#), [Lorenz et al. \(2016\)](#), [Gebert et al. \(2017\)](#) e [Zawadzki et al. \(2018\)](#), apresentam uma metodologia de integração de modelos CAD 3D com *software* de RV por meio de um processo automático, exceto pelo trabalho de [Zawadzki et al. \(2018\)](#), onde é aplicado um processo semiautomático. A metodologia de [Zawadzki et al. \(2018\)](#) utiliza a modelagem 3D paramétrica, configurada por parâmetros definidos pelo usuário, em seguida o AV para RV é produzido automaticamente. Este aspecto pode ser menos produtivo, pois o processo de ajuste dos modelos 3D é manual.

A integração automática entre *software* de modelagem e SRV é um recurso importante para metodologias de criação de AVs. Principalmente quando o sistema é destinado aos usuários menos experientes. Desta forma, a abordagem automática permite realizar a manutenção das cenas produtivamente, dispensando as etapas manuais de adequação de modelos CAD, programação de código-fonte e a produção de uma nova versão do SRV.

Subestações elétricas são projetadas, em parte, por plantas baixas e símbolos inerentes aos elementos reais. O trabalho de [Mattioli et al. \(2015\)](#) apresenta um sistema de geração de AVs para SEs de forma semiautomática por extração de dados das plantas baixas. Os resultados apresentados reforçam a eficácia da estratégia adotada. Assim, justifica-se a possibilidade de uso de plantas baixas para a produção de cenários de RV aplicadas a SEs.

[Gebert et al. \(2017\)](#) apresenta uma estratégia de integração usando metamodelo. Sua vantagem é a capacidade de definir um modelo de estrutura de dados onde as informações de diferentes fontes podem ser agrupadas e transformadas em um arquivo de integração. Além disso, permite a padronização da comunicação entre os *softwares* CAD e RV.

Através da RBS, foi possível observar que nenhum desses trabalhos fornece simultaneamente: (i) integração automática entre *software* CAD e RV; (ii) arquitetura de *software* centralizada adaptativa, baseada na arquitetura cliente-servidor; (iii) gerenciamento de insumos e dados utilizados nos projetos CAD e seus respectivos cenários virtuais; (iv) topologia dos elementos do cenário; e (v) processo de reconstrução do Ambiente Virtual em tempo de execução nas instâncias de cada *software* de RV. Estas são características importantes e desejáveis para um melhor atendimento das necessidades de um Sistema de Autoria de RV para SEs.

Conforme mencionado, o processo de integração automático permite ao usuário realizar manutenção nos AVs sem processos complexos. Desta forma, é possível separar o desenvolvimento de SEs no *software* CAD do uso de SRV para tarefas de supervisão e treinamentos.

[Gebert et al. \(2017\)](#) utilizaram um *software* PDM para gerenciar as informações do produto. O sistema é dedicado ao controle de ativos para vendas. No entanto, os autores não apresentam um sistema de gerenciamento de seus elementos em RV. Um gerenciador de insumos no projeto possibilitaria maior controle dos elementos utilizados em cada AV.

Equipamentos como uma chave seccionadora tem a função de permitir o fluxo de corrente elétrica nos arranjos físicos. Esta ação é realizada pelo acoplamento e desacoplamento dos braços de controle ao circuito elétrico por meio da ação mecânica de motores. Essa ação de movimentos de abrir e fechar é importante ser apresentada aos operadores do Sistema de

Controle (SC) para visualização do *status* do equipamento por meio das animações, proporcionando a credibilidade visual do AV. Esta característica pode ser alcançada por estruturas hierárquicas utilizando grafos e animações, sendo amplamente empregadas em na CG.

A topologia elétrica em subestações virtuais é um atributo fundamental para supervisão, treinamento e simulação. As ligações físicas entre os equipamentos, criadas pelas conexões elétricas, formam um sistema lógico que permite a visualização do fluxo de corrente elétrica e possíveis interrupções no sistema. Assim, quando um disjuntor é desativado (acidentalmente ou não), por exemplo, é possível analisar a cadeia de eventos e o fluxo de corrente elétrica no sistema. Portanto, os AVs são enriquecidos com informações visuais e textuais sobre o *status* dos ativos da subestação.

Segundo Jyani e Barwar (2019), um sistema de versionamento (edições históricas) é extremamente importante quando se trata de projetos em constante atualização. Armazenar os estados dos elementos garante uma retrospectiva de informações de elementos inseridos e removidos, permitindo apresentar em treinamentos ou em análises de projetos, as ações tomadas durante um período de desenvolvimento, além de manter os projetos consistentes e seguros. Desta forma, os trabalhos de Lorenz et al. (2016) e Zawadzki et al. (2018) apresentam um sistema de versionamento parcial, baseado no sistema em que desenvolveram o trabalho.

Portanto, uma arquitetura de *software* cliente-servidor adaptável é importante para unificar CAD e SRV. Essa configuração permite que várias instâncias do SA e SRV sejam executadas simultaneamente. Além disso, o acesso remoto ao GIV permite que os administradores do sistema gerenciem projetos, usuários e controle de acesso aos insumos.

Todos esses recursos fornecem os elementos necessários para a supervisão dos ativos no SRV. Por meio desses atributos, também é possível criar, editar, gerenciar e utilizar AVs de subestação elétricas.

Assim, a análise detalhada mostrou que os trabalhos relacionados não abordaram todos os atributos mencionados simultaneamente. Também não há evidências de metodologias para a produção de AVs de SEs por meio de plantas baixas e arquitetura de *software* englobando *softwares* de gerenciamento de RV, CAD e AV.

3.3.2 Análise da Geração de Ambientes Virtuais

Os autores utilizaram diferentes extensões de modelos 3D para a construção dos Ambientes Virtuais, cada uma com características específicas e adequadas às propostas dos trabalhos. Visando analisar as características das extensões e obter informações relevantes de quais extensões se destacam em relação ao suporte às tecnologias da Computação Gráfica para motores de jogos, a Tabela 3.5 foi elaborada. As extensões utilizadas foram obj, stl, vrml e pcf e cada uma possui características relevantes para os objetivos de cada trabalho relacionado. A extensão Filmbox (fbx) não foi evidenciada em nenhum dos trabalhos, porém, ela foi incorporada à tabela, pois é uma das extensões que possui mais recursos e é suportadas por motores de jogos

da atualidade.

Pode-se observar que a extensão obj possui suporte a texturas e materiais, contudo, ao gerar o modelo 3D, os arquivos são criados separadamente da geometria do elemento (não embutidos), isso pode ser um desvantajoso em momentos que o SRV necessita transferir informações pela *internet*, ou mesmo em diretórios locais, a quantidade de arquivos necessários para construir um modelo 3D em cena pode demandar mais tempo de transferência, para a construção das malhas geométricas, mapeamentos de texturas e as aplicações de texturas.

Tabela 3.5: Extensões de modelos 3D e suas especificações.

Extensão	Geometria	Texturas	Materiais	Animações	Câmera	Iluminação	Embutido
.obj	✓	✓	✓				
.stl	✓						
.vrm1 2.0	✓	✓	✓	✓		✓	
.pcf	✓		✓				
.fbx	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Fonte: o autor.

A extensão stl é utilizada para peças CAD em impressão 3D e para visualização. Desta forma, o modelo possui apenas a sua geometria, sem atribuição de texturas e materiais, que é algo importante para a credibilidade visual na RV.

A extensão vrm1 possui muitas características relevantes para a CG e desejáveis para a criação de AVs realísticos, pois suporta texturas, materiais, animações e iluminação, porém a tecnologia foi substituída pela extensão x3d e é pouca utilizada na atualidade, permanecendo defasada. Devido ao crescente uso de outras extensões com características parecidas, poucos motores de jogos têm suporte a essa extensão.

A extensão pcf, um formato de modelo CAD 3D específico para condutos forçados (tubulações) e tem seu uso limitado a projetos do tipo.

Por fim, a extensão fbx possui características consideráveis, possui suporte a todas as tecnologias listadas na tabela, além de possuir as mídias embarcadas no arquivo do modelo 3D. Alguns motores de jogos e sistemas de CG possuem suporte para leitura e exportação. Além disso, possui benefícios em relação ao tamanho do arquivo e os elementos embutidos, facilitando o compartilhamento pela *internet*.

A Tabela [3.6](#) apresenta as extensões utilizadas nos trabalhos correlatos.

Tabela 3.6: Extensões de modelagem 3D utilizadas nos trabalhos científicos.

Autores	.obj	.stl	.vrml	.pcf	.fbx
Han et al. (2019)				✓	
Freeman et al. (2017)		✓			
Lorenz et al. (2016)			✓		
Gebert et al. (2017)	✓				
Mattioli et al. (2015)			não informado		
Zawadzki et al. (2018)			não informado		

Fonte: o autor.

Analisando os aspectos descritos em cada trabalho, a Tabela 3.7 foi elaborada, apresentando questões sobre o visual do AV e como são construídos.

Um dos critérios da RV é a credibilidade visual do cenário, onde o usuário vivencia a experiência da imersão através de elementos bem construídos. Um sistema realista tem a credibilidade de apresentar ao usuário, aspectos de elementos virtuais altamente fidedignos aos objetos do mundo real, sendo assim uma excelente estratégia para treinamentos, simulações e auxílio em operações críticas. Da mesma forma, elementos texturizados estão totalmente relacionados ao realismo. Os trabalhos de Mattioli et al. (2015) e Zawadzki et al. (2018) apresentam AVs realísticos, com texturas e iluminação. As animações dos ativos virtuais estão presentes no trabalho de Mattioli et al. (2015), enriquecendo os cenários.

Tabela 3.7: Tabela de características relacionadas a modelos 3D e o Ambiente Virtual gerado.

Autores	Credibilidade Visual	Texturas	Iluminação	Animações
Han et al. (2019)	Não	Não	Não	Não
Freeman et al. (2017)	Não	Não	Não	*
Lorenz et al. (2016)	Não	Não	Não	*
Gebert et al. (2017)	Não	Não	Sim	Não
Mattioli et al. (2015)	Sim	Sim	Sim	Sim
Zawadzki et al. (2018)	Sim	Sim	Sim	Não

(*) De forma aproximada.

Fonte: o autor.

3.4 Considerações

Apresentando contextos distintos no âmbito da engenharia, foi possível observar nos trabalhos científicos, a importância de metodologias de integração entre CAD e RV. A integração de

ferramentas de engenharia e *softwares* de RV propicia aos usuários um novo paradigma de criação e visualização de elementos 3D. Um dos fatores pertinentes é a imersão e interação com o mundo virtual, de tal sorte a exibir níveis de detalhes e informações espaciais complexas e difíceis de serem apresentadas e visualizadas na forma convencional.

Sendo assim, foi possível identificar e analisar atributos que favorecem a experiência de uso de ferramentas de engenharia no contexto de elaboração e edição de AVs para RV para subestações elétricas, sendo estes, apresentados nas Tabelas 3.4, 3.6, 3.7 como: a) metamodelos para integração de sistema de engenharia com SRV; b) grafos de cena para a topologia e lógica para a malha elétrica; c) versões históricas de projetos CAD visando analisar a evolução durante o processo de elaboração de AVs e com a mesma importância, garantir um sistema íntegro e consistente; d) credibilidade de objetos e ambientes virtuais; e) processo de reconstrução em tempo de execução de SRV com o intuito de manter o processo de elaboração de AVs em ferramentas de engenharia e a apresentação em RV de forma simples para manipulação e edição dos projetos.

Com base nos Capítulos 1, 2 e os trabalhos analisados neste capítulo, criou-se um escopo para elaborar uma estratégia para desenvolver um sistema de concepção/edição de Ambientes Virtuais de subestações de energia elétrica, baseado em ferramentas CAD, que possibilite aos projetistas e operadores do sistema elétrico elaborarem, de forma simples e amigável, ambientes de supervisão, treinamento e, em simultâneo, auxiliar na operação do sistema real. Tal estratégia será apresentada nos próximos capítulos.

A análise e relação entre os trabalhos apresentados neste capítulo e as estratégias abordadas no presente trabalho são importantes para a definição das contribuições no meio científico. Sendo assim, uma análise comparativa é apresentada no Capítulo 7, apresentando as conclusões sobre a metodologia adotada, a arquitetura, o desenvolvimento e os resultados da estratégia proposta.

Metodologia

Neste capítulo são apresentados os materiais e métodos abordados na proposta do trabalho. Inicialmente, é apresentada a arquitetura de *software* com os detalhes de seus componentes. Em seguida é demonstrada as etapas de produção de AVs pelo Sistema de Autoria. Por fim, as estratégias de criação e edição de plantas baixas por meio convenções de modelagem 3D e de símbolos, a estratégia de integração com o SRV e de reconstrução do AV.

4.1 Arquitetura do Sistema de Autoria

Foi proposta uma arquitetura de *software* para o Sistema de Autoria baseando-se nos objetivos descritos no Capítulo 1 e os resultados obtidos pela RBS no Capítulo 3. A arquitetura visa unir (i) os recursos que proporcionam a criação e edição de AVs de subestações de energia elétrica por plantas baixas em um editor CAD; (ii) a integração entre o editor CAD e o SRV; (iii) o gerenciador de Ambientes Virtuais; e (iv) os serviços de supervisão do ambiente real por meio do sistema SCADA conectados pela *internet*.

A Figura 4.1 apresenta a arquitetura do Sistema de Autoria simplificada, evidenciando, nos tracejados, os componentes essenciais do SA e seus relacionamentos:

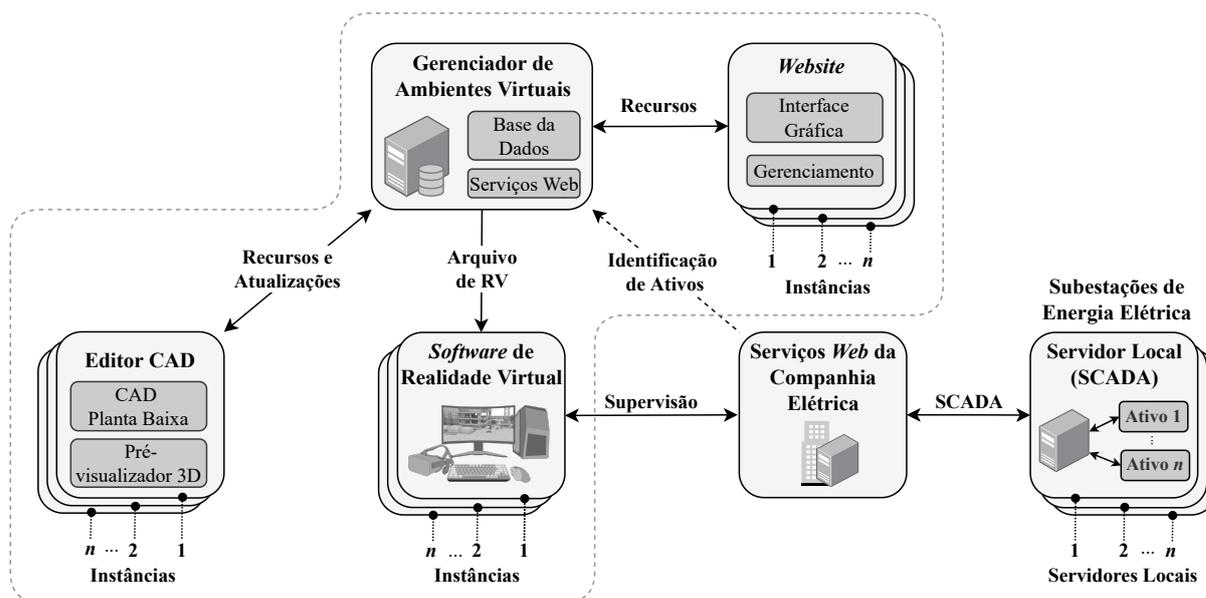
- **Gerenciador de Ambientes Virtuais (GAV):** servidor responsável por armazenar os ativos virtuais necessários e fornecer acesso para os sistemas externos por um serviço de rede do tipo *Representational State Transfer (REST)*¹. O sistema armazena e gerencia os modelos 3D, símbolos CAD, projetos de plantas baixas, versões históricas projetos, grupos de usuários e documentos em uma base de dados relacional;
- **Website:** página da *internet* com uma interface gráfica amigável destinada aos usuários especialistas para gerenciar e visualizar os insumos e projetos armazenados no GAV. O *Website* apresenta todas as funcionalidades do GAV por menus e elementos gráficos,

¹Em português: Transferência Representacional de Estado.

possibilitando visualizar e registrar conteúdos no Sistema de Autoria de forma fácil e intuitiva;

- **Editor CAD (ECAD):** é composto por ferramentas integradas ao *software* CAD que auxilia o projetista a elaborar as plantas baixas a partir dos itens cadastrados no GAV, o qual oferece recursos como (i) abrir e atualizar projetos do usuário; (ii) pesquisar, inserir, editar e substituir símbolos que representam um modelo 3D; (iii) criar símbolos CAD e relacionar com modelos 3D; (iv) inserir e editar condutores elétricos; (v) definir altura de elementos acima do solo e (vi) compilar e integrar a planta baixa no SRV. O ECAD foi implementado no formato *add-on (plugin)* utilizando a *Application Programming Interface (API)* fornecida pelo *software* AutoCAD. Foi projetada para que usuários possam trabalhar em projetos distintos, possibilitando a concepção e edição de desenhos CAD paralelamente;
- **Pré-visualizador 3D de plantas baixas:** *software* auxiliar utilizado em conjunto com o ECAD, que enriquece a visualização das plantas baixas com informações visuais 3D no processo de concepção. Pode-se visualizar detalhadamente o projeto em 3D, navegar entre os elementos, obter informações das conexões entre equipamentos e obter *feedback* visual antes da implantação no SRV;
- **Software de Realidade Virtual (SRV):** *software* destinado ao usuário final para navegar, interagir e realizar tarefas nos AVs produzidos pelo SA. O SRV foi projetado para ser utilizado por multiusuários, possibilitando acesso simultâneo ao mesmo AV. Desta forma, o SRV realiza o acesso ao arquivo de integração por meio do GAV, efetua a transferência dos modelos necessários para reconstruir o cenário 3D em um curto período;
- **Serviço Web da Companhia Elétrica:** é um *software* de encargo da companhia elétrica. Ele centraliza informações de supervisão dos servidores SCADA instalados nas subestações. O serviço *Web* fornece aos sistemas dos operadores, no centro de operações do sistema, informações das subestações com funções para monitoramento e controle dos ativos em tempo real. Além das funcionalidades apresentadas, o sistema é responsável por gerenciar o acesso e prover segurança da informação, pois pode permitir acesso externo às informações críticas. Nesta proposta, o serviço *Web* fornece acesso limitado e seguro para uso dos dados de supervisão, com a viabilidade, quando permitido, de enviar comandos de controle para os ativos;
- **Servidor Local (SCADA):** servidor de uma subestação com um sistema SCADA instalado e operando de forma centralizada, onde as informações referentes aos ativos locais que possuem sistemas de sensoriamento e controle são armazenadas e transmitidas ao sistema do centro de operações (serviço *Web*).

Figura 4.1: Arquitetura simplificada do Sistema de Autoria.

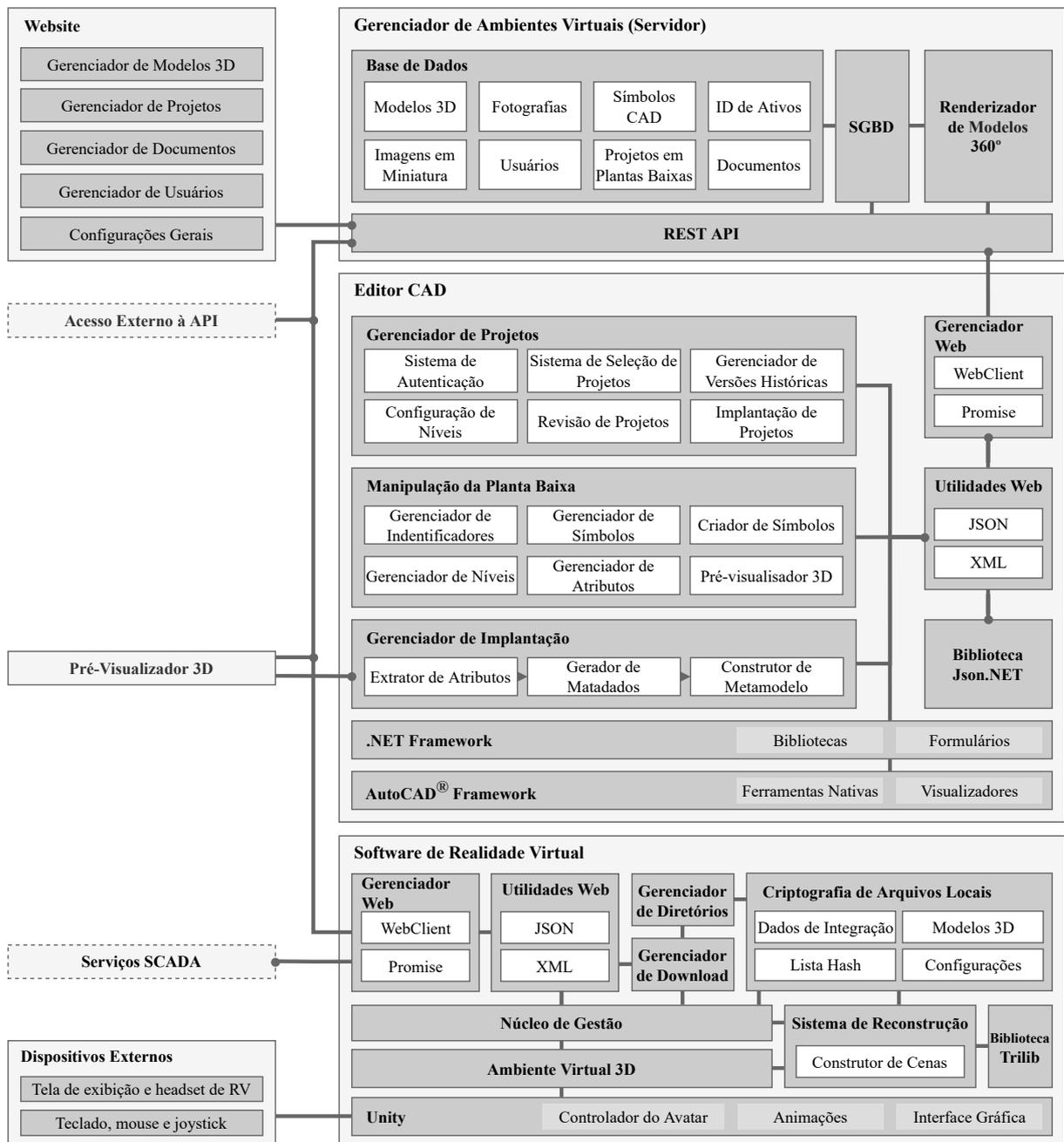


Fonte: o autor.

Os servidores locais, pertencentes às estruturas de campo das SEs (ambiente real), possuem domínio das informações dos elementos das subestações através do SCADA (BOYER, 2010), utilizado nas indústrias para aquisição de dados e controle de ativos. Como resultado, é possível realizar a transferência de informações entre várias SEs em campo e o SRV pelos Serviços Web da companhia elétrica, enriquecendo, assim, a representação 3D com os estados reais dos ativos.

A Figura 4.2 apresenta detalhadamente o diagrama conceitual dos softwares do Sistema de Autoria. O GAV é o módulo responsável por gerenciar os insumos do SA e também prover serviços para softwares externos. Foi desenvolvido utilizando o conceito cliente-servidor empregando o framework Django (DJANGO, 2020). O Sistema de Gerenciamento de Bases de Dados (SGBD) gerencia a base de dados relacional, armazenando referências para os arquivos de projetos como os modelos 3D, símbolos, plantas baixas, códigos de identificação de ativos e fotografias referentes aos elementos reais. Dispõe de um sistema de visualização de ativos virtuais por imagens em miniatura produzidas automaticamente pela suite Blender (FOUNDATION, 2020) durante o processo de cadastro de modelos 3D. Por fim, para possibilitar a conexão de softwares externos, foi proposto uma API baseada na arquitetura do tipo *Representational State Transfer* (REST), habitualmente utilizada em serviços modernos da internet (MASSÉ, 2012). Foram utilizadas as estruturas de dados do tipo *Extensible Markup Language* (XML) e *JavaScript Object Notation* (JSON) para realizar a serialização e deserialização dos dados que trafegam pela rede. Para que os usuários mantenham os cadastros e controle de todos os insumos de forma simples, uma página Web foi proposta, como representado no componente denominado Website.

Figura 4.2: Arquitetura detalhada do Sistema de Autoria.



Fonte: o autor.

O ECAD foi desenvolvido utilizando os *frameworks* Microsoft .NET e AutoCAD .NET (AUTODESK, I., 2020). Sendo assim, o sistema foi implementado em três módulos principais denominados Gerenciador de Projetos, Manipulação da Planta Baixa e Gerenciador de Implantação. Módulos de controle para acesso ao GAV via *internet* também foram implementados para auxiliar os principais, denominados como Gerenciador Web e Utilidades Web.

O módulo Gerenciador de Projetos é responsável pelo processo de controle de projetos CAD. Sendo assim, realiza a autenticação do usuário ao GAV, possibilita a seleção de projetos

do usuário autenticado, armazena versões históricas quando solicitado, configura os níveis (alturas) dos elementos do desenho em relação ao solo, revisa todos os elementos por meio de extração de relatórios e realiza a execução do módulo de implantação para integrar o desenho no SRV.

O módulo Manipulação da Planta Baixa é responsável pelo processo de concepção do projeto em planta baixa. Possui as ferramentas de busca, inserção e criação de símbolos, identificação de elementos, definição de níveis e a pré-visualização da planta baixa em 3D. A pré-visualização 3D é executada paralelamente com o ECAD por um *software* 3D, derivado do SRV, que utiliza os mesmos componentes de reconstrução de AVs. Também realiza acesso ao GAV para obter símbolos por meio de filtros. O módulo possui ferramentas de criação e atribuição de símbolos aos modelos 3D registrados no GAV, onde é realizada a seleção das entidades do símbolo no desenho e posteriormente a seleção do modelo 3D no GAV.

Por fim, o módulo Gerenciador de Implantação é dedicado aos processos de integração entre ECAD e SRV. O processo é realizado por algoritmos de extração de atributos da planta baixa, geração de estruturas de dados para incorporar os metadados dos elementos e a aplicação de um metamodelo para definir a estruturação do arquivo de integração. Essa tarefa é solicitada pelo usuário no momento final da concepção do projeto e o arquivo de integração é encaminhado e armazenado no GAV para acesso do SRV.

O SRV possui cinco módulos principais denominados, Núcleo de Gestão, Gerenciador de *Download*, Gerenciador de Diretórios, Criptografia de Arquivos Locais e Sistema de Reconstrução. Os módulos foram implementados utilizando o *framework* .NET e *Scripts* na linguagem C#, característicos do *game engine* Unity. O Núcleo de Gestão é o primeiro módulo a ser executado durante a inicialização do *software*. Após o procedimento inicial, uma conexão é realizada com o GAV para obter a lista de projetos em planta baixa implantados em RV. Ao selecionar um projeto, uma requisição HTTP (*Hypertext Transfer Protocol*) é enviada ao GAV solicitando o Arquivo de Integração com as informações do AV, onde em seguida, é analisado e gerado um relatório de quais são os ativos virtuais necessários para transferência e para a reconstrução. Os insumos são baixados pelo Gerenciador de *Download* e direcionados a Criptografia de Arquivos Locais por meio do Gerenciador de Diretórios, responsável por direcionar cada elemento para seu diretório padrão. Ao mesmo tempo, um algoritmo de criptografia e descriptografia é utilizado para garantir a segurança contra desvios e garantir a integridade dos arquivos locais. Esse processo é melhor detalhado na Subseção [4.3.6](#).

O Sistema de Reconstrução é responsável por reconstruir o Ambiente Virtual por meio das informações do arquivo de integração, com todos os atributos e características definidos no processo de desenho da planta baixa. Ele utiliza a biblioteca Trilib ([REIS, 2020](#)), apropriada para obter e gerar instancias de modelos 3D locais com formato FBX na game engine Unity.

Por fim, aplicações destinadas à supervisão de ativos podem realizar conexões pela *internet* com o servidor SCADA. Sendo assim, o Núcleo de Gestão realiza requisições periódicas para obter os *status* dos elementos do ambiente real e disponibiliza-os visualmente no SRV.

4.2 Etapas da Produção de Ambientes Virtuais com o Sistema de Autoria Proposto

O Sistema de Autoria possui um conjunto de ferramentas com o propósito de criar e editar AVs para RV através de plantas baixas e com apoio do *software* CAD. A abordagem de concepção de AVs por meio de desenhos de engenharia em plantas baixas é um aspecto valoroso para a proposta.

O desenvolvimento de AVs possui muitas variáveis que influenciam a usabilidade de ferramentas e o desempenho do usuário. Segundo [Nielson e Olsen \(1987\)](#), as técnicas tridimensionais de entrada apresentaram problemas pela questão da natureza bidimensional dos monitores e dos dispositivos de interação. Também pode-se citar a dificuldade de visualização em determinados ângulos de visão, oclusão de elementos e confusão visual.

Acredita-se que a representação simbólica de um ambiente real, por se tratar da manipulação de elementos no espaço bidimensional, provê abstração e reduz a sobrecarga visual durante o desenvolvimento.

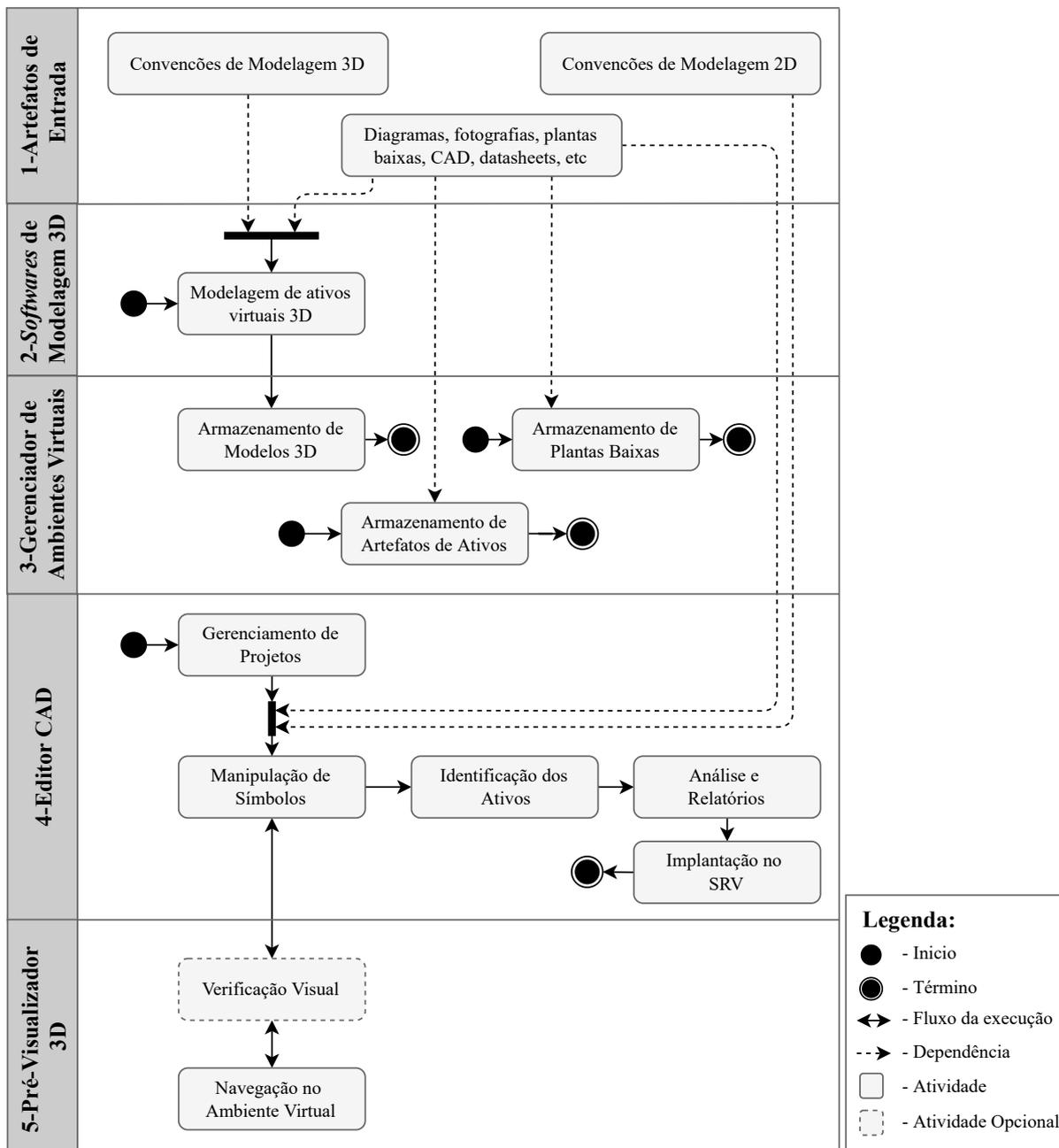
A Figura [4.3](#) apresenta as etapas de produção de AVs utilizando o Sistema de Autoria e *softwares* de modelagem geométrica. As etapas são definidas em (1) aquisição de artefatos de entrada, (2) modelagem e ativos virtuais 3D com *softwares* específicos, (3) armazenamento de ativos virtuais e plantas baixas no GAV, (4) execução do projeto no ECAD e (5) verificação visual e acompanhamento do projeto em 3D.

É importante destacar que cada atividade há a possibilidade de ser realizada por equipes e períodos distintos, paralelamente. Isso é uma responsabilidade do líder de desenvolvimento para organizar as equipes e otimizar os processos, objetivando os melhores resultados. Pode-se reunir equipes por habilidades e destiná-las a uma tarefa específica, como, por exemplo, uma equipe de modelagem para realizar a criação de ativos virtuais, uma equipe para manter os insumos do GAV, ou uma equipe de projetistas para criar desenhos em planta baixa, todos trabalhando em paralelo.

Primeiramente é realizada a etapa de aquisição dos artefatos, onde documentos são agrupados e organizados para que possam ser utilizados nas etapas posteriores. Neste trabalho, os artefatos foram disponibilizados pela companhia de energia elétrica e outros foram desenvolvidos, como, por exemplo, as convenções de modelagem 3D e 2D. Os artefatos reúnem elementos como os diagramas unifilares, fotografias, imagens, plantas baixas, datasheets de equipamentos e informações dos fabricantes, onde são utilizados em processos específicos.

Na etapa seguinte, os ativos virtuais 3D são produzidos utilizando *softwares* de modelagem geométrica, como o 3Ds Max ([AUTODESK, 2020](#)), Blender ou Inventor ([Inventor, 2021](#)). Durante o processo, utiliza-se artefatos que possibilitam a concepção com maiores níveis de detalhes. Além disso, o emprego de convenções propicia qualidade e padronização, obtendo os mesmos resultados independentemente do *software* escolhido para modelagem.

Figura 4.3: Etapas de produção de AVs utilizando o Sistema de Autoria.



Fonte: o autor.

Os insumos produzidos são armazenados na terceira etapa. Modelos 3D, plantas baixas, código de identificação de ativos, documentos e fotografias são cadastrados no GAV pelo *Website*. Nesta etapa, os modelos 3D cadastrados são enriquecidos com informações como, sua identificação, categoria do elemento, nível de tensão de operação, fabricante, fotografias, símbolos e outros. Assim, pode-se garantir o relacionamento entre elementos do projeto e possibilitar a busca por filtros.

A etapa de execução do projeto é o processo de concepção do desenho CAD. Nesse sentido,

ferramentas específicas para manipulação são utilizadas para cada atividade envolvida. As atividades relacionadas são:

- **Gerenciar Projeto:** atividades relacionadas com a autenticação do usuário ao GAV, seleção de projeto de planta baixa do usuário, configurações de níveis de elementos (altura em relação ao solo) e armazenar versão histórica da planta baixa;
- **Manipular Símbolos:** buscar, inserir, editar, substituir, apagar, mover, rotacionar, etc. os símbolos que representam modelos 3D de equipamentos;
- **Identificação de Ativos:** atribuir o código de identificação ao símbolo quando o SRV for destinado à supervisão de ativos em campo. Essa etapa pode ser realizada no momento de inserção de símbolos no desenho da planta baixa;
- **Implantação no SRV:** realiza o processo de extração dos dados do projeto e integra com o SRV. Os dados são armazenados no GAV de forma automática e relacionado ao projeto em desenvolvimento, desta forma os dados de integração podem ser acessados pelo SRV quando utilizado;
- **Análise e Relatórios:** é executada uma análise detalhada de todos os ativos em relação à topologia de conexão entre elementos (quando necessário) e as identificações atribuídas aos elementos. Todas as atividades são realizadas por ferramentas automatizadas e, ao final, um relatório é apresentado com os eventuais problemas detectados.

A pré-visualização 3D é um processo opcional. Esta etapa está relacionada ao enriquecimento visual e o aprimoramento do modelo mental do usuário (VOGT et al., 2021), com ela é possível visualizar o desenho da planta baixa em ambiente tridimensional. A revisão visual 3D é importante para detectar possíveis erros e problemas pertinentes ao processo de concepção, reduzindo o retrabalho, tempo e custo total (CASENAVE; LUGO, 2017). Nesse sentido, é possível pré-visualizar seu estado final antes da implantação no SRV. O pré-visualizador possui o mesmo núcleo de reconstrução do SRV, porém ele é executado paralelamente com o ECAD.

4.3 Metodologia do Sistema de Autoria

Nesta seção são apresentadas as metodologias e estratégias que tange a proposta do Sistema de Autoria. A seção é dividida em seis subseções pertinentes a arquitetura de *software* e as etapas de produção descritas na Seção 4.1.

4.3.1 Modelagem Geométrica de Ativos e de Símbolos

A padronização dos modelos 3D e dos símbolos são requisitos fundamentais para garantir o correto funcionamento do desenho em planta baixa e a reconstrução do AV pelo SA. A modelagem 3D é um processo complexo, que abrange diversos fatores, inúmeras formas e técnicas

de construção e exigem experiência dos modeladores para produzirem um elemento de qualidade. Portanto, o uso de convenções é um requisito importante, pois simplifica e padroniza a forma que os elementos virtuais são produzidos e inseridos no SRV. Sendo assim, permite que quaisquer modelos concebidos adotando as convenções, em *softwares* de modelagens distintos, sejam compatíveis com os padrões de montagem do Sistema de Autoria.

Segundo Sui et al. (2010), existem muitas abordagens utilizadas na modelagem 3D, porém, uma metodologia bem definida ainda é necessária para garantir a qualidade e reutilização dos modelos em outros contextos. A metodologia utilizada por Sui et al. (2010) apresenta estratégias relacionadas a este trabalho. Destaca-se a utilização de unidades de medidas, definição do ponto central do modelo (*pivot*) e otimização da malha (redução de polígonos).

As SEs abordadas neste trabalho são constituídas por inúmeros elementos. Para possibilitar a concepção dos cenários por meio de representações simbólicas, é necessário definir convenções para padronizar as características de modelagem dos modelos 3D e dos símbolos 2D. Desta forma é importante definir acordos sobre a qualidade visual, qualidade estrutural, unidade de medida, matriz de transformação (centro do modelo, posição na cena, rotação e escala), ancoragens para pontos de conexão de condutores elétricos e referências de bases para apoio no solo.

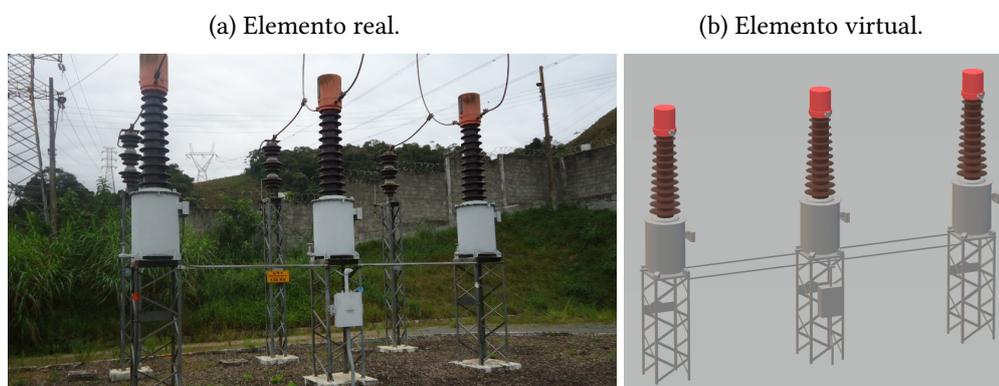
Com a mesma importância, os acordos para modelagem de símbolos abordam a qualidade visual, similaridade com o modelo 3D, dimensões, unidade de medida e matriz de transformação.

Considerando características cruciais, como a fidelidade dos elementos virtuais em relação aos reais, quantidade simultânea de elementos nos cenários, desempenho gráfico e limitações tecnológicas, foram definidas as seguintes convenções para modelagem 3D:

- **Qualidade do modelo 3D:** a qualidade do modelo 3D considera três aspectos fundamentais:
 - Quantidade de polígonos: ao modelar um elemento, deve-se considerar a quantidade de polígonos em sua forma final, esse aspecto é fundamental para manter qualidade visual e comportamento fluido. O ideal é que os modelos sejam otimizados e com o mínimo de polígonos necessários (modelagem *low poly*);
 - Texturas e materiais: os modelos 3D devem receber materiais com texturas próximas ao real, pois assegura a qualidade visual e a fidelidade com os elementos reais. Ao aplicar texturas, deve-se realizar a otimização das imagens para obter melhor desempenho durante a execução;
 - Fidelidade ao objeto real: manter os aspectos físicos em relação ao elemento real. A Figura 4.4 exemplifica a fidelidade de um equipamento do tipo disjuntor (Figura 4.4a) em comparação com o elemento virtual (Figura 4.4b). Uma das dez questões que Zhao (2011) listou para adquirir maior maturidade na modelagem é a semelhanças com o objeto real. O autor afirma que os métodos para estimar a similaridade

ainda não são satisfatórios. Nesse sentido, o método simples de avaliar o modelo é a análise visual comparativa.

Figura 4.4: Equipamento elétrico do tipo disjuntor.



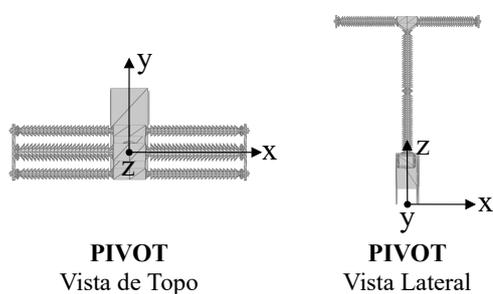
Fonte: o autor.

- **Unidade de medida:** o *software* de modelagem deve ser configurado para utilizar o sistema métrico, com 1 unidade de medida correspondendo a 1 metro;
- **Centro do objeto (*pivot*):** objetos devem conter o ponto de origem (*pivot*) no centro de massa do corpo, centralizado no plano XY , com o eixo Z correspondendo ao nível mais baixo do objeto ($Z = 0$ em relação ao objeto), exemplo na Figura 4.5a;
- **Posição do objeto:** o posicionamento do modelo 3D no espaço do mundo (*world space*) deve ser realizado aplicando sua posição nos eixos $XYZ = 0$, permitindo a manipulação do objeto pelo do ponto de origem;
- **Escala:** a escala do modelo deve ser mantida em 100% nos eixos XYZ (sem mudanças nos aspectos físicos);
- **Rótulo do modelo (*target*):** todos os elementos devem possuir um elemento vazio (*dummy*), nomeado como “*target*”, destinado ao posicionamento de rótulos de interface gráfica. Esse elemento vazio deverá ser posicionado no centro de massa do modelo com deslocamento no eixo Z até o ponto mais alto do modelo. Exemplo na Figura 4.5b;
- **Conectores para ancoragem de condutores:** os conectores para ancoragem são responsáveis por referenciar os pontos de conexão de condutores elétricos entre dois ou mais equipamentos. Os conectores são objetos simples como caixa, cilindro ou cápsula em regiões de conexão de cabos. Todos os objetos devem ser nomeados como “*conector*”, independentemente da quantidade. A Figura 4.6a demonstra um exemplo de conectores com dois pontos de ancoragem para a entrada da linha elétrica e duas ancoragens para saída;

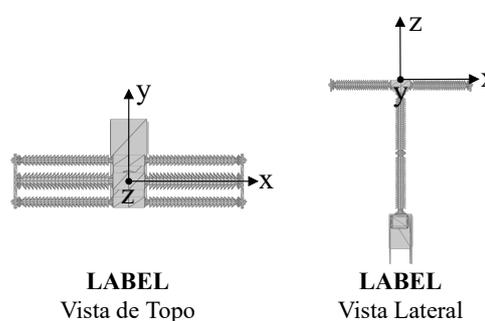
- **Referências para bases:** elementos que possuem duas ou mais áreas de contato com o solo devem ser referenciados. As referências são objetos vazios (*dummy*) posicionados nas áreas de contato. As bases são utilizadas para apoiar a estrutura dos equipamentos no solo. Equipamentos que possuem apenas uma área de contato são isentos desta configuração. A Figura 4.6b demonstra às seis referências para bases em um equipamento do tipo Chave Seccionadora.

Figura 4.5: Demonstração das convenções de modelagem 3D.

(a) Posicionamento do *pivot* no centro de massa e com o eixo Z no ponto mais baixo do objeto.



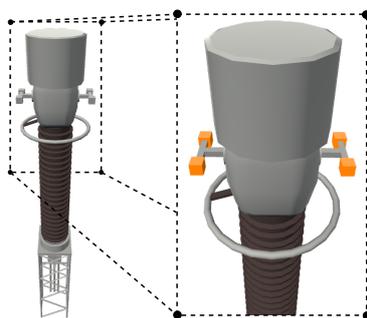
(b) Posicionamento do rótulo no centro de massa do objeto e com o eixo Z no ponto mais alto do objeto.



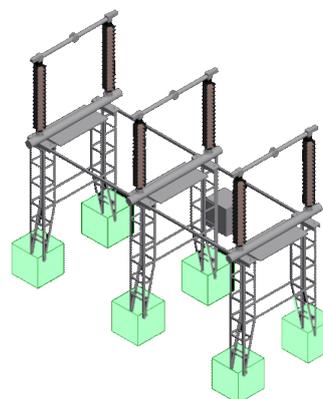
Fonte: o autor.

Figura 4.6: Exemplo de convenção de pontos de referência.

(a) Referência de conectores para condutores elétricos.



(b) Referências para bases de apoio ao solo.

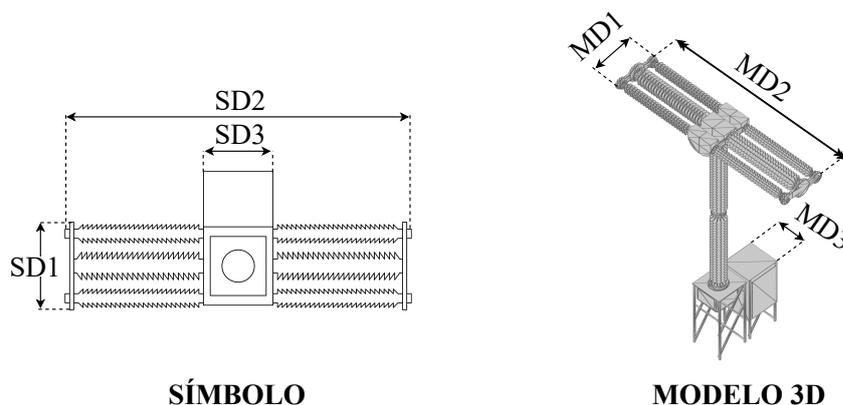


Fonte: o autor.

A modelagem de símbolos é realizada no ECAD com o auxílio das ferramentas nativas do *software* CAD e das implementadas. As convenções são:

- **Representação simbólica:** o símbolo deve ser desenhado representando o modelo 3D em visão de topo;
- **Similaridade com modelo 3D:** o símbolo a ser modelado deve representar o modelo 3D com alta similaridade, para permitir o reconhecimento do elemento. O símbolo deve ser otimizado, eliminando a quantidade exagerada de informações não úteis (linhas, arcos, círculos);
- **Dimensões:** as dimensões do símbolo devem ser iguais às do modelo. A Figura 4.7 apresenta compatibilidade entre dimensões de um modelo 3D e seu símbolo, onde $SD1 = MD1$, $SD2 = MD2$ e $SD3 = MD3$;
- **Centro do símbolo (*pivot*):** o símbolo deve ter o ponto de origem (*pivot*) no plano XY posicionado no seu centro de massa no mesmo ponto de origem do modelo 3D no plano XY;
- **Unidade de medida:** o símbolo deve ser criado sem utilizar unidade de medida (*unitless*), para quando ser utilizado em um desenho CAD sua unidade de medida ser atribuída com o padrão do desenho;
- **Matriz de transformação:** o posicionamento do símbolo no plano XY é feito pelo seu ponto central (*pivot*), da mesma forma, a rotação é baseada no *pivot*. Deve-se utilizar o mesmo valor de rotação e escala do modelo 3D.

Figura 4.7: Exemplo de convenção para as dimensões dos símbolos onde a representação simbólica mantém as proporções do modelo 3D.

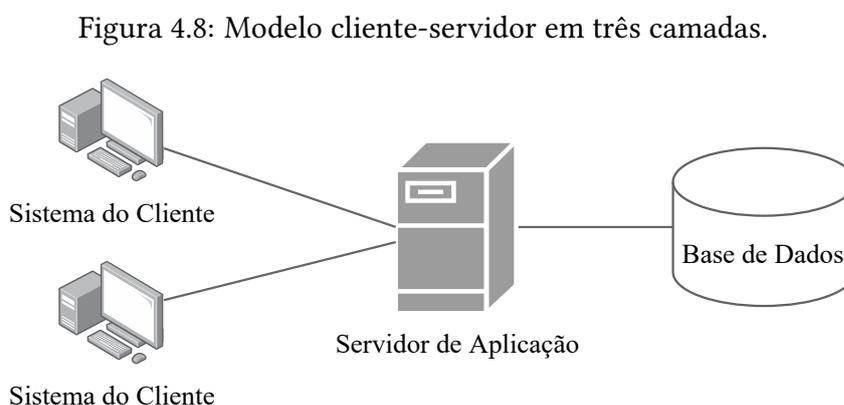


Fonte: o autor.

4.3.2 Gerenciador de Ambientes Virtuais

O Gerenciador de Ambientes Virtuais é uma biblioteca Web responsável por armazenar insumos dos projetos de subestações elétricas. É uma peça importante para a arquitetura de software do SA, pois permite centralizar e gerenciar todos os dados utilizados entre os sistemas ECAD, SRV e externos.

A arquitetura de software do GAV foi elaborada baseando-se no modelo centralizado cliente-servidor em três camadas. Essa arquitetura isola o processamento de dados em um local central e maximiza a reutilização de objetos (REESE, 2000). Neste sentido, a reutilização de objetos significa usar as mesmas instâncias de objeto em um servidor de aplicações (REESE, 2000). Isso otimiza o sistema reduzindo o uso da memória, acesso redundante a base de dados e menor tempo na resposta ao cliente. A Figura 4.8 apresenta o conceito de modelo cliente-servidor em três camadas.



Fonte: Adaptado de (REESE, 2000).

A arquitetura do GAV mantém uma base de dados relacional entre os insumos dos projetos com objetivo de documentar a integração entre SEs e o reuso dos elementos. Portanto, é possível monitorar o uso dos ativos virtuais nas subestações e gerenciar relatórios de estatística sobre a utilização dos elementos em cada AV, destacando o compartilhamento de modelos geométricos entre os projetos de SEs.

Os elementos associados aos projetos são: ativos virtuais, símbolos, subestações, projeto CAD, usuários e documentos. Cada um deles possui insumos utilizados na elaboração de plantas baixas no ECAD e para reconstrução do AV no SRV. Há o relacionamento entre eles durante a etapa de engenharia, onde o uso dos elementos é registrado na base de dados e relacionado com o objeto em questão. A Tabela 4.1 apresenta, de forma detalhada, os elementos associados ao GAV.

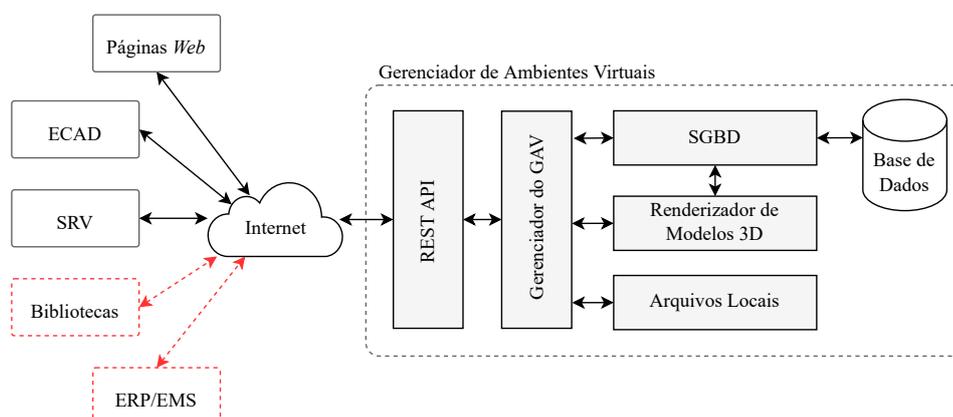
Durante o processo de registro dos elementos, os campos nas colunas “Insumos” e “Informações” devem ser informados. Desta forma, os dados são relacionados aos outros elementos durante a fase de elaboração das plantas baixas. Da mesma forma, ao solicitar os elementos

Tabela 4.1: Informações e relacionamentos dos insumos armazenados no Gerenciador de Ambientes Virtuais.

Elemento	Insumos	Relacionamentos	Informações
Ativos Virtuais	Modelos 3D, fotos e informações	Símbolos, usuários e subestações	Identificação, tipo, fabricante, subestação, símbolos e descrição
Símbolos	Símbolos CAD e informações	Ativos virtuais	Identificação, imagem e modelos 3D
Subestações	Informações	Ativos virtuais e projetos	Identificação, nome, sigla, descrição e localização geográfica
Projetos CAD	Planta baixa, arq. integração, versões históricas e informações	Subestações, usuários e ativos virtuais	Identificação, usuário, status, histórico, data de atualização e código de operação
Usuários	Informações	Ativos virtuais, projetos CAD	Nome, e-mail, status
Documentos	Arquivos, informações	Usuários	Identificação, título, marcação

ao GAV, as informações são serializadas e retornadas ao serviço solicitante. A coluna “Relacionamentos” acontecem de forma automática durante o registro inicial ou durante a fase de implantação no SRV.

As informações do GAV podem ser acessadas pelos *software* do SA (ECAD, SRV, pré-visualizador) por meio de conexão com a internet. Um aspecto relevante é a possibilidade de outros aplicativos se conectarem a biblioteca. A Figura 4.9 apresenta um diagrama conceitual da arquitetura de software do GAV (apresentadas também nas Figuras 4.1 e 4.2) onde os principais sistemas do AS se conectam.

Figura 4.9: Diagrama conceitual do acesso ao GAV por *softwares* externos.

Fonte: o autor.

Empresas do setor de sistemas elétricos de potência possuem *softwares* de planejamento de recursos empresariais (ERP - *Enterprise Resource Planning*) e de gerenciamento de energia (EMS - *Energy Management System*) no qual possuem inúmeros dados sobre a malha elétrica. Através da arquitetura de software do GAV, há possibilidade de integração e expansão dos dados entre o ERP/EMS e AS, permitindo enriquecer as informações de operação do sistema elétrico para ambos os sistemas.

É importante destacar que indústrias de equipamentos elétricos são potenciais usuários do GAV, uma vez que a integração entre bibliotecas industriais permite a expansão dos ativos e compartilhamento de arranjos de campo.

Os elementos em vermelho na Figura 4.9 representam os sistemas de empresas que, por uma adequação no protocolo de comunicação é possível integrar as bases de dados.

Mais detalhes do desenvolvimento do GAV são apresentado na Seção 5.7.

4.3.2.1 Registro de Ativos no Gerenciador de Ambientes Virtuais

O Gerenciador de Ambientes Virtuais é um sistema *Web* que mantém os insumos de projetos de subestações virtuais e provê acesso a aplicações externas. Dessa forma, possui a função de armazenamento de ativos virtuais, símbolos CAD, versões históricas de projetos de subestações, arquivos de integração para RV, documentos e controle de usuário. O GAV mantém uma base de dados relacional entre os elementos com objetivo de documentar e fornecer informações às aplicações do Sistema de Autoria.

Como descrito na Seção 4.2, onde são apresentadas as etapas de produção de AVs via SA, a segunda etapa é destinada à produção de ativos, posteriormente seu armazenamento no GAV. Pela página *Web* do GAV, os modelos 3D são cadastrados e enriquecidos com dados importantes para uso em filtros de busca e o funcionamento do sistema. Desta forma, ao cadastrar um modelo 3D, é necessário inserir no formulário os dados sobre a classe do equipamento, tensão de operação, fabricante, descrição, fotos de referência, modelo 3D em formato editável (3Ds Max) e, por fim, o modelo 3D em formato exportado (FBX). Desta forma, os ativos podem ser filtrados em campos de busca do SA para diversas finalidades, como o cadastro de símbolos ou inserção no desenho da planta baixa.

Durante o processo de concepção do desenho em planta baixa, pode-se criar símbolos representativos e atribuí-los aos modelos 3D, enriquecendo-os com símbolos e informações. Outro aspecto importante é o relacionamento dos ativos virtuais aos projetos que eles estão inseridos. Esta etapa é realizada durante a implantação, onde uma lista dos ativos virtuais utilizados no desenho são relacionados ao projeto de subestação.

Desta forma, pode-se considerar que os registros de ativos no GAV são realizados via página *Web* e as ferramentas do ECAD, proporcionando versionamento histórico de projetos e seus relacionamentos com ativos virtuais e seus símbolos.

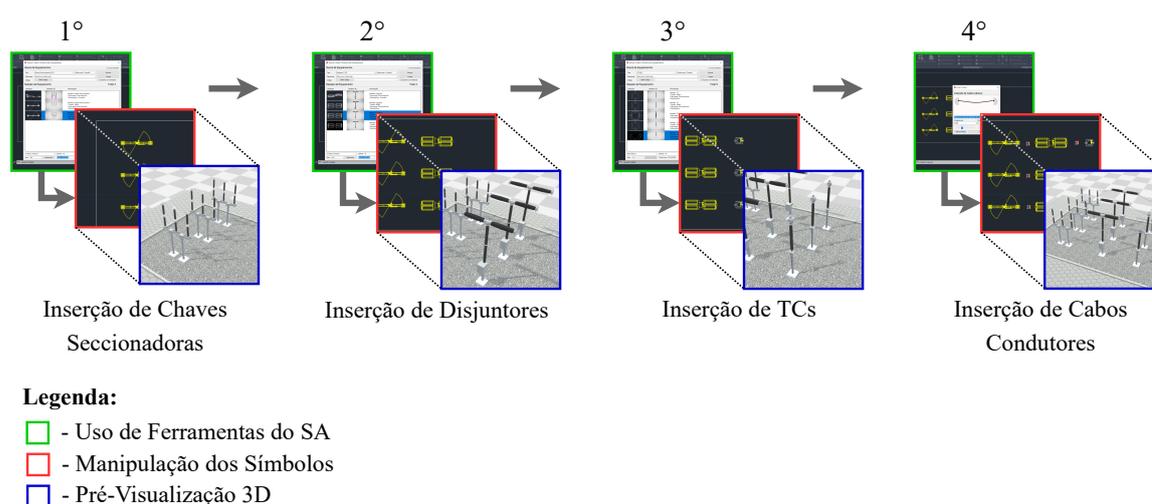
4.3.3 Manipulação da Planta Baixa

A manipulação dos símbolos na planta baixa é realizada utilizando ferramentas nativas do *software* AutoCAD e implementadas no SA. É importante destacar o uso do AutoCAD na proposta deste trabalho, pois possui ferramentas indispensáveis para a manipulação dos elementos do desenho como, mover, rotacionar, escalar, copiar, colar, recortar e outras. Neste sentido, o uso das ferramentas nativas reduz a necessidade de implementação dessas funcionalidades.

A manipulação dos elementos na planta baixa envolve a criação de símbolos e sua atribuição a um modelo 3D, inserção de símbolos, inserção de condutores, a definição da matriz de transformação dos elementos (translação, rotação e escala) e a identificação do símbolo com código de operação do sistema de supervisão.

A Figura 4.10 apresenta brevemente as etapas de manipulação da planta baixa com objetivo de elaborar um arranjo do tipo barra simples. As etapas são realizadas sequencialmente.

Figura 4.10: Etapas de concepção de um arranjo físico de SE com o SA.



Fonte: o autor.

Observa-se que no primeiro passo em verde, uma ferramenta que auxilia na busca do ativo virtual a ser inserido, no caso uma chave seccionadora com dupla abertura lateral. Ela é inserida na planta baixa (vermelho) e visualizada simultaneamente no pré-visualizador 3D (azul). Os próximos passos realizam a inserção de disjuntores, TCs e cabos condutores. Desta forma, a sequência de passos apresentados cria um arranjo de SE. Destaca-se a funcionalidade de busca, inserção e visualização 3D em tempo real, aprimorando o modelo mental do usuário durante a fase de concepção da planta baixa.

A seguir são apresentadas as etapas que antecedem a execução do projeto em planta baixa e, posteriormente, as etapas de manipulação dos símbolos.

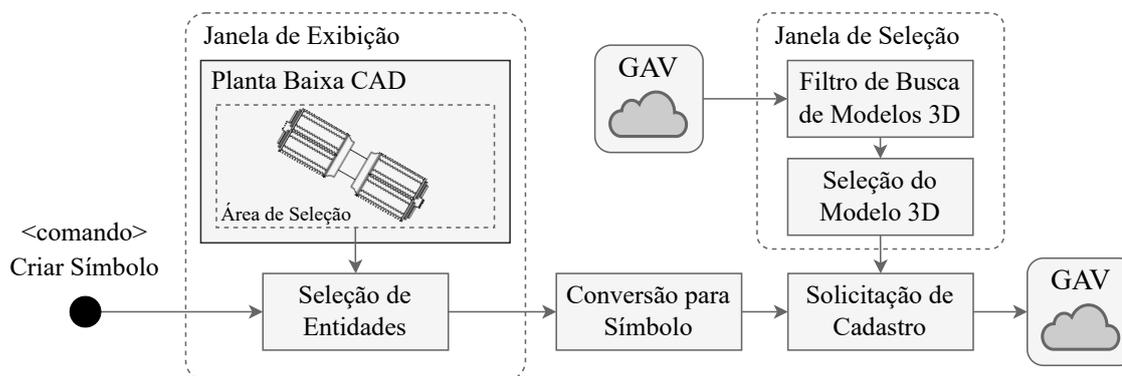
4.3.3.1 Criação de Símbolos

Os símbolos são representações dos ativos virtuais 3D, e sua manipulação permite desenhar plantas baixas e convertê-las em um ambiente 3D. Para isso, os símbolos devem ser criados (desenhados) através do ECAD e atribuídos aos ativos virtuais 3D.

A funcionalidade para criação de símbolo e sua atribuição aos modelos virtuais foi implementada priorizando a facilidade de execução da tarefa. O processo de cadastramento do símbolo no GAV possui como pré-requisito o cadastro do modelo 3D referente a ele.

A Figura 4.11 demonstra, em síntese, o processo de criação e atribuição de símbolos pelo ECAD. Ao executar o comando, uma janela é apresentada ao usuário possibilitando a seleção das entidades pertencentes ao símbolo (linhas e elipses que formam o desenho). Em seguida, o algoritmo transforma todas as entidades em um único bloco, direcionado ao cadastro no GAV. Em paralelo, o usuário realiza uma busca na galeria, por filtros, dos modelos virtuais cadastrados. Uma vez selecionado, é solicitado ao sistema, o cadastro do novo símbolo e sua atribuição ao modelo 3D.

Figura 4.11: Diagrama conceitual da ferramenta de criação de símbolos e atribuição a modelos 3D.



Fonte: o autor.

A requisição é do tipo HTTP/POST e é enviada ao GAV por meio da *Uniform Resource Locator* (URL) **http://server:port/api/symbols/** carregando as seguintes informações:

- **Block:** símbolo CAD no formato base 64 para compartilhamento via *internet*;
- **Thumbnail:** miniatura rasterizada do símbolo;
- **Description:** descrição do elemento, e;
- **Object3D:** código de identificação do modelo 3D que o símbolo foi atribuído.

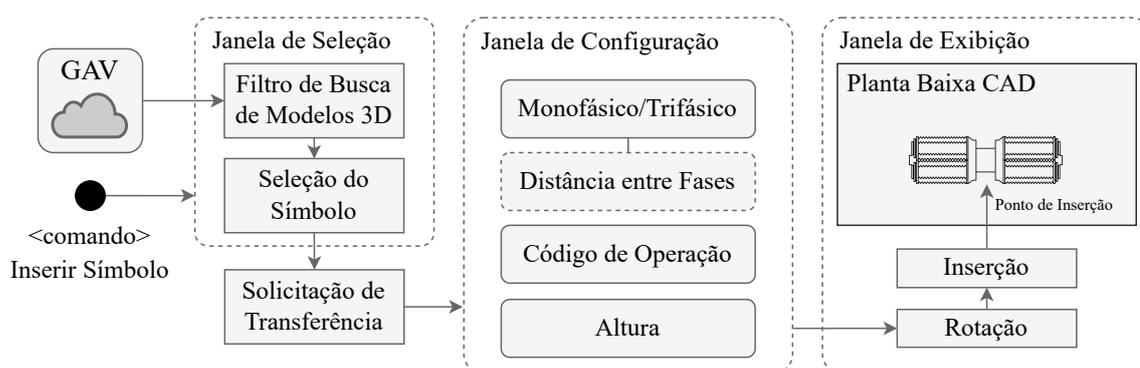
Após o registro do novo símbolo, uma mensagem é apresentada ao usuário informando se a ação foi bem sucedida ou não.

Desta forma, o símbolo registrado está disponível para uso em qualquer projeto e pode ser reaproveitado para compor parte de outra subestação. Além da disponibilidade no ECAD, o símbolo também está disponível no GAV. Os usuários podem acessar as informações pelo *Website*.

4.3.3.2 Inserção de Símbolos

A inserção de símbolos é realizada por uma ferramenta implementada com funcionalidades para busca, seleção e inserção de elementos ao desenho. Primeiramente, o usuário realiza a busca através de filtros informando a classe, descrição ou código do elemento. A Figura 4.12 demonstra resumidamente o processo de busca e inserção de símbolos no desenho da planta baixa. Os serviços do GAV retornam uma lista de símbolos apresentando imagens em miniaturas e suas características.

Figura 4.12: Diagrama conceitual da ferramenta de inserção de símbolos.



Fonte: o autor.

Ao selecionar o símbolo desejado e executar o processo de inserção no desenho, uma requisição HTTP/GET é enviada ao GAV por meio da URL **`http://server:port/api/symbols/?id=1`**, onde o trecho “id=1” representa a identificação do elemento selecionado. Logo em seguida, o AS recebe o *payload* solicitado, contendo informações do símbolo e do modelo 3D:

- **Fingerprint:** identificação global do símbolo na base de dados do GAV;
- **Thumbnail:** miniatura rasterizada do símbolo;
- **Block:** símbolo CAD no formato base 64 para serialização dos dados via *internet*;
- **Description:** descrição do elemento, e;
- **Object3D:** código de identificação do modelo 3D que o símbolo representa.

Em seguida, uma janela é apresentada ao usuário contendo campos para definir a forma com que o símbolo será inserido na planta baixa. Pode-se inserir o símbolo em uma configuração monofásica ou trifásica com a distância entre fases definidas pelo usuário. Uma etapa, antes da

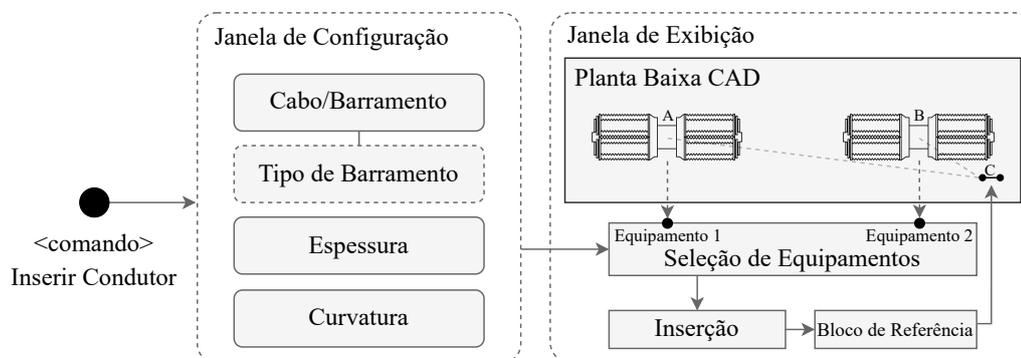
inserção do símbolo, deve-se informar a rotação em graus e posteriormente informar o ponto de inserção (x, y e z) no plano do desenho.

Como comentado anteriormente, o AutoCAD possui uma *suite* de ferramentas *built-in* que permite a manipulação das entidades de um projeto CAD. Desta forma, associados às ferramentas implementadas é possível estender as funcionalidades, como, por exemplo, realizar cópias de múltiplos elementos ou duplicar arranjos físicos inteiros.

4.3.3.3 Inserção de Condutores Elétricos

Os condutores elétricos são inseridos de forma parecida com a inserção de símbolos. Ao executar o comando de inserção de condutores, uma janela com campos para configuração é apresentada ao usuário. Nela é possível definir qual categoria de condutor que será inserido, a espessura do condutor e a curvatura, caso necessário. Após a configuração, uma janela é apresentada ao usuário, permitindo a seleção de até dois equipamentos. Após a seleção dos elementos, é realizada a inserção de um bloco de referência contendo o relacionamento entre os equipamentos. Esse bloco é utilizado posteriormente para extrair as informações de relacionamento entre equipamentos do projeto. A Figura 4.13 exemplifica sucintamente os elementos da funcionalidade de inserção de condutores na planta baixa.

Figura 4.13: Diagrama conceitual da ferramenta para inserção de condutores.



Fonte: o autor.

Na janela de configuração dos condutores, ao selecionar a opção de cabos, o usuário deve informar a espessura e a curvatura. São características que o cabo deve assumir no AV. Desta forma, ao avançar nos passos da funcionalidade, deve-se selecionar os equipamentos que o condutor irá conectar, são dois. Por fim, a inserção do condutor é realizada e um bloco de referência da conexão entre os equipamentos é inserido na planta baixa.

4.3.4 Definição dos Metadados dos Ativos Virtuais

Um documento CAD e suas entidades, *In Natura*, contém informações inerentes às suas finalidades, tais como comandos, instruções e dados. Algumas informações sobre entidades podem

ser destacadas: (i) nome, (ii) cor, (iii) camada, (iv) espessura da linha, (v) unidade de medida, (vi) material e (vii) código de identificação. Desta forma, as informações referentes ao desenho, são destinadas ao contexto da estrutura padrão de um documento CAD.

A proposta deste trabalho, que visa, como parte, gerar AVs tridimensionais por meio de planta baixa, carece de informações essenciais para a reconstrução virtual. As informações disponíveis no documento CAD são úteis, porém insuficientes, sendo necessário a incorporação de informações extras.

Sendo assim, novas informações são atribuídas as entidades do documento CAD e tratadas como metadados. Segundo Baca (2008), a definição sucinta de metadados é “dados sobre dados”, são conjuntos de informações para outro tipo de informação.

Visando obter informações complementares para a integração entre ECAD e SRV, foram realizadas análises de plantas baixas de SEs. Foram identificados os elementos apresentados na Tabela 4.2. Observa-se a divisão dos elementos e a definição de quais tipos de metadados são atribuídos a cada subcategoria.

Tabela 4.2: Informações complementares de elementos de subestações de energia elétrica.

Referência	Subcategoria	Informações
Documento CAD	Projeto de subestação	Identificação
		Nome Sigla Unidade de medida
Objetos	Equipamentos e elementos civis	Identificação CAD Identificação do modelo 3D Identificação do símbolo Categoria do equipamento Nível (altura) Matriz de transformação
	Equipamentos supervisionados	+ Código SCADA
Condutores Elétricos	Cabos	Identificação CAD Identificação de conexão (A) Identificação de conexão (B) Espessura
	Barramentos	+ Catenária + Tipo de barramento └ Distância Inicial* └ Distância Final*

(+) As informações anteriores mais esta informação.

(*) A inclusão dos dados é relacionado ao “Tipo de barramento”.

Fonte: o autor.

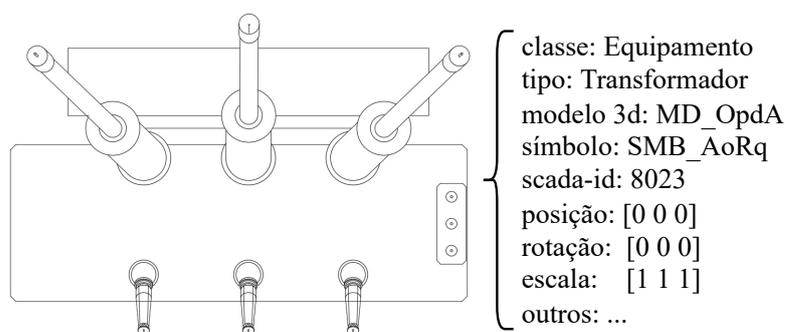
A subcategoria “Projeto de subestação” é um documento CAD. Neste sentido, o documento CAD é enriquecido com informações sobre o projeto criado, como sua identificação (única), nome da subestação, sigla e unidades de medida. São informações essenciais para que a integração entre ECAD, GAV e SRV possa ser efetivada, além de ser referência para associação entre os outros insumos pertencentes aos projetos.

A referência “Objetos” engloba os elementos da subestação compostos por: equipamentos elétricos, equipamentos supervisionados, estruturas elétricas e construções civis (pátios, casas de controle, casas de geradores), exceto os condutores elétricos. Todas as entidades CAD referentes aos objetos da subestação são enriquecidas com os dados: (a) identificação CAD, (b) identificação do modelo 3D, (c) identificação do símbolo, (d) categoria do equipamento, (e) nível (altura) e (f) matriz de transformação. As informações extras de equipamentos supervisionados são as mesmas, porém acrescida com o dado “Código SCADA”, responsável pela identificação do elemento no sistema de supervisão.

A referência “Condutores Elétricos” é destinada aos cabos e barramentos elétricos inseridos entre equipamentos para transmissão de energia elétrica. Sua categoria e aspectos físicos são importantes para que o operador do sistema reconheça as estruturas durante o uso do SRV. Neste sentido, os condutores elétricos são enriquecidos com as informações: (a) identificação CAD, (b) identificação da conexão A, (c) identificação da conexão B e (d) espessura. Posteriormente, quando definido a subcategoria, são adicionados aos “Cabos” os dados de curva catenária, para os “Barramentos”, seu tipo e distância inicial e final antes da curvatura.

Durante a configuração do projeto e a colocação de elementos na planta baixa, a ferramenta de inserção de símbolos realiza uma adição de atributos como apresentado na Figura 4.14, referente a um equipamento elétrico. A entidade CAD representada por um símbolo, ou um bloco no contexto CAD, é enriquecida com metadados por relacionamento feito no banco de dados do documento durante o registro do ativo virtual e o do símbolo. Desta forma, conforme o desenho progride, é associado a ele metadados importantes para o projeto CAD e sua integração com o SRV.

Figura 4.14: Exemplo de um símbolo de modelo 3D com metadados atribuídos.



Fonte: o autor.

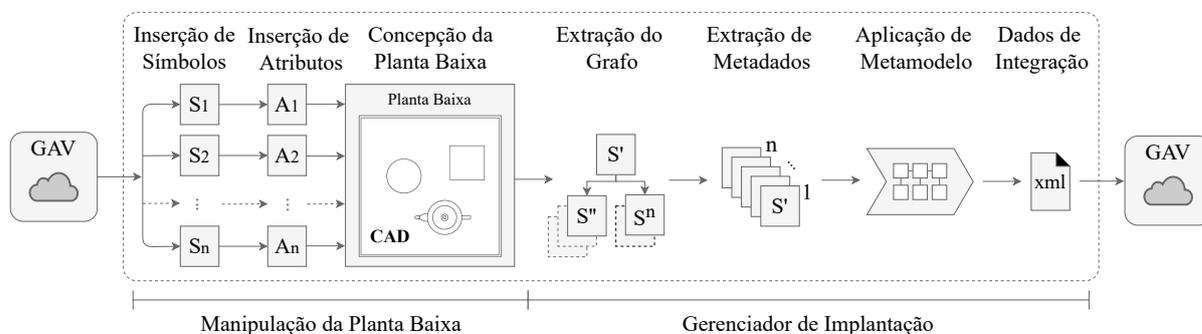
4.3.5 Integração entre Editor CAD e o *Software* de Realidade Virtual

O processo de integração entre ECAD e SRV é realizado por meio da adequação dos dados dos elementos da planta baixa em um formato legível para os sistemas. Por se tratarem de espaços dimensionais diferentes, há o desafio de reproduzir o plano 2D em 3D sem a ação manual do usuário. Neste sentido, a estratégia de integração é dada pela extração das informações de cada entidade da planta baixa e sua organização em estruturas de dados utilizando grafos para possibilitar a hierarquia dos elementos e o uso de metamodelo para definir o formato do arquivo de integração.

Como apresentado na seção anterior, em cada símbolo inserido no desenho, são inseridos metadados advindos do GAV. Os modelos 3D cadastrados com antecedência no GAV possuem, também, metadados referente a classe de elemento, descrição, categoria, projetos relacionados e sua identificação, além de fotografias e documentos. Sendo assim, as entidades são ricas em metadados essenciais para a reconstrução do cenário em RV.

A Figura 4.15 apresenta o diagrama conceitual do processo de concepção de plantas baixas por meio da inserção de símbolos, o processo de extração de grafos com seus metadados e a adequação dos dados para integração entre ECAD e o SRV.

Figura 4.15: Diagrama conceitual do processo de integração de plantas baixas entre Editor CAD e o *software* de Realidade Virtual.



Fonte: o autor.

Na etapa de manipulação da planta baixa, os símbolos são obtidos por meio do GAV e inseridos no desenho com a atribuição dos metadados descritos na Subseção 4.3.4. Posteriormente, quando solicitado pelo usuário, o “Gerenciador de Implantação” (Figura 4.2) executa o processo de integração, realizado em três etapas:

- **Extração da estrutura de grafos:** o processo obtém todas as conexões entre símbolos de forma hierárquica e armazena temporariamente em uma estrutura de dados do tipo grafo, posteriormente as informações são relacionadas com seus metadados;
- **Extração dos metadados:** o processo extrai os atributos dos símbolos inseridos durante a manipulação do desenho e relaciona-os com a estrutura de grafos;

- **Aplicação do Metamodelo:** o processo une os grafos e os metadados em uma estrutura de dados unificada, legível pelo ECAD e SRV. Nessa etapa, os dados são organizados em blocos identificados, mantendo a hierarquia dos elementos. Toda a informação é armazenada em um arquivo com extensão XML, para transporte dos dados pela *internet*.

Após a conclusão do processo de extração e adequação das informações realizado pelo “Gerenciador de Implantação”, os dados de integração com extensão XML são submetidos ao GAV e atribuído ao projeto que pertence. Essa etapa é realizada visando armazenar versões históricas dos arquivos de integração, disponibilizando acesso às versões anteriores. Para cada submissão ao GAV é atribuído um *status*, horário de submissão e comentários sobre a versão, neste sentido, para organizar as versões são utilizados os seguintes *status*:

- **Em edição:** o desenho em planta baixa está em processo de elaboração ou edição e não está em sua forma final;
- **Pronto e não implantado:** o desenho está totalmente concluído, isso significa que foi revisado e todos os problemas resolvidos, porém ainda não foi implantado;
- **Implantado:** ao realizar a implantação, primeiramente o último *status* deve ser “Pronto e não implantado”. Realizando essa condição, o sistema efetua a implantação e altera automaticamente o *status* para “implantado”, a última etapa da produção das SEs virtuais. Sendo assim, a subestação está pronta para ser utilizada no SRV.

4.3.5.1 Metamodelo do Arquivo de Integração entre Softwares

Segundo Guedes (2012), modelo é uma abstração de um sistema com um certo propósito. Descreve aspectos estruturais ou comportamentais do *software*. Determina o que deve ser incluído no modelo e o que é irrelevante. Nesse sentido, um metamodelo é um modelo de modelos. O papel de um metamodelo é o de definir a semântica para modelar elementos dentro de um modelo sendo instanciado. Dessa forma, um modelo é uma instância de um metamodelo (GUEDES, 2011).

O uso de metamodelos para definição do arquivo de integração entre ECAD e o SRV, foi motivado pela forma com que pode-se definir sua estrutura semântica. Sendo assim, o metamodelo viabiliza reunir em uma estrutura de dados, várias informações provenientes de diversas fontes, tornando conjuntos de dados em um único modelo composto por informações essenciais para a reconstrução do AV.

Os metadados foram extraídos e apresentados na Tabela 4.2, são dados provenientes de várias fontes de informações como o *software* CAD, GAV e códigos de operação do SCADA. Dessa forma, o metamodelo foi definido segundo apresentado na Listagem 1. Cada objeto do cenário é definido a seguir:

- **Scene:** composto por atributos com informações do cenário virtual, possui uma lista de pelo menos 1 ou mais objetos *object* (objeto), e uma lista opcional de objetos *conductor*;

- **Objects:** lista contendo elementos *objects* do AV da subestação elétrica virtual;
- **Object:** composto por atributos com informações da identificação do símbolo no desenho CAD, armazenamento de símbolos, armazenamento de modelos 3D, SCADA e o seu tipo. Também possui informações da matriz de transformação (objeto *transform*) com posição, rotação e escala;
- **Transform:** composto por atributos referentes à matriz de transformação: posição, rotação e escala;
- **Conductors:** lista contendo elementos *conductor* do AV da subestação elétrica virtual;
- **Conductor:** composto por atributos referentes à identificação do condutor, ponto inicial e final de conexão e espessura do elemento. Possui uma lista contendo um ou mais objetos *cable* (cabo) e uma lista opcional de objetos *bus* (barramento);
- **Cable:** herda características do objeto *Conductor*, é um elemento de conexão entre equipamentos e possui o atributo *catenary* (catenária) que define a curvatura do cabo, e;
- **Bus:** herda características do objeto *Conductor*, é um elemento de conexão entre equipamento do tipo barramento, possui os atributos *type* (tipo) que define qual o tipo de barramento e os atributos opcionais *distA* e *distB* que definem a distância entre um equipamento e a curva do barramento (dependente do tipo do barramento).

```

1  <?xml version="1.0" encoding="utf-8"?>
2  <scene id="30" name="Sao Paulo" initials="SP" units="Meters">
3    <objects>
4      <object model-type="Disconnecter Switch" scada="8023" model-id="01" symbol-id="11"
5        block-id="14098" level="0">
6        <transform>
7          <position x="5.0000" y="0.0000" z="40.0000" />
8          <rotation x="0.0000" y="0.0000" z="0.0000" />
9          <scale x="1.0000" y="1.0000" z="1.0000" />
10       </transform>
11     </object>
12   </objects>
13   <conductors>
14     <bus conductor-id="14718" first-point-id="14098" second-point-id="14527"
15       type-bus="1" thickness="0.1" />
16     <cable conductor-id="15601" first-point-id="14098" second-point-id="14953"
17       catenaty="0.1" thickness="0.05" />
18   </conductors>
19 </scene>

```

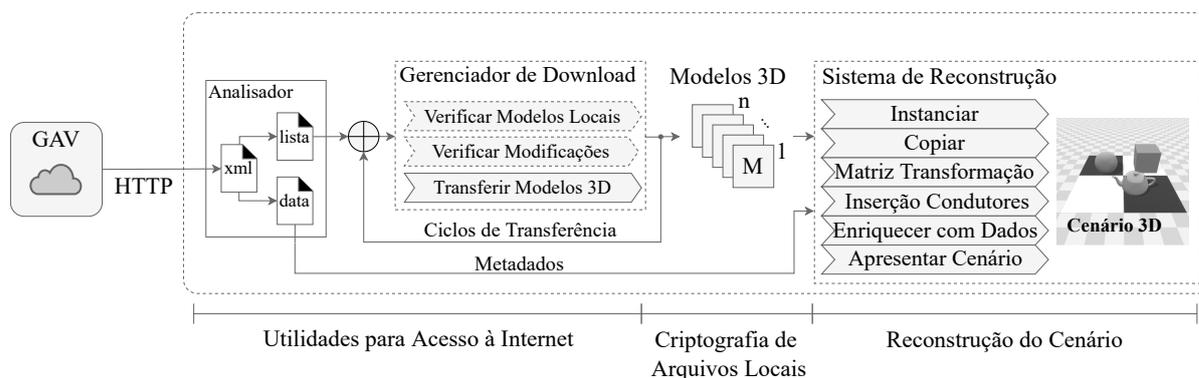
Listing 1: Amostra de dados de um arquivo de integração de subestação elétrica em formato XML.

4.3.6 Recuperação dos Dados de Integração e Reconstrução de Cenários

O processo de reconstrução dos cenários virtuais de subestações é realizado por módulos de acesso à *internet* e de reconstrução 3D, pertencentes à arquitetura de *software* do SRV e da ferramenta de pré-visualização do ECAD. A reconstrução do cenário e seu enriquecimento com os metadados se inicia no momento em que o usuário seleciona o cenário em uma lista de subestações implantadas no GAV. Em seguida, o cenário é reconstruído e apresentado ao usuário em tempo de execução da aplicação.

A Figura 4.16 apresenta o diagrama conceitual do processo de recuperação dos dados de integração e a extração das informações para realizar o processo de reconstrução do cenário no SRV. O SRV solicita ao GAV o arquivo de integração do projeto a ser utilizado. Por meio da estrutura pré-definida do metamodelo utilizado, funções realizam as extrações dos dados e os convertem em listas de modelos 3D a serem baixados (quando necessário) e os metadados com informações da construção do Ambiente Virtual 3D.

Figura 4.16: Diagrama conceitual do processo de recuperação e reconstrução do cenário de uma SE no *software* de Realidade Virtual e no Pré-Visualizador 3D.



Fonte: o autor.

A transferência de modelos 3D é realizada em três etapas:

- **Verificação do armazenamento local de modelos 3D:** análise do diretório de armazenamento local para obter a lista de modelos atuais. Desta forma, é possível verificar quais modelos devem ser transferidos ou atualizados;
- **Verificação de modificações de modelos 3D:** os modelos armazenados no diretório local, são comparados aos armazenados no GAV por códigos *hash*. Caso haja discordância entre o código do modelo 3D local e do GAV, o modelo local é atualizado, e;
- **Transferência de modelos 3D:** após às duas verificações, uma lista de modelos é definida e realizada a transferência dos modelos 3D necessários.

O processo realizado pelo “Gerenciador de *Download*” é executado antes do processo de reconstrução do cenário, garantindo a disponibilidade de todos os modelos 3D. Após a transferência, o processo de reconstrução é iniciado. Ele é executado em seis etapas:

- **Instanciar:** um modelo de cada tipo é instanciado na memória e permanece nela até a finalização da reconstrução do cenário. Esse processo é realizado pela biblioteca Trilib, onerosamente em termos de processamento;
- **Copiar:** a partir dos modelos 3D instanciados na memória, o sistema de reconstrução realiza as cópias utilizando como referência os metadados do arquivo de integração. Este processo é menos oneroso e reduz o tempo de reconstrução do cenário;
- **Matriz de transformação:** após a cópia dos modelos 3D, é aplicado a matriz de transformação contendo as informações de posição, rotação e escala de cada elemento;
- **Inserção dos condutores:** os cabos e barramentos condutores são desenhados em tempo de execução durante a tarefa de cópias de modelos 3D. Os equipamentos são analisados e quando os dois equipamentos, que o condutor conecta, são inseridos na cena, ele é desenhado;
- **Enriquecer o Ambiente Virtual com dados:** os principais metadados são inseridos e referenciados no objeto em que pertence, assim quando necessário, são apresentados ao usuário, e;
- **Apresentar cenário:** durante os processos anteriores nenhuma informação visual é apresentada ao usuário, somente quando o processo de reconstrução é finalizado o sistema apresenta o AV ao usuário.

A reconstrução dos cenários 3D é realizada pelo “Sistema de Reconstrução” implementado no SRV e pré-visualizador 3D. É responsável por receber os metadados dos elementos do arquivo de integração e construir os cenários em tempo de execução. A Figura [4.17](#) apresenta os detalhes do processo.

O “Núcleo de Gestão” é responsável por controlar as principais solicitações realizadas pelo usuário e pelo *software* de RV. Primeiramente, quando o usuário seleciona o cenário de uma subestação, uma solicitação é feita ao GAV (etapa 1) para obter o arquivo de integração concebido pelo ECAD. A transferência é realizada pelos módulos “Utilidades Web”, “Gerenciador de *Download*”, “Gerenciador de Diretórios” e “Criptografia de Arquivos Locais”. Por fim, é realizada a extração dos dados de integração (etapa 2) e disponibilizados ao sistema.

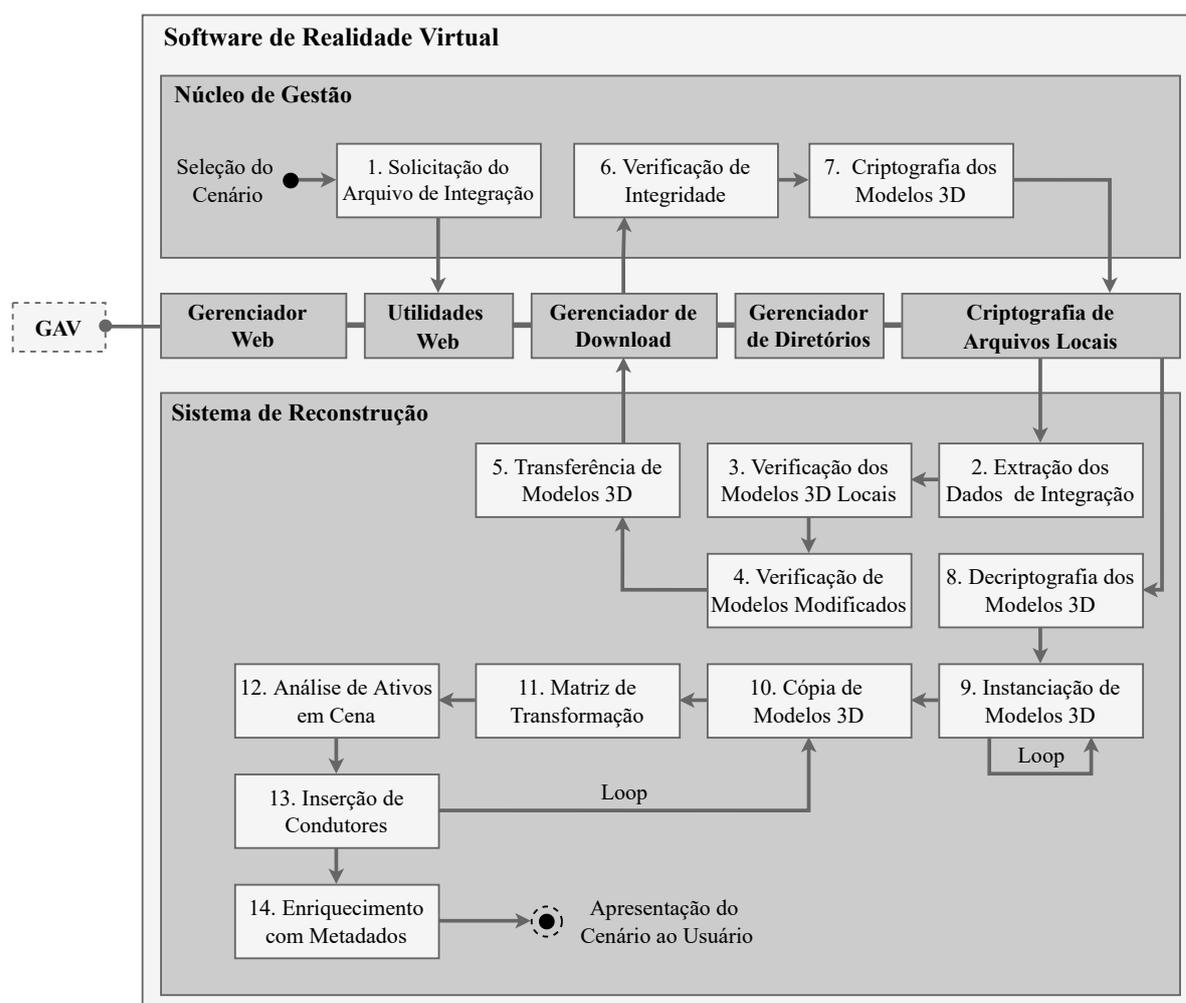
As etapas 3 e 4 são destinadas à verificação dos modelos armazenados localmente. São analisados quais modelos 3D vão compor a lista de transferência com base nos elementos não presentes no diretório de armazenamento ou apresentarem atualizações disponíveis no GAV.

Posteriormente, na etapa 5, é realizada a transferência dos ativos virtuais. Ao finalizar a transferência, a etapa 6 realiza uma verificação da integridade e totalidade dos elementos transferidos. Desta forma, para garantir a segurança dos modelos 3D contra o compartilhamento não autorizado, é realizada a criptografia dos elementos (etapa 7).

Posteriormente, na etapa 8, os modelos são descriptografados para serem carregadas suas instâncias na memória (etapa 9), no qual o processo é executado sucessivamente até concluir a lista pré-definida. Assim que todos os modelos estão carregados na memória, é realizado nas etapas 10, 11, 12 e 13, referentes a cópia das instâncias na memória para o cenário 3D, aplicação da matriz de transformação (posição, rotação e escala), análise dos ativos carregados em cena e a inserção de condutores.

Os condutores são inseridos apenas quando todos os ativos relacionados a ele estejam inseridos no cenário. Esse processo é repetido a cada iteração entre as etapas 10 e 13.

Figura 4.17: Detalhes do processo de reconstrução de cenários 3D.



Fonte: o autor.

Diferentemente dos modelos 3D armazenados no GAV, os condutores são elementos construídos em tempo de execução por algoritmos que analisam os pontos de conexão entre os ativos e concebem as malhas dos condutores.

O sistema possui duas categorias de condutores: cabos e barramentos. Os cabos são elementos maleáveis, possui curvas ao longo de seu comprimento, formando uma catenária entre dois elementos. Os barramentos são elementos sólidos e rígidos, quando há curvas elas possuem um ângulo bem definido de 35, 45 e 90 graus, por exemplo.

O algoritmo de inserção de condutores analisa os pontos de conexão entre os dois ativos e define qual a melhor configuração para desenhá-los. Os pontos de conexão são definidos nos modelos 3D durante sua modelagem, como apresentado na subseção 4.3.1. O pseudocódigo apresentado na Listagem 2, exemplifica como os pontos de conexão entre os ativos são obtidos e a definição de quantos cabos serão inseridos entre eles.

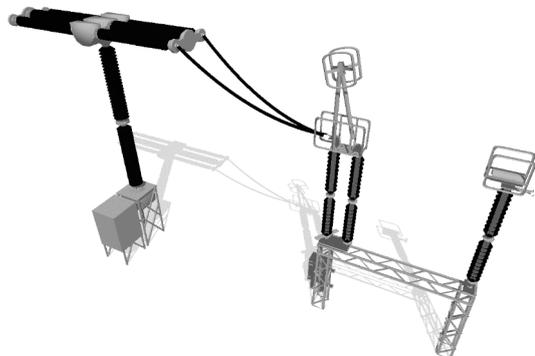
```
1 function DRAWCABLE(assetA, assetB)
2   consA[] = assetA.GetConnectors
3   consB[] = assetB.GetConnectors
4   amountConsA = consA[].length
5   amountConsB = consB[].length
6   if amountConsA >= amountConsB then
7     factorConnection = amountConsA
8   else
9     factorConnection = amountConsB
10  end if
11  for i = 1,n do
12    for j = 1,m do
13      MatList[n][m] = Vector3.Dist(consA[n], consB[m])
14    end for
15  end for
16  for i = 1,n do
17    for j = 1,m do
18      ArrayMinDist[COUNT] = MatList[n][m]
19      COUNT++
20    end for
21  end for
22  ARRAY.SORT(ArrayMinDist)
23  for i = 1, factorConnection do
24    distBuffer = ArrayMinDist[n1]
25    connectorA = MatList.getCol(distBuffer)
26    connectorB = MatList.getRow(distBuffer)
27    INSERTCABLE(connectorA, connectorB)
28  end for
29 end function
```

Listing 2: Pseudocódigo do algoritmo de inserção de cabos.

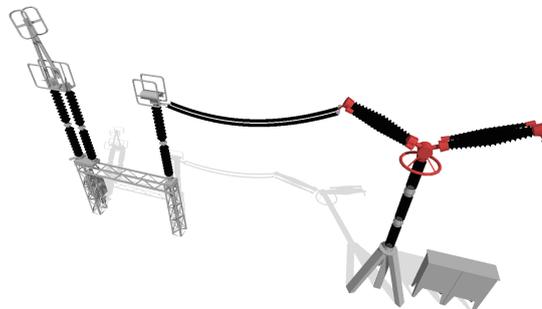
A Figura 4.18 apresenta dois exemplos de inserção de cabos, onde a Figura 4.18a mostra o desenho de dois cabos em que o primeiro equipamento possui quatro conectores e o segundo apenas dois. Por sua vez, a Figura 4.18b exemplifica o desenho de dois cabos entre equipamentos que possuem quatro conectores.

Figura 4.18: Exemplos de inserção de cabos.

(a) Inserção de dois cabos entre equipamento com quatro conectores para equipamento com dois conector.



(b) Inserção de dois cabos entre equipamentos de quatro conectores.



Fonte: o autor.

Desenvolvimento

Este capítulo apresenta o processo de concepção do trabalho proposto, abordando as especificações de Engenharia de *Software*, Arquitetura de *Software*, requisitos do sistema e os detalhes de desenvolvimento. Além de um breve conceito das tecnologias de apoio adotadas.

5.1 Requisitos de *Software*

No Capítulo [4](#) foi descrito a metodologia proposta para o desenvolvimento do trabalho. Com base na arquitetura de *software* apresentada, foram levantados os Requisitos Funcionais e Não Funcionais, apresentados a seguir.

5.1.1 Requisitos Funcionais

Requisitos funcionais do módulo gerenciador de projetos de subestações no Editor CAD:

RF01 – O sistema deve permitir a autenticação de usuários: gerenciar o acesso ao sistema é fundamental para manter a integridade de todos os insumos dos projetos de subestações, resguardando os dados apenas a usuários autorizados.

RF02 – O sistema deve permitir selecionar e utilizar plantas baixas de subestações: no momento após o usuário ser autenticado, uma lista de projetos de SEs atribuídas a ele deve ser exibida, para em seguida ser selecionada e aberta. Portanto, fornecer ao usuário a possibilidade de escolher o projeto a ser trabalhado.

RF03 – O sistema deve permitir a atualização (armazenamento da versão) de plantas baixas: ao realizar uma modificação na planta baixa, pode-se atualizar o arquivo do projeto no GAV. Possibilitar ao sistema manter versões históricas, organizadas por projeto de subestação, data de atualização, descrição e usuário solicitante.

RF04 – O sistema deve permitir implantar o projeto no *software* de Realidade Virtual: a implantação é o processo final da elaboração e edição da planta baixa de subestações. É quando o projeto está finalizado e pronto para ser utilizado no *software* de RV. Desta forma, ao realizar a solicitação de implantação, o usuário poderá revisar o projeto e garantir que tudo está correto.

Requisitos funcionais do módulo de manipulação:

RF05 – O sistema deve permitir a pré-visualização de plantas baixas em Ambiente Virtual 3D: durante o processo de desenvolvimento do projeto, é importante que o usuário visualize a planta baixa em 3D, dessa forma pode-se tomar decisões e ajustar os elementos antes da implantação da subestação no SRV.

RF06 – O sistema deve disponibilizar a busca por símbolos: realizar a busca de símbolos no GAV aplicando filtro e apresentar ao usuário uma lista de itens e associados às suas imagens em miniatura, com suas características.

RF07 – O sistema deve permitir inserir, substituir e remover símbolos: durante a edição da planta baixa, a funcionalidade deve fornecer ao usuário a busca e inserção de símbolos, como também substituição e remoção quando solicitado. Durante esse processo, o usuário pode identificar os símbolos com códigos do sistema SCADA e atribuir nível em relação ao solo.

RF08 – O sistema deve atribuir metadados nos símbolos ao inseri-los no desenho: ao inserir um símbolo no desenho o sistema deve atribuir informações necessárias para o funcionamento no SRV, informações descritas na Seção [4.1](#).

RF09 – O sistema deve permitir manipular os símbolos no plano cartesiano: mover, rotacionar, escalar e copiar símbolos da planta baixa utilizando as ferramentas implementadas neste trabalho em conjunto com as ferramentas *built-in* do AutoCAD.

RF10 – O sistema deve oferecer a funcionalidade para criar e atribuir símbolos a um modelo 3D: possibilitar ao usuário criar um símbolo customizado seguindo as convenções de modelagem e atribuí-lo a um modelo 3D registrado no GAV.

Requisitos funcionais de manipulação de condutores:

RF11 – O sistema deve permitir inserir, editar e remover cabos elétricos: inserir cabos elétricos entre equipamentos, definindo uma conexão elétrica entre eles. Para inserir o condutor deve-se definir a sua categoria e realizar as configurações. Ao definir o condutor como cabo, deve-se informar a espessura, curvatura da catenária e os dois equipamentos para realizar a conexão.

RF12 – O sistema deve permitir inserir, editar e remover barramentos elétricos: inserir barramentos elétricos entre equipamentos, referenciando uma conexão elétrica entre eles. Ao definir o condutor como barramento, deve-se informar a espessura, tipo de barramento e os dois equipamentos para realizar a conexão.

RF13 – O sistema deve permitir inserir, substituir e remover conectores elétricos: inserir símbolos de conectores no desenho CAD para unir cabos e barramentos condutores.

Requisitos funcionais do Gerenciador de Ambientes Virtuais:

RF14 – O sistema deve permitir o cadastro e edição de modelos 3D com informações e arquivos de imagem: realizar o cadastro de modelos 3D nos formatos “max” e “fbx”. Inserir no momento do registro o tipo do modelo, tensão, fabricante, símbolo, fotografias, imagens em miniatura, usuário solicitante, data, hora e sua descrição. Permitir modificar o modelo 3D, suas informações e fotografias.

RF15 – O sistema deve permitir cadastrar e editar símbolos CAD: realizar o cadastramento de novos símbolos para modelos 3D por acesso externo ao ECAD pelos serviços *Web* para realizar solicitações de cadastros e referências aos modelos 3D.

RF16 – O sistema deve permitir cadastrar, editar e atualizar projetos de SEs: realizar o cadastro de novos projetos de SE, fornecer acesso ao ECAD para possibilitar a edição e atualização das plantas baixas. A cada atualização, o sistema deve armazenar uma versão histórica do projeto contendo a data, hora da última atualização, o usuário e um comentário.

RF17 – O sistema deve permitir cadastrar, editar e desabilitar usuários do sistema: o gerenciamento do sistema deve ser feito por usuários com diferentes atribuições como: administrador, projetista de subestações, modeladores 3D e convidados. Os usuários possuem acessos restritos às áreas que não são atribuídas a ele por questão de organização e segurança do sistema.

RF18 – O sistema deve permitir o acesso de outras aplicações através de *Web Service*: permitir acesso externo a aplicações e manter acesso aos dados de forma simultânea. O sistema deve fornecer as funcionalidades padrões definidos anteriormente, com exceção para: gerenciamento de usuários.

Requisitos funcionais do pré-visualizador 3D de plantas baixas:

RF19 – O sistema deve permitir a navegação pelo Ambiente Virtual 3D: permitir ao usuário navegar no AV e visualizar os elementos em diferentes graus de liberdade.

RF20 – O sistema deve permitir selecionar os tipos de navegação: permitir a seleção dos tipos de navegação em primeira pessoa, livre e com visão superior.

RF21 – O sistema deve permitir visualizar as informações relacionadas aos elementos do cenário virtual: apresentar visualmente as informações dos elementos no cenário virtual, como, por exemplo, o destaque dos equipamentos supervisionados, código de operação e dados de supervisão.

RF22 – O sistema deve permitir visualizar as informações de reconstrução do AV: apresentar as informações pertinentes ao processo de reconstrução do AV, como o nome do projeto, quantidade de elementos, tempo de reconstrução e erros, quando necessário.

Requisitos funcionais do módulo de reconstrução de Ambientes Virtuais:

RF23 – O sistema deve permitir a autenticação de usuário: o usuário deve inserir as credenciais para solicitar a autenticação no GAV para obter as permissões de transferência dos arquivos de integração de uma subestação.

RF24 – O sistema deve permitir buscar por subestações no GAV: o sistema deve realizar uma busca no GAV e apresentar ao usuário uma lista de subestações integradas e prontas para uso.

RF25 – O sistema deve permitir selecionar uma subestação: o sistema deve permitir o usuário selecionar, dentro de uma lista de SEs, uma subestação para ser reconstruída.

RF26 – O sistema deve realizar a transferência do arquivo de integração: ao selecionar uma subestação para uso, o sistema deve realizar uma requisição do arquivo de integração, desta forma, o sistema deve realizar a transferência e armazenamento dos insumos em um diretório local.

RF27 – O sistema deve realizar a transferência dos ativos virtuais (modelos 3D): realizar a listagem e transferência dos modelos 3D utilizados no cenário virtual da SE para um diretório local.

RF28 – O sistema deve reconstruir o Ambiente Virtual 3D: ao finalizar a transferência dos insumos, o sistema deve realizar a reconstrução do AV em tempo de execução utilizando o arquivo de integração.

RF29 – O sistema deve apresentar ao usuário o Ambiente Virtual 3D reconstruído: ao realizar a reconstrução do cenário virtual, o sistema deve apresentar ao usuário a SE virtual.

5.1.2 Requisitos Não Funcionais

RNF01 – O sistema deve balancear o uso de processamento e memória do computador: algumas tarefas do sistema podem ser configuradas de maneira a consumir mais memória ou mais processamento. Para cada tarefa, o sistema deverá balancear essa utilização, escolhendo a melhor estratégia para manter o desempenho do sistema.

RNF02 – O sistema deve ser robusto para lidar com erros: erros podem ocorrer a qualquer momento, seja durante o processo de transferência de modelos 3D, reconstrução do cenário, cadastro de itens e desenho da subestação. O sistema deve conseguir identificar esses erros e tentar resolvê-los.

RNF03 – O sistema deve permitir a pré-visualização em um curto período por um software 3D auxiliar durante a edição do desenho: o visualizador deve analisar o arquivo de implantação gerado no momento em que foi solicitado e listar os modelos 3D que serão utilizados na reconstrução do cenário. Caso algum modelo 3D não esteja disponível na pasta local, imediatamente o *software* deve realizar a transferência. Nesse sentido, o tempo total de transferência não deve ultrapassar 120 segundos para uma coleção de elementos e 5 segundos para um elemento individual. Caso os modelos 3D estiverem disponíveis na pasta local, o processo de reconstrução do cenário não deve extrapolar 30 segundos para cenários simples e 120 segundos para cenários complexos.

RNF04 – A medida que o desenho for atualizado, as modificações devem ser refletidas imediatamente no Ambiente Virtual: durante a edição e visualização do Ambiente Virtual, o usuário poderá perceber as mudanças ocorridas no desenho CAD em 3D. A cada alteração no desenho, deve ser atualizado em 3D, não extrapolando 5 segundos para cada operação. Entretanto, caso um item modificado não esteja na pasta local do *software* de visualização, é necessário realizar sua transferência, que não deve ultrapassar o tempo definido no RNF-03.

RNF05 – Integração e Compatibilidade com AutoCAD: A ferramenta deve ser desenvolvida como uma extensão (*plugin*) para AutoCAD.

5.2 Modelagem UML do Sistema

A *Unified Modeling Language* (UML) ou Linguagem de Modelagem Unificada é uma linguagem visual utilizada para modelar *softwares* baseados no paradigma de orientação a objetos. É uma linguagem de modelagem de propósito geral que pode ser utilizada em todos os domínios de aplicação. Essa linguagem é atualmente o instrumento padrão de modelagem adotada internacionalmente pela indústria de engenharia de *software* (GUEDES, 2011).

Foi adotado o uso da UML para simplificar e detalhar os aspectos de desenvolvimento e implementação da solução proposta. A seguir são apresentados os diagramas elaborados a partir dos requisitos funcionais e não-funcionais descritos na seção anterior.

5.2.1 Casos de Uso

Nesta subseção são apresentados os Casos de Uso (UC) relacionados ao gerenciamento dos AVs, criação e edição via ferramentas do ECAD, pré-visualização 3D de planta baixa e o módulo de reconstrução de AVs.

AT01: Modelador – Ator que contém a autorização para cadastro de modelos 3D e documentos. O ator é impossibilitado de realizar cadastros de símbolos, modificar configurações globais do sistema, modificar dados de outros usuários e de projetos de subestações.

AT02: Projetista – Ator principal do ECAD, tem acesso aos projetos de subestações elétricas, cria e registra símbolos, elabora e edita plantas baixas de subestações.

AT03: Convidado – Ator com a autorização de visualizar modelos 3D no GAV. Impossibilitado de realizar alterações no sistema.

AT04: Administrador – Ator responsável por gerenciar todo o sistema do GAV. Possui todas as permissões dos atores modelador e projetista. Tem permissão para gerenciar os usuários, projetos de subestações, modelagem 3D, símbolos, documentação e configurações globais.

AT05: << sistema >> REST API - Gerenciador de Ambientes Virtuais – O ator é um sistema *Web* de arquitetura centralizada que provê e recebe dados pelo sistema RESTful. Através deste ator todos os sistemas se comunicam, independentemente, por meio da *internet*.

AT06: << sistema >> Web Service SCADA – O ator é um sistema *Web* que fornece acesso aos dados do SCADA que supervisiona as subestações reais. Fornece uma camada de *software* que possibilita o acesso externo a um sistema seguro de uma concessionária de energia elétrica.

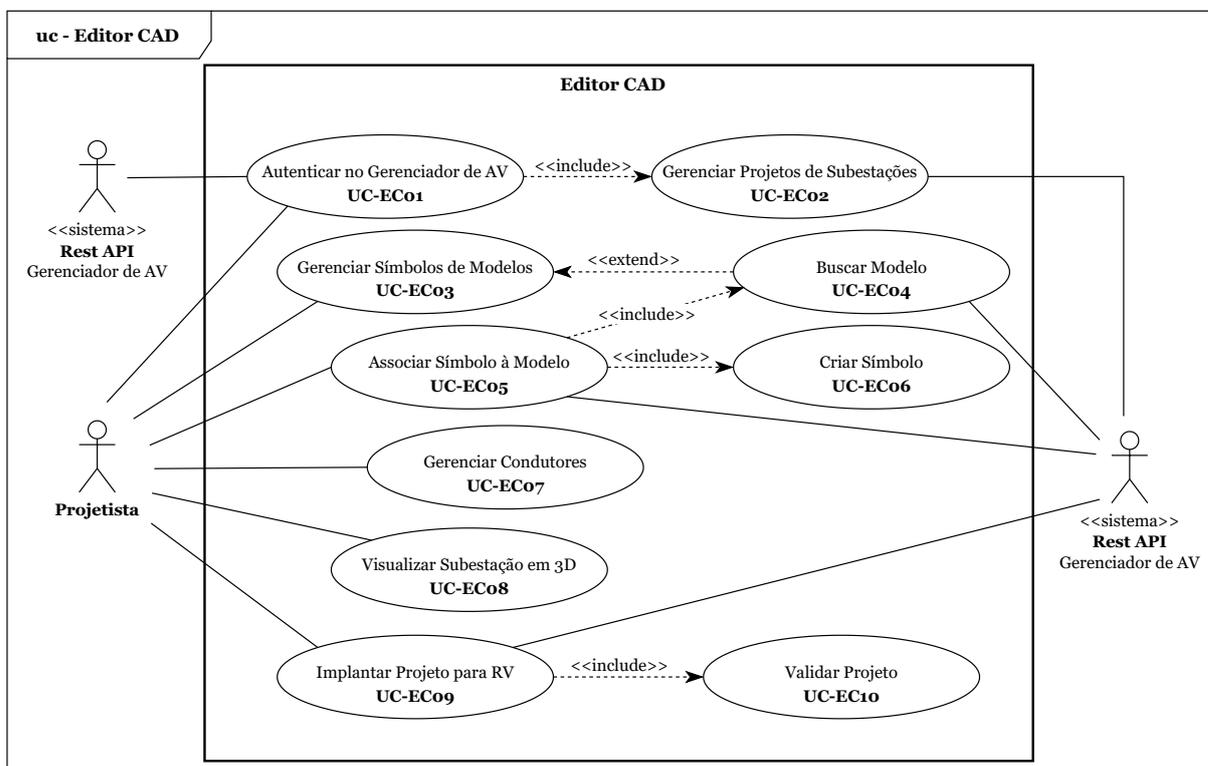
AT07: << sistema >> Sistema de Realidade Virtual – O ator é um sistema de Realidade Virtual que possui módulos de renderização do ambiente 3D, navegação, interação e efeitos do ambiente. É utilizado para executar treinamentos, simulações, supervisão do sistema e outros.

Casos de Uso do Editor CAD

A Figura 5.1 apresenta o diagrama de casos de uso do ECAD. O ator Projetista tem permissões no ECAD que o possibilita o gerenciamento e elaboração dos projetos em planta baixa. Desta

forma, é possível organizar a produção das plantas baixas e sua implantação no SRV. O ator também tem a permissão de manipular de todos os elementos do desenho, como os símbolos de ativos virtuais, condutores elétricos e a visualização 3D pelo pré-visualizador.

Figura 5.1: Diagrama de casos de uso do Editor CAD.



Fonte: o autor.

O caso de uso UC-EC01 (Autenticar no Gerenciador de AV) permite que o usuário se autentique no GAV para acessar os recursos destinados ao grupo de usuários “projetista”, como seus projetos de SEs e símbolos. Ele está relacionado com o requisito funcional RF01.

Após a autenticação, o ator Projetista pode gerenciar os projetos de subestações (UC-EC02 - Gerenciar Projetos de Subestações). Sendo assim, permitir selecionar, em uma lista de opções, o projeto de SE que será aberto. O ator pode realizar outros tipos de gerenciamentos, como a atualização do projeto em uma versão histórica e a implantação da planta baixa no SRV. O caso de uso está relacionado com os requisitos funcionais RF02, RF03 e RF04.

Os casos de uso UC-03, UC-04, UC-05 e UC-06 são relacionados a manipulação dos símbolos na planta baixa. Permite ao ator buscar e inserir símbolos no desenho em edição. Permite também a substituir e remover, além de possibilitar criar e associar novos símbolos aos modelos 3D. Os casos de uso estão relacionados com os requisitos funcionais RF06, RF07, RF08, RF09 e RF10.

O caso de uso UC-EC07 possui funcionalidades de inserção e edição de cabos e barramentos condutores de energia elétrica entre os ativos virtuais. Está relacionado com os requisitos funcionais RF11, RF12 e RF13.

O ator Projetista tem acesso ao sistema de pré-visualização em Ambiente Virtual 3D da planta baixa que está sendo elaborada (UC-EC08). O caso de uso permite que o ator visualize com antecedência o AV 3D do desenho que está sendo manipulado, com o intuito de fornecer informações visuais adicionais. Está relacionado com o requisito funcional RF05.

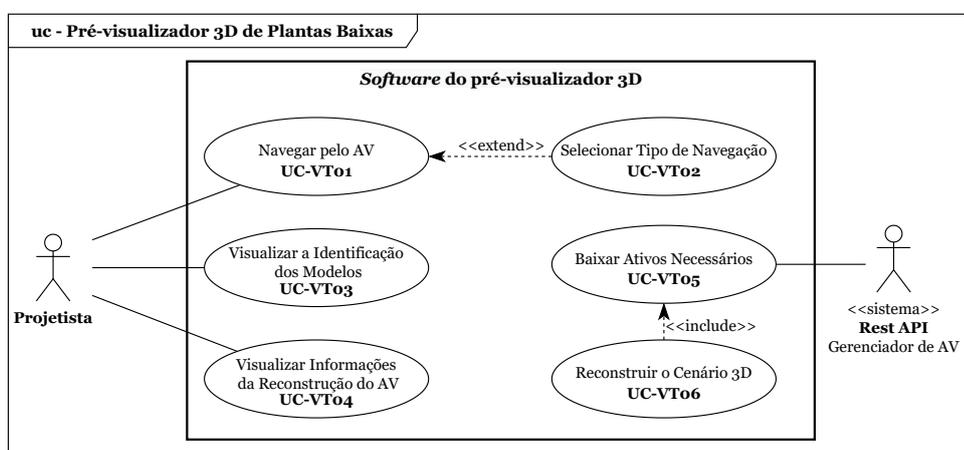
Ao finalizar o projeto de desenho de planta baixa, o ator Projetista pode concluir o projeto implantando-o no Sistema de Realidade Virtual (UC-EC09 e UC-EC10), dessa forma o AV para RV fica disponível para uso. Esse caso de uso está relacionado com o requisito funcional RF04.

Casos de Uso do Pré-visualizador 3D de Plantas Baixas

O diagrama de casos de uso do pré-visualizador 3D é apresentado na Figura 5.2. O ator Projetista tem acesso à navegação nos AVs (UC-VT01), definição do tipo de navegação (UC-VT02), visualização das identificações de equipamentos (UC-VT03) e acesso a informações de reconstrução do AV (UC-VT04). O ator com o estereótipo “sistema”, representa a RESTful API de acesso às aplicações externas pela *internet*. O caso de uso UC-VT01 possibilita ao ator utilizar paradigmas de navegação para visualizar o ambiente 3D em primeira pessoa, navegação livre e navegação com visão superior.

O caso de uso UC-VT03 apresenta visualmente as identificações dos equipamentos supervisionados. O caso de uso UC-VT04 informa ao ator os dados da reconstrução do AV como: modelos 3D a serem baixados, o processo de transferência, modelos modificados, processos de carregamento de modelos, modelos utilizados no AV, tempo total de reconstrução e erros de processamento. Desta forma, os requisitos funcionais relacionados com o diagrama são RF19, RF20, RF21 e RF22.

Figura 5.2: Diagrama de casos de uso do pré-visualizador 3D de plantas baixas.

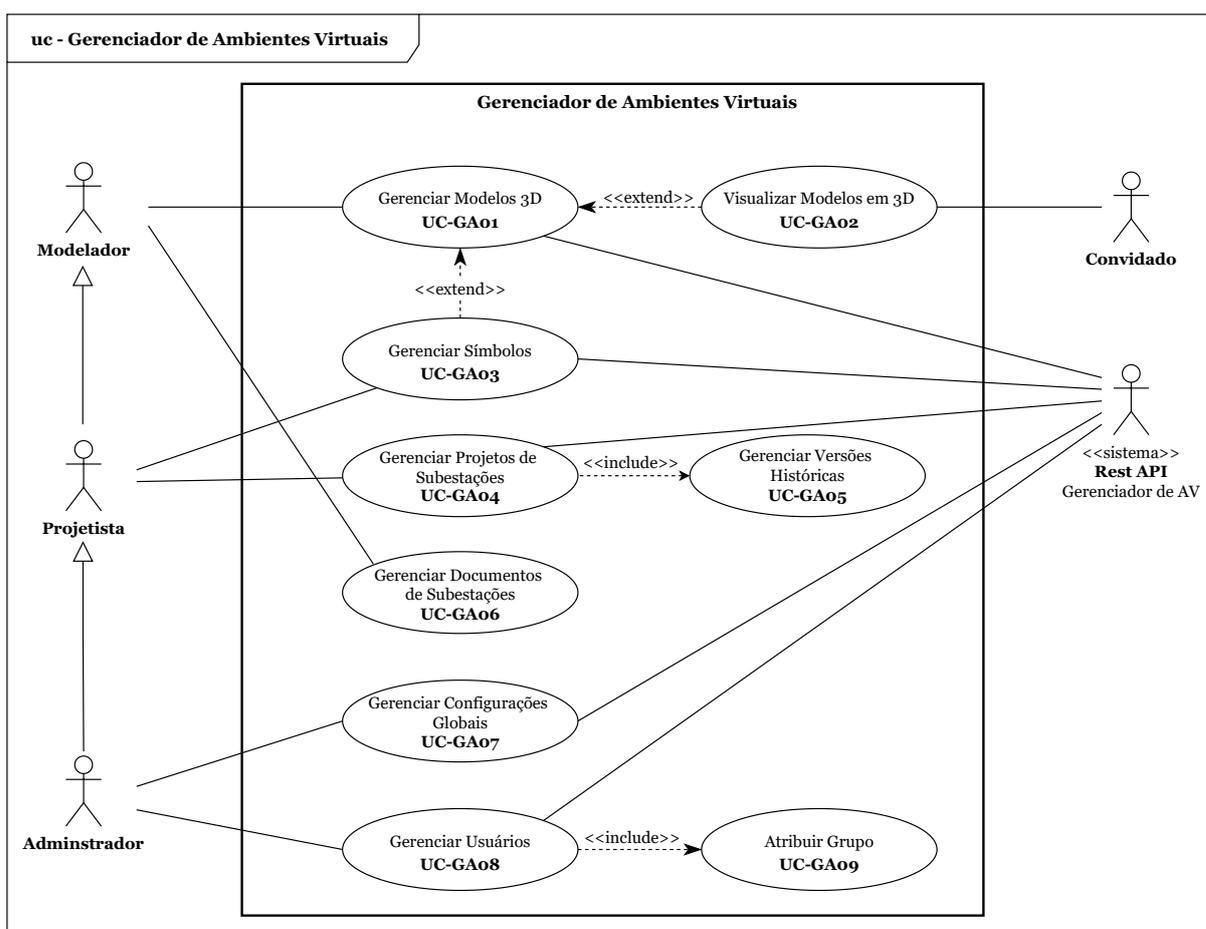


Fonte: o autor.

Casos de Uso do Gerenciador de Ambientes Virtuais

O diagrama de casos de uso do GAV, apresentado na Figura 5.3, possui quatro atores humanos e um ator do tipo sistema. O ator Convidado possui apenas o acesso à visualização de modelos 3D (UC-GA02).

Figura 5.3: Diagrama de casos de uso do Gerenciador de Ambientes Virtuais.



Fonte: o autor.

O ator Modelador tem acesso restrito à algumas funcionalidades, como o gerenciamento de símbolos (UC-GA03), gerenciamento de projetos (UC-GA04), configurações globais (UC-GA07) e gerenciamento de usuários (UC-GA08). Permanecendo apenas o acesso ao gerenciamento de modelos 3D (UC-GA01) e documentos (UC-GA06). Neste sentido, para manter o sistema seguro e íntegro.

O ator Projetista possui herança das funcionalidades do ator Modelador, porém, com a adição do gerenciamento de símbolos (UC-GA03) e gerenciamento de projetos de subestações (UC-GA04).

O ator Administrador possui a herança dos atores Modelador e Projetista, podendo realizar todas suas funções. Foi adicionado a funcionalidade Gerenciador de Usuários (UC-GA06) e Gerenciador das Configurações Globais do sistema (UC-GA06).

O caso de uso UC-GA01 permite registrar, editar e remover modelos 3D. Ao registrar, deve-se inserir as informações do modelo 3D. Da mesma forma ao realizar uma edição. O caso de uso UC-GA02 permite aos usuários visualizarem os modelos 3D e suas informações. Esses casos de uso estão relacionados com o requisito funcional RF14.

No caso de uso UC-GA03, o usuário Projetista pode registrar, editar e atribuir símbolos aos modelos 3D. Desta forma, o sistema REST API também permite gerenciar símbolos via aplicações externas, neste caso, o ECAD. O caso de uso está relacionado com o requisito funcional RF15 e RF18.

Outras funcionalidades que os atores Projetista e REST API tem acesso, são o gerenciamento de projetos de SEs e gerenciamento de versões históricas, definidos pelos casos de uso UC-GA04 e UC-GA05. A funcionalidade permite registrar, editar e remover projetos de SEs, além de armazenar versões históricas dos arquivos da planta baixa. Os casos de uso são relacionados com o requisito funcional RF16.

Permitir o gerenciamento de documentos relacionados aos projetos de subestações, é uma funcionalidade atribuída a todos os atores, com exceção do ator Convidado. O caso de uso UC-GA06 permite que documentos sejam registrados, editados, compartilhados e removidos.

Por fim, o ator Administrador tem a permissão de gerenciar as configurações globais do GAV e de usuários (UC-GA07, UC-GA08 e UC-GA09). Desta forma, é possível definir os tipos de ativos, fabricantes, tensões de operação e outros. Também é possível registrar, editar e desativar usuários do sistema. Os casos de uso estão relacionados ao requisito fundamental RF17.

Casos de Uso do Módulo de Reconstrução de Ambientes Virtuais

O Módulo de Reconstrução de AVs, apresentado na Figura 5.4, possui dois atores do tipo sistema. Os atores Sistema de Realidade Virtual e REST API são os principais usuários do Módulo de Reconstrução de AVs.

O ator Sistema de Realidade Virtual utiliza as funcionalidades do Módulo de Reconstrução de AV no núcleo de seu sistema. O ator REST API fornece acesso ao Módulo de Reconstrução de AV, de modo a prover dados da reconstrução da subestação.

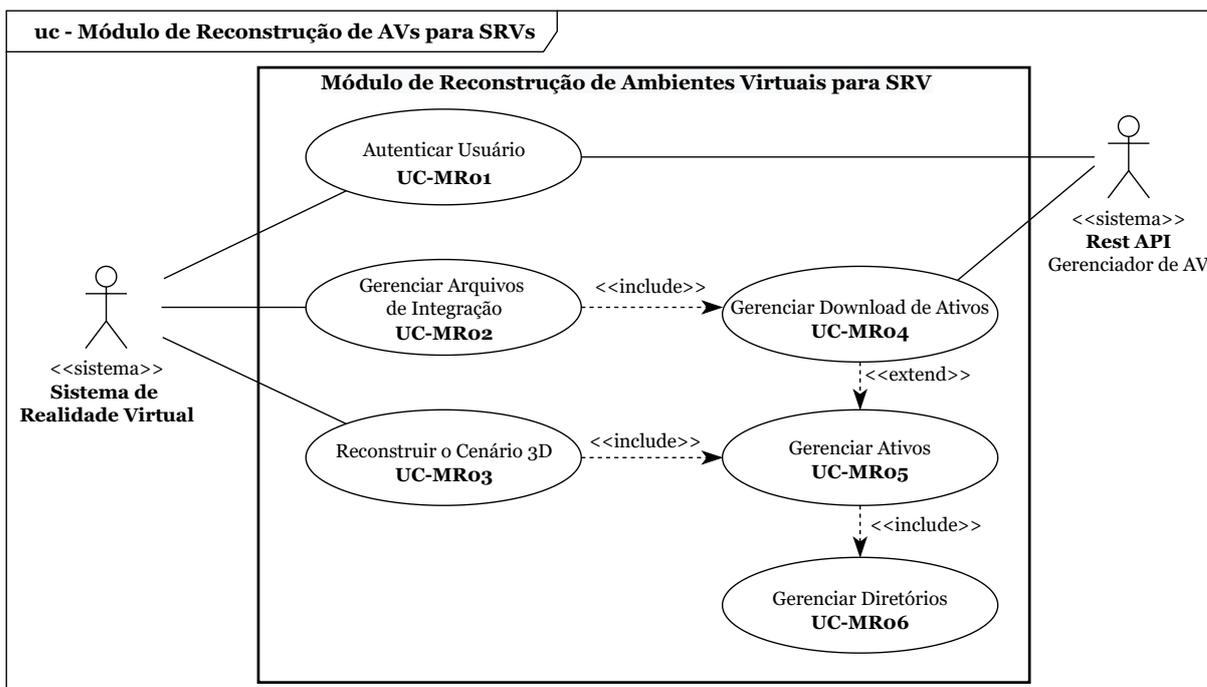
O caso de uso UC-MR01 permite ao SRV autenticar o usuário para o uso de funcionalidades do GAV como, transferir o arquivo de integração e os ativos virtuais. Referente ao requisito funcional RF23.

Ao realizar a autenticação, o SRV realizar a transferência de arquivos de integração e dos ativos virtuais, referentes aos casos de uso UC-MR02 e UC-MR04. Desta forma, é necessário também gerenciar os ativos e os diretórios onde cada arquivo deve ser armazenados, referentes aos casos de uso UC-MR05 e UC-MR06. Essas ações são referentes aos requisitos funcionais

RF24, RF25, RF26 e RF27.

Por fim, o caso de uso UC-MR03 reconstrói o AV a partir dos insumos transferidos do GAV e apresenta ao usuário o AV da SE. Esse caso de uso está relacionado com os requisitos funcionais RF28 e RF29.

Figura 5.4: Diagrama de casos de uso do Módulo de Reconstrução de Ambientes Virtuais.



Fonte: o autor.

5.2.2 Diagramas de Classe e de Entidade e Relacionamento

O diagrama de classe é um dos mais importantes da UML. Seu principal objetivo está em permitir a visualização das classes que compõem o sistema, incluindo seus respectivos atributos e métodos, bem como apresentar o relacionamento entre classes (GUEDES, 2011).

Foram modelados os seguintes diagramas:

- Diagramas de classe do ECAD;
- Diagramas de classe do Módulo de Reconstrução de AVs para SRV;
- Diagrama de Entidade e Relacionamento do Gerenciador de Ambientes Virtuais.

Os diagramas detalhados estão dispostos no **APÊNDICE B - Diagramas UML**.

5.3 Softwares e Tecnologias de Apoio

O desenvolvimento do SA envolveu diferentes linguagens de programação, *frameworks*, bibliotecas e *softwares*. Tais tecnologias de apoio estão listadas e atribuídas aos seus sistemas na Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Tecnologias de apoio utilizadas no desenvolvendo do Sistema de Autoria.

Tecnologias	Softwares		
	ECAD	Pré-Visualizador 3D e SRV	GAV
C#	✓	✓	
Python			✓
Framework Django			✓
API do Blender			✓
Biblioteca Json.net	✓	✓	
JSON	✓	✓	✓
XML	✓	✓	✓
XSD	✓	✓	✓
Unity Game Engine		✓	
Biblioteca Trilib		✓	
API do AutoCAD	✓		
HTML			✓
CSS			✓
JavaScript			✓
Framework Vue.JS			✓
PostgreSQL			✓

Fonte: o autor.

O ECAD foi desenvolvido utilizando a API do AutoCAD em formato de *plugin*, sendo um módulo incorporado ao sistema do AutoCAD. Desta forma, foi utilizada a linguagem de programação C# e as funções da API AutoCAD para implementar todas as funcionalidades definidas pelos requisitos do sistema. A comunicação entre o GAV é realizada por trocas de mensagens no formato JSON e XML, com validação utilizando o XSD.

A implementação do módulo de reconstrução, pertencente ao pré-visualizador 3D e SRV, foi realizado utilizando o Unity e a linguagem de programação C#. O pré-visualizador utiliza para comunicação com o GAV o formato JSON, possibilitando a transferência de informações e ativos virtuais pela *internet*. Para realizar a leitura e carregamento de modelos 3D externos, foi necessário utilizar a biblioteca Trilib, responsável por carregar modelos 3D locais em tempo de execução.

O GAV é um sistema *Web* que envolveu o desenvolvimento dos sistemas no lado cliente (*client-side*) e lado servidor (*server-side*). Desta forma, o lado cliente, que utiliza o navegador

de *internet* para acessar as funcionalidades, possui tecnologias específicas como o HTML, CSS, Javascript e o *framework* Vue.js para interface gráfica. O lado servidor, que realiza o processamento das informações e disponibiliza acesso externo as aplicações, utiliza a linguagem de programação Python, *framework* Django, API do Blender (para renderização de imagens em miniatura de modelos 3D) e os formatos JSON, XML e XDS para transferência e validação de informações na *internet*.

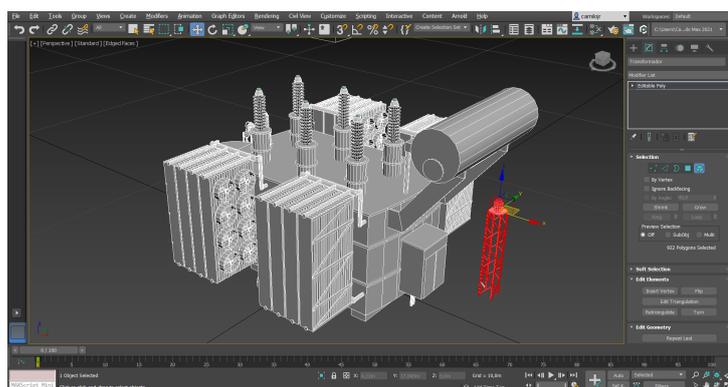
Os *softwares* e ferramentas utilizadas são amplamente empregadas em projetos da atualidade. Possuem comunidades de amparo ao desenvolvimento, tornando-as fortes candidatas para a proposta de trabalho e garantindo viabilidade de atualizações e manutenções a médio e longo prazo. São apresentados a seguir, os *softwares* de apoio ao desenvolvimento dos componentes da proposta.

5.3.1 *Software* de Modelagem 3D

Foi utilizado o *software* 3Ds Max da AutoDesk para desenvolver os modelos 3D das subestações virtuais. O *software* cria objetos partir de elementos geométricos primitivos e com a manipulação de seus vértices o modelo pode ser ajustado, chegando ao resultado esperado (ALMEIDA, 2007).

A Figura 5.5 exemplifica a modelagem de um equipamento elétrico utilizado em subestações. Para a construção dos modelos, foi elaborada uma convenção de modelagem para que todos os objetos tridimensionais fossem desenvolvidos com os mesmos padrões como alto grau de credibilidade visual, baixa quantidade de polígonos, dimensões e escalas reais. As convenções de modelagem foram apresentadas na subseção 4.3.1.

Figura 5.5: Modelagem de um transformador trifásico utilizando 3Ds Max.



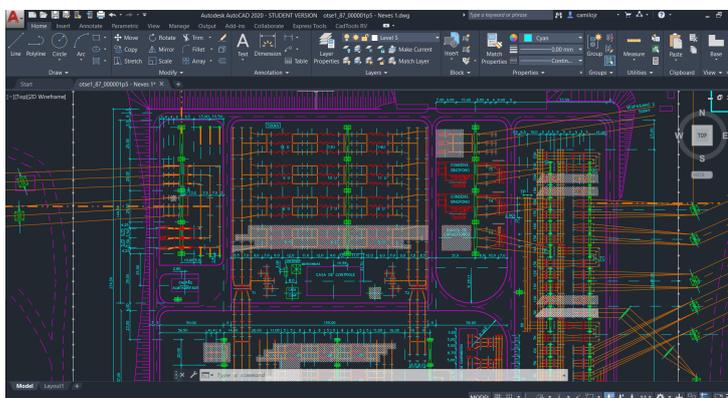
Fonte: o autor.

5.3.2 AutoCAD

O AutoCAD (AUTODESK, I., 2020) é um dos *softwares* de modelagem CAD utilizado por empresas de engenharia e arquitetura. Para o desenvolvimento do trabalho proposto, o AutoCAD foi selecionado por permitir criar extensões customizadas e fornecer uma API de desenvolvimento na linguagem de programação C#, sendo de fácil acesso e com muitas comunidades de apoio ao desenvolvimento.

O ECAD foi implementado no formato *plugin*, possibilitando o desenvolvimento de todas as funcionalidades especificadas nos requisitos do sistema. A Figura 5.6 apresenta um projeto de subestação em planta baixa utilizando o AutoCAD.

Figura 5.6: Projeto de uma subestação em planta baixa utilizando AutoCAD.



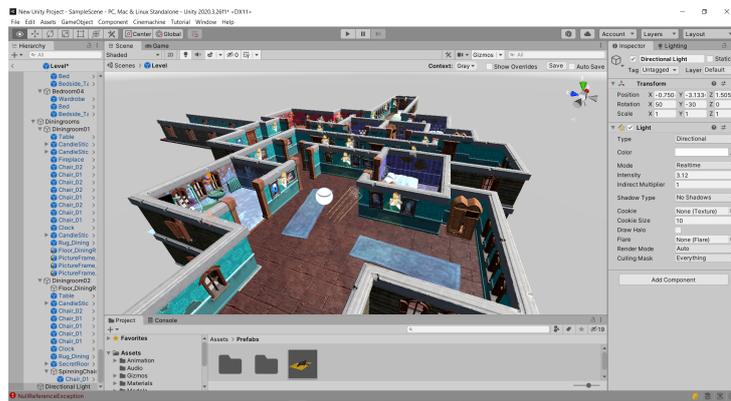
Fonte: o autor.

5.3.3 Motor de Jogos Unity

Os motores de jogos (*game engines*) são ferramentas de desenvolvimento de *software* projetadas para reduzir o custo, a complexidade e o tempo para disponibilidade no mercado exigidos pelas produtoras. Desta forma, criam uma camada de abstração além das tarefas comuns no desenvolvimento de videogames. Os mecanismos de jogo oferecem enormes benefícios de eficiência, reduzindo a complexidade para a criação de jogos e permitindo que os desenvolvedores se concentrem totalmente na escrita de códigos (HALPERN, 2019).

O Unity foi escolhido para o desenvolvimento deste protótipo por ser um dos mais completos para implementação de aplicações interativas tridimensionais da atualidade. Fornece suporte a diversas plataformas como iOS, Android, PS4, Xbox, Windows, Linux e WebGL com qualidade visual e desempenho. O pré-visualizador 3D e o *software* de Realidade Virtual foram desenvolvidos utilizando o Unity. A Figura 5.7 apresenta o motor de jogos Unity e um cenário virtual para jogos.

Figura 5.7: Motor de Jogos Unity.



Fonte: o autor.

5.3.4 Biblioteca Trilib para Unity

O Trilib é uma biblioteca desenvolvida por Reis (2020), projetada para carregar modelos 3D nos cenários virtuais da Unity durante a execução de uma aplicação, pós-compilado. A biblioteca permite carregar modelos não embutidos no aplicativo, possibilitando o uso de elementos externos, localizados em diretórios ou por uma URL da *internet*. Como a Unity não possui essa funcionalidade, o uso da biblioteca Trilib é imprescindível.

5.4 Detalhes de Implementação do Editor CAD

Nesta seção são apresentados os detalhes de desenvolvimento do ECAD utilizando a API do AutoCAD, apontando os comandos customizados para a manipulação dos símbolos, diagrama de componentes do sistema e interfaces gráficas.

5.4.1 Implementação das Funcionalidades com API AutoCAD

O *software* AutoCAD fornece aos desenvolvedores uma API de programação utilizando a linguagem de programação C#. A API foi desenvolvida para fornecer alto nível de abstração às funções do AutoCAD.

A implementação de extensão para o AutoCAD seguiu a metodologia apresentada pela documentação da API, onde o sistema deve conter duas classes principais: (i) classe de inicialização da extensão, que implementa a classe *IExtensionApplication* e (ii) classe de comandos customizados.

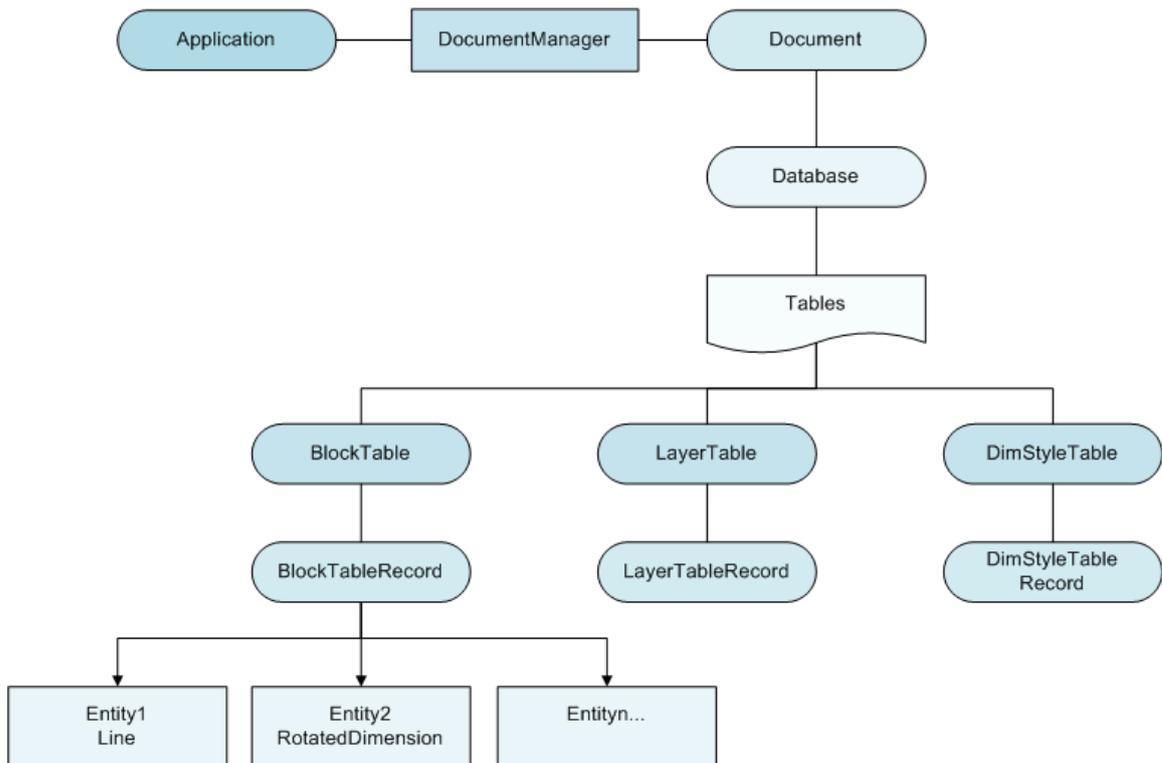
O armazenamento do AutoCAD é realizado por bases de dados incorporadas ao documento CAD. A Figura 5.8 apresenta a hierarquia de componentes de um documento do AutoCAD. Os arquivos CAD são definidos como *Documents* e possuem bases de dados com tabelas de

blocos (*BlockTable*), camadas (*LayerTable*) e estilos (*DimStyleTable*). Desta forma, as tabelas têm funções de armazenar os seguintes elementos:

- **BlockTable**: entidades CAD como linhas, arcos, retângulos e blocos com seus atributos;
- **LayerTable**: dados sobre as camadas do desenho, nome da camada, cor e configurações;
- **DimStyleTable**: armazena os estilos de cotas do desenho.

O fragmento de código apresentado na Listagem 3, exemplifica o acesso à base de dados do documento em uso. A linha 6 apresenta a obtenção do documento ativo e em uso, neste caso todos os dados estão contidos em sua estrutura. O acesso à base de dados é apresentado na linha 7 e o acesso às tabelas na linha 9.

Figura 5.8: Hierarquia de objetos em um documento CAD do AutoCAD.



Fonte: [Inc. Autodesk](#) (2020).

```
1 using Autodesk.AutoCAD.ApplicationServices;
2
3 public class ExampleCad {
4     public static void Example() {
5
6         Document activeDocument = Application.DocumentManager.MdiActiveDocument;
7         Database db = activeDocument.Database;
8
9         using (Transaction transaction = db.TransactionManager.StartTransaction()) {
10             // Acesso ao BlockTable, LayerTable e DimStyleTable
11             transaction.Commit();
12         }
13     }
14 }
```

Listing 3: Exemplo de implementação para acesso a base de dados de um documento do AutoCAD.

As funcionalidades do AutoCAD são executadas por comandos, como, por exemplo, inserir uma linha utilizando o comando *line* ou mover uma entidade com o comando *move*.

O fragmento de código apresentado na Listagem 4, exemplifica a implementação de comando para o AutoCAD. Durante o uso do *software* CAD, ao digitar o comando “RunExample”, apresentado nas linhas 6 e 7, o sistema irá executar a função na linha 9.

```
1 using Autodesk.AutoCAD;
2
3 [assembly: CommandClass(typeof(MyCommands))]
4 public class MyCommands
5 {
6     [CommandMethod("RunExample")]
7     public void Run()
8     {
9         ExampleCad.Example();
10    }
11 }
```

Listing 4: Exemplo de implementação de comando para AutoCAD utilizando a API .net.

5.4.2 Comandos Implementados para o Sistema de Autoria

Foram implementados os comandos para execução das funcionalidades do Sistema de Autoria com base nos requisitos do sistema. A Tabela 5.2 apresenta os comandos e sua breve descrição.

Durante a manipulação do AutoCAD, o usuário é permitido digitar comandos para uma tarefa específica. Os comandos podem ser informados por campos de entrada de texto ou utilizando uma interface gráfica de acesso rápido.

Tabela 5.2: Comandos implementados para o Editor CAD.

Comando	Descrição
<i>ServerSettings</i>	Configurações do endereço de acesso ao servidor do GAV.
<i>UserLogin</i>	Autenticar usuário
<i>UserLogoff</i>	Encerrar seção e sair do sistema
<i>SelectUserProject</i>	Visualizar, selecionar e abrir projetos do usuário
<i>UpdateProject</i>	Atualizar o projeto CAD no Gerenciador de AV
<i>Deploy</i>	Implantar o projeto CAD e disponibilizar em RV
<i>ProjectLevels</i>	Definir as diferentes alturas (níveis) de elementos suspensos
<i>SCADACheck</i>	Analisar os códigos de operação de equipamentos do projeto
<i>ProjectSettings</i>	Acessar as configurações do projeto no Gerenciador de AV
<i>SymbolManage</i>	Acessar o gerenciador de símbolos no Gerenciador de AV
<i>CreateSymbol</i>	Criar símbolo e atribuí-lo a um modelo 3D
<i>InsertSymbol</i>	Obter, visualizar e inserir símbolos de modelos 3D
<i>ReplaceSymbols</i>	Obter, visualizar e substituir símbolos de modelos 3D
<i>InfoModel</i>	Exibir informações do símbolo selecionados
<i>DefineSCADAID</i>	Definir ao um símbolo o código de operação SCADA
<i>DefineLevel</i>	Definir a altura (nível) de elementos suspensos
<i>ShowByLevel</i>	Mostrar símbolos pelo nível em relação ao solo
<i>ShowByLevelList</i>	Mostrar símbolos por diversos níveis em relação ao solo
<i>InsertCables</i>	Inserir cabos entre dois equipamentos
<i>EditCables</i>	Editar cabos
<i>InsertBuses</i>	Inserir barramento entre dois equipamentos
<i>EditBuses</i>	Editar barramento
<i>InsertConnector</i>	Inserir conectores para cabos
<i>Preview3D</i>	Pré-visualizar em 3D o projeto CAD em desenvolvimento

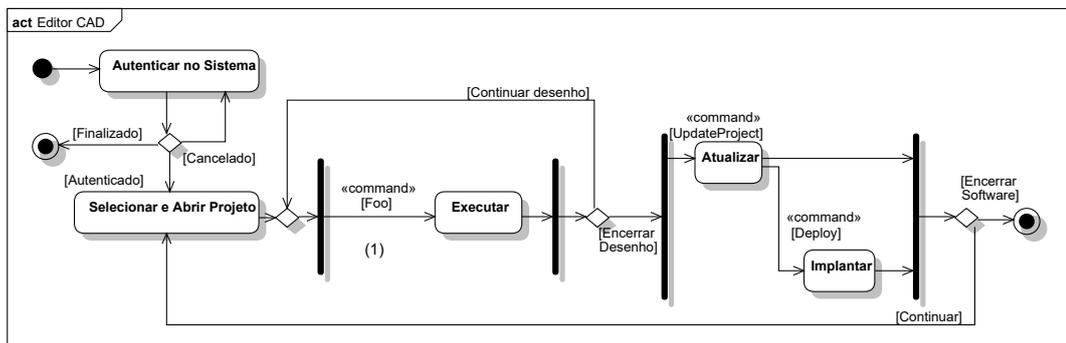
Fonte: o autor.

A Figura 5.9 apresenta, através de um diagrama de atividades, a sequência de atividades ao utilizar comandos no ECAD. Como demonstrado, a primeira atividade é a autenticação no sistema, realizado pelo comando *UserLogin*, posteriormente a seleção do projeto de subestação atribuído ao usuário utilizando o comando *SelectUserProject*.

Ao carregar a planta baixa, o usuário está habilitado para realizar qualquer comando pertinente a manipulação do desenho. O item (1) apresenta o momento de entrada de comandos pelo usuário, podendo entrar com qualquer comando da Tabela 5.2. Esse processo se repete até o usuário decidir encerrar o projeto.

Sendo assim, ao finalizar, o usuário pode optar por atualizar e inserir a versão histórica no GAV e, por fim, caso solicitado, implantar a planta baixa no SRV.

Figura 5.9: Diagrama de atividades da sequência de comandos no Editor CAD.



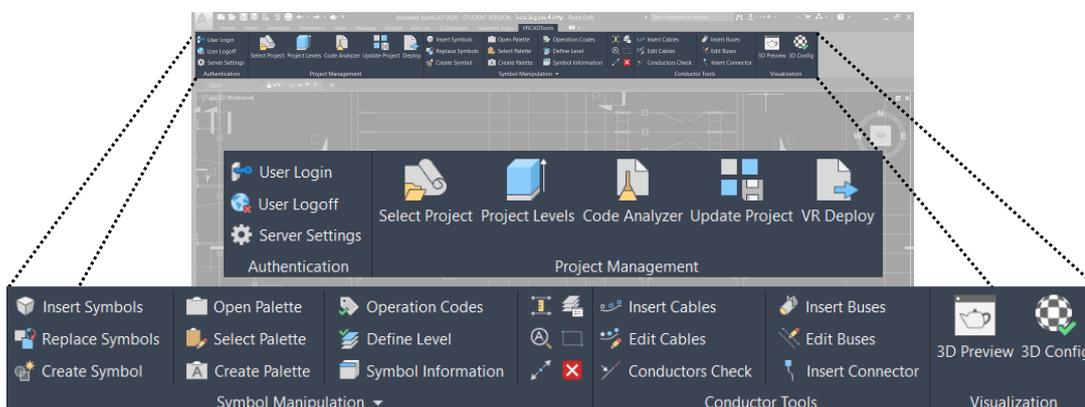
Fonte: o autor.

5.4.3 Interface Gráfica de Acesso Rápido às Ferramentas do Editor CAD

O *software* AutoCAD permite customizar sua interface gráfica com estilo *Ribbon*, utilizado por *softwares* como o Word e Excel. É um painel localizado na parte superior do *software*, organizado por abas e divididos por categoria. Os menus *Ribbon* oferece uma opção visual dos comandos implementados para o ECAD. A Figura 5.10 apresenta o painel com os botões para execução das funcionalidades.

Os comandos dispostos na interface gráfica são separados por categorias e fornecem aos usuários uma visão geral das funcionalidades. As categorias são: gerenciamento do projeto de planta baixa, manipulação de símbolos, gerenciamento de símbolos, manipulação de condutores e visualização do projeto.

Figura 5.10: Menus de acesso rápido de comandos do ECAD no AutoCAD.



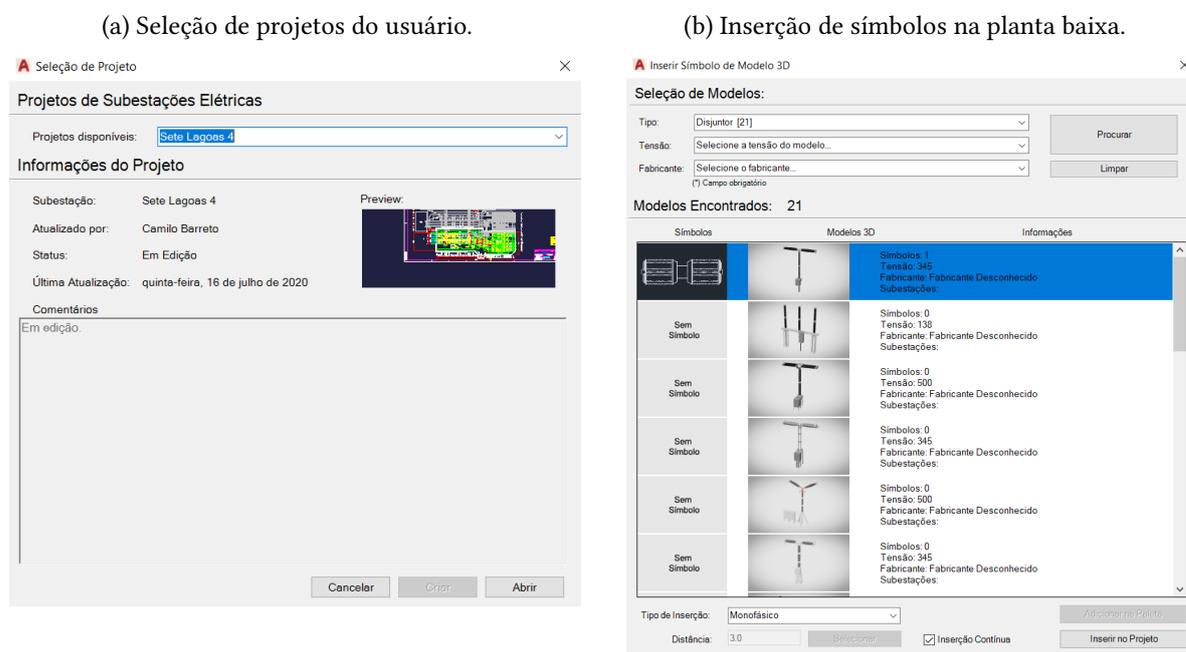
Fonte: o autor.

5.4.4 Interface Gráfica das Ferramentas do Editor CAD

O objetivo das interfaces gráficas é facilitar o uso das ferramentas por meio de informações visuais. Ao executar o comando de uma determinada atividade, sua interface gráfica é apresentada ao usuário, mostrando os campos de entradas necessários para executá-la. Foram desenvolvidas interfaces gráficas para cada funcionalidade apresentada na Tabela 5.2.

Como exemplo, a Figura 5.11 apresenta duas interfaces gráficas. São as interfaces de seleção de projetos do usuário (Figura 5.11a) e busca e inserção de símbolos de modelos 3D na planta baixa (Figura 5.11b).

Figura 5.11: Exemplos de interfaces gráficas do Editor CAD.



Fonte: o autor.

5.4.5 Persistência de Dados entre Editor CAD e Gerenciador de Ambientes Virtuais

O ECAD realiza consultas na base de dados do GAV quando uma funcionalidade necessita de informações ou arquivos para uso. Tarefas como a autenticação de usuário, seleção de projetos, inserção e substituição de símbolos necessitam recuperar dados para utilizá-los no gerenciamento e manipulação de plantas baixas. Sendo assim, são apresentadas algumas estratégias de comunicação e transferência de dados entre os *softwares* do SA.

5.4.5.1 Recuperação de Projetos de Subestações

Após o usuário se autenticar no ECAD, uma tela para seleção de projetos atribuídos ao seu perfil é apresentada (Figura 5.11a). A tela possui uma lista de projetos autorizados a serem

abertos pelo usuário. Ao selecionar um projeto da lista apresentada, suas informações são exibidas na interface gráfica, como (a) nome da subestação, (b) último usuário a atualizar, (c) *status* de edição, (d) data da última atualização, (e) comentários sobre o que foi realizado e (f) imagem em miniatura da planta baixa.

Todos os projetos e suas informações são recuperadas do GAV pela URL `http://__:8000/api/ps-projects/?user={user-id}` onde o “user-id” é a identificação do usuário e `http://__:8000/api/ps-loggers/{project-id}` onde “project-id” é a identificação de uma versão do projeto.

Ao solicitar as informações de projetos de usuários utilizando estas URLs, a resposta é retornada em um *payload* (carga útil) no formato JSON. Posteriormente é extraído os dados do projeto selecionado e apresentados ao usuário por meio da interface gráfica. O *payload* apresentado na Listagem 5 exemplifica os dados de um projeto identificado pelo “project-id” 79, onde pode-se observar o nome da subestação, iniciais e as informações da última versão do projeto.

```
1  [{
2    "id": 79,
3    "powerSubstation": {
4      "id": 0,
5      "fingerprint": "SEL_NjDA",
6      "name": "Subestação SLAG4",
7      "initials": "SLAG4"
8    },
9    "lastLog": {
10     "id": 222,
11     "projectCad": "http://__:8000/api/ps-loggers/000/project-cad/",
12     "projectMetadata": "http://__:8000/api/ps-loggers/000/project-metadata/",
13     "thumbnail": "iV...w0K==",
14     "userUpdater": {
15       "id": 3,
16       "name": "Camilo Barreto",
17       "fingerprint": "USR_ADMI_901yasE"
18     },
19     "lastUpdate": "2020-07-16T12:14:04.097584Z",
20     "fingerprint": "LOG_SLAG4_Ebd6",
21     "comment": "Em edição.",
22     "cadHashCode": "d09c5ded1ad5bf8f837ee31fb4c6bc0dc223c90b4b8fd506b89b2",
23     "metaHashCode": "e2ce505a57e1fb2742234d144466c7cbb4acf070fd57ca0ee339",
24     "psProject": 79
25   }
26 }]
```

Listing 5: Pacote de dados no formato JSON recebido pelo ECAD contendo informações sobre um projeto de subestação.

Ao selecionar um projeto e solicitar sua execução, o ECAD recebe o arquivo por transferência e abre em uma nova janela. O exemplo apresentado na Listagem 6 é uma função implementada como parte do sistema de seleção, transferência e carregamento de projetos de plantas baixas. Desta forma, é enviado como parâmetro ao método “DownloadAndOpenPro-

ject" a identificação "id" da versão de um determinado projeto de subestação. A URL é criada e repassada para a função "Promise.GET_FILE", uma ação assíncrona aguarda a resposta do servidor e abre o projeto quando a transferência for terminada. Uma nova tela com o projeto selecionado é carregada e apresentada ao usuário.

```
1 public void DownloadAndOpenProject(string id)
2 {
3     var uri = new Uri($"http://_:8000/api/ps-loggers/{id}/project-cad/");
4     var name_file = $"project_{id}";
5     Promise.GET_FILE(uri, Directories.Temporary_Path, name_file, ".dwg")
6     .Then(reply =>
7     {
8         CADUtils.OpenProjectAndCloseCurrent(name_file);
9         CadSession.SetCurrentEntitiesList(CADUtils.GetAllEntities());
10    })
11    .Catch(ex =>
12    {
13        Messages.ShowError(ex.HResult.ToString(), $"Erro ao fazer download do projeto:");
14    })
15    .Done();
16 }
```

Listing 6: Fragmento de código para transferência e carregamento de um projeto de planta baixa CAD.

```
1 {
2     "objectTypes": [
3         {
4             "id": 53,
5             "type": "Chave VCR",
6             "objects3d": []
7         }
8     ],
9     "voltages": [
10        {
11            "id": 8,
12            "voltage": 500
13        }
14    ],
15    "manufacturers": [
16        {
17            "id": 3,
18            "manufacturer": "ABB",
19            "objects3d": []
20        }
21    ]
22 }
```

Listing 7: *Payload* com dados para o filtro de busca.

5.4.5.2 Recuperação e Inserção de Símbolos

As funcionalidades de inserção e substituição de equipamentos e conectores solicitam informações dos símbolos ao GAV. A Figura 5.11b apresenta a tela de busca e inserção de símbolos.

A ferramenta de inserção de símbolos possui um sistema de filtro de busca que permite ao usuário personalizar os campos com características a serem pesquisadas, como, por exemplo, “tipo de modelo”, “tensão” e “fabricante”. Todas as informações utilizadas no filtro são recuperadas por meio da URL **http://__ :8000/api/objects/filter-options** e, posteriormente, enviadas em um *payload* ao GAV com a lista opções selecionadas pelo usuário.

O *payload* apresentado na Listagem 7 apresenta exemplos de informações para filtragem de símbolos, recebidas no ECAD advindas do servidor.

Após solicitar a busca de símbolos aplicando os filtros, uma lista de elementos é apresentada ao usuário.

Nesse sentido, ao selecionar um símbolo para inserção na planta baixa, o sistema realiza uma solicitação para transferência do elemento selecionado. Através da URL **http://__ :8000/api/symbols/{id}/**, onde o “id” é a identificação do elemento, é realizada a requisição.

```

1 {
2   "id": 22,
3   "thumbnail": "ivB...mCC",
4   "block": "QUM...s2M",
5   "fingerprint": "SMB_PONP_EbaN",
6   "description": "Chave Seccionadora",
7   "objects3d": [
8     21
9   ]
10 }
```

Listing 8: *Payload* com dados do símbolo e ativo virtual.

O ECAD recebe do GAV o *payload* apresentado na Listagem 8 com as informações:

- **id**: identificação do símbolo na base de dados,
- **thumbnail**: imagem em miniatura do símbolo em formato base64¹,
 - **block**: símbolo com extensão “.dwg” em formato base64,
- **fingerprint**: identificação compartilhável do símbolo,
- **description**: descrição do elemento,
- **objects3d**: lista de modelos relacionados com o símbolo.

Ao receber o sistema, as informações são extraídas e convertidas em arquivos CAD.

¹É um método de codificação de dados para transferências via *internet*. É constituído por 64 caracteres ([A-Z],[a-z],[0-9], "/" e "+") que deram origem ao nome.

5.4.5.3 Cadastro de Símbolos

O cadastro e atribuição de símbolos a modelos 3D se inicia com a seleção das entidades que compõem o símbolo (linhas, retângulos, elipses). A API do AutoCAD permite, por meio de implementação, gerar um bloco único com as entidades selecionadas e armazená-las temporariamente em um diretório local no formato base64. Da mesma forma, a API do AutoCAD permite extrair uma imagem em miniatura do símbolo para ser pré-visualizada no GAV ou ECAD.

Por fim, é enviado ao GAV os dados do símbolo e seu relacionamento com um ativo virtual.

O fragmento de código na Listagem 9 apresenta o processo simplificado de cadastro e atribuição de um símbolo. A função “RegisterAndAssignSymbol” requer por parâmetro o símbolo gerado em base64, a imagem em miniatura em base64, a indicação do modelo virtual e sua descrição. Um objeto do tipo “Symbol” é criado e atribuído os parâmetros.

```
1 public void RegisterAndAssignSymbol(string symbolBase64, string thumbnailBase64,
2                                     string idOfModel, string desc)
3 {
4     var symbol = new Symbol()
5     {
6         block = symbolBase64,
7         thumbnail = thumbnailBase64,
8         objects3d.Add(idOfModel),
9         description = desc,
10    };
11
12    var url = new Uri(URL.symbolsURL);
13    Promise.POST<Symbol>(url, symbol)
14    .Then(result =>
15    {
16        Messages.ShowMessage(title: "Atribuição de Símbolo",
17                               message: $"Símbolo atribuído a modelo 3D com sucesso!",
18                               Messages.MessageSize.Medium,
19                               Messages.MessageType.Successful);
20    })
21    .Catch(ex =>
22    {
23        Messages.ShowError(ex.HResult.ToString(), $"Símbolo não inserido: {ex.Message}");
24    })
25    .Done();
26 }
```

Listing 9: Fragmento de código do processo de cadastro de novos símbolos.

Logo após criar o objeto “symbol” (linha 4) ele é convertido em um arquivo JSON e solicitado um cadastro via HTTP/POST (linha 13) por meio de uma conexão com o GAV. O arquivo JSON apresentado na Listagem 10 exemplifica o objeto “Symbol” em um *payload* enviado ao servidor com informações do símbolo e arquivo em base64.

```
1 {
2   "id": 0,
3   "block": "ra...wQ=",
4   "thumbnail": "iVB...CC",
5   "description": "Descrip...",
6   "objects3d": [ 1 ]
7 }
```

Listing 10: *Payload* enviado ao GAV para cadastro de novo símbolo.

5.4.5.4 Atualizações de Projetos

Da mesma forma, como apresentado nas funcionalidades anteriores, a atualização de projetos realiza uma solicitação para atualização do projeto em planta baixa. O GAV mantém cada atualização de projeto em versões históricas. A cada atualização é cadastrado uma nova versão do projeto com informações como a data de atualização, identificação do projeto, usuário solicitante, arquivo da planta baixa, arquivo de integração, código de segurança do projeto, código de segurança do arquivo de integração e a imagem em miniatura do desenho. O *payload* gerado pelo sistema, apresentado na Listagem 11, é enviado ao GAV e registrado por solicitação utilizando a URL http://__:8000/api/ps-loggers/.

```
1 {
2   "id": 10,
3   "comment": "Extração de Payload para documento",
4   "userUpdater": 1,
5   "psProject": 2,
6   "projectCad": "QU...As=",
7   "projectMetadata": null,
8   "cadHashCode": "ad...bf",
9   "metaHashCode": null,
10  "thumbnail": "iV...=="
11 }
```

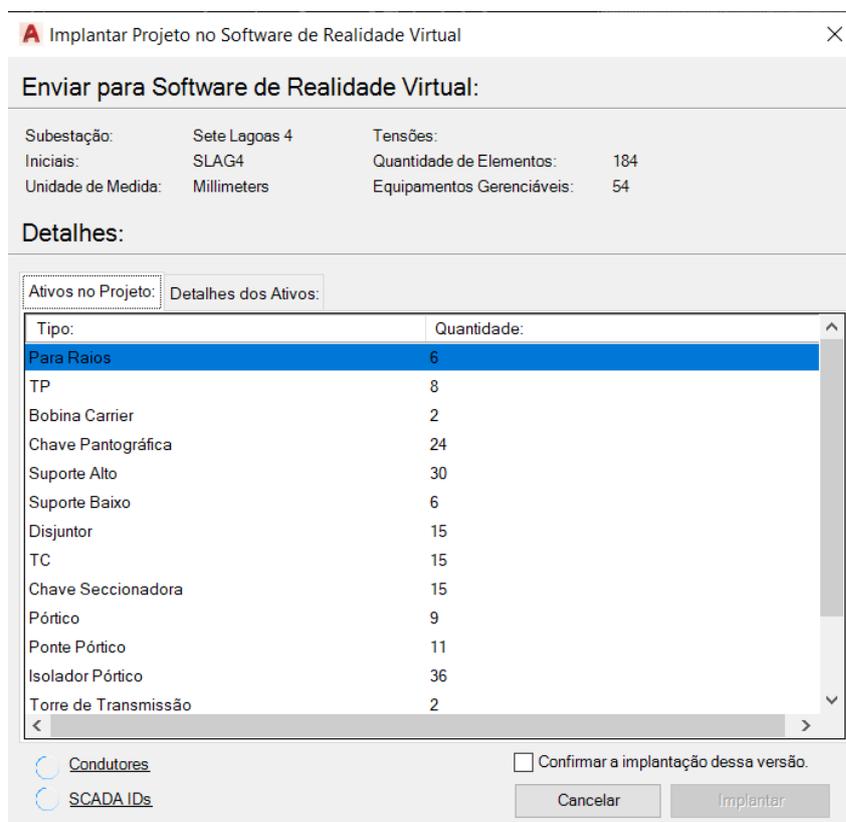
Listing 11: *Payload* de atualização de projetos de subestações virtuais.

5.4.6 Implantação do Projeto em Planta Baixa no *Software* de Realidade Virtual

O ECAD realiza a implantação do projeto em planta baixa CAD por meio de uma ferramenta denominada “*VR Deploy*” (implantar para RV). A Figura 5.12 apresenta a tela da ferramenta.

Ao clicar no botão “*VR Deploy*” um relatório de ativos (equipamentos) é exibido na tela com informações relacionadas a identificação da subestação, tipos de ativos em cena, quantidades de ativos por grupo de tipos e o nome dos modelos com sua identificação CAD. Caso algum erro surja durante o processo de compilação, ele é apresentado ao usuário.

Figura 5.12: Ferramenta de implantação de projetos CAD com o Sistema de Realidade Virtual.



Fonte: o autor.

Ao realizar a implantação, um arquivo de integração é cadastrado como uma nova versão do projeto. Esse arquivo fica disponível para o *software* de Realidade Virtual utilizá-lo na reconstrução do AV. A Figura 5.13 exemplifica as versões atualizadas no GAV onde a primeira versão do projeto está marcado com "X" na coluna RV, que significa que essa versão não tem arquivo de integração em RV. A segunda linha possui a marcação "check" na coluna RV, significa haver um arquivo de integração onde o usuário pode utilizá-lo no SRV. Quando há muitas versões de arquivos de integração, o sistema fornece a versão atual.

Figura 5.13: Versões de projetos CAD e integração com o SRV.

Data	Comentário	Status	Usuário	RV	Detalhes
14/09/2021 15:25:56.422	Subestação implantada para RV.	Implantado	Camilo Barreto	✓	🔗
14/09/2021 15:25:28.631	Ajustes de posicionamento	Pronto e Não Implantado	Camilo Barreto	✗	🔗

Fonte: o autor.

5.5 Detalhes de Implementação do Pré-Visualizador 3D

O pré-visualizador auxilia os usuários durante a elaboração da planta baixa, fornecendo informações e vantagens visuais indisponíveis em uma visualização 2D do *software* CAD. Nesse sentido, pode-se visualizar detalhadamente o AV em 3D, obtendo informações relevantes e alcançando *feedback* visual antes da implantação no SRV.

A ferramenta foi desenvolvida utilizando o motor de jogos Unity, que possui motor gráfico para aplicações em 3D com tecnologia de RV. O diagrama de casos de uso apresentado na Figura 5.2 exemplifica as funcionalidades do pré-visualizador.

São apresentados a seguir os passos do desenvolvimento da ferramenta de pré-visualização.

5.5.1 Navegação

A navegação foi desenvolvida em três modalidades apresentadas na Figura 5.14: (a) navegação em primeira pessoa, (b) livre e (c) com visão de topo. As três modalidades concedem ao usuário uma visualização completa e simples do AV.

Nesse sentido, possibilita a navegação próxima aos elementos com a navegação livre, navegação similar ao andar do operário em primeira pessoa e, por fim, uma visão geral e ampla com a visão de topo.

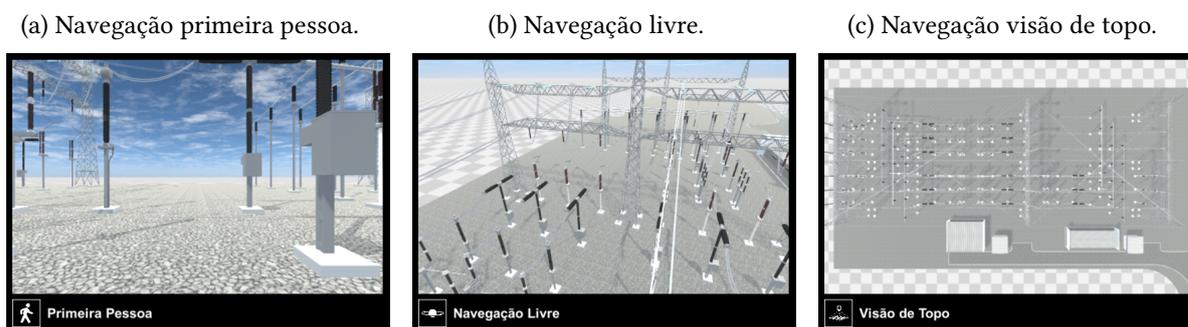
A navegação com visão de topo permite ao usuário visualizar amplamente o ambiente virtual com uma vista superior, propiciando a movimentação do *mouse* no eixo vertical Y da tela, avançando a câmera na linha vertical no sentido para frente. Ao mover o *mouse* no eixo horizontal X da tela, a câmera se move na linha horizontal em sentido lateral, para esquerda e direita.

A navegação livre concede ao usuário quatro graus de liberdade. Navegação nos eixos horizontais, verticais, de profundidade (XYZ) e rotação no eixo da câmera. Os movimentos são realizados pelas teclas "W A S D" ou as setas direcionais " $\leftarrow \rightarrow \uparrow \downarrow$ ". A tecla W realiza o movimento na câmera de seguir em frente e a tecla S realiza o movimento de seguir para trás. As teclas A e D realizam os movimentos laterais. As teclas podem ser utilizadas em conjunto com o dispositivo *mouse*, onde o movimento no plano XY da tela direciona a câmera.

Por fim, a navegação em primeira pessoa utiliza as teclas "W A S D" ou as setas direcionais " $\leftarrow \rightarrow \uparrow \downarrow$ " para se movimentar pelo pátio da subestação e a movimentação do *mouse* realiza a angulação da câmera.

A Figura 5.14a exemplifica a visão em primeira pessoa durante a navegação no AV de uma SE. A Figura 5.14b exemplifica a visão do usuário durante a navegação livre, observa-se que a câmera está posicionada a alguns metros do solo. Por fim, a Figura 5.14c apresenta a visão de topo do pátio da subestação virtual.

Figura 5.14: Formas de navegação no pré-visualizador 3D.



Fonte: o autor.

5.5.2 Informações Visuais

As informações apresentadas aos usuários são provenientes dos dados da planta baixa. Neste sentido, as informações do AV e de seus componentes são apresentadas de duas formas. A primeira é por meio de *Heads-Up Display* (HUD²), que são campos textuais dispostos fixamente na janela do pré-visualizador, com objetivo de apresentar os dados do cenário virtual, como o nome da SE, sigla, tensões de operação, unidade de medida e dados de desempenho gráfico. A segunda forma é por meio de elementos gráficos textuais e geométricos acima e ao redor dos ativos virtuais. Neste sentido, são apresentados os ativos supervisionados, cabos e barramentos com cores distintas. A Figura 5.15 apresenta algumas informações visuais implementadas para melhorar a experiência do usuário ao projetar plantas baixas para o SRV.

A Figura 5.15a apresenta o destaque em amarelo de um equipamento supervisionado e acima o código de operação em forma textual. As Figuras 5.15b e 5.15c apresentam os destaques em vermelho para evidenciar os cabos e os destaques azuis para barramentos. Desta forma, ao realizar uma análise visual do AV, os destaques em cores e com informações distintas facilitam ao usuário identificar os elementos e sua categoria.

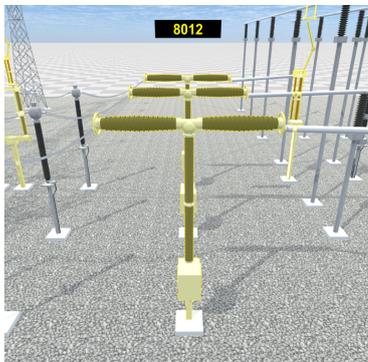
O cenário virtual, por si, é uma informação visual da composição física da subestação. Além de apresentar as conexões entre equipamentos pelos cabos condutores, apresenta as dimensões horizontais e verticais dos equipamentos e as ações mecânicas da abertura e fechamento de chaves seccionadoras.

A experiência da navegação no AV auxilia o usuário na criação de um modelo mental da SE. A visualização enriquecida com informações sobre a subestação, completa a visualização geral do projeto. As informações dos ativos virtuais apresentadas ao usuário durante a fase

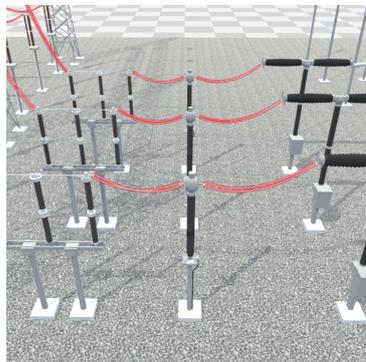
²Segundo Rogers (2014), HUD refere-se a sobreposição visual da tela por minitelas e ícones que exibe informações do ambiente do jogo ao usuário. É a maneira mais eficaz de se comunicar com os jogadores.

Figura 5.15: Informações visuais do cenário virtual no pré-visualizador 3D.

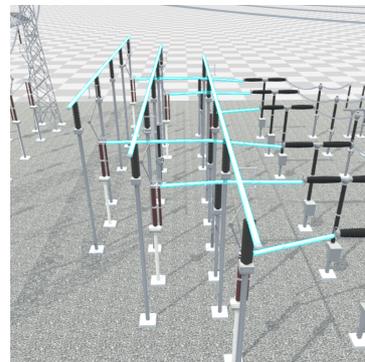
(a) Destaque de equipamento supervisionado e seu código de operação.



(b) Destaque na cor vermelha para cabos condutores.



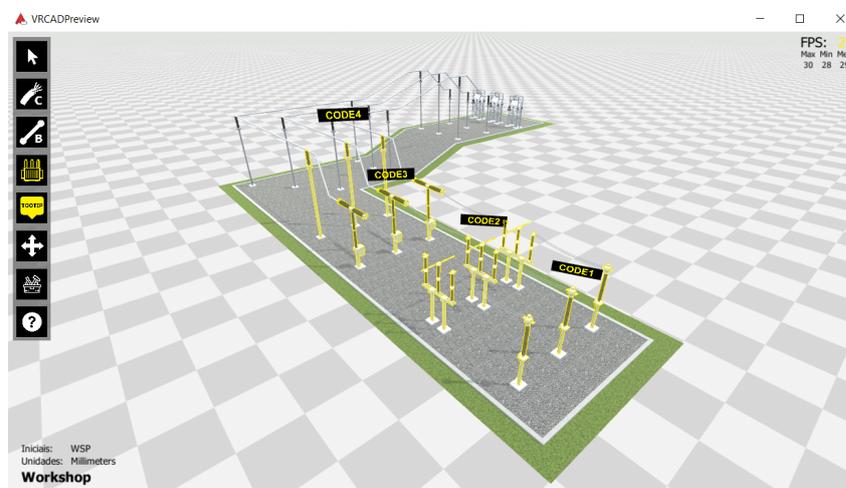
(c) Destaque na cor azul para barramentos condutores.



Fonte: o autor.

de concepção do projeto, são: posicionamento no espaço 3D, cores e texturas, dimensões, relacionamentos e classificação de elementos por cores e código de identificação (código de operação). A Figura 5.16 exemplifica o uso do pré-visualizador.

Figura 5.16: Pré-visualizador 3D de projetos de subestações em planta baixa.



Fonte: o autor.

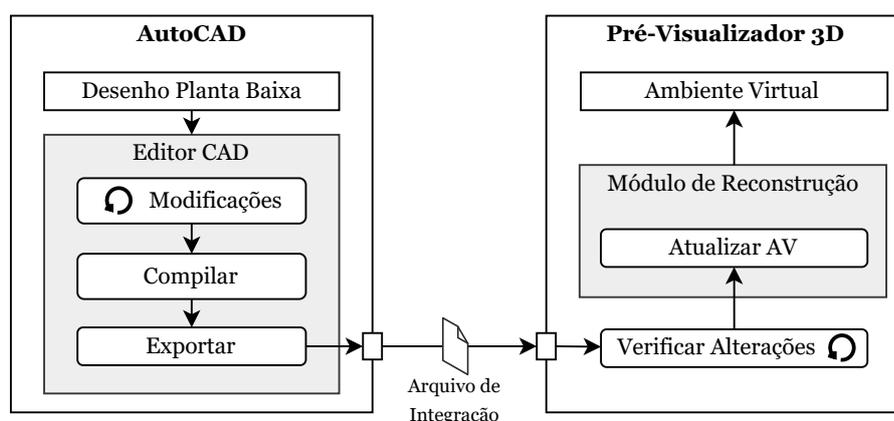
5.5.3 Reconstrução do Ambiente Virtual do Pré-Visualizador

Ao executar o pré-visualizador 3D em conjunto com o ECAD, o sistema compila as informações da planta baixa e exporta o arquivo de integração para um diretório local.

O ECAD executa uma análise contínua das alterações da planta baixa, caso alguma alteração seja detectada os dados do arquivo de integração são atualizados. Esse processo se repete até o momento em que o pré-visualizador é encerrado.

Um algoritmo implementado no núcleo do pré-visualizador 3D, verifica continuamente as alterações do arquivo de integração proveniente do ECAD. Caso alguma alteração seja detectada, o AV é atualizado. As atualizações englobam a transferência de modelos 3D, aplicação das novas matrizes de transformação (posição, rotação e escala), adição e remoção de objetos 3D e seus condutores. A Figura 5.17 apresenta um diagrama conceitual do processo de atualização dos elementos no AV.

Figura 5.17: Processo contínuo de atualização dos elementos no Ambiente Virtual do pré-visualizador 3D.



Fonte: o autor.

Pode-se destacar o Módulo de Reconstrução de AVs integrado ao pré-visualizador 3D, que realiza toda a reconstrução dos elementos que compõem o cenário, como apresentado na subseção 5.15c.

5.6 Integração do Módulo de Reconstrução no *Software de Realidade Virtual*

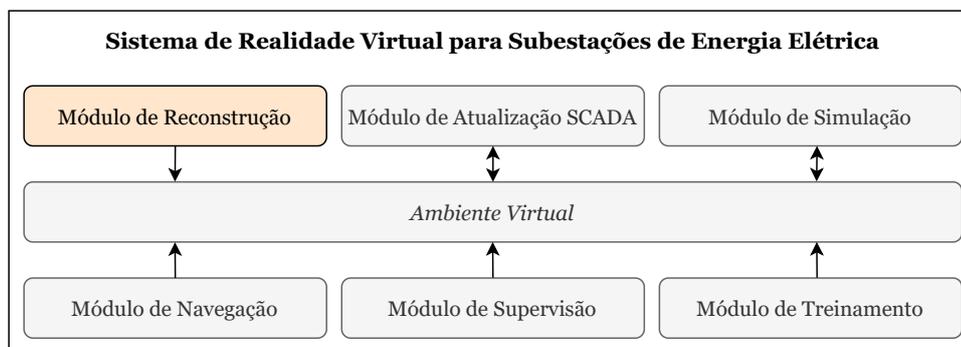
O módulo de reconstrução foi implementado segundo o diagrama conceitual apresentado na subseção 4.3.6. A Figura 5.18 apresenta os módulos que compõem o SRV e em destaque o módulo de reconstrução.

A forma que o módulo de reconstrução foi integrado ao SRV permite aos outros módulos trabalharem paralelamente e independentes, visto que a utilização de cada um é relacionado ao tipo de tarefa que o sistema irá desempenhar.

A recuperação de cenários virtuais implantados no GAV e sua apresentação ao usuário é uma funcionalidade do módulo de reconstrução. Desta forma, foi implementado o recurso de autenticação de usuários no SRV com busca e apresentação das subestações implantadas. A Figura 5.19 apresenta as telas de autenticação e a lista de subestações virtuais. Primeiramente, no sistema de inicialização do SRV, o usuário realiza a autenticação no GAV (Figura 5.19a). Posteriormente, ao acessar a tela principal do SRV, uma lista com as subestações implantadas

é apresentada ao usuário, possibilitando a seleção e o carregamento do cenário virtual (Figura 5.19b).

Figura 5.18: Diagrama conceitual na visão de módulos do SRV, com destaque para o módulo de reconstrução de subestações virtuais de energia elétrica.



Fonte: o autor.

Figura 5.19: Menus do sistema de autenticação e recuperação de subestações virtuais implantadas no GAV.



Fonte: o autor.

Desta forma, é responsabilidade do sistema de autenticação e carregamento dos cenários virtuais:

- **Autenticar usuário no GAV:** para ter acesso à lista de subestações implantadas pela ECAD;
- **Buscar subestação no GAV:** após realizar a autenticação, o sistema requisita a lista das subestações disponíveis;

- **Baixar arquivo de integração da subestação:** ao selecionar uma subestação o sistema realiza a transferência do arquivo de integração referente ao item escolhido;
- **Carregar ambiente virtual:** extrair as informações do arquivo de integração e reconstruir o cenário virtual 3D da subestação.

5.7 Detalhes de Implementação do Gerenciador de Ambientes Virtuais

O GAV é um sistema centralizado, disponível na *internet* e que provê acesso externo para outras aplicações. Possui funcionalidades que proporciona o gerenciamento de AVs de projetos de plantas baixas de subestações. Ele gerencia a galeria de modelos 3D, símbolos CAD, relacionamento entre modelos 3D e símbolos, lista de subestações, projetos de subestações, documentações e usuários.

O comportamento do GAV foi descrito na Seção 5.2 e apresentado na Figura 5.3 por meio de um diagrama de Casos de Uso que demonstra as funcionalidades do sistema. A seguir são apresentados os detalhes de desenvolvimento, infraestrutura das máquinas virtuais, estratégias de comunicação e acesso a funcionalidades através de URLs.

5.7.1 Arquitetura do Gerenciador de Ambientes Virtuais

O sistema foi desenvolvido por categorias de serviços, executando máquinas virtuais (VMs) distintas, integrados por meio da rede local e da *internet*. Trata-se de uma arquitetura centralizada baseada no modelo cliente-servidor que fornece funcionalidades por meio da *internet* a sistemas e usuários remotos (*Web Service*).

São dois tipos de serviços:

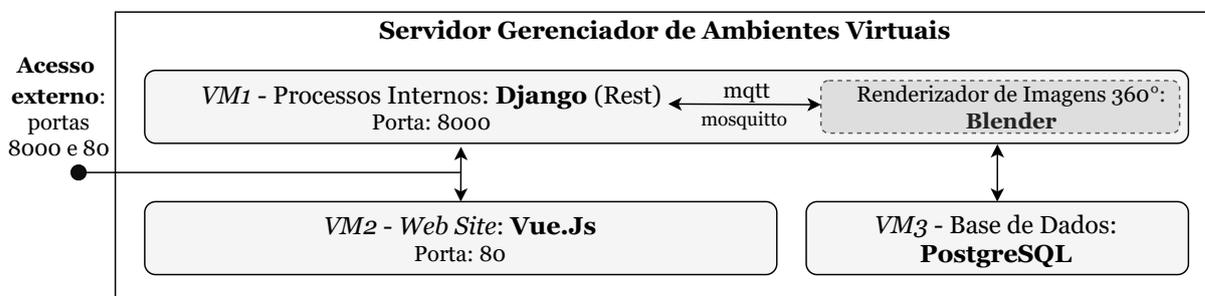
- *Backend* (processos internos do servidor): realiza processamento de dados e fornece acesso externo por meio de API REST;
- *Frontend* (*Website*): fornece interface gráfica por meio do *browser* (navegador) para usuários gerenciarem o sistema.

Pode-se observar na Figura 5.20 a arquitetura geral do GAV. Os serviços foram alocados em um servidor físico com três instancias de VMs:

- VM1: viabiliza processos internos associado ao Módulo Renderizador de Imagens 360° por acesso à porta 8000,
- VM2: prove páginas *Web* para os usuários por meio de *Website* por acesso à porta 80,
- VM3: viabiliza serviços de base de dados.

Todas as VMs são constituídas com o sistema operacional Ubuntu Server. Os serviços são descritos detalhadamente a seguir.

Figura 5.20: Visão geral dos serviços do Gerenciador de Ambientes Virtuais.



Fonte: o autor.

5.7.1.1 Processos Internos (*backend*)

O serviço *backend* do GAV é baseado em uma arquitetura centralizada, proporcionando acesso simultâneo a usuários (a palavra “usuários” engloba pessoas e sistemas computacionais). Por meio de uma API REST, desenvolvida utilizando o *framework* Django, foi possível criar um *Web Service* robusto para prover acesso a diversos usuários.

O REST é uma arquitetura proposta pela primeira vez no ano 2000 por Fielding (2000) em sua tese de dissertação. Segundo Vincent (2019), é uma abordagem para construir APIs baseadas na *Web* utilizando o protocolo HTTP.

Quando a API RESTful é implementada seguindo as regras apresentador por Fielding (2000), o serviço *Web* pode ser considerado REST.

Segundo Vincent (2019), há três características principais nas para que o *Web Service* seja uma API RESTful:

- não possuir estados, isto é, o servidor não pode armazenar qualquer tipo de contexto entre a comunicação cliente-servidor,
- suportar verbos do HTTP (get, post, put, delete, path),
- retornar dados no formato JSON ou XML.

Entretanto, outros autores citam mais características para o conceito de REST, como:

- modelo cliente-servidor onde as responsabilidades do cliente e servidor devem ser separadas,
- interface uniforme que garante um “contrato” de comunicação bem definido entre os lados,

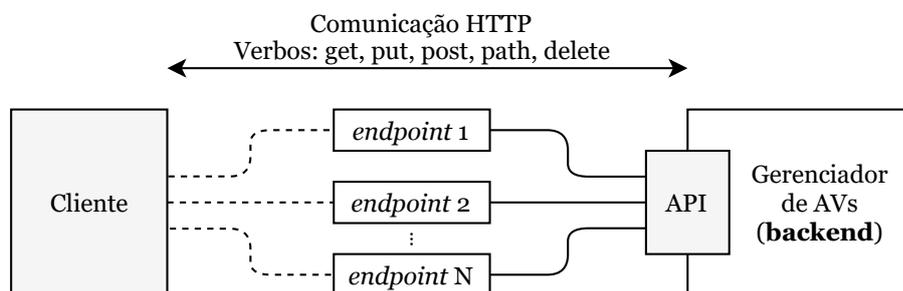
- o cache ajuda a melhorar o desempenho visto que reduz o tempo de resposta do servidor e,
- camadas para serem gerenciadas independentemente e que não impactam nas demais.

A arquitetura desenvolvida possibilita que sistemas e plataformas de diferentes origens consumam os serviços providos pela API. A interface uniforme utiliza a estrutura de dados JSON, amplamente empregada em sistemas *Web*.

Por meio da API desenvolvida, o sistema disponibiliza uma URL para acesso dos recursos do servidor para qualquer sistema de computação externo. As URLs são endereços das redes locais ou da *internet* para acesso da interface de comunicação entre a API e o cliente. A interface entre cliente e servidor em aplicações REST são chamados *endpoints* (terminais).

Como apresentado na Figura 5.21, um *Web Service* pode conter uma API de acesso e disponibilizar interfaces de acesso (*endpoints*) com endereços URL distintos, cada uma realizando tarefas específicas e utilizando verbos HTTP diferentes.

Figura 5.21: Exemplo de comunicação cliente-servidor utilizando os *endpoints* da API do Gerenciador de AVs.



Fonte: o autor.

A Listagem 12 exemplifica os dados recebidos através de uma requisição para obter informações de um determinado modelo virtual. Para realizar essa funcionalidade utilizou-se o *endpoint* `https://_:8000/api/objects/{id}` informando a identificação (ID) "5" do modelo. O sistema realiza a requisição utilizando o verbo HTTP/GET, onde a aplicação REST retorna o *payload* (carga de dados) com as informações do objeto. Os dados recebidos podem ser utilizados em diversas funcionalidades do GAV, ECAD e SRV.

```
1 {
2   "id": 5,
3   "file": "0M8...AX=",
4   "exported": "S2F...Bg=",
5   "webFormat": "Z2x...w==",
6   "thumbnail": "iVB...g==",
7   "thumbnail360": "iVB...g==",
8   "powerSubstations": [ 14 ],
9   "referencePictures": [],
10  "symbols": [ 335 ],
11  "fingerprint": "M3D_CHAV_E05o",
12  "exportedFileHash": "0ec...352",
13  "description": "Chave Seccionadora vertical",
14  "user": 26,
15  "objectType": 46,
16  "voltage": 6,
17  "manufacturer": 3
18 }
```

Listing 12: Pacote de dados no formato JSON contendo informações sobre um modelo 3D.

Quando é realizado o registro de um novo modelo virtual, a requisição é repassada ao GAV utilizando o verbo HTTP/POST com o *payload* do objeto. No caso, não é necessário informar as chaves “id” e “fingerprint”, pois são gerados automaticamente durante o registro. O *payload* exemplificado na Listagem 13 é preenchido com os dados do modelo virtual e seus arquivos, com a identificação do usuário que está solicitando o registro.

```
1 {
2   "manufacturer": 3,
3   "voltage": 1,
4   "objectType": 2,
5   "description": "Disjuntor substituto",
6   "exported": "S2F...w==",
7   "file": "0M8...A=",
8   "symbols": [],
9   "user": 3,
10  "referencePictures": []
11 }
```

Listing 13: Pacote de dados no formato JSON contendo informações sobre um modelo 3D para ser cadastrado no GAV.

Considerando os requisitos funcionais apresentados na Seção 5.1, foram implementados no serviço *backend* os *endpoints* apresentados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3: Lista de *endpoints* do Gerenciador de Ambientes Virtuais.

URL (<i>endpoint</i>)	Metodos	Descrição
https://_:8000/api/...		URL base dos <i>endpoints</i>
...login/	GET	Solicitar autenticação do usuário no sistema
...refresh/	GET	Solicitar atualização do token de acesso
...users/?id={id}		Solicitar dados de usuário pelo ID
...objects/?id={id}		Solicitar dados de modelo 3D pelo ID
...objects/filter-options/		Solicitar opções para filtro de busca
...objects/?object_type={id}		Solicitar modelos 3D pelo ID do tipo
...objects/?voltage={id}		Solicitar modelos 3D pelo ID da tensão
...objects/?manufacturer={id}		Solicitar modelos 3D pelo ID do fabricante
...objects/{id}/model-information/		Solicitar dados de modelo 3D pelo ID
...object-types/		Solicitar tipos de modelo 3D
...object-categories/		Solicitar categorias de modelos 3D
...object-managements/?id={id}		Solicitar tipo de gerenciamento para modelo 3D
...groups/{id}		Solicitar dados de grupos de usuários pelo ID
...symbols/?id={id}		Solicitar dados de símbolo CAD pelo ID
...manufacturers/{id}		Solicitar dados de fabricante pelo ID
...voltages/{id}		Solicitar dados de tensão pelo ID
...power-substations/{id}		Solicitar dados de subestação pelo ID
...ps-status/{id}		Solicitar <i>status</i> de subestação pelo ID
...ps-projects/{id}		Solicitar dados de projeto de subestação pelo ID
...ps-loggers/{id}		Solicitar dados de versão de subestação pelo ID
...reference-pictures/{id}		Solicitar imagens de modelo 3D pelo ID
...scada-entry/?ps_project={id}		Solicitar códigos de operação de uma SE pelo ID
...documentation/{id}		Solicitar documentação pelo ID

Fonte: o autor.

5.7.1.2 Renderizador de Imagens 360°

Ao cadastrar um modelo 3D no GAV pelo *Website*, é solicitado ao *backend* para que as informações do modelo sejam salvas na base de dados e inicie o processo de renderização da imagem em miniatura para visualização. Uma imagem provisória contendo a mensagem “processando” é atribuída ao modelo 3D até que a nova imagem esteja renderizada. A Figura 5.22a exemplifica a imagem provisória informando que a renderização está em progresso.

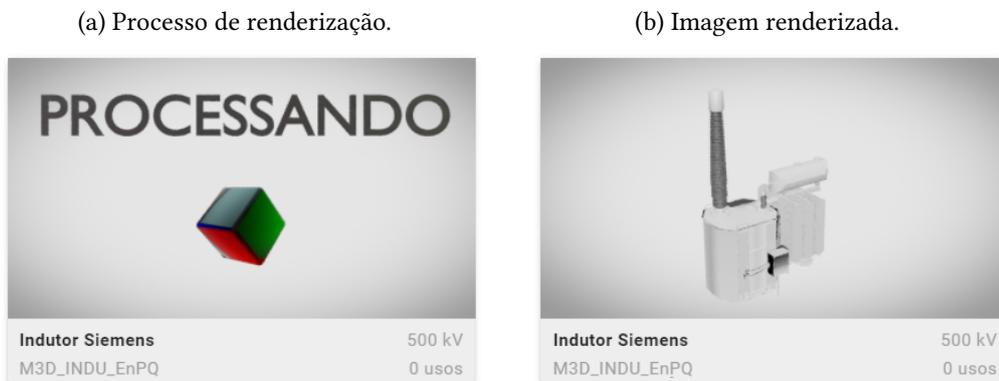
O processo de renderização é feito por um serviço MQTT³ executando no sistema operacional da VM, que inicia o processo de renderização na *suite* de modelagem Blender.

Por meio de um *script* implementado utilizando a API do Blender, o modelo com extensão “.fbx” é carregado e fotografado em 360° em visão lateral. Ao finalizar o processo de renderização, a imagem é salva e substituída pelas imagens recém-processadas. A Figura 5.22b apresenta uma fotografia em um ângulo pré-determinado do modelo 3D renderizado. O processo de cadastro e renderização pode ser observado detalhadamente no diagrama de sequência

³MQ Telemetry Transport: é um protocolo de mensagens leves otimizado para redes TCP/IP.

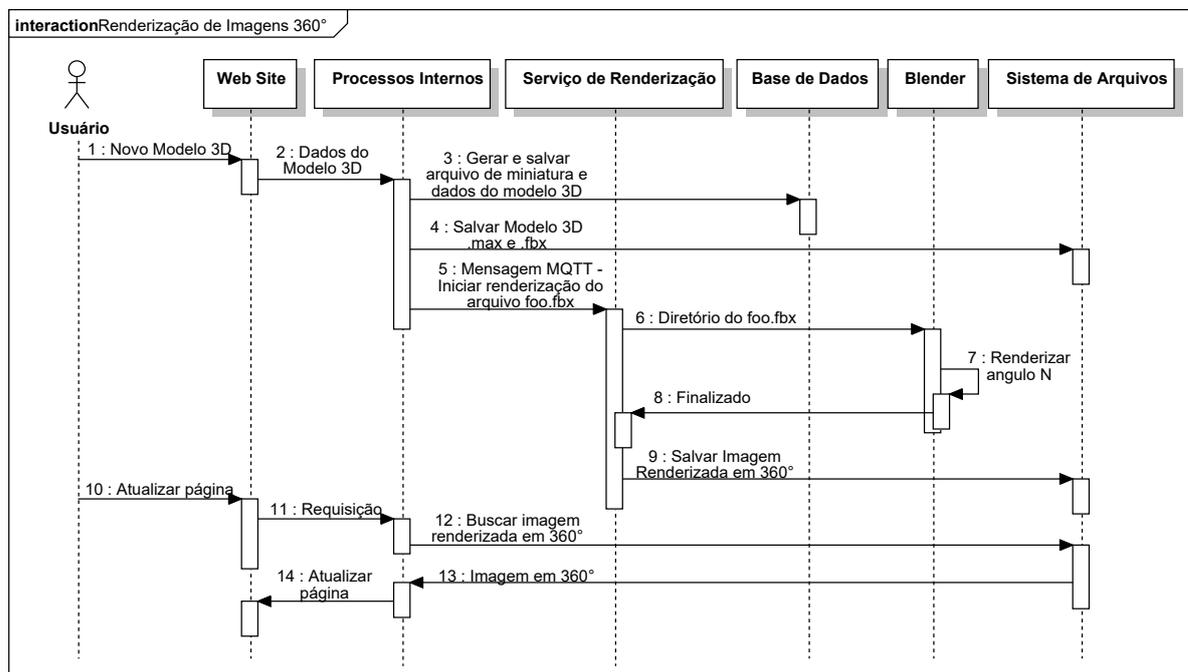
apresentado na Figura 5.23.

Figura 5.22: Renderização de imagens em 360° de modelo cadastrado.



Fonte: o autor.

Figura 5.23: Diagrama de sequência do processo de cadastro e renderização de modelos 3D.



Fonte: o autor.

5.7.1.3 Base de Dados

O sistema de gerenciamento de banco de dados (SGBD) utilizado foi o PostgreSQL. As tabelas e relacionamentos entre entidades foram criadas utilizando o Mapeamento Objeto-Relacional (ORM) do *framework* Django. O diagrama de classes do GAV está disponível no Apêndice B, Seção 7.3.

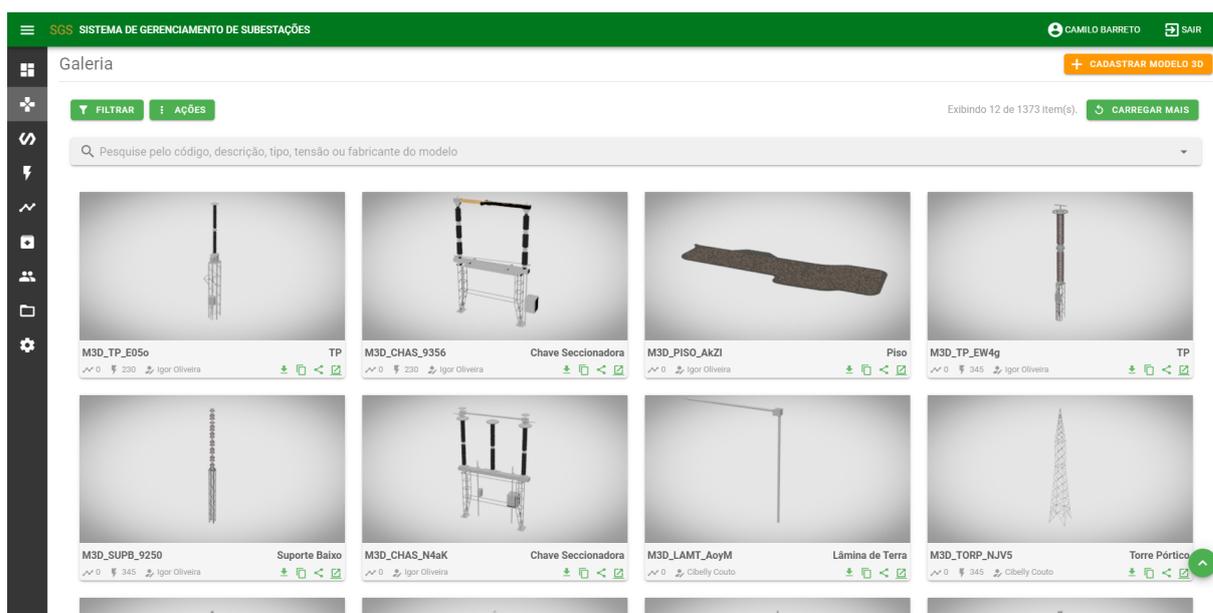
5.7.1.4 Website (frontend)

O Website foi desenvolvido utilizando tecnologias atuais. O sistema de *templates*, *layouts* e componentes visuais foram implementados utilizando HTML, CSS, JavaScript e Vue.JS. A Figura 5.24 apresenta a galeria de modelos 3D registrados no GAV. É possível observar os elementos registrados e a imagem em miniatura para pré-visualização dos modelos 3D. Ao passar o ponteiro do mouse no elemento, uma representação em 360° é exibida. Nesta tela, é possível aplicar filtros de busca e configurar o alvo com o nível de tensão, tipo de equipamento, fabricante e código de identificação.

A Figura 5.25 apresenta a galeria de símbolos registrados e atribuídos a modelos 3D. É possível selecionar o símbolo e analisar os modelos 3D relacionados a ele.

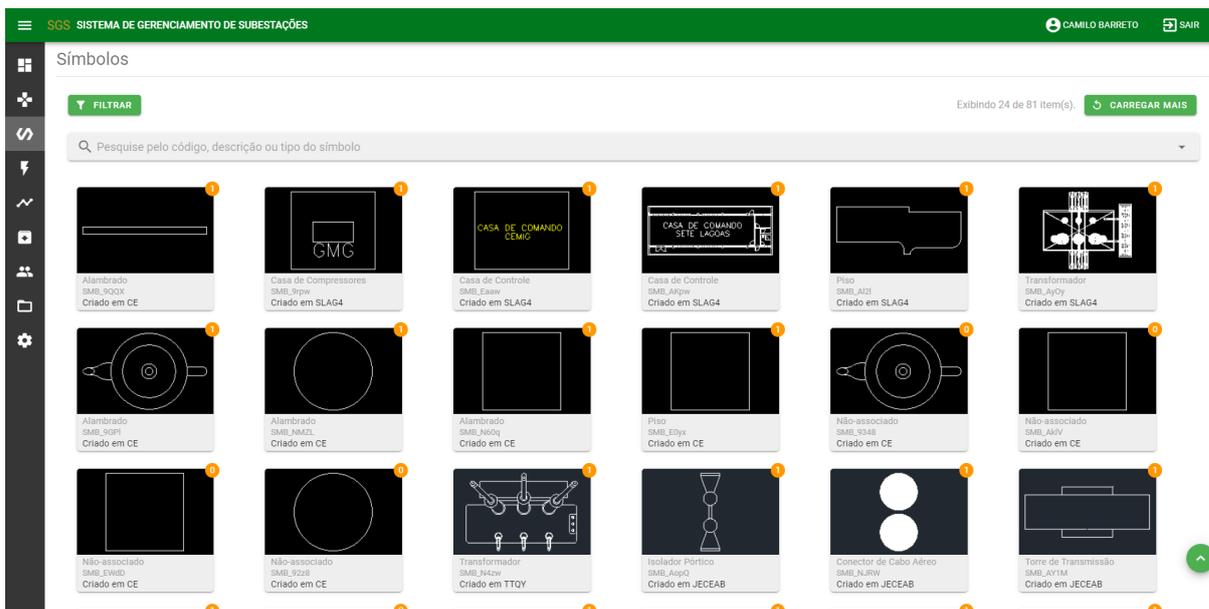
Por fim, a Figura 5.26 apresenta os projetos de subestações e suas informações. É possível observar algumas informações básicas como a sigla do projeto, descrição, usuário projetista, *status*, código do projeto e data da última atualização. Ao selecionar o projeto, outra tela é apresentada ao usuário com informações detalhadas, como as versões históricas, códigos de operação SCADA e arquivos de integração.

Figura 5.24: Galeria de modelos 3D do Gerenciador de Ambientes Virtuais.



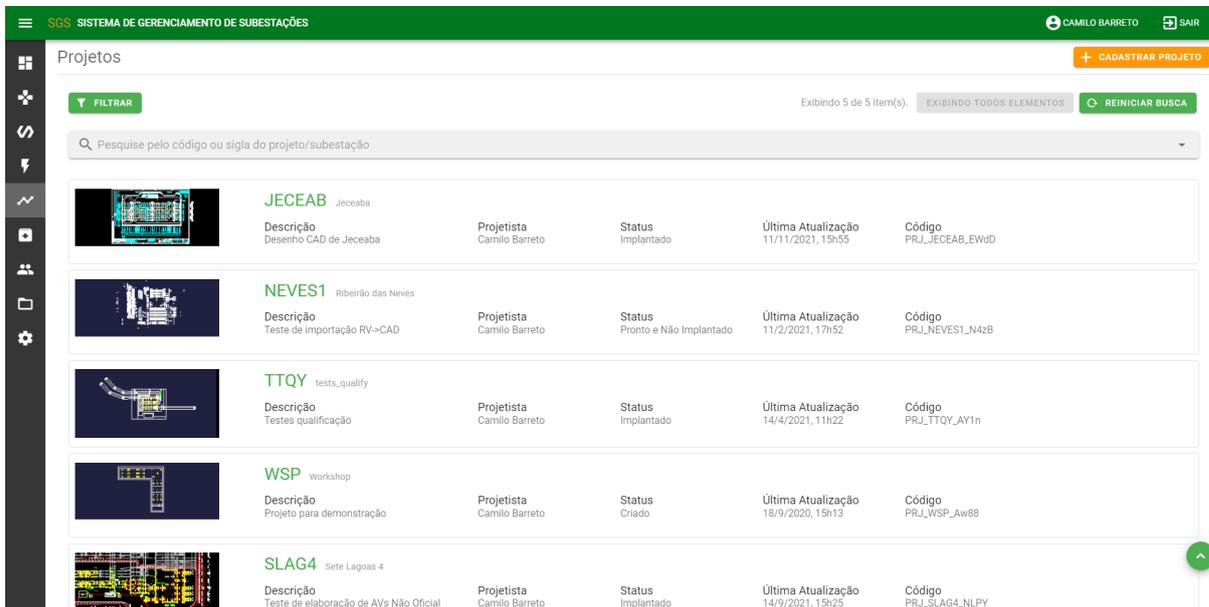
Fonte: o autor.

Figura 5.25: Galeria de símbolos do Gerenciador de Ambientes Virtuais.



Fonte: o autor.

Figura 5.26: Projetos de SEs do Gerenciador de Ambientes Virtuais.



Fonte: o autor.

5.8 Implantação do Sistema Proposto

O Sistema de Autoria foi implantado em um ambiente de testes. Sendo assim, um servidor físico foi configurado com máquinas virtuais para executar os serviços do *Website (frontend)*, pro-

cessos internos (*backend*) e base de dados. Como descrito na Subseção 5.7.1 o GAV é composto por três subsistemas divididos em três VMs. As configurações das VMs para cada subsistema estão representadas na Tabela 5.4.

Tabela 5.4: Configurações de *software* e *hardware* das máquinas virtuais do Gerenciador de AVs.

VM	Especificações	
<i>Frontend</i>	Núcleos de Processador:	2 núcleos de 2Ghz
	Memória:	4Gb
	Armazenamento:	10Gb
	Sistema Operacional:	Ubuntu Server
<i>Backend e</i> Renderizador 360°	Núcleos de Processador:	2 núcleos de 2Ghz
	Memória:	4Gb
	Armazenamento:	128Gb
	Acelerador Gráfico:	Nvidia GeForce 900 Series + Sistema Operacional: Ubuntu Server
Base de Dados	Núcleos de Processador:	2 núcleos de 2Ghz
	Memória:	4Gb
	Armazenamento:	50Gb
	Sistema Operacional:	Ubuntu Server

Fonte: o autor.

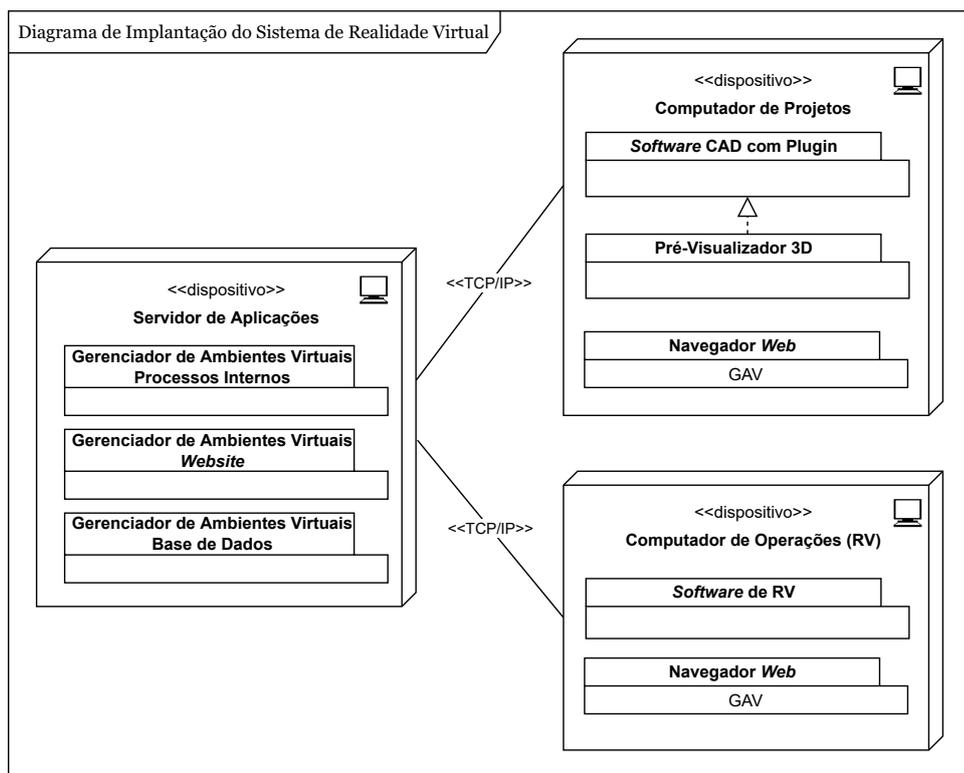
O diagrama de implantação apresentado na Figura 5.27 demonstra como foram dispostos os dispositivos físicos e suas aplicações.

Em um servidor físico, denominado “Servidor de Aplicações”, os serviços de *backend*, *frontend* e base de dados são providos para clientes por meio da *internet* ou rede local utilizando protocolos de comunicação TCP/IP.

O dispositivo denominado “Computador de Projetos” é destinado aos usuários projetistas de subestações ou responsáveis por elaborar planta baixa do SRV. O dispositivo é conectado a *internet* ou rede local para acesso ao Gerenciador de Ambientes Virtuais. O dispositivo possui instalado em seu sistema as aplicações Editor CAD e pré-visualizador 3D.

O dispositivo “Computador de Operações” é destinado ao usuário final. É um computador para realizar a supervisão do sistema de energia elétrica, simulações e um possível treinamento de operadores. O dispositivo é conectado à *internet* ou rede local para acesso ao GAV. O dispositivo possui instalado em seu sistema operacional a aplicação do SRV.

Figura 5.27: Diagrama de implantação do protótipo de sistema.



Fonte: o autor.

Avaliação Experimental

Este capítulo apresenta uma avaliação experimental e relata os resultados obtidos ao aplicar a solução proposta em um Estudo de Caso (EC). O objetivo é alcançar resultados qualitativos e quantitativos, considerando os aspectos de modelagem geométrica, modelagem de símbolos, gerenciamento dos ativos virtuais no GAV, elaboração de planta baixa, precisão do cenário virtual e a integração com SRV visando a supervisão dos ativos e simulação de um cenário hipotético.

Primeiramente, foi avaliada a elaboração dos projetos de subestações em plantas baixas. Sob o propósito de obter informações sobre a produção de AVs através de plantas baixas existentes, inexistentes e a reutilização dos insumos virtuais em diferentes projetos, foi concebida uma subestação real e uma hipotética. Sendo assim, foram aplicadas as etapas de produção de AVs utilizando o SA, apresentadas na Seção [4.2](#).

O objetivo de conceber uma SE hipotética é analisar a capacidade de uso das ferramentas quando não há uma planta baixa previamente desenhada, permitindo que seja experimentado ferramentas de criação, busca, inserção e substituição de símbolos em uma nova SE. Além de analisar a viabilidade de reaproveitamento de ativos virtuais de outra SE.

Foi avaliada a acurácia do cenário virtual criado pelo SA em relação a um cenário concebido manualmente. A finalidade deste experimento foi analisar a precisão do posicionamento dos equipamentos elaborados no ECAD e pela manipulação manual dos modelos 3D no motor de jogos Unity, realizado por uma equipe de usuários especialistas. O objetivo é identificar o impacto relacionado com a imprecisão do AV do SRV para tarefas que podem envolver, planejamento, manutenção e supervisão dos cenários virtuais.

Por fim, foi analisado o desempenho da solução no quesito de conexão de *internet*, transferência de modelos 3D, tempo de reconstrução, fidelidade e qualidade gráfica dos AVs.

6.1 Estudo de Caso

A avaliação experimental foi realizada por meio de um Estudo de Caso aplicado ao projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) de uma concessionária de energia elétrica, que abrange o fornecimento nacional brasileiro. O P&D aborda tópicos de pesquisa em RV para supervisão e treinamento de sistemas elétricos críticos de energia, bem como em interfaces homem-computador, que potencializam os três pilares da RV: interação, imersão e imaginação (SHE-RIDAN, 2000).

A estratégia inicial, adotada em projetos de RV, emprega equipes especializadas em modelagem geométrica, programação e modelagem do cenário 3D. Assim, as cenas são produzidas por métodos manuais com o motor de jogo Unity. Apenas partes do processo de desenvolvimento são realizadas por *scripts* automatizados, para, por exemplo, a inserção e substituição de objetos, listagens de elementos na cena e no processo de criação dos executáveis do *software* de RV. Mesmo com a automatização de alguns processos, há trabalho manual e tempo investido. Dessa forma, a produção e manutenção de SEs virtuais torna-se árdua quando se consideram os processos de implantação, manutenção, tempo, qualidade e equipes especializadas.

Alguns processos de concepção dos cenários virtuais de subestações utilizados no P&D são apresentadas nos trabalhos de Silva (2014), Mattioli (2015) e Barreto Junior (2016), cujas metodologias são baseadas em processos semiautomáticos de posicionamento de equipamentos ou efetuando inserções manuais no cenário virtual.

6.2 Análise da Produção de Ambientes Virtuais de Subestações Elétricas

Para o EC e avaliação da proposta, foi realizado o projeto de planta baixa de uma SE real, que opera em um nível de tensão de 345kV em uma área de cerca de 28.000m².

Outra planta baixa foi projetada de forma hipotética utilizando componentes da primeira. O objetivo é verificar a possibilidade de conceber cenários inexistentes para aplicação em simulações e planejamentos e com possibilidade de aplicação em treinamentos.

A análise de produção de AVs foi baseada na elaboração das subestações:

- **Subestação pertencente a concessionária de energia elétrica:** subestação identificada como SLAG4, sua planta baixa foi concedida pela concessionária e contém o projeto atual com o planejamento de expansão;
- **Subestação hipotética:** subestação concebida baseando-se em arranjos físicos de subestações. Não há ligação com nenhum projeto real, apenas para avaliação de reaproveitamento de ativos virtuais.

A subestação SLAG4 é uma subestação composta por arranjos físicos, onde alguns são supervisionados por outras concessionárias, sendo assim, apenas a área de responsabilidade da

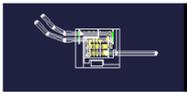
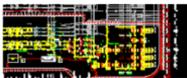
concessionária cedente foi utilizada.

6.2.1 Concepção dos Projetos pelo Sistema de Autoria

O processo de concepção dos AVs utilizou as etapas de produção do Sistema de Autoria composta por: i) modelagem geométrica e de símbolos (insumos); ii) registro dos insumos no GAV; iii) execução do projeto em planta baixa; iv) revisão do projeto e, por fim, a implantação no SRV.

Sendo assim, todos os ativos virtuais foram modelados e cadastrados no GAV. Também, os projetos da subestação SLAG4 e hipotética, foram criados e registrados. A Figura 6.1 apresenta os dois projetos cadastrados no GAV.

Figura 6.1: Projetos das subestações SLAG4 e hipotética cadastrados no Gerenciador de Ambientes Virtuais.

	SESTC <small>SE Sintética</small> Descrição Projeto Sintético para Treinamento	Projetista Camilo Barreto	Status Implantado	Última Atualização 14/4/2021, 11h22	Código PRJ_TTQY_AY1n
	SLAG4 Descrição Teste de elaboração de AVs Não Oficial	Projetista Camilo Barreto	Status Implantado	Última Atualização 14/9/2021, 15h25	Código PRJ_SLAG4_NLPY

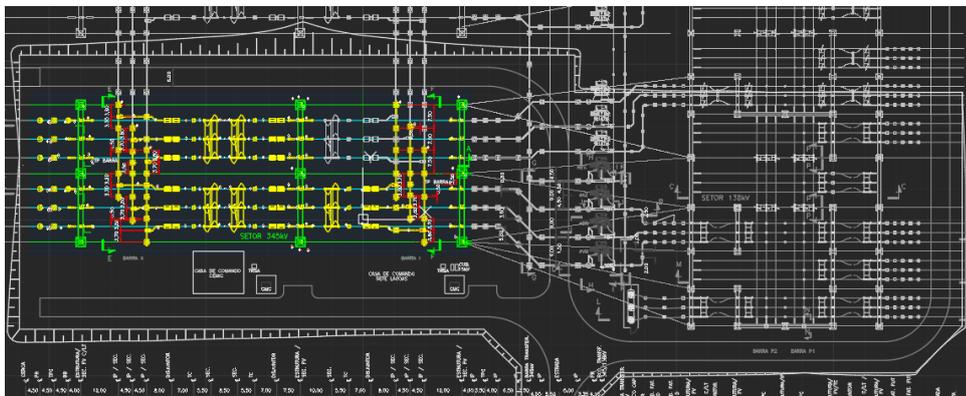
Fonte: o autor.

6.2.1.1 Planta Baixa da Subestação SLAG4

O projeto de planta baixa da subestação SLAG4, foi concedido pela concessionária elétrica para realizar os testes de funcionalidade do Sistema de Autoria. A Figura 6.2 apresenta um fragmento do projeto em planta baixa onde a área colorida representa os equipamentos pertencentes a concessionária, utilizados para elaborar o cenário virtual. A Figura 6.2a apresenta uma fotografia da SE, capturada por satélite, onde a área demarcada com a linha pontilhada em vermelho é utilizada para a análise.

Figura 6.2: Subestação SLAG4 com destaque para área de concessão.

(a) Planta baixa utilizada para elaborar o Ambiente Virtual da subestação.



(b) Vista superior da subestação por captura de satélite.



Fonte: Figura 6.2a elaborada pelo autor, Figura 6.2b adaptado de Google (2020).

Por se tratar de uma planta baixa concluída, a adequação e relacionamento dos símbolos aos modelos 3D foi simples, visto que o processo envolve apenas a seleção do símbolo e seu registro no GAV. Utilizando as convenções de modelagem de símbolos e a ferramenta de registro de novos símbolos, foi possível cadastrar todos.

Após a inserção dos equipamentos, os condutores foram inseridos utilizando a ferramenta de inserção de cabos e de barramentos. Todos os equipamentos responsáveis pela linha de energia elétrica foram conectados entre si.

Ao final de cada turno de trabalho no desenho, realizaram-se as atualizações do projeto no GAV, gerando o versionamento histórico. Sendo assim, a Figura 6.3 apresenta versões históricas do projeto registrados durante o processo de edição.

Figura 6.3: Atualizações do projeto da subestação SLAG4.

Data ↓	Comentário	Usuário	RV	Detalhes
28/10/2020 20:16:33.218	Atualização de conectores aéreos	Camilo Barreto	×	i
27/10/2020 22:33:13.680	Inserindo conectores para cabos aéreos	Camilo Barreto	×	i
27/10/2020 10:26:44.299	Inserção de cabos de transmissão	Camilo Barreto	×	i
27/03/2020 11:19:50.106	Teste de Modificação de modelos	Camilo Barreto	×	i
25/03/2020 17:51:17.947	Inserindo Cabos	Camilo Barreto	✓	i

Fonte: o autor.

6.2.1.2 Projeto da Subestação Hipotética

A subestação hipotética foi elaborada a partir de um documento em branco. Foi desenhada baseando-se em arranjos físicos básicos comumente encontrados nas SEs. O objetivo é validar a reutilização de elementos de outros projetos, dessa forma, a subestação foi concebida reutilizando símbolos da SE SLAG4.

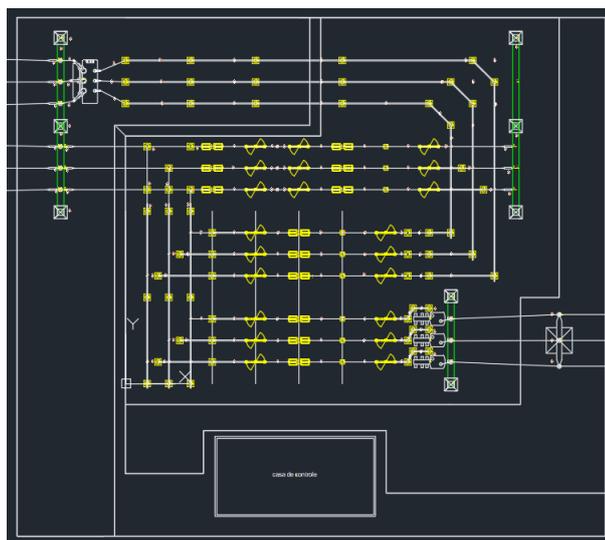
A subestação é composta por dois arranjos físicos do tipo barra simples e um barra simples disjuntor e meio, três linhas de transmissão com um transformador e três indutores. Todos os equipamentos foram conectados por condutores do tipo cabo e barramento, por conexões próximas ao solo e aéreas. O terreno da subestação possui dois pátios, onde um deles está ao nível elevado. No nível elevado está disposto o transformador e as torres do barramento aéreo, nesse sentido, foi necessário utilizar a ferramenta de elevação para definir a altura dos elementos em relação ao nível do solo.

A Figura 6.4 apresenta o desenho da planta baixa da subestação hipotética. Observa-se os três arranjos e o barramento que liga o transformador aos arranjos.

Da mesma forma como foi conduzido no projeto SLAG4, os símbolos foram inseridos por ferramentas de busca e inserção. A princípio, foi necessário inserir no desenho um gabarito com distâncias entre elementos, para facilitar o posicionamento e garantir maior precisão ao Ambiente Virtual.

Durante a elaboração da planta baixa, foram realizadas diversas atualizações no GAV, assim, todas as modificações realizadas em um turno de trabalho foram registradas e disponibilizadas para acesso ao histórico do projeto. A Figura 6.5 apresenta cinco versões históricas trabalhadas.

Figura 6.4: Planta baixa da subestação hipotética.



Fonte: o autor.

Figura 6.5: Atualizações do projeto da subestação hipotética.

Data ↓	Comentário	Usuário	RV	Detalhes
25/10/2020 18:14:43.985	Subestação concluída!	Camilo Barreto	✓	
25/10/2020 18:14:15.397	Subestação concluída!	Camilo Barreto	✗	
25/10/2020 15:44:29.530	Piso inserido	Camilo Barreto	✗	
22/10/2020 23:29:0.227	Editando o piso	Camilo Barreto	✗	
22/10/2020 23:22:10.605	Edição do piso	Camilo Barreto	✗	

Fonte: o autor.

6.2.2 Modelagem 3D e de Símbolos

A modelagem dos elementos das subestações foi realizada seguindo as regras de convenção apresentadas no Capítulo 4. O *software* utilizado foi o AutoDesk 3Ds Max.

Desta forma, a Figura 6.6 apresenta resumidamente os elementos modelados e utilizados nos projetos das duas subestações. Os modelos 3D utilizados nas subestações são:

- **Subestação SLAG4:** terreno e pátio, bobina carrier, chave seccionadora pantográfica, chave seccionadora com dupla abertura lateral, disjuntor, isolador de um cabo, isolador de dois cabos, para raios, ponte pórtico modelo 1, ponte pórtico modelo 2, suporte alto, suporte baixo, tc, tp, torre pórtico, torre transmissão, casa de controle modelo 1, casa de controle modelo 2 e casa do gerador;

- **Subestação hipotética:** terreno e pátio, casa de controle, chave seccionadora com dupla abertura lateral, disjuntor, indutor, isolador de um cabo, ponto pórtico, suporte alto, suporte baixo, tc, torre pórtico, torre transmissão e transformador.

Cada modelo foi elaborado foi otimizado, proporcionando o mínimo de polígonos possíveis. Tendo em vista que uma subestação é composta por muitos elementos, a otimização garante desempenho em computadores simples. Assim, modelos 3D otimizados não perdem a credibilidade visual e mantém a forma física e visual.

As texturas foram produzidas utilizando imagens processadas digitalmente, com dimensões máximas de 800 píxeis. Desta forma, ao executar o SRV em computadores sem placa gráfica dedicada, o tempo de carregamento das texturas e materiais é reduzido.

Cada modelo foi submetido a um *checklist* de validação com as regras descritas nas convenções de modelagem, logo, a validação garante a modelagem correta para a inserção na biblioteca de modelos.

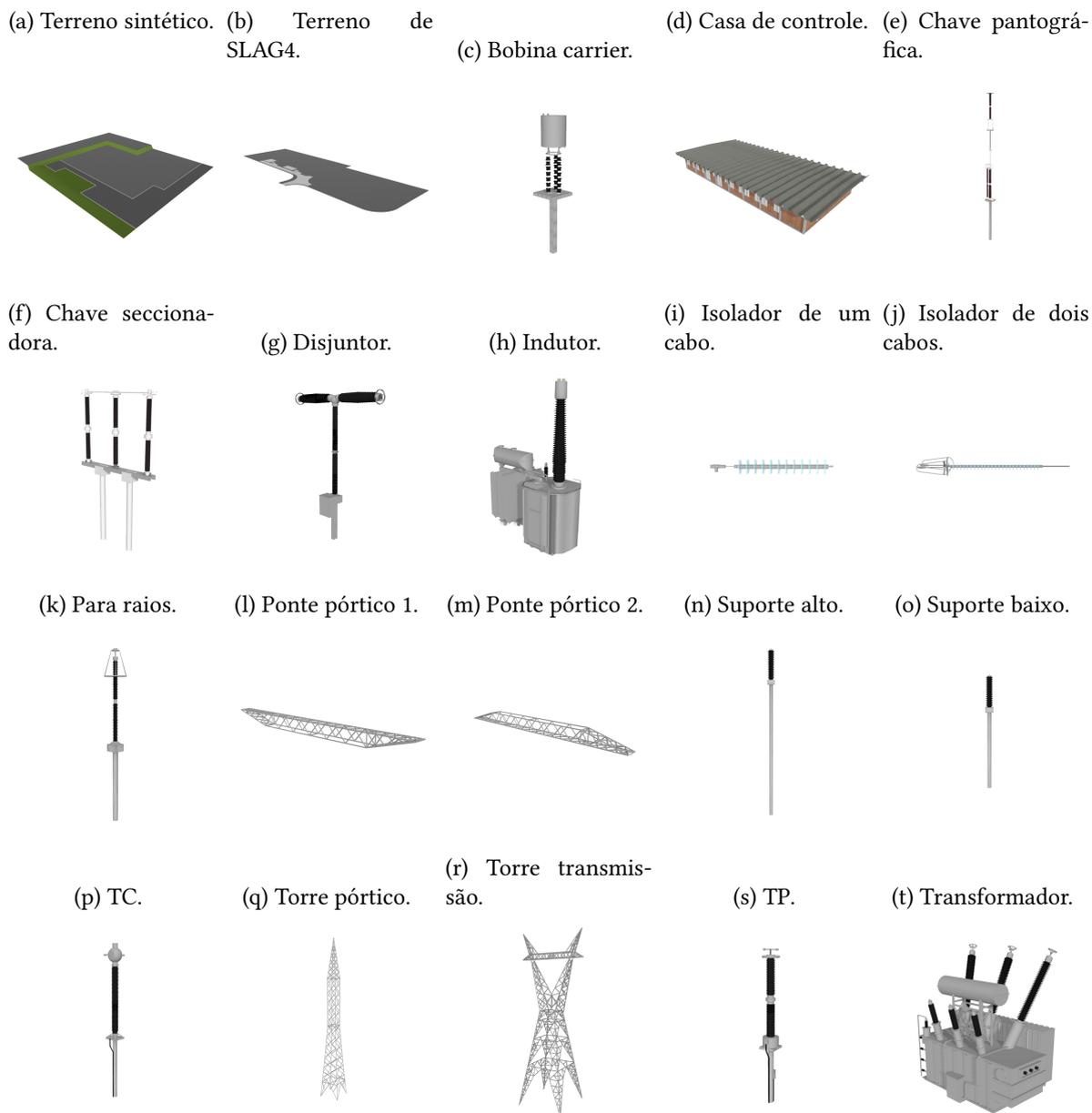
Pode-se observar na Figura 6.6 o alto nível de detalhe, que garante ao usuário um nível elevado de imersão e credibilidade.

Todas as dimensões foram coletadas e passadas aos modelos 3D por manuais e *datasheets* dos fabricantes. Desta forma, os AVs são todos elaborados com dimensões reais, garantindo a fidelidade com o ambiente real.

Os símbolos foram extraídos da planta baixa cedida pela concessionária. O processo de cadastro foi realizado utilizando o ECAD. Para cada símbolo cadastrado, foi atribuído um modelo 3D, referente à Figura 6.6. A Figura 6.7, no que lhe concerne, apresenta os símbolos utilizados para a elaboração das plantas baixas das SEs.

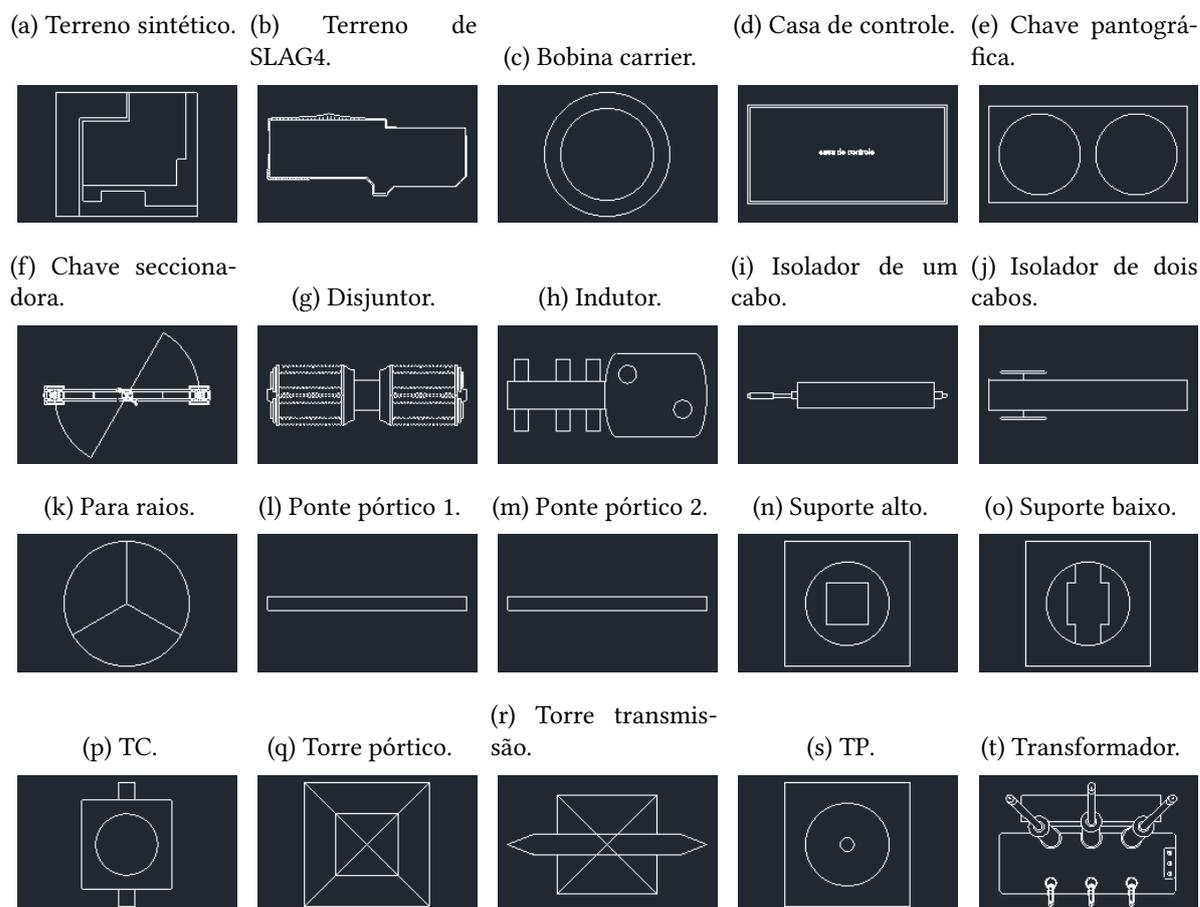
Após a modelagem, todos os elementos foram registrados no GAV. Durante o processo de registro, foram inseridos os modelos 3D no formato editável (.max) e exportado (.fbx), associação dos símbolos quando necessário e as fotografias reais dos equipamentos quando disponíveis.

Figura 6.6: Modelos utilizados para a concepção dos AVs.



Fonte: o autor.

Figura 6.7: Símbolos utilizados para a concepção das plantas baixas.



Fonte: o autor.

6.2.3 Análise Visual dos Ambientes Virtuais Concebidos

Nesta subsecção são analisados os cenários virtuais gerados pelo módulo de reconstrução do SRV e pré-visualizador. Desta forma, são destacados os AVs das subestações SLAG4 e hipotética, visando detalhes da modelagem geométrica como, credibilidade dos elementos, texturas, materiais, condutores e o ambiente virtual.

6.2.3.1 Análise Visual da Subestação SLAG4

A Figura 6.8 apresenta imagens da subestação virtual de SLAG4. Observa-se na Figura 6.8a a visão geral dos arranjos pertencentes a concessionária, composta por três pórticos, dois arranjos do tipo “barra simples disjuntor e meio”, dois barramentos de transferência e duas linhas de transmissão.

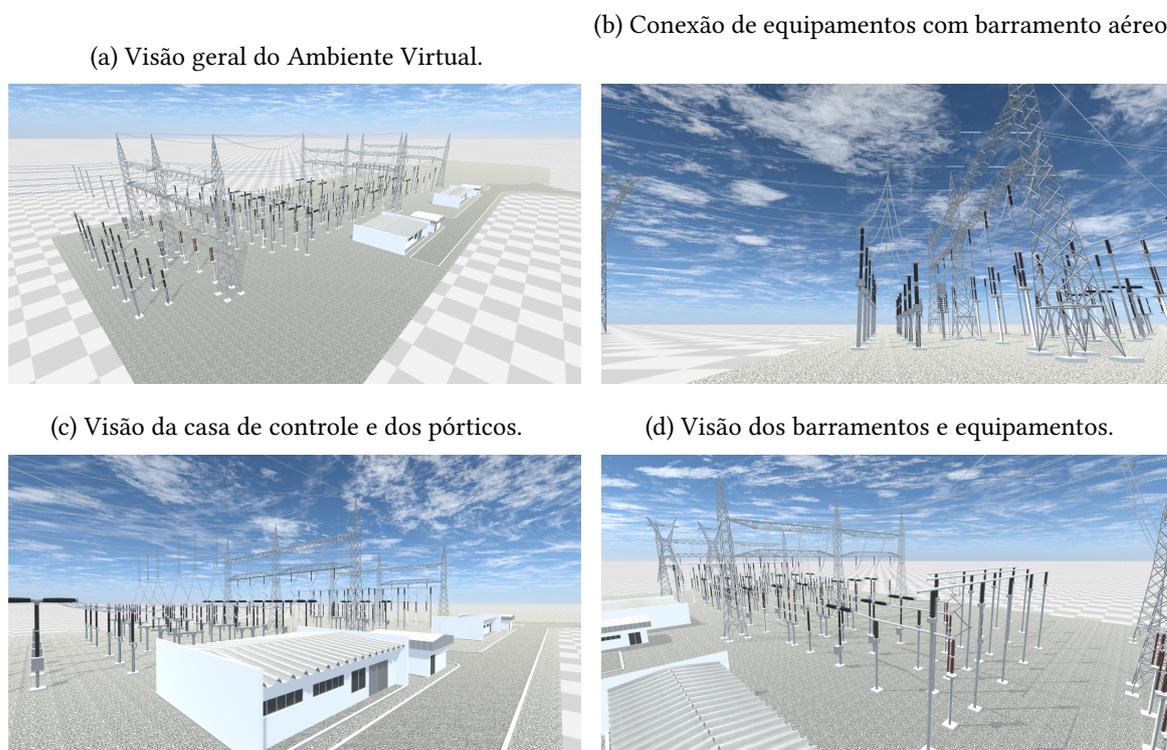
Em relação às conexões de condutores, pode-se observar na Figura 6.8b a conexão entre TP e Para Raios em uma linha de transmissão. A conexão possui uma confluência para um par de cabos interligados no barramento aéreo. Já nas Figuras 6.8b e 6.8d, observa-se os cabamentos

aéreos para segurança de descargas aéreas e o cabeamento entre os equipamentos. Da mesma forma, pode-se observar os barramentos rígidos.

Todas as imagens apresentadas na Figura 6.8 mostram os equipamentos com uma base de cimento de apoio ao solo. Essa base é o apoio estrutural para suportar o peso dos equipamentos. Como no ambiente real, as bases foram inseridas no AV para ter credibilidade.

Zhao (2011) apresentou alguns desafios necessários para que os modelos 3D sejam definidos como cópias exatas. Nesse sentido, é complexo afirmar que os elementos são idênticos aos reais, contudo, é possível observar que a modelagem geométrica dos equipamentos e do AV possuem um alto nível de credibilidade e semelhança.

Figura 6.8: Ambiente Virtual da subestação SLAG4.



Fonte: o autor.

Para comparar o AV com o ambiente real, a Figura 6.9 apresenta três imagens para serem observadas. As figuras 6.9a, 6.9c e 6.9e são fotografias capturadas durante uma visita à subestação, enquanto as figuras 6.9b, 6.9d e 6.9f são os Ambientes Virtuais referentes às fotografias.

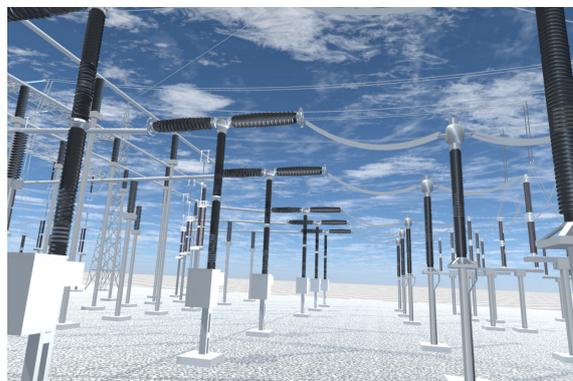
Portanto, pode-se observar as semelhanças entre as imagens reais e a virtuais. Mesmo com os níveis de detalhes limitados dos ativos virtuais, não há perdas significativas em relação à credibilidade e fidelidade dos objetos.

Figura 6.9: Subestação real e virtual de SLAG4.

(a) Fotografia dos disjuntores e transformadores de corrente.



(b) Ambiente Virtual dos disjuntores e transformadores de corrente.



(c) Fotografia de um barramento elétrico.



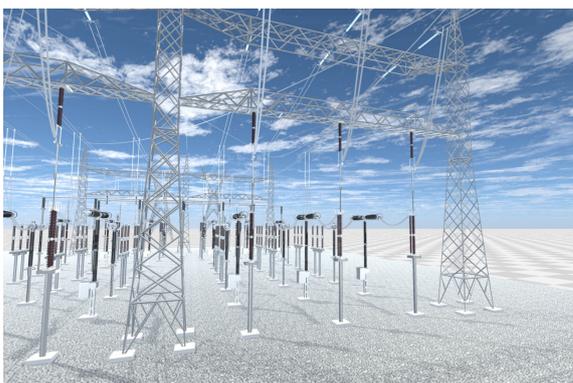
(d) Ambiente Virtual na área do barramento elétrico.



(e) Fotografia de um pórtico e suas chaves pantográficas.



(f) Ambiente Virtual do pórtico e suas chaves pantográficas.



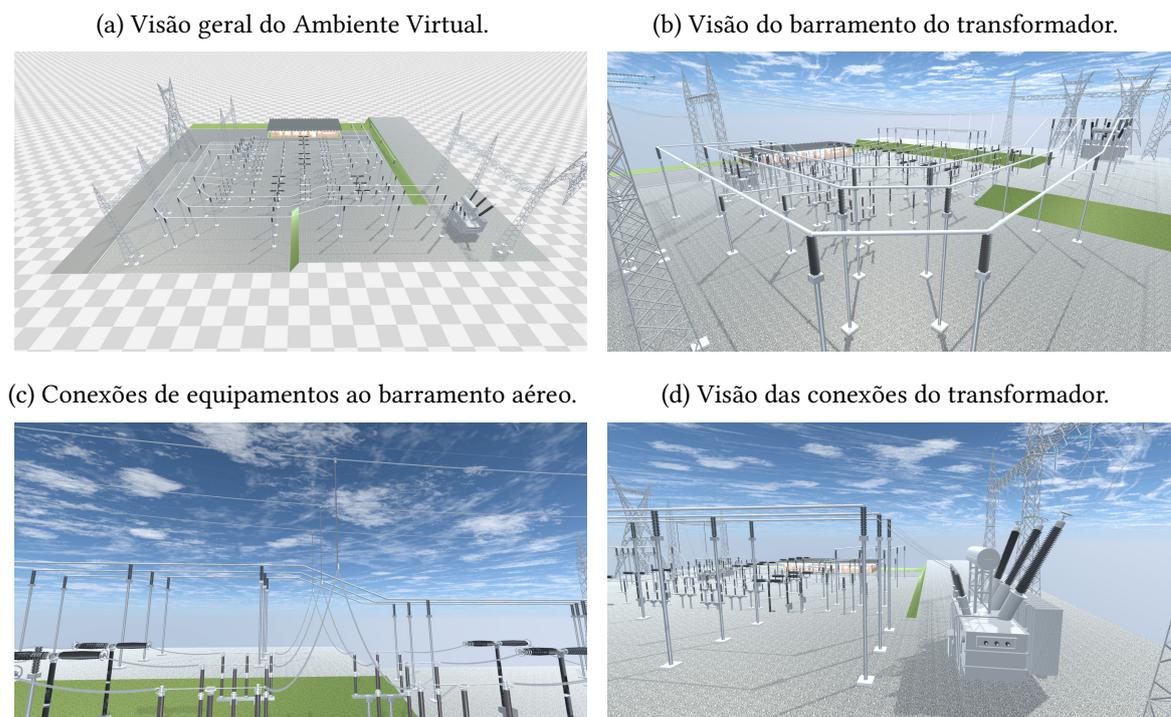
6.2.3.2 Análise Visual da Subestação Hipotética

A Figura 6.10 apresenta imagens da subestação virtual hipotética. A Figura 6.10a mostra a visão geral da subestação hipotética. Observa-se ao fundo, a casa de controle da SE. É possível ver os detalhes da modelagem geométrica dos elementos e do cenário virtual, como o barramento da Figura 6.10b, que mostra os detalhes do ângulo de 90 graus e os cabos em bifurcação na

Figura 6.10c.

A Figura 6.10d, no que lhe concerne, mostra os detalhes de modelagem geométrica de um transformador e sua conexão com o barramento. O transformador possui outra conexão via cabos em direção ao pórtico e em seguida para a linha de transmissão.

Figura 6.10: Ambiente Virtual da subestação hipotética.



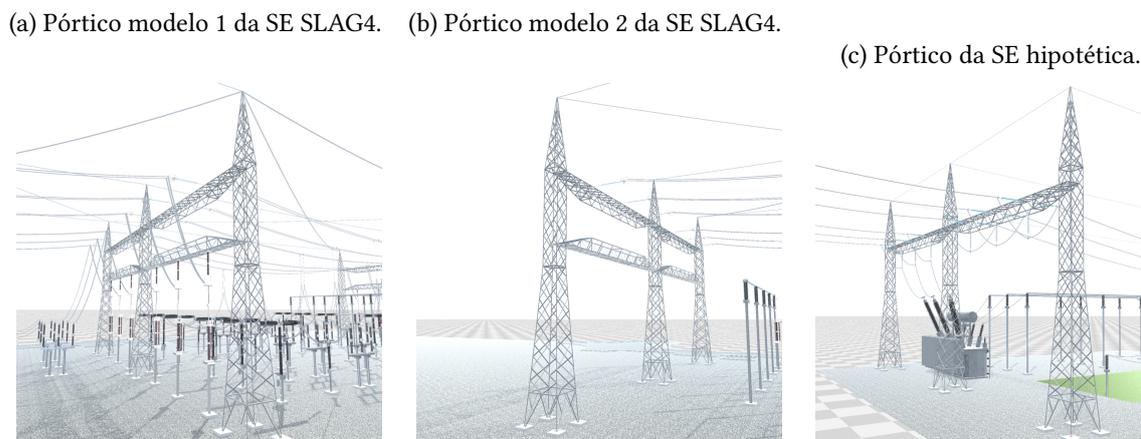
Fonte: o autor.

6.2.4 Detalhes dos Ambientes Virtuais

Nesta subseção, são apresentados os detalhes que evidenciam a credibilidade dos AVs em relação aos reais. Desta forma, a Figura 6.11 exibe três imagens da reconstrução dos pórticos nas subestações SLAG4 e hipotética. As Figuras 6.11a e 6.11b apresentam a mesma configuração com duas pontes, porém, a primeira se difere por possuir chaves pantográficas conectadas a ponte.

A Figura 6.11c, entretanto, mostra uma configuração simples com apenas uma ponte suportando os isoladores de barramento aéreo. O problema de definir a altura de elementos acima do solo foi solucionado com uma ferramenta desenvolvida para o ECAD, a qual define previamente as alturas que serão utilizadas no projeto e posteriormente atribui-se ao símbolo.

Figura 6.11: Reconstrução das torres e pórticos.



Fonte: o autor.

Os condutores que interligam os equipamentos são criados em tempo de execução, assim, não há a necessidade de modelar esses elementos. Eles se adequam a qualquer configuração de arranjo físico.

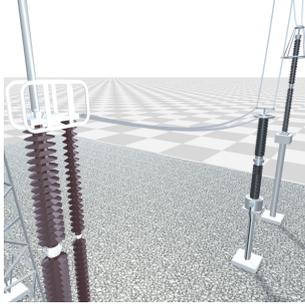
A Figura 6.12 demonstra exemplos de conexões entre equipamentos realizadas por cabos. Ao serem desenhados na planta baixa, o projetista define a espessura e curvatura dos cabos, sendo assim, pode-se observar nas Figuras 6.12a e 6.12e as diferenças na curvatura dos cabos.

Há equipamentos interligados aos barramentos aéreos (cabos aéreos entre pórticos), como a apresentada na Figura 6.12b. Desta forma, quando há necessidade de bifurcação do condutor, um elemento do tipo conector é inserido no local. Há cabos interligados por meio de dois isoladores aéreos, como pode-se observar nas Figuras 6.12c e 6.12f, e cabos conectando dois barramentos, como apresentado na Figura 6.12f.

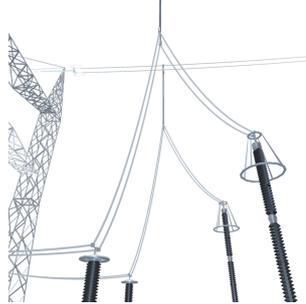
Os barramento interligam os equipamentos por meio de barras metálicas, como apresentadas nas imagens da Figura 6.12d. As Figuras 6.13a e 6.13b apresentam a conexão entre chaves seccionadoras e um barramento principal utilizando suportes baixos para apoio das barras. A Figura 6.13c mostra a conexão de equipamentos em barras de transferências, há um conjunto de chaves seccionadoras que realizam o chaveamento entre os arranjos e o barramento.

Figura 6.12: Conexões por cabos condutores.

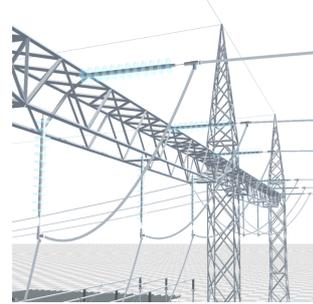
(a) Cabos entre chave seccionadora e TP.



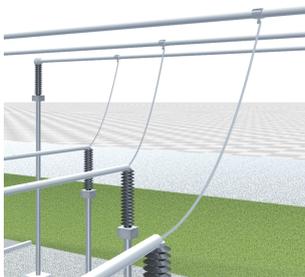
(b) Cabos em barramento aéreo.



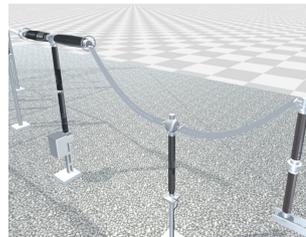
(c) Cabos e isoladores de pórticos.



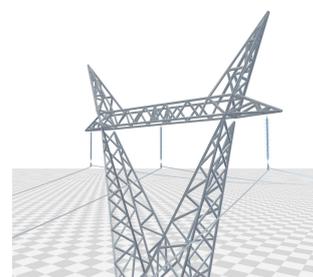
(d) Cabos ligados ao barramento.



(e) Cabos entre equipamentos.



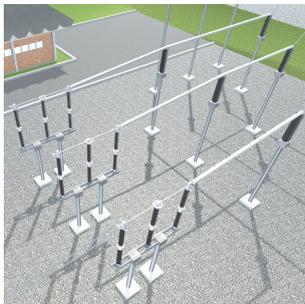
(f) Cabos e isoladores em torre de transmissão.



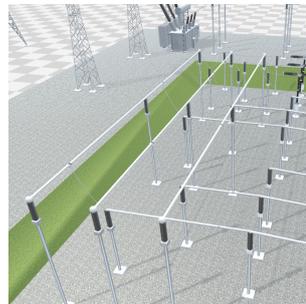
Fonte: o autor.

Figura 6.13: Conexões por barramentos condutores.

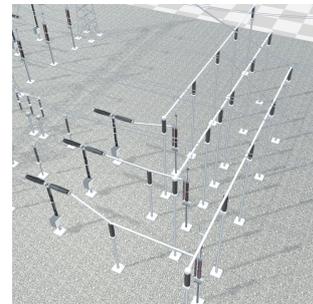
(a) Conexão entre equipamentos e barramento.



(b) Conexão entre dois barramentos.



(c) Disjuntor conectado ao barramento de transferência em outra localidade.



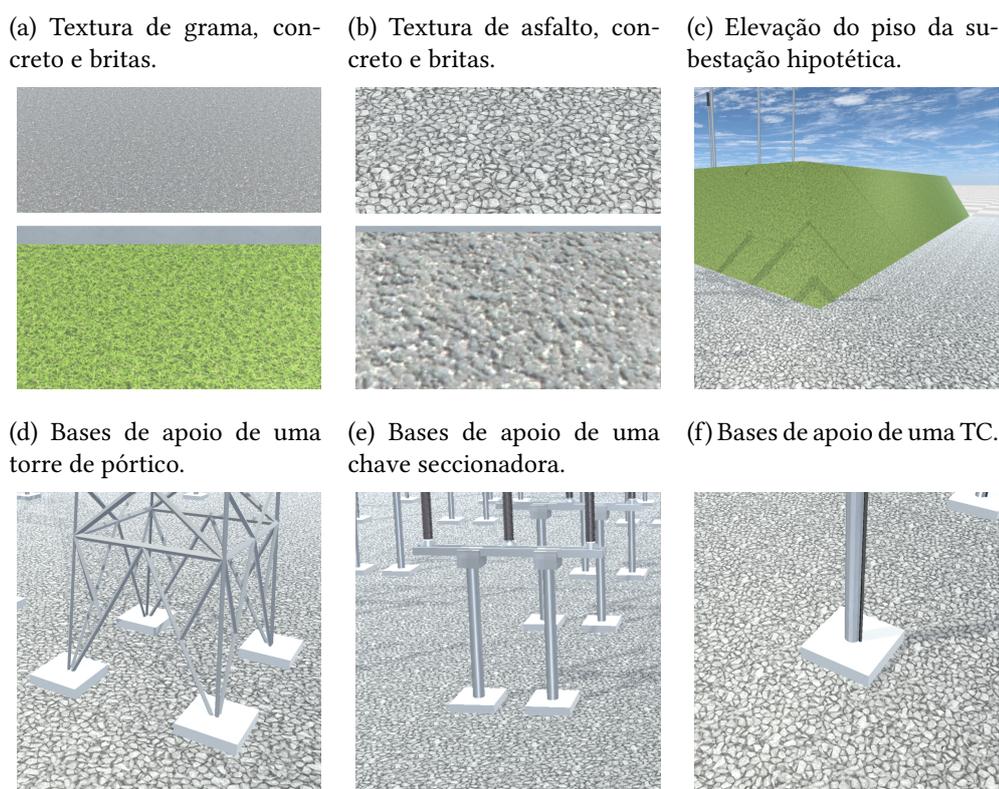
Fonte: o autor.

Os detalhes dos terrenos e pátios são extremamente importantes para elevar o nível de credibilidade e imersão. As modelagens geométricas dos terrenos foram realizadas para maximizar a experiência dos usuários. As imagens da Figura [6.14](#) demonstram os detalhes da

modelagem, enquanto as Figuras 6.14a e 6.14b mostram as texturas de gramas, britas, asfaltos e concreto. Há na Figura 6.14c, uma elevação no terreno do pátio da subestação hipotética.

Alguns elementos possuem bases de apoios de concreto, há elementos que possuem de uma a seis bases de apoio, como as apresentadas nas Figuras 6.14d, 6.14e e 6.14f referentes a quatro bases, duas bases e uma base, respectivamente. As referências para as bases de apoio são inseridas no momento da modelagem, onde são descritas nas convenções.

Figura 6.14: Detalhes nos pátios das subestações SLAG4 e hipotética.



Fonte: o autor.

Os ambientes virtuais das SEs apresentaram credibilidade visual, construtiva e comportamental. O alcance de tal fidelidade é resultado da modelagem geométrica, utilizando como referência documentos CAD, diagramas e imagens de referência dos equipamentos. A credibilidade construtiva aqui alcançada é resultado da utilização do ECAD e do sistema de reconstrução do SRV, que processou e aplicou as matrizes de transformação (posição, rotação e escala) aos ativos virtuais e inserção dos condutores elétricos. Além disso, foi possível representar os estados comportamentais e do equipamento por meio de informações visuais (etiquetas e destaques), bem como as animações de abertura e fechamento das seccionadoras.

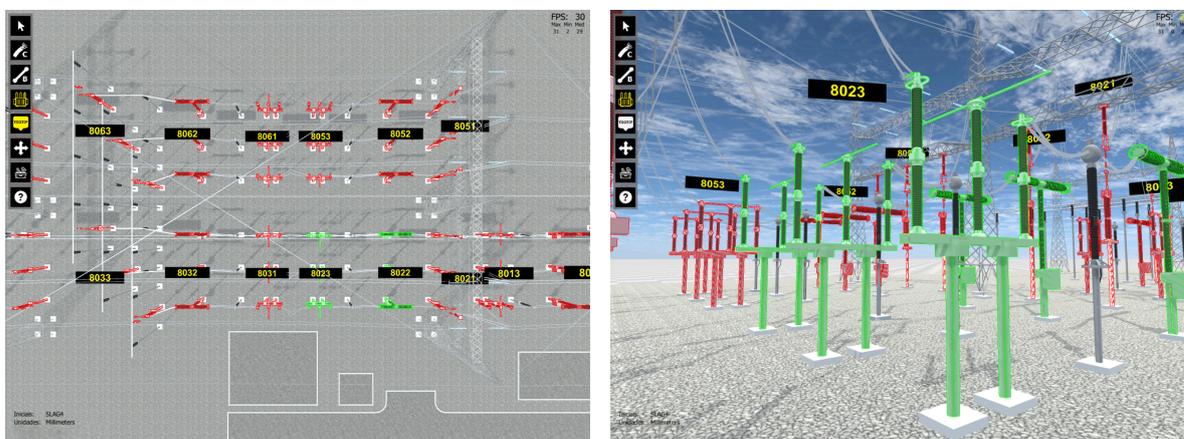
6.3 Sistema de Supervisão

A Figura 6.15 apresenta os resultados para o modo de supervisão do SRV aplicado na subestação SLAG4, utilizando uma simulação de *status* fornecida por um sistema SCADA simulado. Este modo de supervisão possibilita a visualização dos estados dos equipamentos em tempo real, enquanto navega pelo AV. Acima dos equipamentos trifásicos, há uma etiqueta de identificação com o código de operação utilizado pelo sistema de supervisão.

A Figura 6.15a demonstra a vista superior da SE e a identificação dos equipamentos nos arranjos. Os elementos destacados em vermelho representam os equipamentos em estado de circuito fechado (energizado) e em verde em estado de circuito aberto (não energizado), conforme definido pelos padrões da concessionária. A Figura 6.15b mostra uma perspectiva em primeira pessoa de uma chave seccionadora com dupla abertura lateral destacada em verde, identificada com o código 8023. Observa-se que os braços cruzados entre os terminais estão em posição de circuito aberto, refletindo em representação visual o estado do equipamento real através dos dados de supervisão.

Figura 6.15: Supervisão simulada da subestação SLAG4.

- (a) Vista superior com destaque para as etiquetas com identificações dos ativos.
- (b) Chave seccionadora com dupla abertura lateral em estado aberto (verde/não energizado) com equipamentos de fundo em estado fechado (vermelho/energizado).



Fonte: o autor.

6.4 Precisão dos Elementos dos Ambientes Virtuais

Um problema na concepção manual de SEs virtuais para engenharia diz respeito aos erros no posicionamento dos elementos no cenário virtual. Em algumas situações, a diferença de posicionamento entre o AV e o ambiente real pode levar a problemas técnicos, como, por exemplo, em planejamento de manutenção, ampliação, licitação de materiais, serviços e até mesmo

influenciar no entendimento espacial dos ativos. Desta forma, uma análise das possíveis desigualdades foi realizada.

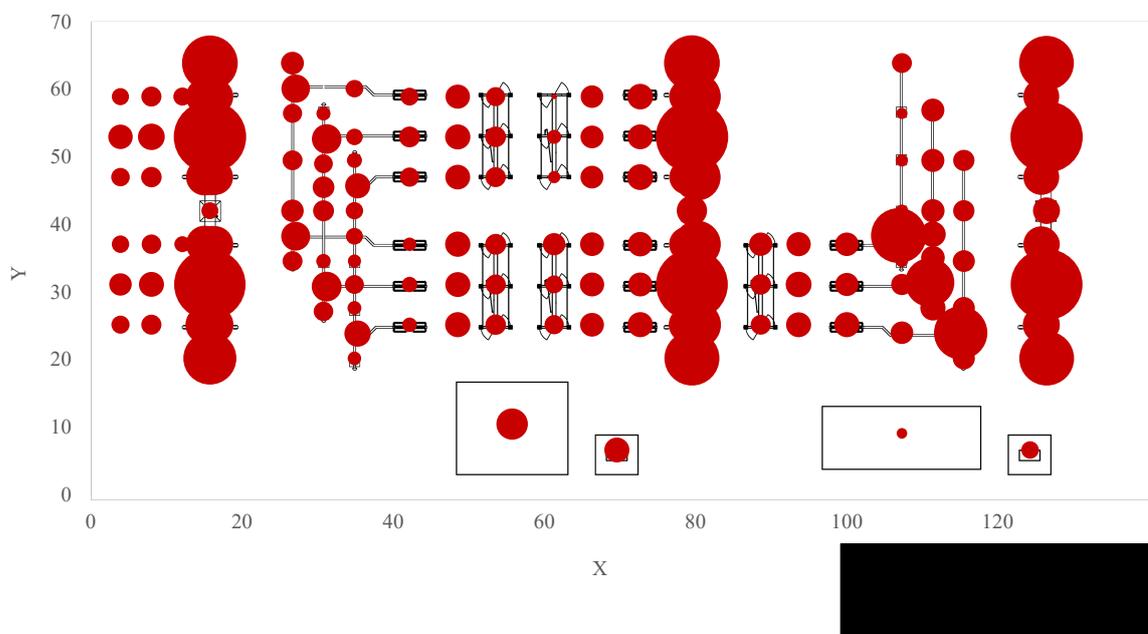
A análise foi conduzida utilizando a SE SLAG4 em dois AVs, um concebido manualmente e outro concebido pelo Sistema de Autoria, ambos do P&D citado. O cenário virtual utilizado foi desenvolvido por uma equipe especializada utilizando técnicas de posicionamento manual. A produção do cenário foi realizada sem que a equipe soubesse dos testes de precisão, visto que essa informação poderia influenciar o resultado.

Pressupõe-se que a planta baixa da SE SLAG4, preparada e fornecida pela companhia de energia elétrica, possui o correto posicionamento dos elementos, visto que é o artefato de referência para realização da obra. Neste sentido, considera-se a planta baixa fornecida, referência base para os testes.

Através de um *script* automatizado, os dados de posicionamento dos ativos virtuais, produzidos tanto manualmente quanto pelo SA, foram extraídos e comparados, resultando em informações sobre as diferenças de posicionamento entre eles.

A Figura 6.16 apresenta um gráfico de bolhas que evidenciam os erros de posicionamento entre a metodologia de concepção manual e a metodologia do SA. Cada bolha representa um ativo virtual posicionados no plano XY. O raio de cada bolha é proporcional à diferença (erro) de posicionamento entre a metodologia de concepção manual e pelo SA.

Figura 6.16: Erros de posicionamento manual de equipamentos em comparação com a metodologia do Sistema de Autoria.



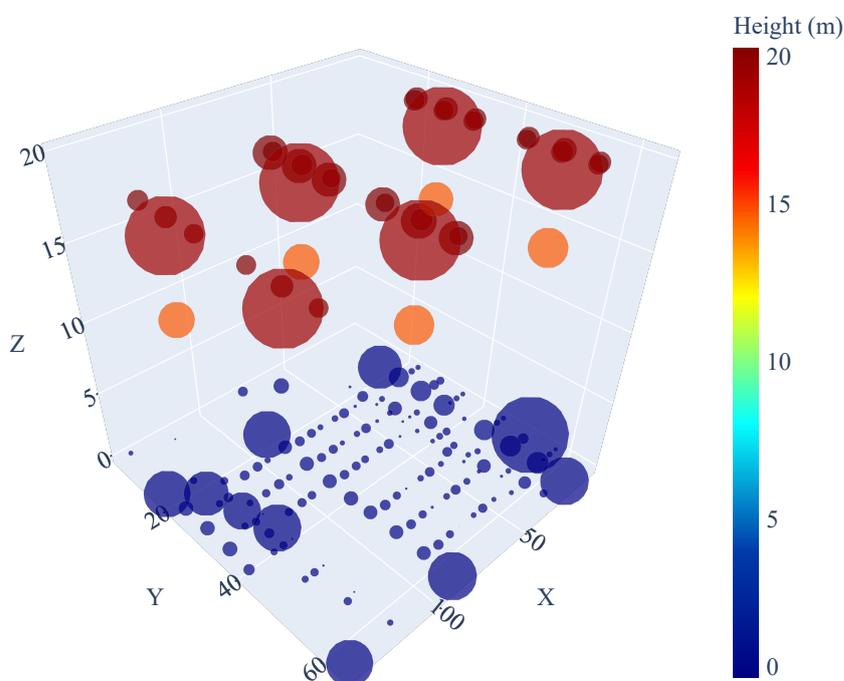
Fonte: o autor.

O diâmetro da bolha representa o erro em distância euclidiana dos AVs concebidos utilizando as duas metodologias. Os valores de erro variam de 6,5mm a 1221,7mm. A média de

erro está relacionada aos elementos posicionados acima do nível do solo, como, por exemplo, pontes de pórtico e isoladores para cabeamento aéreo.

A Figura 6.17 complementa as informações de posicionamento apresentadas na Figura 6.16. O gráfico apresenta o posicionamento 3D dos equipamentos, onde o plano XY representa a posição do equipamento no solo e o eixo Z representa a altura do equipamento. A cor das bolhas também representa a altura em relação ao solo, onde os valores de $Z \approx 0\text{m}$ estão em azul, $Z \approx 15\text{m}$ estão em laranja e $Z \approx 20\text{m}$ estão em marrom. Há também a variação de altura próxima a 0m, não visível no gráfico (-0,05m, -0,02m, 0,2m), e próximo a 20m (18,85m, 19,72m, 19,78m), demonstrando assim a diferença de posicionamento entre as duas versões.

Figura 6.17: Gráfico espacial mostrando a altura do equipamento e os erros de posicionamento da metodologia de projeto manual.



Fonte: o autor.

Cerca de 76,58% dos equipamentos estão posicionados ao nível do solo. Os erros médios são caracterizados pela imprecisão do posicionamento manual no plano XY, que representa 52,27% dos erros de posicionamento para a SE produzida manualmente.

Aproximadamente 23,42% dos equipamentos estão posicionados acima do solo. No entanto, estes equipamentos representam 47,72% dos erros para todo o AV. Portanto, a proporção de erros é maior em equipamentos posicionados acima do solo. A imprecisão do posicionamento de equipamentos aéreos pode estar relacionada a complexidade de manipulação dos elementos nos eixos tridimensionais, que exige maior rigor do usuário durante a manipulação.

Diante das evidências levantadas, observa-se que a metodologia utilizada pelo SA pode propiciar maior nível de acurácia em relação ao AV produzido manualmente em motores de jogos. Vale salientar que isso não impossibilita que os AVs produzidos manualmente sejam aplicados em determinadas tarefas, porém, limita-se o uso quando a acurácia é uma característica importante.

6.5 Desempenho do Processo de Reconstrução de Ambientes Virtuais

Foram realizados testes de desempenho aplicados ao processo de reconstrução dos AVs. O objetivo foi verificar se o sistema proposto satisfaz os requisitos para a supervisão de SEs. O tempo de carregamento dos AVs é um aspecto importante quando se trata de supervisão, onde as mudanças de cenários virtuais nos sistemas críticos de energia elétrica devem ser o menor possível.

Além do tempo para carregamento dos AVs, o tempo para atualização das informações visuais que o SRV proporciona é importante para que o usuário se sinta imerso. Desta forma foram realizados testes de tempo de atualização dos Quadros por Segundo dos AVs desenvolvidos e executados pelo Sistema de Autoria.

Os resultados estão dispostos no [APÊNDICE C - Análise de Desempenho](#).

Conclusões e Trabalhos Futuros

Este estudo propôs um Sistema de Autoria baseado na concepção de AVs através de projetos de engenharia em plantas baixas visando facilitar o desenvolvimento de cenários para RV e possibilitar sua aplicação como ferramenta auxiliar para supervisão de ativos em campo e possivelmente em treinamentos de operadores do sistema elétrico.

Foi apresentada uma arquitetura de *software* cliente-servidor composta por *software* de gerenciamento de AVs, editor CAD e *software* de RV. Para avaliar a proposta, foi realizado um Estudo de Caso aplicado ao desenvolvimento de SEs por meio de um projeto de P&D.

A metodologia proposta mostrou-se aplicável na produção de Ambientes Virtuais para SEs, possibilitando usuários finais utilizarem o SA. Devido à representação bidimensional das plantas baixas, acreditamos que o Sistema de Autoria facilitou a elaboração de projeto em comparação com o desenvolvimento utilizando motores de jogo. Um motivo para esse problema é que a manipulação de elementos no espaço 3D é complexa e pode gerar dificuldades durante o posicionamento de ativos virtuais, situação essa, não acontece no espaço 2D de plantas baixas.

A arquitetura de *software* proposta foi desenvolvida considerando as lacunas encontradas nos trabalhos relacionados, visto que não abordam estratégias de gerenciamento de integração entre softwares CAD e RV no contexto de SEs. Assim, a arquitetura proporcionou comunicação via *internet* entre o ECAD, o GAV e o sistema supervisor da concessionária de energia elétrica.

O processo de projeto de SEs apresentou resultados relevantes. Foi possível analisar o desempenho associado à arquitetura de *software* utilizando o ECAD com o GAV e o SRV. Os ativos virtuais (símbolos, modelos 3D, plantas baixas, documentos, etc.) foram cadastrados no GAV e utilizados pelo SA durante os processos de projetos das subestações SLAG4 e hipotética, demonstrando a possibilidade de reutilização dos elementos virtuais durante o processo de concepção. Conseqüentemente, as instâncias do SRV são mantidas atualizadas, garantindo assim que todos os AVs utilizados pelo usuário sejam idênticos e atuais.

A manipulação de símbolos em plantas baixas abre a oportunidade de posicionamento com alto nível de acurácia, conforme apresentado nas Figuras 6.16 e 6.17, que demonstram os erros

devido à metodologia de concepção manual de projeto de SEs por motores de jogos. Também demonstramos que equipamentos aéreos (posicionados acima do solo) são mais suscetíveis a erros de posicionamento devido à complexa tarefa de manipulação no espaço tridimensional. Portanto, a utilização do Sistema de Autoria descrito neste trabalho emprega ferramentas apropriadas para fornecer uma posição correta.

O posicionamento de elementos nos cenários virtuais de SEs é relevante em situações que necessitam de precisão, por exemplo, em simulações de transporte de equipamentos e tráfego de caminhões entre arranjos. Outro exemplo é a análise de substituição de equipamentos e adição de arranjos físicos de subestações, onde as distâncias entre os elementos devem ser idênticas às inseridas na planta baixa.

O processo de elaboração de SEs e sua integração com o SRV apresentaram bons resultados. Foram produzidas duas SEs e integradas ao SRV. Seus ativos virtuais foram inseridos no GAV e utilizados durante o processo de produção da planta baixa, o que permitiu o reaproveitamento dos elementos e melhor controle do que é aplicado nos projetos de RV.

A integração e reconstrução das SEs foram realizadas adequadamente, conforme mostram as Figuras 6.8, 6.9 e 6.10. Todos os elementos desenhados na planta baixa foram posicionados em suas respectivas posições, reproduzidos fielmente no ambiente de RV. Bases de concreto e condutores elétricos foram criados e posicionados com precisão. Nenhum erro foi relatado ou observado durante e no final do processo.

A disposição dos elementos na arquitetura do *software*, abriu a possibilidade de inclusão de um serviço *Web* de supervisão, fornecido pela concessionária de energia elétrica. Através da *internet*, o SRV acessou com sucesso os dados de supervisão simulado e apresentou ao usuário os estados dos ativos em tempo real durante a navegação. Todas as informações visuais apresentadas na Figura 6.15 são provenientes dos metadados registrados no GAV e atribuídos aos equipamentos durante os projetos das plantas baixas. A representação visual colorida dos estados dos equipamentos, fornecidos pelo sistema de supervisão, pode melhorar a percepção do operador durante a navegação no SRV. Assim, é possível que os operadores do sistema supervisionem os ativos em campo por meio da RV, enriquecendo a experiência da navegação com informações provenientes do campo.

7.1 Principais Contribuições

Para alcançar a metodologia proposta e obter os resultados apresentados, foram realizados estudos e análises dos trabalhos relacionados apresentados no Capítulo 3. Os estudos forneceram o Estado da Arte e atributos para delinear as lacunas de pesquisa e melhorar os processos de integração entre *software* CAD e RV para o Sistema de Autoria de subestações virtuais.

Para identificar as contribuições e diferenciar as metodologias utilizadas nos estudos relacionados, foram extraídos, no Capítulo 3 e retratados novamente nesta seção, os seguintes atributos qualitativos:

- Categoria de desenho CAD: espaço bidimensional ou tridimensional utilizado pelos autores;
- Gerenciador de Ambiente Virtual (GAV): sistema de gerenciamento de ativos virtuais utilizados nos AVs, como dados dos modelos 3D (classe, tipo, fabricante, etc.), dados AV (*status* de desenvolvimento, modelos 3D utilizados, projetistas, versões históricas, etc.), projeto CAD, usuários e controle de acesso;
- Método de integração: manual, semiautomático (envolve tarefas manuais) e automático;
- Metamodelo: abstração do sistema que descreve os aspectos estruturais e/ou comportamentais do *software*, é uma definição da estrutura de dados do arquivo de integração entre os *softwares* CAD e RV;
- Grafos: estrutura de dados que define os elementos hierárquicos do modelo 3D e do cenário virtual;
- Topologia: definição das relações lógicas entre os elementos de projeto. Utilizado para rastrear o fluxo de corrente elétrica em arranjos de SEs para representar, por meio de simulações ou supervisão, o estado elétrico e funcionamento;
- Reconstrução em tempo de execução (RTE): o SRV executa a reconstrução do AV durante sua inicialização, com maior probabilidade de carregar rapidamente. Isso garante que ao acessar o GAV e obter a atualização recente da subestação, o sistema a reconstrua e apresente a versão atual do projeto.

A partir das características extraídas dos trabalhos relacionados e do presente trabalho, elaborou-se a Tabela 7.1

Tabela 7.1: Comparação entre o presente trabalho e trabalhos relacionados, abordando questões sobre a elaboração e integração de projetos CAD com *software* Realidade Virtual.

Autores	CAD	GAV	Metamodelo	Grafos	Integração	Topologia	Versão	RTE
Han et al. (2019)	3D	Não	Não	Não	Automática	Não	Não	Sim
Freeman et al. (2017)	3D	Não	Não	Não	Automática	Não	Não	Sim
Lorenz et al. (2016)	3D	Não	Não	Não	Automática	Não	*	Sim
Gebert et al. (2017)	3D	*	Sim	Não	Automática	Não	Não	Não
Mattioli et al. (2015)	2D	Não	Não	Não	Semiautomática	Não	Não	Não
Zawadzki et al. (2018)	3D	Não	Não	Não	Semiautomática	Não	*	Não
Este trabalho	2D	Sim	Sim	Sim	Automática	Sim	Sim	Sim

(*) De forma parcial ou aproximada.

Fonte: o autor.

Mattioli et al. (2015) apresenta uma metodologia para projetar AVs de SEs em um processo semiautomático utilizando plantas baixas. O contexto de trabalho é próximo a este, mas a metodologia não prevê um sistema de integração automatizado com o *software* de RV. O projeto é realizado por processos manuais sem processos de reconstrução em tempo de execução, exigindo atualização do SRV a cada modificação da SE. Outro atributo importante para uso em SEs é a topologia de ativos, que não foi utilizada pelo autor.

Gebert et al. (2017) discutem a modelagem 3D e o processo de integração automática. A aplicação de RV e o contexto de trabalho não abordam o uso em SEs, mas está relacionado à metodologia de integração, que utiliza metamodelos para definir a estrutura de dados do arquivo de integração. Uma característica importante do trabalho é a utilização de um sistema de gerenciamento de ativos, aumentando o controle e o compartilhamento das informações dos projetos.

Os autores Freeman et al. (2017), Han et al. (2019) e Lorenz et al. (2016), discutiram as mesmas características do trabalho de Gebert et al. (2017), exceto para o GAV. Os autores abordaram a integração de modelos CAD tridimensionais com o processo de integração automática. O recurso relevante usado no SA é a reconstrução em tempo de execução, que permite que o AV seja atualizado e reconstruído durante o uso.

Em contraste, Zawadzki et al. (2018), aborda uma integração semiautomática de modelos CAD paramétricos. Os modelos são projetados por parâmetros configurados antes do processo de integração, que possui uma etapa de trabalho manual. Este atributo é uma adversidade para a metodologia proposta, pois gera um esforço adicional durante o processo de integração.

A metodologia proposta para o projeto de AVs para SEs por meio de um SA baseia-se nas características da Tabela 7.1. Assim, a metodologia proposta forneceu ao SA atributos importantes para o processo de concepção, integração e utilização de RV. Esses recursos são significativos para instalações de desenvolvimento usando as funcionalidades ECAD, GAV e SRV.

No entanto, o SA apresenta algumas limitações quanto à representação simbólica. Os símbolos devem ser os mais fiéis possíveis aos modelos 3D. Como consequência disso, o processo de criação de símbolos pode ser trabalhoso. Por outro lado, o símbolo, uma vez desenhado e atribuído ao objeto, torna-se acessível e útil para qualquer projeto de planta baixa, caracterizando sua reutilização. Outra limitação está relacionada a estruturas complexas, onde são necessários níveis ou elementos interpostos, como um conjunto de dutos em uma refinaria de petróleo ou os vários andares de uma determinada construção. A sobreposição de símbolos pode tornar-se confusa, pois estes, são geralmente representados como um emaranhado de linhas e círculos.

Em relação à modelagem 3D e qualidade visual dos Ambientes Virtuais, este trabalho também se destaca em relação aos correlatos. No sentido credibilidade visual, os AVs gerados pelo sistema de reconstrução apresentam qualidade visual e física, visto que foram abordados questões de texturização, iluminação e animações. A Tabela 7.2 apresenta os elementos de destaque

deste trabalho em relação aos trabalhos correlatos. Sendo assim, uma contribuição importante é a forma com o que os elementos 3D do ambiente foram modelados. As convenções de modelagem geométrica e de símbolos demonstram como são as regras e acordos para que um bom elemento virtual seja modelado, visando a utilização e reaproveitamento no sistema de RV apresentado.

Tabela 7.2: Comparação entre o presente trabalho e trabalhos relacionados, abordando questões visuais dos Ambientes Virtuais gerados.

Autores	Credibilidade Visual	Texturas	Iluminação	Animações
Han et al. (2019)	Não	Não	Não	Não
Freeman et al. (2017)	Não	Não	Não	*
Lorenz et al. (2016)	Não	Não	Não	*
Gebert et al. (2017)	Não	Não	Sim	Não
Mattioli et al. (2015)	Sim	Sim	Sim	Sim
Zawadzki et al. (2018)	Sim	Sim	Sim	Não
Este trabalho	Sim	Sim	Sim	Sim

(*) De forma aproximada.

Fonte: o autor.

Desta forma, as principais contribuições, são: a arquitetura de *software* para um Sistema de Autoria baseado em desenhos em plantas baixas, as convenções de modelagem geométrica e de símbolos, a metodologia de elaboração de plantas baixas para SEs por meio de símbolos e a metodologia de integração automática entre o Editor CAD e o SRV.

7.2 Conclusões

A partir dos experimentos realizados e os resultados obtidos, pode-se concluir que a proposta do trabalho atingiu os objetivos estabelecidos.

O processo de elaboração de Ambientes Virtuais por plantas baixas e com auxílio de *software* CAD, apresentaram resultados notáveis por meio do uso do ECAD. As subestações SLAG4 e hipotética, desenvolvidas utilizando as ferramentas do SA, foram elaboradas por meio dos recursos disponibilizados pelo AutoCAD, acessando as informações e insumos do Gerenciador de Ambientes Virtuais. A facilidade do uso das ferramentas e acesso aos itens de construção, aprimorou a elaboração das duas subestações, reduzindo as dificuldades encontradas em projetos 3D, como, por exemplo, utilizando os motores de jogos como o Unity. Entretanto, ainda é necessário realizar testes com operadores e projetistas, visando obter resultados mais precisos em relação à usabilidade e redução de tempo ao utilizar o Sistema de Autoria. Também

é essencial realizar testes em campo, porém, essa etapa é complexa e exige da companhia de energia elétrica um planejamento e disponibilidade de uma subestação adequada para cumprilos. Uma possibilidade é realizá-lo como trabalhos futuros.

A modelagem geométrica e de símbolos utilizando as convenções de modelagem, demonstraram que a padronização dos elementos garantem qualidade e compatibilidade entre plantas baixas e o SRV.

A qualidade visual dos cenários virtuais construídos pelo Módulo de Reconstrução implementado no pré-visualizador 3D e SRV, apresentaram, de forma geral, credibilidade visual e fidelidade em comparação com o ambiente real. A qualidade da modelagem dos ativos virtuais, texturas e iluminação é um aspecto importante no contexto de imersão. Dessa forma, pode-se observar nos cenários apresentados na Seção 6.2, a qualidade visual que refina o uso do *software* de Realidade Virtual para os usuários.

O GAV e suas funcionalidades foram de extrema importância para gerenciar os insumos virtuais. Utilizando o sistema, foi possível armazenar os elementos de cada projeto, como os cadastros dos modelos 3D, símbolos, subestações, plantas baixas, usuários e documentos de projetos. Pode-se concluir que o GAV com a integração com o ECAD, pré-visualizador 3D e SRV via *internet*, desempenhou com sucesso as tarefas documentadas nos Requisitos Funcionais. Como se trata de um sistema *online* e dependente da rede de *internet*, problemas como baixa velocidade de conexão ou quedas na rede de comunicação, podem interromper temporariamente a comunicação entre os sistemas. Desta forma, implantar todos os sistemas em uma rede confiável é importante.

A integração entre plantas baixas e SRV, utilizando a metodologia proposta, constatou ser possível utilizar a estratégia abordada. Através do uso de grafos, metadados e metamodelos, foi possível gerar um arquivo integração entre um ambiente bidimensional e tridimensional, transportando todas as informações necessárias para que o pré-visualizador 3D e SRV possam reconstruir em tempo de execução todos os AVs em um curto período. Os resultados sobre o desempenho no tempo de reconstrução dos AVs, apresentaram em média 6.4 segundo para subestações com 60 modelos 3D, 22.5 segundos para 960 modelos 3D e 40.5 segundos para 2160 modelos, como discutido no 7.3. Esses resultados atendem o tempo mínimo para carregamento dos AVs, como descrito no requisito não funcional RNF03.

O desempenho em relação às atualizações das informações visuais apresentaram resultados satisfatórios. Segundos os resultados coletados dos computadores de testes, o QPS mínimo para uma boa qualidade de experiência do usuário em um sistema de RV, foram alcançados segundo os autores Humes et al. (2009), Potter et al. (2014), Claypool, Claypool e Damaa (2006) e Bianchini et al. (2006).

Por fim, um dos problemas da concepção manual de SEs, que pode levar a problemas técnicos na manutenção, bem como nos materiais durante os processos de planejamento da construção, foi melhorado. O posicionamento manual de elementos no cenário 3D pode gerar erros, como os apresentados nas Figuras 6.16 e 6.17. Desta forma, através da implementação de fer-

ramentas de inserção e substituição de símbolos na planta baixa, por funções CAD, aumentou a precisão do posicionamento dos elementos, garantindo melhor qualidade do AV para tarefas críticas.

7.3 Trabalhos Futuros

Conforme a evolução deste trabalho, alguns aspectos foram considerados importantes para a continuação da pesquisa, sendo assim, alguns tópicos relacionados ao aprimoramento, desenvolvimento e avaliações experimentais são apresentados.

O módulo de reconstrução de AVs apresentou resultados de tempo de carregamento dos cenários virtuais dentro dos requisitos de tempo descritos na seção 5.1, porém, acredita-se que é possível otimizar o processo, reduzir o tempo de carregamento e aprimorar a usabilidade do SA.

A visualização das informações que tange as SEs, como supervisão, planejamento e manutenção, são importantes para os projetistas e operadores do sistema elétrico. O sistema de operação de SEs é em sua maioria operado por diagramas 2D em *Video Walls* na sala de controle, como apresentado na Figura 2.4. São utilizados representações visuais por Diagrama Unifilar Operacional (DUO). Neste sentido, para enriquecer a usabilidade e apresentar informações adicionais, é importante integrar os DUOs ao SRV das SEs e implementar interações onde o usuário utiliza os diagramas em conjunto com o 3D, possibilitando acessar os ativos virtuais com maior rapidez.

O SA foi implantado, em partes, no ambiente corporativo da companhia de energia elétrica. Devido a adversidades com os sistemas computacionais, segurança da rede corporativa, burocracia e tempo, não foi possível executar o sistema por completo. Sendo assim, a avaliação experimental para obter métricas sobre a usabilidade, tempo de produção e testes no sistema de supervisão devem ser realizados futuramente. Essas métricas são dados importantes para otimizar e aprimorar o sistema, o objetivo é favorecer a usabilidade e obter bons resultados por parte dos usuários.

Um dos problemas de concepção dos projetos de SEs, é a dificuldade de obter os artefatos de entrada, como os *datasheets* de ativos, plantas baixas, diagramas unifilares, e outros elementos importantes. Desta forma, é interessante obter um conjunto de regras para possibilitar um subprocesso de entrada de informação ao sistema. O objetivo é facilitar a obtenção destes artefatos e disponibilizá-los e difundi-los aos envolvidos.

O Sistema de Autoria forneceu a integração entre *software* CAD e o SRV por um arquivo de integração com os dados de cada elemento que compõe o desenho CAD, porém, o arquivo de integração pode ser aprimorado para dar suporte a outras plataformas de visualização e de RV. Sendo assim, um tópico importante é propor um arquivo de integração composto por elementos embarcados, sem a necessidade de obter os ativos virtuais do GAV.

Outro aspecto relevante é que o trabalho possui uma sólida arquitetura para ser integrado

com bases de dados de indústrias com objetivo de compartilhamento de informações entre ativos do setor elétrico e expandir as possibilidades do SA e dos sistemas já em operação. Sendo assim, como trabalhos futuros, é evidente a implementação de uma integração com as bases de dados de Operação e Manutenção (O&M), com a associação dos ativos virtuais pertencentes a companhias elétricas com as bases de dados do *System Applications and Products in Data Processing* (SAP).

Referências

ADELEKE, Oluwafemi. **Computer Aided Design: A Designer's Tool**. Abuja, Nigeria: Research e Development, Headquarters, Nigeria Air Force, 2019.

ALMEIDA, Marilane de. **Desvendando o 3Ds Max**. Edição: Digerati Books. [S.l.]: São Paulo: Digerati Books, 2007. ISBN 978-85-60480-66-1.

ALVES, Marcos E. G. **Equipamentos de Alta Tensão – Prospecção e Hierarquização de Inovações Tecnológicas: Inovações Aplicadas ao Monitoramento de Equipamentos de Alta Tensão**. [S.l.]: Goya, Brasília, Brasil, 2013. p. 786–829. ISBN 978-85-88041-09-7.

AMAZON, Lumberyard. **Open 3D Engine**. [S.l.: s.n.], 10 mar. 2022. Disponível em: <https://aws.amazon.com/pt/lumberyard/>.

AMON, J. et al. Sistema de Diagnósticos para o Monitoramento de Subestações de Alta Tensão e o Gerenciamento das Atividades de Manutenção: Integração e Aplicações. **X ERLAC – Encontro Regional Latinoamericano do Cigré**, Puerto Iguazu, Argentina, 2003.

AUTODESK. **3Ds Max**. [S.l.: s.n.], 5 jun. 2020. Disponível em:

<https://www.autodesk.com.br/products/3ds-max/>.

AUTODESK, Inc. **AutoCAD**. [S.l.: s.n.], 5 jun. 2020. Disponível em:

<https://www.autodesk.com.br/products/autocad/>.

BACA, Murtha. **Introduction to Metadata**. 2. ed. [S.l.]: Getty Research Institute, 2008. ISBN 0892368969,9780892368969. Disponível em:

<http://www.getty.edu/publications/intrometadata/>.

BAILEY, David; WRIGHT, Edwin. **Practical SCADA for Industry**. Linacre House, Jordan Hill, Oxford OX2 8DP: Elsevier, 2003. ISBN 0750658053.

BARATA, Pebertli Nils Alho; FILHO, Manoel Ribeiro; NUNES, Marcus V. Alves.

Consolidating Learning in Power Systems: Virtual Reality Applied to the Study of the Operation of Electric Power Transformers. **IEEE Transactions on Education**, 2015. DOI:

[10.1109/TE.2015.2393842](https://doi.org/10.1109/TE.2015.2393842).

BARRETO JUNIOR, Camilo de Lellis. **Uma estratégia para otimizar a geração de arranjos em subestações virtuais de energia elétrica**. [S.l.: s.n.], 2016. Disponível em: <<https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/17740>>.

BERENA, Arjule John et al. A Cloud-based Authoring Tool for Creating Reusable Multimedia Learning Content on WebELS. **IEICE - Institute of electronics, information and communication engineers**, jun. 2015. DOI: [10.13140/RG.2.1.4739.3443](https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4739.3443).

BIANCHINI, Roberto Cezar et al. **Fundamentos e Tecnologia de Realidade Virtual e Aumentada: Jogos Eletrônicos e Realidade Virtual**. Edição: Porto Alegre Editora SBC - Sociedade Brasileira de Computação. [S.l.: s.n.], 2006. ISBN 85-7669-068-3.

BOWMAN, D. A.; MCMAHAN, R. P. Virtual Reality: How Much Immersion Is Enough? **Computer**, v. 40, n. 7, p. 36–43, jul. 2007. ISSN 1558-0814. DOI: [10.1109/MC.2007.257](https://doi.org/10.1109/MC.2007.257).

BOYER, Stuart A. **SCADA: Supervisory Control and Data Acquisition**. Research Triangle Park, NC 27709: ISA - International Society of Automation, 2010. ISBN 978-1-936007-09-7.

CARDOSO, Alexandre; LAMOUNIER JÚNIOR, Edgard A.; BARCELOS, Mariana A. Ferramentas de apoio ao ensino de componentes de subestações de energia elétrica com uso de realidade virtual e aumentada. **Iniciação - Revista de Iniciação Científica, Tecnológica e Artística**, Centro Universitário Senac, São Paulo, SP, v. 4, 2014. ISSN 2179-474X.

CARDOSO, Alexandre et al. VRCEMIG: A Novel Approach to Power Substation Control. In: ACM SIGGRAPH 2016 Posters. Anaheim, California: Association for Computing Machinery, 2016. (SIGGRAPH '16). ISBN 9781450343718. DOI: [10.1145/2945078.2945081](https://doi.org/10.1145/2945078.2945081). Disponível em: <<https://doi.org/10.1145/2945078.2945081>>.

CARDOSO, Alexandre. et al. Tecnologias e Ferramentas para o Desenvolvimento de Sistemas de Realidade Virtual e Aumentada. Edição: Editora Universitária UFPE. Recife, Brasil, p. 1–19, 2007.

CARVALHO, A. et al. A methodology for reducing the time necessary to generate virtual electric substations. In: 2016 IEEE Virtual Reality (VR). [S.l.: s.n.], 2016. p. 163–164. DOI: [10.1109/VR.2016.7504704](https://doi.org/10.1109/VR.2016.7504704).

[S.l.]. **Design Review Using Virtual Reality Enabled CAD**. [S.l.: s.n.], ago. 2017. Volume 1: 37th Computers and Information in Engineering Conference. V001T02A067. DOI: [10.1115/DETC2017-67878](https://doi.org/10.1115/DETC2017-67878), eprint: <https://asmedigitalcollection.asme.org/IDETC-CIE/proceedings-pdf/IDETC-CIE2017/58110/V001T02A067/2473213/v001t02a067-detc2017-67878.pdf>. Disponível em: <<https://doi.org/10.1115/DETC2017-67878>>.

- CHILUISA, Max G.; MULLO, Rubén D.; ANDALUZ, Víctor H. Training in Virtual Environments for Hybrid Power Plant. In: BEBIS, George et al. (Ed.). **Advances in Visual Computing**. Cham: Springer International Publishing, 2018. p. 193–204. ISBN 978-3-030-03801-4. DOI: [10.1007/978-3-030-03801-4_18](https://doi.org/10.1007/978-3-030-03801-4_18).
- CIPRIAN FIRU, Adrian et al. Virtual reality in the automotive field in industry 4.0. **Materials Today: Proceedings**, v. 45, p. 4177–4182, 2021. 8th International Conference on Advanced Materials and Structures - AMS 2020. ISSN 2214-7853. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.037>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785320397224>.
- CLAYPOOL, Mark; CLAYPOOL, Kaja; DAMAA, Feissal. The Effects of Frame Rate and Resolution on Users Playing First Person Shooter Games. **Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering**, v. 6071, jan. 2006. DOI: [10.1117/12.648609](https://doi.org/10.1117/12.648609).
- COIFFET, Grigore C. Burdea; Philippe. **Virtual Reality Technology**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2003. ISBN 9781119485728; 111948572X.
- GEBERT, Martin et al. Meta-model for VR-based design reviews. English. In: DS87-4. v. 4, p. 337–346. Calculation data; Collaborative design; Development process; Energy systems; Engineering project; Integrated product development; Simulation program; Virtual engineering;
- HAN, Young-Soo et al. 3D CAD data extraction and conversion for application of augmented/virtual reality to the construction of ships and offshore structures. English. **International Journal of Computer Integrated Manufacturing**, v. 32, n. 7, p. 658–668, 2019. Augmented/virtual reality; CAD data; Customer requirements; Manufacturing environments; Piping components; Production efficiency; Shape transformation; Various technologies; ISSN 0951192X. DOI: [10.1080/0951192X.2019.1599440](https://doi.org/10.1080/0951192X.2019.1599440).
- LORENZ, Mario et al. CAD to VR-A Methodology for the Automated Conversion of Kinematic CAD Models to Virtual Reality. English. In: v. 41, p. 358–363. Automated modeling; Computer aided designs (CAD); Development process; Enabling technologies; Intelligent assistances; Kinematic mechanism; Kinematic model; Virtual technology; DOI: [10.1016/j.procir.2015.12.115](https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.12.115).
- CONFORTO, Edivandro; AMARAL, Daniel; LUIS, da Silva. Roteiro para Revisão Bibliográfica Sistemática: Aplicação no Desenvolvimento de Produtos e Gerenciamento de Projetos. In:
- CUMMINGS, James; BAILENSON, Jeremy. How Immersive Is Enough? A Meta-Analysis of the Effect of Immersive Technology on User Presence. **Media Psychology**, v. 19, p. 1–38, mai. 2015. DOI: [10.1080/15213269.2015.1015740](https://doi.org/10.1080/15213269.2015.1015740).

DJANGO, Software Foundation. **Django**. [S.l.: s.n.], 13 jul. 2020. Disponível em:

<<https://www.djangoproject.com/>>.

DOWNING, Frances; THOMAS, Hubka. Diagramming: A Visual Language. **Vernacular Architecture Forum**, v. 2, 1986. DOI: [10.2307/3514315](https://doi.org/10.2307/3514315).

EPIC GAMES. **Unreal Engine**. [S.l.: s.n.], 10 mar. 2022. Disponível em:

<<https://www.unrealengine.com/>>.

FIELDING, Roy Thomas. **Architectural Styles and the Design of Network-based Software Architectures**. 2000. University of California, Irvine.

FOUNDATION, Blender. **Blender**. [S.l.: s.n.], 5 jun. 2020. Disponível em:

<<https://www.blender.org/>>.

FREEMAN ET AL., Ian. Cad Integration in Virtual Reality Design Reviews for Improved Engineering Model Interaction. English. In: AMER SOC MECH ENGINEERS. ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition (IMECE2016), Phoenix, AZ, NOV 11-17, 2016. ISBN 978-0-7918-5065-7. DOI: [10.1115/IMECE2016-66948](https://doi.org/10.1115/IMECE2016-66948).

FRONTIN, Sergio de Oliveira; JARDINI, José Antônio; GABAGLIA, Carlos Pederneiras Raja. **Equipamentos de Alta Tensão – Prospecção e Hierarquização de Inovações Tecnológicas: Planejamento e Custos dos Equipamentos de Alta Tensão**. [S.l.]: Goya, Brasília, Brasil, 2013. p. 56–77. ISBN 978-85-88041-09-7.

GONZALEZ LOPEZ, Juan Miguel et al. Incorporating Virtual Reality into the Teaching and Training of Grid-Tie Photovoltaic Power Plants Design. **Applied Sciences**, v. 9, n. 21, 2019. ISSN 2076-3417. DOI: [10.3390/app9214480](https://doi.org/10.3390/app9214480). Disponível em:

<<https://www.mdpi.com/2076-3417/9/21/4480>>.

GOOGLE. **Google Earth - Subestação SLAG4 - 345kV, Coordenadas 19°31'04"S 44°19'28"W elevação 838m, Ano da Imagem: 2020**. 2020. Disponível em:

<<https://www.google.com.br/earth/>>.

GUEDES, G. **Um Metamodelo UML para a Modelagem de Requisitos em Projetos de Sistemas MultiAgentes**. 2012. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Instituto de Informática. Disponível em:

<<https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/56847>>.

_____. **UML 2: Uma Abordagem Prática**. Edição: São Paulo: Novatec Editora. [S.l.]: São Paulo: Novatec Editora, 2011. ISBN 978-85-7522-281-2.

HALPERN, Jered. **Developing 2D Games with Unity: Independent Game Programming with CSharp**. Edição: Apress. [S.l.]: Apress New York, 2019. ISBN 978-1-4842-3771-7. DOI: [10.1007/978-1-4842-3772-4](https://doi.org/10.1007/978-1-4842-3772-4).

HUMES, Larry E. et al. The effects of age on sensory thresholds and temporal gap detection in hearing, vision, and touch. eng. **Attention, perception & psychophysics**, v. 71, n. 4, p. 860–871, mai. 2009. ISSN 1943-3921. DOI: [10.3758/APP.71.4.860](https://doi.org/10.3758/APP.71.4.860). Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/19429964/>.

HUSSAIN, Akhtar; ASLAM, Muhammad; ARIF, Syed Muhammad. A standards-based approach for Auto-drawing single line diagram of multivendor smart distribution systems. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, v. 96, p. 357–367, 2018. ISSN 0142-0615. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2017.10.003>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061517302697>.

INVENTOR, Autodesk. **Inventor**. [S.l.: s.n.], 5 jun. 2021. Disponível em: <https://www.autodesk.com.br/products/inventor/overview>.

ISO. Information Technology—Computer Graphics, Image Processing and Environmental Data Representation—Mixed and Augmented Reality (MAR) Reference Model. **Standard ISO/IEC 18039:2019; International Organization for Standardization**, Geneva, Switzerland, 2019.

_____. Information Technology for Learning, Education and Training—Human Factor Guidelines for Virtual Reality Content—Part 1: Considerations when Using VR Content. **Standard ISO/IEC TR 23842-1:2020; International Organization for Standardization**, Geneva, Switzerland, 2020.

JACOBSON, Daniel; BRAIL, Greg; WOODS, Dan. **APIs: A Strategy Guide**. [S.l.]: O'Reilly Media, 2012. ISBN 978-1-449-30892-6.

JYANI, Jai Prakash; BARWAR, N. C. A Collaborative Versioning Framework for Model-Based Version Control Systems. In _____. **Proceedings of International Conference on Communication and Computational Technologies. Algorithms for Intelligent Systems**. [S.l.: s.n.], 2019. DOI: [10.1007/978-981-15-5077-5_56](https://doi.org/10.1007/978-981-15-5077-5_56).

KEARSLEY, Greg. Authoring Systems in Computer Based Education. **Commun. ACM**, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, v. 25, n. 7, p. 429–437, jul. 1982. ISSN 0001-0782. DOI: [10.1145/358557.358569](https://doi.org/10.1145/358557.358569). Disponível em: <https://doi.org/10.1145/358557.358569>.

KERSTEN, T. P.; TSCHIRSCHWITZ, F.; DEGGIM, S. DEVELOPMENT OF A VIRTUAL MUSEUM INCLUDING A 4D PRESENTATION OF BUILDING HISTORY IN VIRTUAL REALITY. **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, XLII-2/W3, p. 361–367, 2017. DOI: [10.5194/isprs-archives-XLII-2-W3-361-2017](https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W3-361-2017). Disponível em: <https://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XLII-2-W3/361/2017/>.

KIRNER, Claudio; SANTIN, Rafael. Artoolkit: conceitos e ferramenta de autoria colaborativa. **Realidade Virtual e Aumentada: Uma Abordagem Tecnológica, SBC, Porto Alegre**, p. 178–276, 2008. Disponível em:

<https://www.researchgate.net/publication/228384109_ARToolKit_Conceitos_e_Ferramenta_de_Autoria_Colaborativa>.

KIRNER, Claudio; SISCOUITO, Robson. **Fundamentos de Realidade Virtual e Aumentada**. Edição: Claudio Kirner e Robson Siscoutto. Petrópolis, RJ, Brasil: Editora SBC – Sociedade Brasileira de Computação, 2007. ISBN 85-7669-108-6.

KOVAR, Jiri et al. Virtual reality in context of Industry 4.0 proposed projects at Brno University of Technology. In: 2016 17th International Conference on Mechatronics - Mechatronika (ME). [S.l.]: Prague, Czech Republic, 2016. p. 1–7.

KUTS, Vladimir et al. Enabling the Teaching Factory leveraging a Virtual Reality system based on the Digital Twin. In: IN Proceedings of the 15th Annual EuroVR Conference. [S.l.]: Research Centre of Finland, Ltd.: Espoo, Finland, out. 2018. p. 26–31.

LEÃO, Ruth. **Geração, Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica**. Edição: Ruth Leão. [S.l.]: Universidade Federal do Ceará, Brasil, 2009.

LEFFA, Vilson J. Uma ferramenta de autoria para o professor: o que é e o que faz. **Letras de Hoje**, Porto Alegre-RS, Brasil, v. 41, n. 144, p. 189–214, 2006.

LIAO, X. et al. Research on Virtual Reality Simulation Training System of Substation. In: 2017 International Conference on Virtual Reality and Visualization (ICVRV). [S.l.: s.n.], 2017. p. 413–414. DOI: [10.1109/ICVRV.2017.00101](https://doi.org/10.1109/ICVRV.2017.00101).

LOCATIS, Craig et al. Authoring systems: An introduction and assessment. **Journal of Computing in Higher Education**, Springer Science e Business Media LLC, v. 3, n. 1, p. 23–35, set. 1991. DOI: [10.1007/bf02942596](https://doi.org/10.1007/bf02942596). Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/bf02942596>>.

LOPES, Yona et al. Minicurso para o SBRT-2012: Smart Grid e IEC 61850: Novos Desafios em Redes e Telecomunicações para o Sistema Elétrico. XXX SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TELECOMUNICAÇÕES - SBRT-12, set. 2012. DOI: [10.14209/sbrt.2012.188](https://doi.org/10.14209/sbrt.2012.188).

MASSÉ, Mark. **Rest API: Design Rulebook**. Edição: Simon St. Laurent. [S.l.]: O'Reilly Media, 2012. ISBN 978-1-449-31050-9.

MATTIOLI, L. et al. Semi-automatic generation of virtual reality environments for electric power substations. **Advances in Intelligent Systems and Computing**, Springer Verlag, v. 353, p. 833–842, 2015. cited By 1. DOI: [10.1007/978-3-319-16486-1_83](https://doi.org/10.1007/978-3-319-16486-1_83).

- MATTIOLI, Leandro. **Desenvolvimento de Ferramentas para Geração Semi-Automática de Ambientes de Realidade Virtual para Subestações de Energia Elétrica**. [S.l.: s.n.], 2015. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/14603?locale=pt_BR>.
- MEIGUINS, Bianchi Sireque et al. **Realidade Virtual e Aumentada em Visualização de Informação. In Fundamentos e Tecnologia de Realidade Virtual e Aumentada**. Edição: Romero Tori, Robson Siscoutto e Claudio Kirner. [S.l.]: SBC—Sociedade Brasileira de Computação, Belém, Brazil, 2006. p. 319–326. ISBN 85-7669-068-3.
- MERRILL, M David; TWITCHELL, David. **Instructional design theory**. Englewood Cliffs, N.J: Educational Technology, 1994. ISBN 978-0877782759.
- MORENO, Erika F. et al. Multi-user Expert System for Operation and Maintenance in Energized Lines. In _____. **Advances in Information and Communication**. Cham: Springer International Publishing, 2020. p. 454–472. ISBN 978-3-030-39442-4.
- MUNZLINGER, Elizabete; NARCIZO, Fabricio Batista; QUEIROZ, José Eustáquio Rangel de. Sistematização de revisões bibliográficas em pesquisas da área de IHC. In: COMPANION Proceedings of the 11th Brazilian Symposium on Human Factors in Computing Systems. Cuiaba, Brazil: Brazilian Computer Society, 2012. (IHC '12), p. 51–54. ISBN 9788576692621.
- MUZY, Gustavo Luiz Castro de Oliveira. **Subestações Elétricas**. [S.l.: s.n.], 2012. Disponível em: <<http://www.monografias.polis.ufrrj.br/monografias/monopolis10005233.pdf>>.
- NASYROV, Rinat R.; EXCELL, Peter S. Creation of Interactive Virtual Reality Scenarios as a Training and Education Tool. Edição: Rae Earnshaw. Springer International Publishing, p. 353–369, 2020. DOI: [10.1007/978-3-030-42097-0_19](https://doi.org/10.1007/978-3-030-42097-0_19).
- _____. New Approaches to Training of Power Substation Operators Based on Interactive Virtual Reality. **Springer Nature Switzerland**, 2018. DOI: [10.1007/978-3-319-98572-5_43](https://doi.org/10.1007/978-3-319-98572-5_43).
- NIELSON, Gregory M.; OLSEN, Dan R. Direct Manipulation Techniques for 3D Objects Using 2D Locator Devices. In: PROCEEDINGS of the 1986 Workshop on Interactive 3D Graphics. Chapel Hill, North Carolina, USA: Association for Computing Machinery, 1987. (I3D '86), p. 175–182. ISBN 0897912284. DOI: [10.1145/319120.319134](https://doi.org/10.1145/319120.319134). Disponível em: <<https://doi.org/10.1145/319120.319134>>.
- ONG, James; RAMACHANDRAN, Sowmya. Intelligent tutoring systems: Using ai to improve training performance and ROI. **Networker Newsletter**, v. 19, n. 6, p. 1–6, 2003.
- ONG, Jim; RAMACHANDRAN, Sowmya. Intelligent Tutoring Systems: The What and the How. **ASTD: The American Society for Training & Development**, 2000. Disponível em: <https://www.stottlerhenke.com/papers/astd_learning_circuits_2000_its_what_how.pdf>.

PASSMARK. **CPU Benchmarks**. 2020. Disponível em:

<<https://www.cpubenchmark.net/>>. (Acessado em: 2020-11-30).

PEREIRA, J. G.; ELLMAN, A. From CAD to Physics-based Digital Twin: Framework for Real-Time Simulation of Virtual Prototypes. **Proceedings of the Design Society: DESIGN Conference**, Cambridge University Press, v. 1, p. 335–344, 2020. DOI:

[10.1017/dsd.2020.47](https://doi.org/10.1017/dsd.2020.47).

PESSOA, Alexandre et al. Uma Ferramenta de Autoria para Construção de Ambientes de Realidade Virtual para Subestações de Energia Baseada em Panoramas Aumentados. In: IN Proceedings of Conference on Graphics, Patterns and Images (SIBGRAPI). [S.l.]: Sociedade Brasileira de Computação: Porto Alegre, Brazil, 2017.

POTTER, Mary C. et al. Detecting meaning in RSVP at 13 ms per picture. **Attention, Perception, & Psychophysics**, v. 76, n. 2, p. 270–279, fev. 2014. ISSN 1943-393X. DOI:

[10.3758/s13414-013-0605-z](https://doi.org/10.3758/s13414-013-0605-z), Disponível em:

<<https://doi.org/10.3758/s13414-013-0605-z>>.

REALITY, EON. **EON Studio**. [S.l.: s.n.], 5 jun. 2020. Disponível em:

<<http://eonreality.com/>>.

REESE, George. **Database Programming with JDBC and Java**. 2. ed. [S.l.]: O'Reilly Media, 2000. ISBN 9781565926165; 1565926161.

REIS, Ricardo. **Trilib**. [S.l.: s.n.], 13 jul. 2020. Disponível em:

<<https://ricardoreis.net/>>.

RIBEIRO, Tiago Ramos et al. AGITO: Virtual Reality Environment for Power Systems Substations Operators Training. In: _____ . **Augmented and Virtual Reality**. Cham: Springer International Publishing, 2014. p. 113–123. ISBN 978-3-319-13969-2.

ROGERS, Scott. **Level Up! The Guide to Great Video Game Design**. 2. ed. [S.l.]: Wiley, 2014. ISBN 1118877160,9781118877166.

ROLDÁN, Juan Jesús et al. A training system for Industry 4.0 operators in complex assemblies based on virtual reality and process mining. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, v. 59, p. 305–316, 2019. ISSN 0736-5845. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.rcim.2019.05.004>, Disponível em:

<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0736584518303685>>.

ROMO, Juan E. et al. Virtual Training on Pumping Stations for Drinking Water Supply Systems. In: _____ . **Augmented Reality, Virtual Reality, and Computer Graphics**. Cham: Springer International Publishing, 2019. p. 410–429. ISBN 978-3-030-25999-0.

SARCAR, M.; RAO, K.; NARAYAN, K. **Computer Aided Design and Manufacturing**. [S.l.]: Prentice-Hall of India, 2008. ISBN 978-81-203-3342-0.

SARKAR, Jayanta. **Computer Aided Design: A Conceptual Approach**. [S.l.]: CRC Press Taylor e Francis Group, 2014. ISBN 978-1-4822-0880-1.

SHERIDAN, Thomas B. Interaction, Imagination and Immersion Some Research Needs. In: PROCEEDINGS of the ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology. Seoul, Korea: Association for Computing Machinery, 2000. (VRST '00), p. 1–7. ISBN 1581133162. DOI: [10.1145/502390.502392](https://doi.org/10.1145/502390.502392). Disponível em: <https://doi.org/10.1145/502390.502392>.

SILVA, Alexandre Carvalho. **A Proposal Layer Object Interface for Virtual Reality Systems**. [S.l.: s.n.], 2014. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/14563>.

SILVA, Alexandre Carvalho et al. Virtual Reality for Monitor and Control of Electrical Substations. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, FapUNIFESP (SciELO), v. 93, n. 1, 2021. DOI: [10.1590/0001-3765202120200267](https://doi.org/10.1590/0001-3765202120200267). Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0001-3765202120200267>.

SIMÕES, F. et al. Challenges in 3D Reconstruction from Images for Difficult Large-Scale Objects: A Study on the Modeling of Electrical Substations. In: 2012 14th Symposium on Virtual and Augmented Reality. [S.l.: s.n.], 2012. p. 74–83. DOI: [10.1109/SVR.2012.5](https://doi.org/10.1109/SVR.2012.5).

SOUZA, Patrícia Cristiane de. **Sistema de Autoria Para Construção de “Adventures” Educacionais em Realidade Virtual**. [S.l.: s.n.], 1997. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/158166>.

SUI, Z. et al. Constructing rules and scheduling technology for 3D building models. In: 2010 18th International Conference on Geoinformatics. [S.l.: s.n.], jun. 2010. p. 1–6. DOI: [10.1109/GEOINFORMATICS.2010.5567736](https://doi.org/10.1109/GEOINFORMATICS.2010.5567736).

TORI, Romero; SILVA HOUNSELL, Marcelo da; KIRNER, Claudio. **Fundamentos e Tecnologia de Realidade Virtual e Aumentada: Realidade Virtual**. Edição: Porto Alegre Editora SBC - Sociedade Brasileira de Computação. [S.l.: s.n.], 2006. ISBN 85-7669-068-3.

UNITY TECHNOLOGIES. **Unity**. [S.l.: s.n.], 22 fev. 2022. Disponível em: <https://unity.com/>.

VINCENT, William S. **Django for APIs: Build web APIs with Python and Django**. [S.l.]: Leanpub, 2019.

VIOLIN, Airton; D’AJUZ, Ary; LACORTE, Marta. **Equipamentos de Alta Tensão – Prospecção e Hierarquização de Inovações Tecnológicas: Subestações de Alta Tensão**. [S.l.]: Goya, Brasília, Brasil, 2013. p. 80–119. ISBN 978-85-88041-09-7.

- VOGT, Andrea et al. Prompting in-depth learning in immersive virtual reality: Impact of an elaboration prompt on developing a mental model. **Computers & Education**, v. 171, p. 104235, 2021. ISSN 0360-1315. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2021.104235>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360131521001123>.
- WALDRING, S. J. **Standard Network Diagramming Language and Corresponding Meta-Model**. [S.l.: s.n.], 2001.
- WANG, Wenju; LI, Guangyao. Virtual Reality in the Substation Training Simulator. **International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design**, 2010. DOI: [10.1109/CSCWD.2010.5471934](https://doi.org/10.1109/CSCWD.2010.5471934).
- WIEDERHOLD, Brenda; BOUCHARD, Stéphane. **Advances in Virtual Reality and Anxiety Disorders**. [S.l.]: Springer, Boston, MA, jan. 2014. ISBN 978-1-4899-8022-9. DOI: [10.1007/978-1-4899-8023-6](https://doi.org/10.1007/978-1-4899-8023-6).
- WOLFARTSBERGER, Josef. Analyzing the potential of Virtual Reality for engineering design review. **Automation in Construction**, v. 104, p. 27–37, 2019. ISSN 0926-5805. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.03.018>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580518312093>.
- ZAWADZKI, P. et al. Virtual reality and CAD systems integration for quick product variant design. **Lecture Notes in Mechanical Engineering**, Springer Heidelberg, n. 201519, p. 599–608, 2018. cited By 0. DOI: [10.1007/978-3-319-68619-6_57](https://doi.org/10.1007/978-3-319-68619-6_57).
- ZHAO, Qinping. 10 Scientific Problems in Virtual Reality. **Commun. ACM**, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, v. 54, n. 2, p. 116–118, 2011. ISSN 0001-0782. DOI: [10.1145/1897816.1897847](https://doi.org/10.1145/1897816.1897847).

APÊNDICE A - Documentação dos Diagramas de Casos de Uso

1. Introdução

Esse apêndice é parte do trabalho apresentado no Capítulo 5 (Desenvolvimento), são apresentadas as descrições dos Diagramas de Casos de Uso dos sistemas ECAD, pré-visualizador 3D de plantas baixas, Gerenciador de Ambientes Virtuais e Módulo de Reconstrução de AVs, evidenciando suas funcionalidades e aspectos comportamentais.

2. Documentação do Diagrama de Casos de Uso do Editor CAD

Tabela A.1: Documentação do Caso de Uso UC-EC01 - Autenticação no Gerenciador de Ambientes Virtuais.

Nome do Caso de Uso	UC-EC01 - Autenticação no Gerenciador de Ambientes Virtuais
Ator Principal	AT02-Projetista
Atores Secundário	AT05-Rest API - Gerenciador de Ambientes Virtuais
Resumo	Este caso de uso descreve a etapa de autenticação no Gerenciador de Ambientes Virtuais
Pós-condições	Gerenciar um determinado projeto.
Cenário Principal	
Ações do Ator	Ações do Sistema
O usuário deve fornecer credencial e senha de autenticação.	O sistema verifica no gerenciador de AV os dados fornecidos pelo usuário. Caso os dados estejam corretos uma chave de confirmação de autenticação é armazenada para o usuário.

Tabela A.2: Documentação do Caso de Uso UC-EC02 - Gerenciar projeto de subestações.

Nome do Caso de Uso	UC-EC02 - Gerenciar Projeto de Subestações
Ator Principal	AT01-Projetista
Atores Secundário	AT05-Rest API - Gerenciador de Ambientes Virtuais
Resumo	Permite ao projetista abrir projetos CAD de sua responsabilidade, definir níveis de alturas para elementos suspensos e salvar as modificações do desenho.
Pré-condições	O ator deve estar autenticado no Gerenciador de Ambientes Virtuais.
Pós-condições	Selecionar um projeto e abri-lo.
Cenário Principal	
Ações do Ator	Ações do Sistema
Ao se autenticar no gerenciador de AV, o usuário pode selecionar por meio de uma interface gráfica um projeto.	O sistema acesso o gerenciador de AV e obtém as informações do projeto, incluindo o desenho em CAD. Automaticamente o <i>software</i> abre o desenho.
Ao digitar o comando para definir os níveis do desenho, uma interface gráfica é exibida ao usuário. Nela é possível preencher um campo numérico e inserir ao desenho CAD um novo nível.	O sistema acessa os atributos do desenho CAD, realiza leitura de níveis já inseridos e exhibe ao usuário. O sistema armazena o novo nível adicionado pelo usuário.
Ao finalizar uma tarefa, o usuário deve salvar o desenho no gerenciador de AV, o processo pode ser feito através do comando de atualização do desenho.	O sistema armazena temporariamente o desenho no computador local, transforma-o em formato transmissível na <i>internet</i> e envia-o ao gerenciador de AV.

Tabela A.3: Documentação do Caso de Uso UC-EC03 - Gerenciar símbolos de modelos.

Nome do Caso de Uso	UC-EC03 - Gerenciar Símbolos de Modelos
Ator Principal	AT02-Projetista
Resumo	Este caso de uso descreve as tarefas de inserção, substituição, definição de níveis e obtenção de informações de símbolos atribuídos ao desenho em CAD.
Pré-condições	1. O ator deve estar autenticado no Gerenciador de Ambientes Virtuais. 2. Um projeto em CAD deve estar aberto.
Cenário Principal	
Ações do Ator	Ações do Sistema
Ao digitar o comando de inserção de símbolo, o ator pode selecionar um modelo por meio de filtros (tipo, tensão e fabricante) e inseri-lo no desenho informando por meio do mouse a rotação e posição final do símbolo.	Ao receber o comando, uma interface gráfica é apresentada ao ator com campos para filtrar o modelo e opções de inserção no desenho. Quando selecionado, o sistema realiza a busca do modelo no Gerenciador de AV e insere no desenho o novo símbolo com seus atributos específicos.
Ao digitar o comando de substituição de símbolo, o ator pode selecionar um modelo por meio de filtros (tipo, tensão e fabricante), selecionar no desenho quais símbolos devem ser substituídos e executar a substituição.	Ao receber o comando, uma interface gráfica é apresentada ao ator com campos para filtrar o modelo e opções de substituição no desenho. Quando selecionado, o sistema realiza a busca do modelo no Gerenciador de AV e substitui no desenho todos os símbolos selecionados pelo ator.
Ao digitar o comando para definir o nível de um equipamento, o usuário seleciona o nível exibido e posteriormente seleciona o símbolo no desenho.	Ao receber o comando, uma interface gráfica é apresentada ao ator com os campos para seleção de um nível. O sistema atualiza o atributo responsável pela altura do modelo 3D.
Ao digitar o comando para exibir as informações de um símbolo, o ator deve selecionar o símbolo que ele quer visualizar as informações.	Ao receber o comando, o sistema solicita a seleção de um símbolo. O sistema realiza a busca pelas informações do símbolo e exibe por meio de uma interface gráfica as informações.

Tabela A.4: Documentação do Caso de Uso UC-EC04 - Buscar modelo.

Nome do Caso de Uso	UC-EC04 - Buscar Modelo
Ator Principal	AT02-Projetista
Atores Secundário	AT05-Rest API - Gerenciador de Ambientes Virtuais
Resumo	Descreve os passos para realizar uma busca por símbolos de modelos 3D no Gerenciador de AV.
Pré-condições	1. O ator deve estar autenticado no Gerenciador de Ambientes Virtuais. 2. Um projeto em CAD deve estar aberto.
Cenário Principal	
Ações do Ator	Ações do Sistema
Ao realizar qualquer tarefa de inserção, substituição e criação de símbolos, o ator pode realizar uma busca por modelos no gerenciador de ambientes virtuais.	O sistema busca no gerenciador de ambientes virtuais os modelos solicitados por outros casos de uso ou pelo ator.

Tabela A.5: Documentação do Caso de Uso UC-EC05 - Associar símbolo à modelo.

Nome do Caso de Uso	UC-EC05 - Associar Símbolo à Modelo
Ator Principal	AT02-Projetista
Atores Secundário	AT05-Rest API - Gerenciador de Ambientes Virtuais
Resumo	Descreve os passos para realizar a criação de novos símbolos e atribuí-los a modelos cadastrados no gerenciador de ambientes virtuais.
Pré-condições	1. O ator deve estar autenticado no Gerenciador de Ambientes Virtuais. 2. Um projeto em CAD deve estar aberto. 3. Buscar modelo. 4. Criar símbolo.
Cenário Principal	
Ações do Ator	Ações do Sistema
Ao digitar o comando para associar símbolo, o ator seleciona os conjuntos de elementos primitivos (linhas, círculos, arcos) que compõem o símbolo, realiza a busca de um modelo existente no gerenciador de ambientes virtuais, seleciona-o e atribui o novo símbolo ao modelo 3D.	O sistema cria um bloco de símbolo com os elementos primitivos selecionados, realiza uma busca com os filtros definidos pelo ator e associa o novo símbolo ao modelo 3D.

Tabela A.6: Documentação do Caso de Uso UC-EC06 - Criar símbolo.

Nome do Caso de Uso	UC-EC06 - Criar Símbolo
Ator Principal	AT02-Projetista
Resumo	Descreve os passos para criar um novo símbolo a partir de um desenho CAD.
Pré-condições	1. O ator deve estar autenticado no Gerenciador de Ambientes Virtuais. 2. Um projeto em CAD deve estar aberto.
Pós-condições	Associar símbolo ao modelo 3D.
Cenário Principal	
Ações do Ator	Ações do Sistema
Seleciona um conjunto de elementos primitivos que compõem o símbolo.	O sistema cria um bloco único de um símbolo.

Tabela A.7: Documentação do Caso de Uso UC-EC07 - Gerenciar condutores.

Nome do Caso de Uso	UC-EC07 - Gerenciar Condutores
Ator Principal	AT02-Projetista
Resumo	Descreve os passos necessários para o ator gerenciar a manipulação de condutores, como inserir/editar cabos e barramentos.
Pré-condições	1. O ator deve estar autenticado no Gerenciador de Ambientes Virtuais. 2. Um projeto em CAD deve estar aberto.
Cenário Principal	
Ações do Ator	Ações do Sistema
Ao digitar o comando para inserir cabos, o ator informa a espessura e a curvatura. Seleciona o primeiro e o segundo símbolo, seleciona o ponto para fixar os atributos e ao final desenha o cabo.	O sistema exibe na tela uma interface gráfica com campos para inserir espessura e curvatura. Depois dos itens configurados e os dois símbolos selecionados, desenha-se o cabo.
Ao digitar o comando para editar cabos, o ator seleciona os cabos que desejam editar, informa a espessura, curvatura e ao final aplica a nova configuração.	O sistema exibe na tela uma interface gráfica com a opção de selecionar cabos e campos para editar a espessura e curvatura. Depois dos itens configurados os atributos dos cabos são atualizados com a nova configuração.
Ao digitar o comando para inserir barramento, o ator informa a espessura, tipo e a distância entres os extremos. Seleciona o primeiro e o segundo símbolo, define o ponto para fixar os atributos e ao final desenha o barramento.	O sistema exibe na tela uma interface gráfica com campos para inserir espessura, tipo e distância entre extremos. Depois dos itens configurados e os dois símbolos selecionados, desenha-se o barramento.
Ao digitar o comando para editar barramento, o ator seleciona os barramentos que desejam editar, informa a espessura, tipo, distância entre extremos, e ao final aplica a nova configuração.	O sistema exibe na tela uma interface gráfica com a opção de selecionar barramentos e campos para editar a espessura, tipo e distância entre extremos. Depois dos itens configurados os atributos dos barramentos são atualizados com a nova configuração.

Tabela A.8: Documentação do Caso de Uso UC-EC08 - Visualizar subestação em 3D.

Nome do Caso de Uso	UC-EC08 - Visualizar Subestação em 3D
Ator Principal	AT02-Projetista
Resumo	Descreve os passos necessário para o ator visualizar em 3D o desenho do projeto atual.
Pré-condições	1. O ator deve estar autenticado no Gerenciador de Ambientes Virtuais. 2. Um projeto em CAD deve estar aberto.
Cenário Principal	
Ações do Ator	Ações do Sistema
Digitar o comando para visualizar o desenho em 3D.	O sistema abrirá em uma nova janela o módulo de visualização em 3D

Tabela A.9: Documentação do Caso de Uso UC-EC09 - Implantar projeto para RV.

Nome do Caso de Uso	UC-EC09 - Implantar Projeto para RV
Ator Principal	AT02-Projetista
Atores Secundário	AT05-Rest API - Gerenciador de Ambientes Virtuais
Resumo	Esse caso de uso descreve os passos para implantar um projeto em desenho CAD para o ambiente de realidade virtual.
Pré-condições	1. O ator deve estar autenticado no Gerenciador de Ambientes Virtuais. 2. Um projeto em CAD deve estar aberto. 3. Validar projeto.
Cenário Principal	
Ações do Ator	Ações do Sistema
Ao digitar o comando para implantar o desenho da subestação, o ator deve primeiramente compilar o projeto, confirmar que concorda com os dados apresentados e implantar.	O sistema realiza a compilação de elementos do desenho e apresenta ao usuário. Ao ser aprovado, o sistema extrai todas as informações em um documento XML. Ao finalizar, envia para o gerenciador de ambientes virtuais para ser implantado e utilizado pelo SRV.

Tabela A.10: Documentação do Caso de Uso UC-EC10 - Validar projeto.

Nome do Caso de Uso	UC-EC10 - Validar Projeto
Ator Principal	AT02-Projetista
Resumo	O caso de uso descreve as etapas para validar um projeto com desenho CAD.
Pré-condições	1. O ator deve estar autenticado no Gerenciador de Ambientes Virtuais. 2. Um projeto em CAD deve estar aberto.
Pós-condições	Implantar projeto para RV.
Cenário Principal	
Ações do Ator	Ações do Sistema
	O sistema realiza a compilação de elementos que compõem o desenho CAD e realiza a validação dos atributos atribuídos aos elementos. Caso a validação esteja correta, o sistema progride para a implantação do projeto.

3. Documentação do Diagrama de Casos de Uso do Pré-visualizador 3D de Planta Baixa

Tabela A.11: Documentação do Caso de Uso UC-VT01 - Navegar pelo Ambiente Virtual.

Nome do Caso de Uso	UC-VT01 - Navegar pelo Ambiente Virtual
Ator Principal	AT02-Projetista
Resumo	O caso de uso descreve como o projetista navega pelos ambientes virtuais 3D.
Pré-condições	1. O ator deve estar autenticado no Gerenciador de Ambientes Virtuais. 2. Um projeto em CAD deve estar aberto.
Cenário Principal	
Ações do Ator	Ações do Sistema
O ator pode navegar pelo ambiente virtual 3D utilizando o <i>mouse</i> e teclado para mudar o ângulo de visão e movimentar-se pelo cenário.	

Tabela A.12: Documentação do Caso de Uso UC-VT02 - Selecionar tipo de navegação.

Nome do Caso de Uso	UC-VT02 - Selecionar Tipo de Navegação
Ator Principal	AT02-Projetista
Resumo	O caso de uso descreve a seleção do tipo de navegação no Ambiente Virtual 3D.
Pré-condições	1. O ator deve estar autenticado no Gerenciador de Ambientes Virtuais. 2. Um projeto em CAD deve estar aberto.
Cenário Principal	
Ações do Ator	Ações do Sistema
Selecionar o tipo de navegação, como visão em primeira pessoa, navegação livre, navegação orbital.	O sistema muda os movimentos da câmera ao ser configurado pelo ator.

Tabela A.13: Documentação do Caso de Uso UC-VT03 - Visualizar identificação dos modelos.

Nome do Caso de Uso	UC-VT03 - Visualizar Identificação dos Modelos
Ator Principal	AT02-Projetista
Resumo	O caso de uso descreve as etapas para visualizar a identificação dos modelos 3D em cena.
Pré-condições	1. O ator deve estar autenticado no Gerenciador de Ambientes Virtuais. 2. Um projeto em CAD deve estar aberto.
Cenário Principal	
Ações do Ator	Ações do Sistema
O ator pode ativar por meio da interface gráfica a visualização das identificações dos modelos 3D.	O sistema habilita os rótulos dos equipamentos.

Tabela A.14: Documentação do Caso de Uso UC-VT04 - Visualizar informações da reconstrução do Ambiente Virtual.

Nome do Caso de Uso	UC-VT04 - Visualizar Informações da Reconstrução do Ambiente Virtual
Ator Principal	AT02-Projetista
Resumo	O caso de uso descreve como o ator pode visualizar as informações de reconstrução do ambiente virtual.
Pré-condições	1. O ator deve estar autenticado no Gerenciador de Ambientes Virtuais. 2. Um projeto em CAD deve estar aberto.
Cenário Principal	
Ações do Ator	Ações do Sistema
O ator pode expandir a interface gráfica de Log do sistema e visualizar as informações geradas durante a reconstrução do AV.	O sistema recolhe as informações durante o processo de reconstrução do Ambiente Virtual e disponibiliza ao ator por meio de interface gráfica.

Tabela A.15: Documentação do Caso de Uso UC-VT05 - Baixar ativos necessários.

Nome do Caso de Uso	UC-VT05 - Baixar Ativos Necessários
Ator Principal	AT05-Rest API - Gerenciador de Ambientes Virtuais
Resumo	O caso de uso descreve as etapas para realizar a transferência de ativos necessários para reconstruir o AV, como dados sobre o AV e modelos 3D.
Pré-condições	1. O ator deve estar autenticado no Gerenciador de Ambientes Virtuais. 2. Um projeto em CAD deve estar aberto.
Cenário Principal	
Ações do Ator	Ações do Sistema
Fornecer as informações necessários para reconstrução do AV.	O sistema analisa quais são os ativos necessários para a reconstrução do AV, caso haja modelos a serem baixados, o sistema acessa o Gerenciador de AV para obtê-los.

Tabela A.16: Documentação do Caso de Uso UC-VT06 - Reconstruir o cenário 3D.

Nome do Caso de Uso	UC-VT06 - Reconstruir o Cenário 3D
Ator Principal	AT05-Rest API - Gerenciador de Ambientes Virtuais
Resumo	O caso de uso descreve as etapas para que o sistema construa os ambientes virtuais 3D.
Pré-condições	<ol style="list-style-type: none"> 1. O ator deve estar autenticado no Gerenciador de Ambientes Virtuais. 2. Um projeto em CAD deve estar aberto. 3. Baixar os ativos necessários.
Cenário Principal	
Ações do Ator	Ações do Sistema
	Ao realizar a transferência de todos os ativos, o sistema realiza a leitura dos dados e metadados de cada elemento que compõe o AV e os insere no cenário 3D, aplicando a matriz de transformação.

4. Documentação do Diagrama de Casos de Uso do Gerenciador de Ambientes Virtuais

Tabela A.17: Documentação do Caso de Uso UC-GA01 - Gerenciar modelos 3D.

Nome do Caso de Uso	UC-GA01 - Gerenciar Modelos 3D
Ator Principal	AT01-Modelador
Atores Secundário	AT02-Projetista, AT04-Administrador, AT05-Rest API - Gerenciador de AV
Resumo	O caso de uso descreve as etapas para gerenciar os modelos 3D do Gerenciador de Ambientes Virtuais, como: cadastro/edição de modelos 3D.
Pré-condições	O ator deve estar autenticado no Gerenciador de Ambientes Virtuais.
Cenário Principal	
Ações do Ator	Ações do Sistema
O ator pode cadastrar novos modelos selecionando a opção de cadastros. Deve-se informar o tipo de elemento, fabricante do elemento, tensão de operação quando aplicável, símbolo, modelo 3D no formato editável (formato da aplicação de modelagem) e o modelo 3D no formato exportado (formato utilizado no motor de jogos).	O sistema realiza a validação dos dados informados. Após a validação o modelo é inserido no banco de dados e disponibilizado para visualização.
O ator pode editar as informações dos modelos 3D que não estejam em uso por alguma subestação virtual. Essa etapa é igual ao cadastro do modelo 3D.	O sistema realiza a validação dos dados informados. Após a validação o modelo é inserido no banco de dados e disponibilizado para visualização.
O ator pode realizar buscas de modelos 3D utilizando o filtro de buscas, informando dos mesmos dados de cadastro.	O sistema realiza uma busca no banco de dados com as configurações de filtro definidas pelo ator.
O ator pode visualizar o modelo em um visualizador 3D.	O sistema fornece ao usuário a visualização 3D de um modelo selecionado.
O ator pode realizar a transferência dos modelos.	O sistema fornece ao usuário um <i>link</i> para baixar o modelo.

Tabela A.18: Documentação do Caso de Uso UC-GA02 - Visualizar modelos em 3D.

Nome do Caso de Uso	UC-GA02 - Visualizar Modelos em 3D
Ator Principal	AT01-Modelador
Atores Secundário	AT02-Projetista, AT04-Administrador, AT03-Convidado
Resumo	O caso de uso descreve as etapas para visualizar modelos 3D.
Pré-condições	O ator deve estar autenticado no Gerenciador de Ambientes Virtuais.
Cenário Principal	
Ações do Ator	Ações do Sistema
O ator pode buscar por modelos 3D aplicando filtros de busca e visualizar em um visualizador 3D.	O sistema fornece ao usuário a visualização 3D de um modelo selecionado

Tabela A.19: Documentação do Caso de Uso UC-GA03 - Gerenciar símbolos.

Nome do Caso de Uso	UC-GA03 - Gerenciar Símbolos
Ator Principal	AT05-Rest API - Gerenciador de AV
Atores Secundário	AT02-Projetista, AT04-Administrador
Resumo	O caso de uso descreve as etapas para gerenciar que símbolos são utilizados no CAD.
Pré-condições	O ator deve estar autenticado no Gerenciador de Ambientes Virtuais.
Cenário Principal	
Ações do Ator	Ações do Sistema
O ator realiza o cadastro de símbolos por meio de solicitações da internet. No caso a ferramenta de edição no <i>software</i> CAD pode criar um novo símbolo e solicitar o cadastro, atribuindo o símbolo a um modelo 3D.	O sistema realizar o cadastro e atribuição do símbolo a um modelo 3D.

Tabela A.20: Documentação do Caso de Uso UC-GA04 - Gerenciar projetos de subestações.

Nome do Caso de Uso	UC-GA04 - Gerenciar Projetos de Subestações
Ator Principal	AT02-Projetista
Atores Secundário	AT04-Administrador, AT05-Rest API - Gerenciador de AV
Resumo	O caso de uso descreve as etapas para gerenciar os projetos de subestações de energia elétrica.
Pré-condições	O ator deve estar autenticado no Gerenciador de Ambientes Virtuais.
Cenário Principal	
Ações do Ator	Ações do Sistema
O projetista pode realizar o cadastro e atualização de projetos de subestações.	O sistema realiza o armazenamento das informações dos projetos em banco de dados.
O projetista pode realizar a edição de projetos de subestações	O sistema realiza a edição e armazenamento das edições realizadas.
O projetista pode realizar as atualizações dos projetos em versões de modificações utilizando o caso de uso de versionamento.	A cada atualização o sistema cria um novo Log de alterações e armazena em banco de dados.
O projetista pode visualizar o Logs de alterações e baixar os arquivos de cada um.	O sistema fornece ao projetista as informações armazenadas para cada mudança realizada no projeto.

Tabela A.21: Documentação do Caso de Uso UC-GA05 - Gerenciar versões históricas.

Nome do Caso de Uso	UC-GA05 - Gerenciar Versionamento
Ator Principal	AT02-Projetista
Atores Secundário	AT04-Administrador, AT05-Rest API - Gerenciador de AV
Resumo	O caso de uso descreve as etapas para gerenciar o versionamento de atualizações de desenhos de projetos de subestações.
Pré-condições	O ator deve estar autenticado no Gerenciador de Ambientes Virtuais.
Cenário Principal	
Ações do Ator	Ações do Sistema
Durante o gerenciamento de projetos de subestações, novas atualizações podem ser criadas, tanto pelo projetista quanto pelo Rest API por solicitações da internet. Essas novas atualizações são armazenadas e chamadas de versões.	O sistema recebe as novas solicitações para o armazenamento de uma nova versão, realiza o armazenamento em banco de dados.

Tabela A.22: Documentação do Caso de Uso UC-GA06 - Gerenciar documentos de subestações.

Nome do Caso de Uso	UC-GA06 - Gerenciar Documentos de Subestações
Ator Principal	AT01-Modelador
Atores Secundário	AT02-Projetista, AT04-Administrador
Resumo	O caso de uso descreve as etapas para gerenciar os documentos importantes para os projetos de subestações. Inclui o cadastro, edição e remoção de documentos.
Pré-condições	O ator deve estar autenticado no Gerenciador de Ambientes Virtuais.
Cenário Principal	
Ações do Ator	Ações do Sistema
O ator pode cadastrar um novo documento.	O sistema armazena as informações em banco de dados.
O ator pode remover um documento.	O sistema remove os arquivos do bando de dados.
O ator pode baixar um documento.	O sistema disponibiliza um <i>link</i> para transferência do documento.

Tabela A.23: Documentação do Caso de Uso UC-GA07 - Gerenciar configurações globais.

Nome do Caso de Uso	UC-GA07 - Gerenciar Configurações Globais
Ator Principal	AT04-Administrador
Atores Secundário	AT05-Rest API - Gerenciador de Ambientes Virtuais
Resumo	O caso de uso descreve as etapas para gerenciar as configurações globais do sistema. Como gerenciamento de tensões utilizadas por modelos 3D, fabricante de equipamentos e tipos de equipamentos.
Pré-condições	O ator deve estar autenticado no Gerenciador de Ambientes Virtuais.
Cenário Principal	
Ações do Ator	Ações do Sistema
O ator pode cadastrar, editar e remover tensões.	O sistema realiza o cadastramento, edição e remoção dos itens no banco de dados.
O ator pode cadastrar, editar e remover fabricantes.	O sistema realiza o cadastramento, edição e remoção dos itens no banco de dados.
O ator pode cadastrar, editar e remover tipos de equipamentos.	O sistema realiza o cadastramento, edição e remoção dos itens no banco de dados.

Tabela A.24: Documentação do Caso de Uso UC-GA08 - Gerenciar usuários.

Nome do Caso de Uso	UC-GA08 - Gerenciar Usuários
Ator Principal	AT04-Administrador
Atores Secundário	AT05-Rest API - Gerenciador de Ambientes Virtuais
Resumo	O caso de uso descreve as etapas para gerenciar os usuários do gerenciador de ambientes virtuais, realizar operações de cadastro, edição e remoção de usuários do sistema.
Pré-condições	O ator deve estar autenticado no Gerenciador de Ambientes Virtuais.
Pós-condições	Atribuir ao novo usuário, um grupo.
Cenário Principal	
Ações do Ator	Ações do Sistema
O administrador pode cadastrar um usuário informando o nome completo, telefone, setor, cargo, matricula, grupo e <i>e-mail</i> .	O sistema valida todos os dados inseridos e armazena em banco de dados o novo usuário.
O administrador pode editar o cadastro de usuário informando os mesmos dados no momento de cadastro.	O sistema valida todos os dados inseridos e atualiza em banco de dados o novo usuário.
O administrador pode remover o cadastro de usuário, selecionando-o e solicitando ao sistema a remoção.	O sistema busca pelo usuário e o remove do sistema.

Tabela A.25: Documentação do Caso de Uso UC-GA09 - Atribuir grupo.

Nome do Caso de Uso	UC-GA09 - Atribuir Grupo
Ator Principal	AT04-Administrador
Resumo	O caso de uso descreve as etapas para atribuir um grupo no momento de cadastro de um novo usuário.
Pré-condições	1. O ator deve estar autenticado no Gerenciador de Ambientes Virtuais. 2. O ator deve cadastrar um novo usuário.
Cenário Principal	
Ações do Ator	Ações do Sistema
Ao cadastrar um novo usuário, o administrador deverá informar seu grupo pertencente. Os grupos são: convidado, administrador, projetista e modelador.	O sistema atribui ao novo usuário um grupo de trabalho.

5. Documentação do Diagrama de Casos de Uso do Módulo de Reconstrução de Ambientes Virtuais

Tabela A.26: Documentação do Caso de Uso UC-MR01 - Autenticar usuário.

Nome do Caso de Uso	UC-MR01 - Autenticar Usuário
Ator Principal	AT07-Sistema de Realidade Virtual
Atores Secundário	AT05-Rest API - Gerenciador de Ambientes Virtuais
Resumo	O caso de uso descreve as etapas para autenticar um usuário do SRV ao Gerenciador de Ambientes Virtuais.
Cenário Principal	
Ações do Ator	Ações do Sistema
O ator principal deve informar a credencial do usuário.	Realizar acesso ao Gerenciador de Ambientes Virtuais para solicitar a autenticação do usuário. Retornar resposta de autenticação concedida ou não.

Tabela A.27: Documentação do Caso de Uso UC-MR02 - Gerenciar arquivos de integração.

Nome do Caso de Uso	UC-MR02 - Gerenciar Arquivos de Integração
Ator Principal	AT07-Sistema de Realidade Virtual
Resumo	O caso de uso descreve as etapas para buscar o arquivo de integração com RV no Gerenciador de AVs.
Pré-condições	Estar autenticado no Gerenciador de Ambientes Virtuais.
Pós-condições	Realizar a transferência de ativos necessários para o carregamento de um cenário no SRV.
Cenário Principal	
Ações do Ator	Ações do Sistema
O ator principal deve informar ao sistema qual subestação será carregada.	O sistema realiza acesso ao Gerenciador de Ambientes Virtuais e realiza a transferência dos dados de construção da subestação.

Tabela A.28: Documentação do Caso de Uso UC-MR03 - Reconstruir o cenário 3D.

Nome do Caso de Uso	UC-MR03 - Reconstruir o Cenário 3D
Ator Principal	AT07-Sistema de Realidade Virtual
Resumo	O caso de uso descreve as etapas para reconstruir um Ambiente Virtual a partir de informações de construção de uma subestação elaborada em planta baixa. É descrito os passos para realizar a reconstrução do AV.
Pré-condições	<ol style="list-style-type: none"> 1. Estar autenticado no Gerenciador de Ambientes Virtuais. 2. Possuir as informações de construção do AV.
Pós-condições	<ol style="list-style-type: none"> 1. Gerenciar ativos que já estão baixados. 2. Se necessário, realizar a transferência de novos modelos.
Cenário Principal	
Ações do Ator	Ações do Sistema
Utilizando o arquivo informações de construção, iniciar o procedimento de gerenciamento de ativos.	<ol style="list-style-type: none"> 1. O sistema verifica se os ativos presentes no arquivo de informações de construção, estão presentes nos arquivos locais. Caso não estejam, o sistema realiza as transferências. 2. O sistema realiza a busca dos modelos selecionados, descriptografa e carrega na memória. 3. Inicia-se o processo de reconstrução, inserindo os modelos da memória no Ambiente Virtual.

Tabela A.29: Documentação do Caso de Uso UC-MR04 - Gerenciar *download* de ativos.

Nome do Caso de Uso	UC-MR04 - Gerenciar <i>download</i> de Ativos
Ator Principal	AT05-Rest API - Gerenciador de Ambientes Virtuais
Resumo	O caso de uso descreve as etapas para acessar o Gerenciador de Ambientes Virtuais e realizar transferência de ativos.
Pré-condições	1. Estar autenticado no Gerenciador de Ambientes Virtuais. 2. Possuir as informações de construção do AV.
Cenário Principal	
Ações do Ator	Ações do Sistema
Fornecer por meio de API o acesso aos ativos a serem baixados.	Por uma fila de itens o sistema realiza a transferência de cada ativo.

Tabela A.30: Documentação do Caso de Uso UC-MR05 - Gerenciar ativos.

Nome do Caso de Uso	UC-MR05 - Gerenciar Ativos
Resumo	O caso de uso realiza o gerenciamento de ativos. Verifica ativos pronto para uso e os que são necessários baixar.
Pré-condições	Possuir a lista de ativos que serão utilizados na reconstrução do Ambiente Virtual.
Pós-condições	Caso necessário, realizar transferência de ativos.
Cenário Principal	
Ações do Ator	Ações do Sistema
	1. Verificar ativos locais. 2. Gerar uma lista de ativos que necessitam de transferência. 3. Solicitar transferência de ativos.

Tabela A.31: Documentação do Caso de Uso UC-MR06 - Gerenciar diretórios.

Nome do Caso de Uso	UC-MR06 - Gerenciar Diretórios
Resumo	O caso de uso realiza os processos de validação de diretórios, gera lista de itens do diretório. Caso um diretório não exista, ele é criado.
Pós-condições	Informa ao sistema sucesso nas ações.
Cenário Principal	
Ações do Ator	Ações do Sistema
	<ol style="list-style-type: none"> 1. Verifica diretórios do sistema, caso não exista cria-os. 2. Lista os itens dos diretórios.

APÊNDICE B - Diagramas UML

1. Introdução

O Apêndice B é relacionado ao Capítulo 5 - Desenvolvimento. São apresentados os Diagramas de Classe dos *softwares* Editor CAD, Gerenciador de Ambientes Virtuais e Módulo de Reconstrução de AVs. A Tabela B.1 identifica a lista de diagramas de classe de cada sistema.

Tabela B.1: Lista de diagramas de classes.

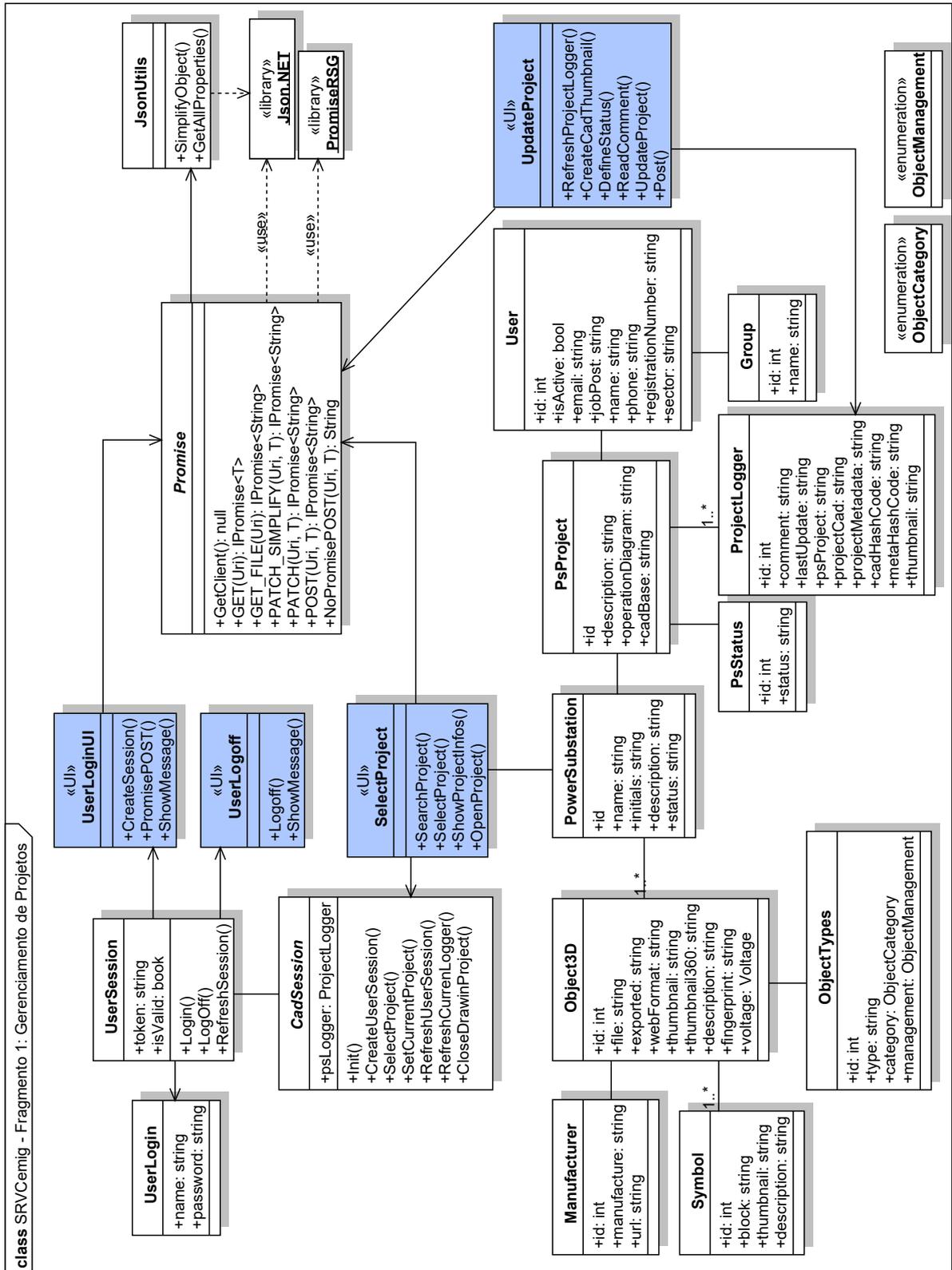
Editor CAD:	
Figura B.1	Fragmento 1 - Gerenciamento de projetos
Figura B.2	Fragmento 2 - Implantação de projetos no SRV
Figura B.3	Fragmento 3 - Manipulação da planta baixa
Figura B.4	Fragmento 4 - Comandos do Sistema
Módulo de Reconstrução de Ambientes Virtuais:	
Figura B.5	Módulo de Reconstrução de AVs
Gerenciador de Ambientes Virtuais:	
Figura B.6	Relacionamento entre Modelos

Fonte: o autor.

2. Diagramas de Classe do Editor CAD

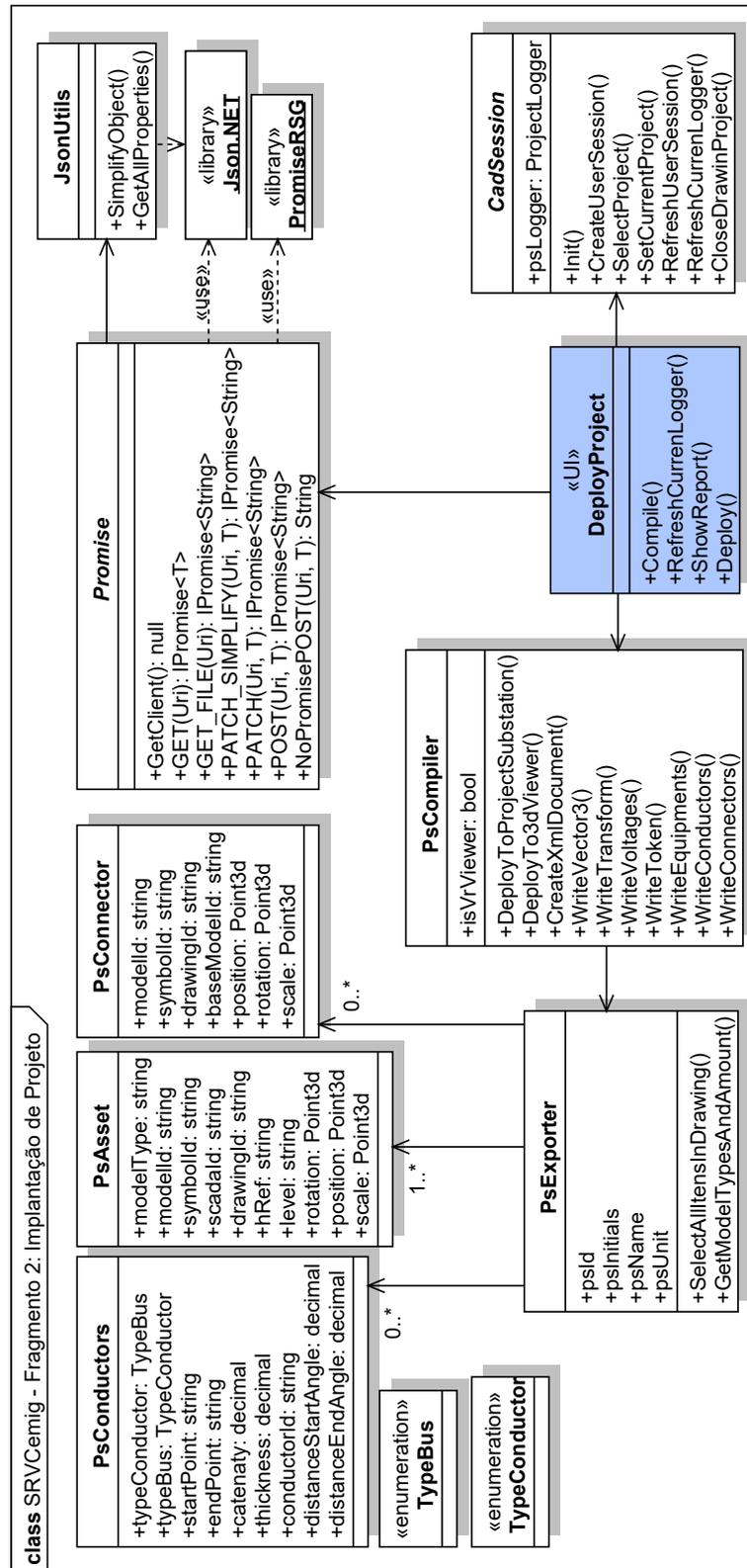
O diagrama de classe do *software* ECAD possui inúmeros componentes, sendo assim, foi fragmentado.

Figura B.1: Diagrama de classe do gerenciamento de projetos.



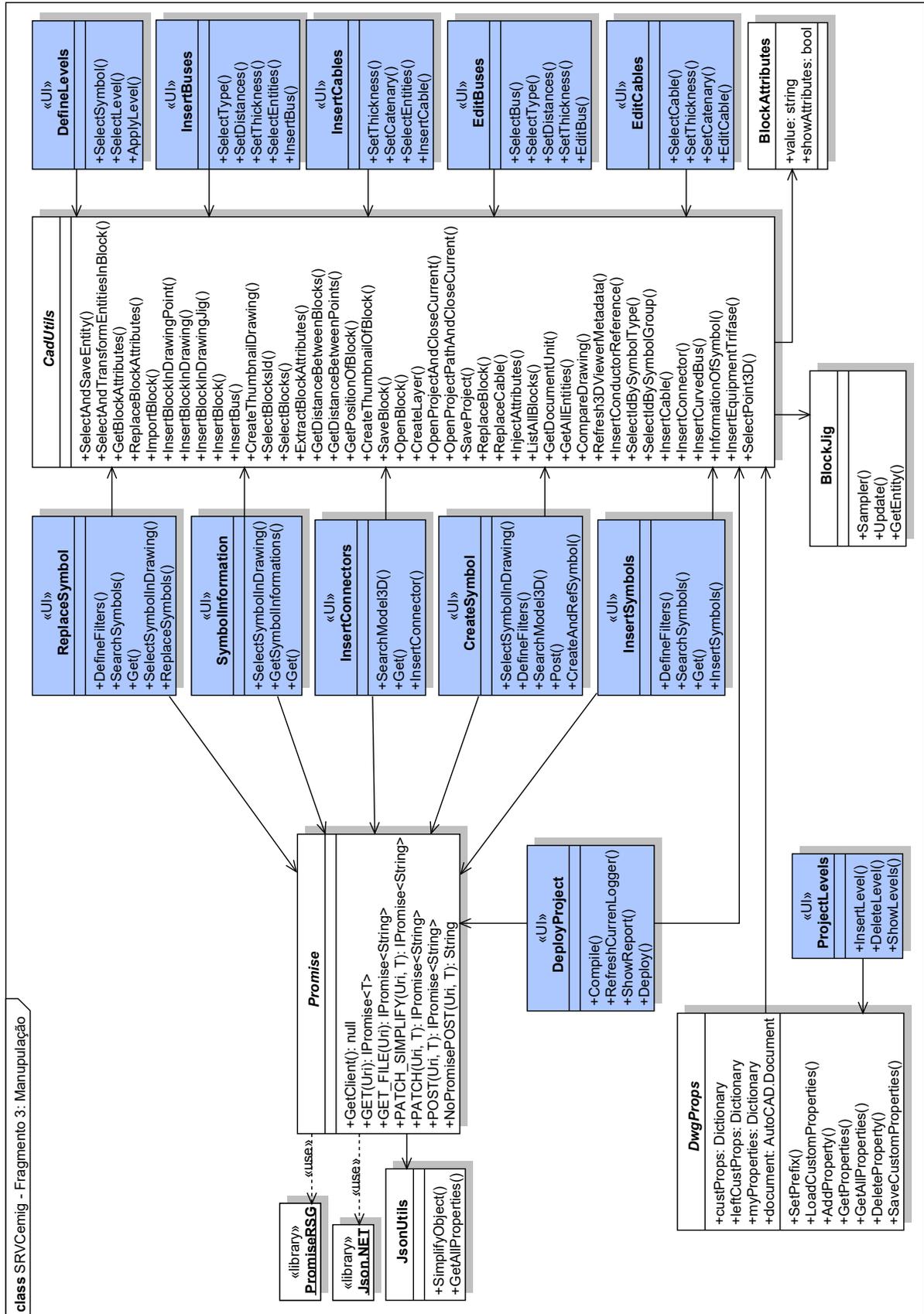
Fonte: o autor.

Figura B.2: Diagrama de classe da implantação de projetos no Sistema de Realidade Virtual.



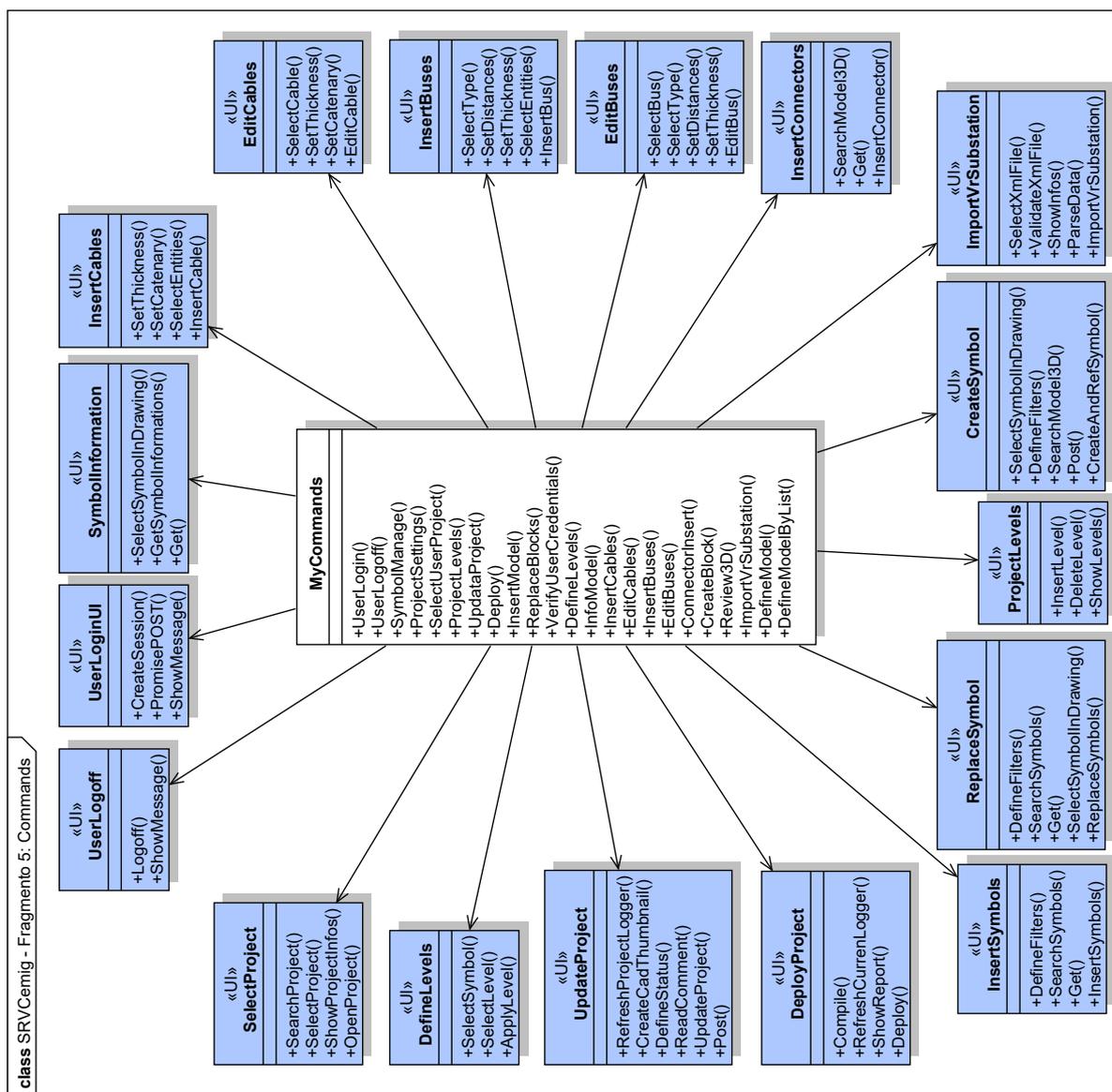
Fonte: o autor.

Figura B.3: Diagrama de classe da manipulação de plantas baixas em CAD.



Fonte: o autor.

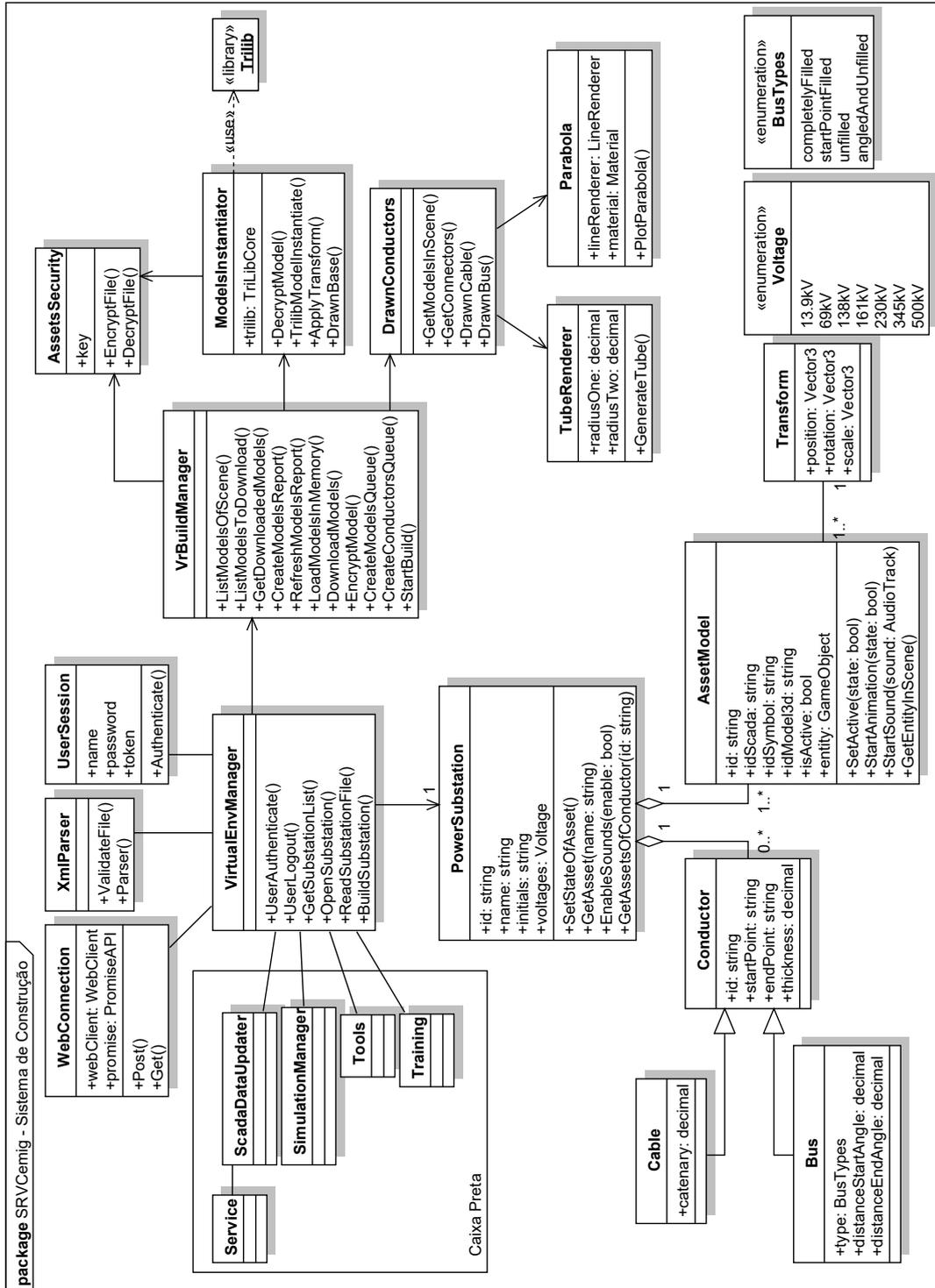
Figura B.4: Diagrama de classe dos comandos CAD.



Fonte: o autor.

3. Diagrama de Classe do Módulo de Reconstrução de Ambientes Virtuais

Figura B.5: Diagrama de classes do Módulo de Reconstrução de Ambientes Virtuais para SRV.



Fonte: o autor.

APÊNDICE C - Análise de Desempenho

São apresentados os resultados dos testes de desempenho aplicados ao módulo de reconstrução de AVs. O objetivo é analisar se o sistema fornece os requisitos de desempenho para uso em supervisão. Além disso, obter uma definição das características básicas de *hardware* para manter o mínimo desempenho gráfico exigido.

Sendo assim, foram realizadas coletas de informações como o tempo de carregamento dos AVs, tempo de transferência de insumos do GAV e taxas de atualização do cenário virtual.

Por meio de projetos de SEs concedidos pela concessionária de energia elétrica, foram levantadas as quantidades de modelos 3D utilizados nas plantas baixas. As subestações analisadas foram NEVES1, PCATU4, EMBO, GVAL2, ITAJU3, JAGU, JFOR1, MCLAR2, NPON, OPR2, SDUM2 e SGOT2.

As subestações são heterogêneas, com quantidades de modelos 3D distintos. A Tabela C.1 apresenta a quantidade de modelos 3D distintos e quantidade de reprodução por elemento. Em média, são aproximadamente 58 modelos 3D distintos por subestação e aproximadamente 16 reproduções por cada elemento.

Tabela C.1: Informações sobre quantidades de modelos 3D distintos e suas cópias.

Subestação	Modelos 3D	Modelos 3D + Reproduções	Reproduções por modelos 3D
NEVES1	107	1685	15.74
PCATU4	38	540	14.21
EMBO	62	1310	21.12
GVAL2	58	1547	26.67
ITAJU3	34	484	14.23
JAGU	46	1241	26.97
UHJAGU	21	227	10.80
JFOR1	76	816	10.73
MCLAR2	53	841	15.86
NPON	32	411	12.84
OPR2	107	1743	16.28
SDUM2	39	466	11.94
SGOT2	83	717	8.63
Média:	58.15 (≈58)	925,23 (≈925)	15.84 (≈16)

Fonte: o autor.

Os testes foram realizados em cinco computadores com configurações de *hardware* distintos. A Tabela C.2 apresenta as especificações dos computadores utilizados nos testes de desempenho. São computadores disponíveis no momento dos testes, com configurações diferentes em relação a processadores, memórias e placas gráficas.

Tabela C.2: Especificações técnicas dos computadores utilizados nos testes.

Dispositivo	Especificações
Computador 1	Tipo: Notebook
	Processador: i7 8750H - 6 núcleos de 2.2Ghz
	Acelerador Gráfico: Nvidia GeForce 1060 Max-Q
	Memória: 16Gb
	Armazenamento: 256Gb SSD
Sistema Operacional: Windows 10	
Computador 2	Tipo: Desktop
	Processador: i5 7400 - 4 núcleos de 3Ghz
	Acelerador Gráfico: Nvidia GeForce 1070
	Memória: 16Gb
	Armazenamento: 512Gb SSD
Sistema Operacional: Windows 10	
Computador 3	Tipo: Desktop
	Processador: i7 4790 - 4 núcleos de 3.6Ghz
	Acelerador Gráfico: AMD Radeon R7 370
	Memória: 8Gb
	Armazenamento: 128Gb SSD
Sistema Operacional: Windows 10	
Computador 4	Tipo: Desktop
	Processador: i7 6700 - 4 núcleos de 3.4Ghz
	Acelerador Gráfico: Nvidia GeForce GT 420
	Memória: 8Gb
	Armazenamento: 512Gb HD
Sistema Operacional: Windows 10	
Computador 5	Tipo: Notebook
	Processador: i3 370M - 2 núcleos de 2.4Ghz
	Acelerador Gráfico: Intel HD Graphics
	Memória: 3Gb
	Armazenamento: 500Gb HD
Sistema Operacional: Windows 10	

Fonte: o autor.

Desta forma, obteve-se dados de desempenho dos processadores e dos aceleradores gráficos de cada computador pelo sistema *online* [PassMark \(2020\)](#), que armazena e fornece os dados de *benchmarks* realizados pela empresa. A Tabela C.3 apresenta as informações de desempenho.

A Figura C.1 apresenta um gráfico comparativo entre os *hardwares* utilizados nos testes. Pode-se observar que os computadores um, três e cinco mantiveram seus valores de desempenho de processador e acelerador gráfico proporcionais, pois a maioria dos computadores tem o desempenho de processamento mais alto do que o gráfico. Além de serem *notebooks*, os quais os fabricantes prezam pelo equilíbrio de processamento.

Contudo, os computadores dois e quatro apresentam discrepância em relação ao poder de processamento do acelerador gráfico e do processador. Observa-se que o computador dois possui desempenho gráfico desproporcional em relação ao acelerador gráfico, da mesma forma, o computador quatro apresenta um nível de desempenho em relação ao acelerador gráfico. Sendo assim, acredita-se que os computadores foram construídos sem considerar o desempenho proporcional.

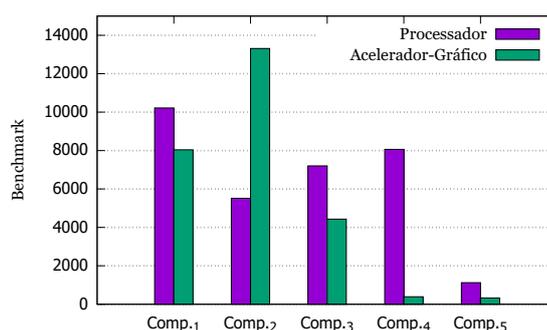
Desta forma, são apresentadas análises em relação ao tempo de transferência de insumos, desempenho do processador no momento da reconstrução dos AVs e o desempenho em relação à qualidade visual durante os testes de Quadros por Segundo (QPS).

Tabela C.3: Desempenho por *benchmark* dos processadores e aceleradores gráficos.

	Comp. 1	Comp. 2	Comp. 3	Comp. 4	Comp. 5
Processador	10219	5514	7204	8061	1124
Acelerador Gráfico	8042	13311	4432	389	325

Fonte: Adaptado de [PassMark \(2020\)](#).

Figura C.1: *Benchmark* dos processadores e aceleradores gráficos.



Fonte: o autor.

1. Transferência de Insumos

Para algumas aplicações de RV, um requisito essencial é o limite de tempo para o carregamento do *software*. Sistemas que demandam curto tempo de carregamento devem priorizar o módulo responsável pela tarefa e otimizá-lo. Desta forma, foram realizados testes de tempo de transferência dos elementos que compõem os AVs visando analisar o desempenho e tempo gasto com configurações distintas de cenários virtuais.

O módulo de reconstrução usa uma estratégia de transferência de arquivos quando o SRV é carregado pela primeira vez ou quando há atualizações dos insumos. Sendo assim, o tempo de transferência é apenas contabilizado nessas circunstâncias.

Os testes foram conduzidos da seguinte forma:

1. Pelos dos dados da Tabela [C.1](#), uma lista de 60 modelos 3D foi elaborada, garantindo que em todos os testes os mesmos elementos sejam utilizados;
2. Testes de tempo de transferência por conjuntos de modelos 3D contendo 15, 30, 45 e 60 elementos, os modelos dos conjuntos anteriores são reutilizados nos conjuntos posteriores. O tamanho dos conjuntos em megabytes são 11.6Mb, 23Mb, 29.1Mb e 48.2Mb respectivamente;
3. Testes em três provedores de *internet*, disponíveis nas cidades de Uberlândia-MG e Patrocínio-MG;
4. Para cada conjunto de modelos 3D e provedor de *internet*, foram colhidas 10 amostras;
5. Após a coleta das amostras, foram calculadas as médias aritméticas de cada conjunto;
6. Foi utilizado o Computador 1 para realizar os testes.

No momento da execução dos testes os provedores apresentaram as características indicadas na Tabela [C.4](#).

Tabela C.4: Informações sobre os provedores utilizados nos testes.

	Latência	Velocidade de Transferência
Provedor 1	46ms	31.8 Mb/s
Provedor 2	13ms	106.8 Mb/s
Provedor 3	14ms	55.1 Mb/s

A Tabela [C.5](#) apresenta os dados coletados nos testes, sendo assim, para cada conjunto de modelos 3D, os dados foram dispostos por provedor (P1, P2 e P3). Na última linha da tabela é apresentada a média aritmética de tempo de transferência por conjunto.

Os dados da Tabela [C.5](#) foram inseridos no gráfico da Figura [C.2a](#) para melhor visualização das informações. Pode-se observar as linhas referentes às médias de cada conjunto de modelos 3D, elas demonstram um sistema quase linear para o tempo de transferência. Isso pode ser observado também na Figura [C.2b](#), na qual uma linha traçada entre as médias dos conjuntos de transferência é próximo ao linear.

Com a linha de tendência, pode-se prever o tempo de transferência para outras quantidades de modelos 3D, obtendo uma estimativa do tempo total de carregamento do SRV baseando-se na quantidade de modelos 3D e nas características da conexão com a *internet*.

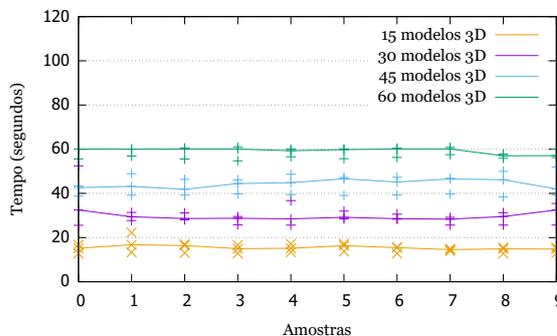
Tabela C.5: Amostras de tempo para transferência de conjuntos de modelos 3D em diferentes provedores de *internet* (em segundos).

15 itens (11.6mb)			30 itens (23mb)			45 itens (29.1mb)			60 itens (48.2mb)		
P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3
15.2	16.73	12.82	15.2	16.73	12.82	15.2	16.73	12.82	15.2	16.73	12.82
22.26	16.75	13.31	22.26	16.75	13.31	22.26	16.75	13.31	22.26	16.75	13.31
16.38	17.05	13.06	16.38	17.05	13.06	16.38	17.05	13.06	16.38	17.05	13.06
15	16.61	12.86	15	16.61	12.86	15	16.61	12.86	15	16.61	12.86
17.1	15.16	13.41	17.1	15.16	13.41	17.1	15.16	13.41	17.1	15.16	13.41
16.34	17.19	13.73	16.34	17.19	13.73	16.34	17.19	13.73	16.34	17.19	13.73
15.42	15.67	12.86	15.42	15.67	12.86	15.42	15.67	12.86	15.42	15.67	12.86
14.96	14.56	13.86	14.96	14.56	13.86	14.96	14.56	13.86	14.96	14.56	13.86
14.9	15.55	12.81	14.9	15.55	12.81	14.9	15.55	12.81	14.9	15.55	12.81
14.79	15.52	13.05	14.79	15.52	13.05	14.79	15.52	13.05	14.79	15.52	13.05
Média: 15.31s			Média: 29.46s			Média: 45.1s			Média: 60.05s		

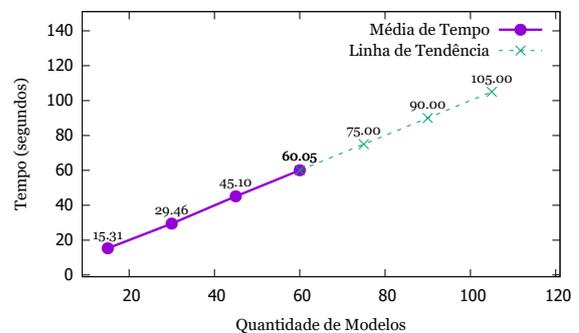
Fonte: o autor.

Figura C.2: Tempo de transferência de modelos 3D no *software* de Realidade Virtual.

(a) Tempo de transferência para os conjuntos de modelos 3D.



(b) Média de tempo para transferência de modelos 3D.



Fonte: o autor.

Considerando a média de modelos 3D apresentada na Tabela [C.1](#), onde há cerca de 58 modelos 3D por SE, pode-se calcular que o tempo de transferência é de aproximadamente 57 segundos, considerando os testes realizados. É imprescindível salientar que os resultados podem variar em diferentes configurações da rede de *internet*.

2. Reconstrução de Ambientes Virtuais

O tempo de reconstrução, é também, importante para determinados *softwares* de RV. Quanto menor o tempo de reconstrução, mais rápido as respostas visuais são fornecidas ao usuário e mais rápido o usuário consegue executar uma ação. O comportamento esperado para o SRV proposto é que o tempo de reconstrução seja abaixo de 120 segundos, como descrito

no requisito não funcional RNF03. Porém, esse comportamento é totalmente dependente das configurações de *hardware* do computador.

Sendo assim, além do tempo de reconstrução de AVs com configurações pré-definidas, a análise de *hardware* e seus componentes são importantes.

Os testes desta seção, tiveram foco no processo de carregamento dos modelos 3D utilizando a biblioteca Trilib e o tempo em que o módulo realiza cópias dos modelos 3D no AV. Entretanto, além desses processos, existem as tarefas de leitura do arquivo de integração, verificação dos modelos 3D baixados no diretório local e o carregamento temporário dos modelos 3D na memória.

Os testes foram conduzidos da seguinte forma:

1. Os testes foram realizados no pré-visualizador 3D;
2. Utilizando os dados informados na Tabela C.1 e baseando nas taxas médias de modelos 3D distintos e quantidade de cópias, foram definidos seis conjuntos com configurações. Conjuntos com 15, 30, 45, 60, 75 e 90 modelos distintos, com taxas de cópia por modelos 3D de 4, 8, 12, 16, 20 e 24 vezes e com número total de modelos 3D em cena respectivamente de 60, 240, 540, 960, 1500 e 2160;
3. A lista mantém os mesmos 90 modelos durante todas as etapas de testes;
4. Teste de tempo de carregamento dos modelos 3D pela Trilib, com configurações de processamento síncrono e assíncrono (disponível na biblioteca);
5. Para cada computador foram coletadas 5 amostras por conjuntos.

Sendo assim, a Tabela C.6 apresenta os resultados dos testes da reconstrução de AVs. Para facilitar a visualização das informações, foram elaborados os gráficos apresentados na Figura C.3

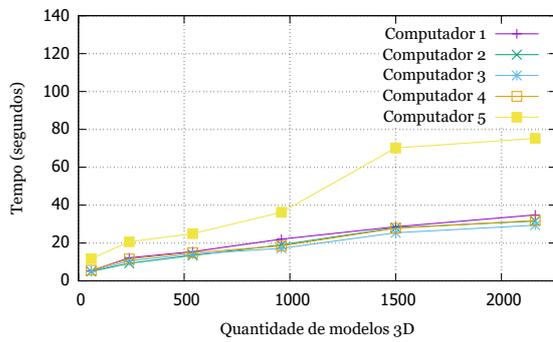
Tabela C.6: Tempo de reconstrução de Ambientes Virtuais (em segundos).

Configuração		Comp. 1		Comp. 2		Comp. 3		Comp. 4		Comp. 5	
Inst.	Cópias	Asnc	Sínc								
15	60	5.3	7.8	4.9	8.4	4.9	7.6	5.6	7.9	11.6	17.4
30	240	12.2	12.2	9.3	12.7	10.5	11.4	11.5	11.7	20.6	29.0
45	540	15.4	15.3	13.4	19.2	14.1	16.0	14.9	17.0	24.9	37.2
60	960	22.0	19.9	19.0	25.6	17.1	20.5	18.4	21.2	36.2	51.0
75	1500	28.5	25.8	28.0	32.2	25.4	26.0	27.7	28.0	70.1	72.8
90	2160	34.8	28.2	31.6	35.0	29.3	30.3	31.9	29.4	75.2	75.1

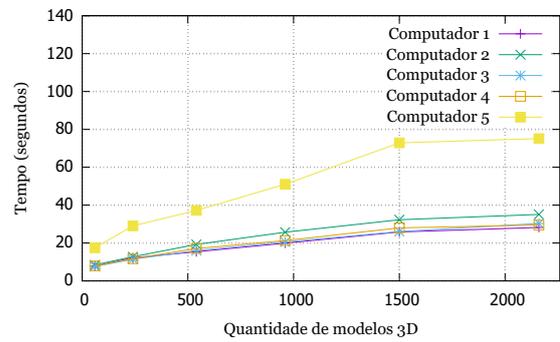
Fonte: o autor.

Figura C.3: Amostras do tempo de reconstrução de AVs no pré-visualizador 3D.

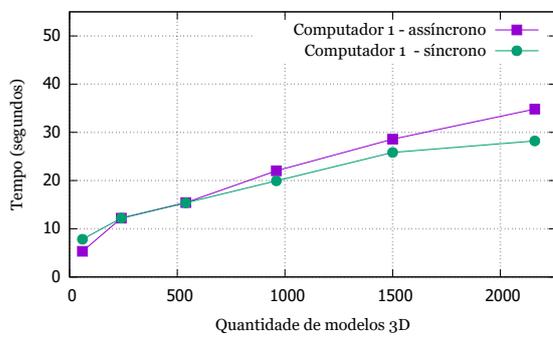
(a) Tempo de reconstrução em modo assíncrono.



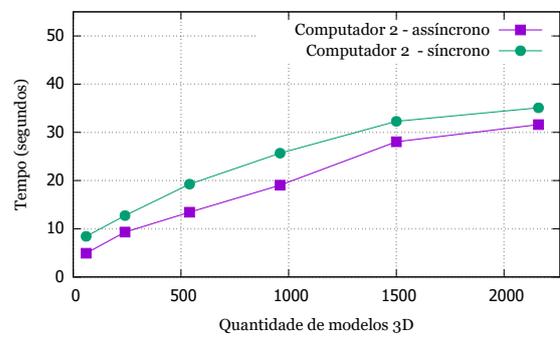
(b) Tempo de reconstrução em modo síncrono.



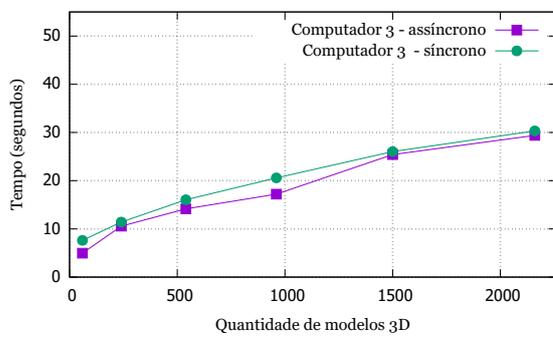
(c) Tempo de reconstrução para o computador 1.



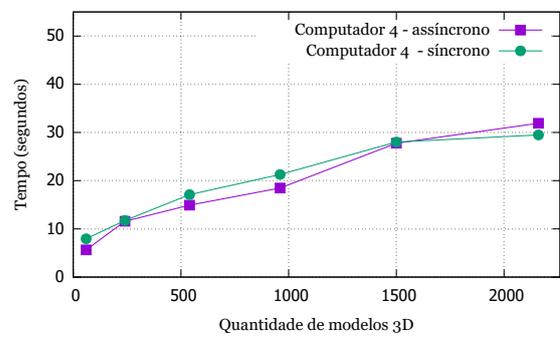
(d) Tempo de reconstrução para o computador 2.



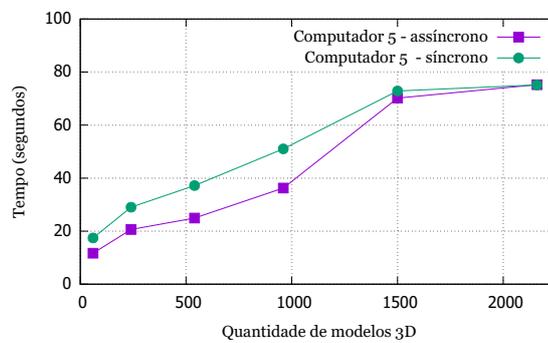
(e) Tempo de reconstrução para o computador 3.



(f) Tempo de reconstrução para o computador 4.



(g) Tempo de reconstrução para o computador 5.



Fonte: o autor.

A Figura C.3a apresenta o gráfico de reconstrução dos AVs para os conjuntos de testes descritos anteriormente, o modo de execução foi configurado para processamento assíncrono. Deste modo, pode-se observar que os computadores 1, 2, 3 e 4 apresentam um nível de desempenho próximos entre eles e o computador 5 apresentou um tempo maior em relação aos outros computadores. Isso pode ser justificado pelo desempenho de seu processador, como apresentado na Figura C.3a e na Tabela C.3, nas quais o desempenho é cerca de 9 vezes inferior ao desempenho do computador 1.

A Figura C.3b, por sua vez, apresenta o gráfico de reconstrução dos AVs configurado para o processamento síncrono, pode-se observar que o computador 5 possui o mesmo comportamento que na configuração de processamento assíncrona. Os computadores 1, 2, 3, e 4 mantiveram o comportamento, contudo, em determinados conjuntos de testes, apresentaram alguns segundos adicionais no tempo de carregamento.

Para comparar as diferenças de tempo de carregamento entre o modo assíncrono e síncrono, as Figuras C.3c, C.3d, C.3e, C.3f e C.3g ilustram as linhas dos tempos de carregamentos dos resultados das amostras para os computadores 1, 2, 3, 4 e 5, respectivamente. Para o computador 1 a maior diferença nos testes foi de 6.6 segundos, para o computador 2 foi de 6.6 segundos, para o computador 3 foi de 3.4 segundos, para o computador 4 foi de 2.8 segundos e para o computador 5 foi de 14.8 segundos.

Sendo assim, para os computadores 1, 2, 3 e 4, as diferenças de tempo entre o modo assíncrono e síncrono são no máximo 6.6 segundos, um tempo satisfatório para o Sistema de Realidade Virtual proposto. Portanto, os testes apresentaram desempenhos próximos em relação ao modo de carregamento síncrono e assíncrono, sendo que o modo assíncrono obteve alguns segundos de vantagem, caracterizando-o como a melhor opção para reconstrução dos AVs.

3. Desempenho da Atualização das Informações Visuais

Segundo Cummings e Bailenson (2015), o que define a qualidade da imagem, além do realismo e fidelidade da síntese da imagem, é a resolução e frequência de atualização. Desta forma, Tori, Silva Hounsell e Kirner (2006) reforçam que a frequência de atualização das informações visuais é algo fortemente ligado à imersão do usuário em aplicações de RV, onde a imersão se refere a quão preciso determinado sistema computacional é, ao prover ao usuário a ilusão de uma realidade diferente daquela na qual este se encontra.

Sendo assim, foram realizados testes de desempenho gráfico com foco na frequência de atualização das informações visuais. O objetivo é analisar a quantidade de Quadros por Segundo (QPS) que os Ambientes Virtuais da SE SLAG4 e hipotética podem desempenhar. Os testes foram conduzidos da seguinte forma:

- *Script de benchmark* de QPS foi implementado com um mecanismo de rotação orbital direcionado para o centro do cenário, renderizando todos os elementos simultaneamente.

Os testes possuem tempo total de 2 minutos, com coleta de 5 amostra por computador, obtendo dados de valores de máximo, mínimo e média de QPS;

- A resolução das imagens no SRV foi de 1080 *pixels* utilizando a qualidade visual máxima (anti-serrilhamento em 2x com múltiplas amostragens, sombras em alta resolução com distância de 150 metros, reflexões em tempo real).

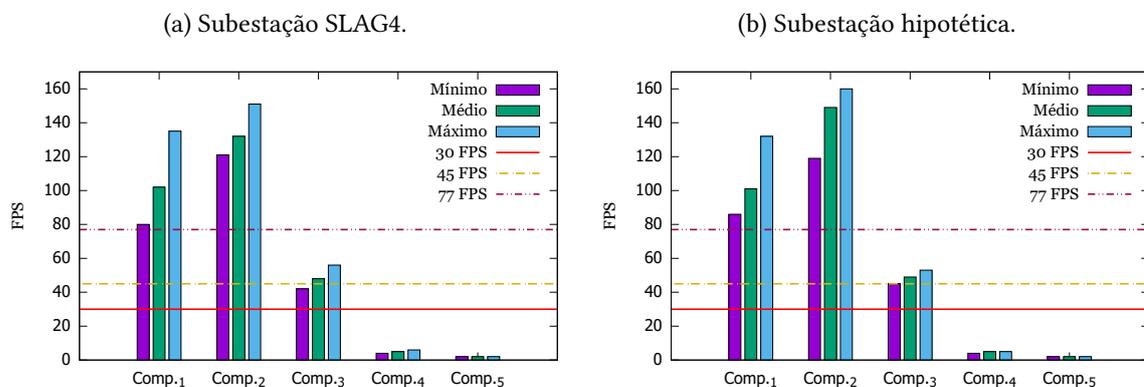
A definição de qualidade mínima de QPS necessários para que o usuário se sinta confortável, imerso e com sentido de presença em um Ambiente Virtual é, de certa forma, variável. Segundo [Humes et al. \(2009\)](#), a taxa mínima de atualização é de 45 QPS, baseando-se na taxa de atualização da visão humana. Entretanto, o trabalho de [Potter et al. \(2014\)](#) descreve que testes de apresentação de imagens em série para usuários apresentaram bons resultados com intervalos de 13 milissegundos, aproximadamente, 77 QPS. Nesse sentido, os autores [Claypool](#), [Claypool e Damaa \(2006\)](#) e [Bianchini et al. \(2006\)](#) relataram que para uma boa experiência com Realidade Virtual a taxa de atualização mínima deve ser de 30 QPS.

Tabela C.7: Dados sobre a atualização da informação visual (QPS).

	SLAG4			Hipotética		
	Médio	Mínimo	Máximo	Médio	Mínimo	Máximo
Computador 1	102	80	135	101	86	132
Computador 2	132	121	151	149	119	160
Computador 3	48	42	56	49	45	53
Computador 4	5	4	6	5	4	5
Computador 5	2	2	2	2	2	2

Fonte: o autor.

Figura C.4: QPS das subestações de testes.



Fonte: o autor.

Por meio da análise das frequências mínimas para garantir qualidade de imersão ao usuário apresentadas anteriormente, acredita-se que a taxa de atualização mínima é pertinente à aplicação do SRV. Sendo assim, os valores das amostras coletadas durante os testes estão dispostos na Tabela C.7 e apresentados em gráficos na Figura C.4, na qual as linhas demarcadas horizontalmente são os marcos dos QPS descritos pelos autores.

Observando a Figura C.4a, referente à SE SLAG4, pode-se verificar que os computadores 1, 2 e 3 apresentaram níveis de desempenho gráfico nos limites mínimos, porém, os computadores 4 e 5 tiveram desempenho inferior aos outros computadores, com desempenho aproximadamente 10 vezes menor do que o computador 3. Com as mesmas características, a Figura C.4b, referente à SE hipotética, apresenta o bom desempenho dos computadores 1, 2 e 3. Desta forma, pode-se analisar pela Figura C.1 que o desempenho de QPS está relacionado ao acelerador gráfico. Observa-se que o computador 4 possui um excelente desempenho de reconstrução de AVs, pois o processador está bem avaliado, entretanto, apresenta um desempenho visual insatisfatório durante a execução do SRV.

4. Considerações

Os testes aplicados para determinar o tempo de resposta de reconstrução dos AVs, obteve uma média de atraso em relação ao provedor de *internet* e o *hardware* do equipamento onde o usuário está utilizando. O desempenho em relação ao tempo de transferência só diz respeito quando os itens são baixados pela primeira vez ou quando há necessidade de atualização. Sendo assim, o tempo para carregamento dos cenários virtuais tiveram métricas dentro do que foi definido nos Requisitos de *Software* RNF01 e RNF03.

Nos testes de atualização das informações visuais, análogo aos testes de desempenho da reconstrução do AV, a maioria dos computadores apresentaram desempenho próximos das métricas que Humes et al. (2009), Potter et al. (2014), Claypool, Claypool e Damaa (2006) e Bianchini et al. (2006) apresentaram. Apenas dois computadores apresentaram desempenho inferior ao esperado, o que pode ser justificado analisando os valores de *benchmark* apresentados anteriormente, nos quais aceleradores gráficos mais atuais apresentam maiores taxas de QPS do que os mais antigos. Desta forma, o equilíbrio entre processador e acelerador gráfico é a melhor opção para obter um excelente desempenho, tanto para a reconstrução dos Ambientes Virtuais quanto uma qualidade gráfica durante o uso do sistema de Realidade Virtual. Esses requisitos são relacionados ao RNF04. Sendo assim, de forma geral, a análise visual e de desempenho apresentaram resultados dentro dos exigidos.