

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
SANTA CATARINA – CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

JULIA DE LIMA COMELLI

**MODELAGEM BIM DE UMA SUBESTAÇÃO COM ARRANJO DE
BARRAMENTO DUPLO COM DISJUNTOR E MEIO: Visualização da
Montagem Eletromecânica em Realidade Virtual**

FLORIANÓPOLIS, 2023.

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
SANTA CATARINA – CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

JULIA DE LIMA COMELLI

**MODELAGEM BIM DE UMA SUBESTAÇÃO COM ARRANJO DE
BARRAMENTO DUPLO COM DISJUNTOR E MEIO: Visualização da
Montagem Eletromecânica em Realidade Virtual**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido
ao Curso de Graduação em Engenharia
Elétrica do Instituto Federal de Educação,
Ciência e Tecnologia de Santa Catarina
como parte dos requisitos para obtenção do
grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador:

Prof. Daniel Tenfen, Dr Eng.

Coorientador:

Prof. Marco Aurélio Moreira Saran, M. Sc.

FLORIANÓPOLIS, 2023.

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor.

Comelli, Julia

MODELAGEM BIM DE UMA SUBESTAÇÃO COM ARRANJO DE BARRAMENTO DUPLO COM DISJUNTOR E MEIO: Visualização da Montagem Eletromecânica em Realidade Virtual / Julia Comelli; orientação de Daniel Tenfen; coorientação de Marco Aurélio Moreira Saran. - Florianópolis, SC, 2023.

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Instituto Federal de Santa Catarina, Câmpus Florianópolis. Bacharelado em Engenharia Elétrica. Departamento Acadêmico de Eletrotécnica.
Inclui Referências.

1. Subestação. 2. Autodesk Revit. 3. Modelagem BIM.
4. Realidade Virtual. I. Tenfen, Daniel. II. Moreira Saran, Marco Aurélio. III. Instituto Federal de Santa Catarina. IV. MODELAGEM BIM DE UMA SUBESTAÇÃO COM ARRANJO DE BARRAMENTO DUPLO COM DISJUNTOR E MEIO: Visualização da Montagem Eletromecânica em Realidade Virtual.

MODELAGEM BIM DE UMA SUBESTAÇÃO COM ARRANJO DE BARRAMENTO DUPLO COM DISJUNTOR E MEIO: Visualização da Montagem Eletromecânica em Realidade Virtual

JULIA DE LIMA COMELLI

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título de Engenheiro(a) Eletricista e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Florianópolis, 20 de dezembro, 2023.

Banca Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **DANIEL TENFEN**
Data: 20/12/2023 09:21:05-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Daniel Tenfen, Dr Eng.

 Documento assinado digitalmente
MARCO AURELIO MOREIRA SARAN
Data: 20/12/2023 13:59:40-0300
CPF: 215.895.118-40
Verifique as assinaturas em <https://v.ifsc.edu.br>

Marco Aurélio Moreira Saran, M. Sc.

 Documento assinado digitalmente
EVERTHON TAGHORI SICA
Data: 20/12/2023 17:39:10-0300
CPF: 022.992.149-33
Verifique as assinaturas em <https://v.ifsc.edu.br>

Everthon Taghori Sica, Dr Eng.

Documento assinado digitalmente
 **FERNANDO LILA**
Data: 20/12/2023 13:45:37-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Fernando Lila, M. Sc.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha profunda gratidão a Deus, por ter me concedido saúde durante a realização deste trabalho e ao longo de todos os anos de estudo.

Um agradecimento especial à minha mãe, meu padrasto e meu irmão, pelo amor incondicional, apoio emocional e incentivo, especialmente nos momentos mais desafiadores deste trabalho e da minha vida.

Ao meu namorado Felix, sou grata por estar ao meu lado, me encorajando, apoiando e incentivando durante todo o período dedicado a este trabalho.

À minha amiga e colega de faculdade, Larissa, com muito carinho, agradeço por me ouvir e me motivar nos momentos mais difíceis e por compartilhar os desafios enfrentados ao longo do curso.

À Araxá Engenharia, pela oportunidade de desenvolver este projeto. A realização deste trabalho não seria possível sem eles. E também à equipe técnica: Guilherme Santos, Raul Ponce e Mateus Oliveira, por todo apoio e disposição.

Aos meus professores Daniel Tenfen e Marco Saran, agradeço por todos os conselhos valiosos, pela ajuda e pela paciência em guiar meu aprendizado.

E a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a minha formação, meu sincero muito obrigada.

RESUMO

O crescimento da demanda por energia elétrica exige a modernização da infraestrutura elétrica, incluindo subestações, que são essenciais para o Sistema Interligado Nacional. O projeto de subestações é complexo, necessitando de ferramentas precisas e flexíveis, como o Autodesk Revit. Esse software tem modernizado a modelagem e visualização de projetos de subestações e oferece uma abordagem dinâmica e detalhada. Com sua modelagem tridimensional e integração de parâmetros técnicos, facilita-se a visualização e a robustez técnica dos projetos. Essencial para entender a interação e a organização espacial de equipamentos, o Revit facilita a detecção de problemas e a compatibilização de distintas áreas técnicas, essenciais para evitar atrasos e custos extras. Sua importância é ainda mais reconhecida no Brasil com o Decreto 10.306/2020, enfatizando a precisão, otimização de prazos e redução de custos em projetos. Com a crescente demanda por projetos elétricos de subestações e a necessidade de colaboração entre várias disciplinas, o Revit se torna uma ferramenta não só tendencial, mas também importante para a área. No projeto da subestação de 500 kV, a aplicação da modelagem BIM e da realidade virtual evidenciou vantagens. O uso do BIM aprimorou a visualização, detecção de erros, integração tecnológica, colaboração entre equipes e flexibilidade de design, além de automatizar tarefas como a criação de listas de materiais. A realidade virtual proporcionou uma imersão total, facilitando a detecção de problemas, redução de custos e sendo uma ferramenta eficaz para treinamento e formação. Assim, essas tecnologias não só otimizaram o processo de modelagem como também contribuíram para a eficiência e redução de custos no desenvolvimento de projetos de subestações elétricas.

Palavras-chave: Subestação. Autodesk Revit. Modelagem BIM. Realidade Virtual.

ABSTRACT

The increasing demand for electrical energy requires the modernization of electrical infrastructure, including substations, which are essential to the National Interconnected System. Substation design is complex, necessitating precise and flexible tools like Autodesk Revit. This software has modernized the modeling and visualization of substation projects, offering a dynamic and detailed approach. With its three-dimensional modeling and integration of technical parameters, it facilitates the visualization and technical robustness of projects. Essential for understanding the interaction and spatial organization of equipment, Revit makes it easier to detect problems and harmonize different technical areas, crucial to avoid delays and extra costs. Its importance is further recognized in Brazil with Decree 10.306/2020, emphasizing precision, optimization of deadlines, and cost reduction in projects. With the growing demand for electrical substation projects and the need for collaboration across various disciplines, Revit becomes not just a trending tool but also important for the field. In the 500 kV substation project, the application of BIM modeling and virtual reality demonstrated advantages. BIM usage enhanced visualization, error detection, technological integration, team collaboration, and design flexibility, and automated tasks such as creating material lists. The virtual reality provided total immersion, facilitating problem detection, cost reduction, and being an effective tool for training and formation. Thus, these technologies not only optimized the modeling process but also contributed to efficiency and cost reduction in the development of electrical substation projects.

Keywords: Substation. Autodesk Revit. BIM Modeling. Virtual Reality.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Arranjo barra simples	18
Figura 2 – Arranjo barramento principal e de transferência	19
Figura 3 – Arranjo barramento duplo - disjuntor simples - 3 chaves	20
Figura 4 – Arranjo barramento duplo com disjuntor simples a 5 chaves	21
Figura 5 – Arranjo barramento duplo com disjuntor duplo a 4 chaves	22
Figura 6 – Arranjo barramento anel simples.....	22
Figura 7 – Arranjo barramento duplo com disjuntor e meio.....	23
Figura 8– Transformador de Potencial Indutivo.....	25
Figura 9 – Transformador de Potencial Capacitivo	25
Figura 10– Detalhe de instalação de cadeia de isoladores de disco.....	28
Figura 11 – Relação de Materiais.....	29
Figura 12– Isolador tipo pedestal em subestação	29
Figura 13– Ciclo de vida BIM	35
Figura 14 – Os fundamentos do BIM	38
Figura 15 – Gráfico comparativo entre o processo tradicional de desenvolvimento de projetos (CAD) e o processo BIM.....	39
Figura 16– Dimensões do BIM, do 3D ao 10D	41
Figura 17– Categoria de família	44
Figura 18– Categoria de família	45
Figura 19 –Troca de isolador em linha viva.....	50
Figura 20 –Visão das 4 possíveis formas de navegação do sistema	50
Figura 21– Captura de tela mostrando alguns passos da atividade já realizados.....	51
Figura 22 – Arranjo 2D do Bay de 500 kV	53
Figura 23– Fluxograma da Criação e Parametrização das Famílias	54
Figura 24– Modelagem cabeça do TC	55
Figura 25– Modelagem cabeça do TC	55
Figura 26– Modelagem cabeça do TC	56
Figura 27– Modelagem cabeça do TC	57
Figura 28– Modelagem cabeça do TC	58
Figura 29– Modelagem cabeça do TC	58
Figura 30– Modelagem cabeça do TC	59
Figura 31– Modelagem do Transformador de Corrente e Disjuntor	60

Figura 32– Modelagem do Reator	61
Figura 33– Modelagem para raio e transformador de potencial	62
Figura 34– Modelagem chave seccionadora.....	63
Figura 35– Lista de Equipamentos Elétricos	64
Figura 36– Conector 9 furos NEMA	66
Figura 37 – Conector cabo / barramento.....	66
Figura 38– Conector isolador para barramento	67
Figura 39– Lista de Conectores	67
Figura 40– Comparação entre a planta sem equipamento e com equipamento inserido	69
Figura 41– Reator inserido no Revit.....	70
Figura 42– Conexão do Transformador de Corrente	71
Figura 43– Carregando o conector 9 NEMA	72
Figura 44– Conector 9 NEMA inserido.....	72
Figura 45– Modelagem do cabo do disjuntor para o TC	73
Figura 46 – Renderização 1 360º.....	74
Figura 47– Renderização 2 360º	75
Figura 48– Arranjo Eletromecânico	77
Figura 49 – Vista do Bay de Disjuntor e Meio – Parte 1.....	78
Figura 50– Vista do Bay de Disjuntor e Meio – Parte 2.....	78
Figura 51– Corte - Primário do Reator	79
Figura 52– Corte saída do barramento	79
Figura 53– Corte Reatores.....	80
Figura 54– Renderização 1	81
Figura 55– Renderização 2	81
Figura 56– Renderização 3	82
Figura 57– Renderização 4	82
Figura 58– Renderização 5	83
Figura 59– Renderização 6	83

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Tipos de abertura – chave seccionadora.....	32
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AEC	Arquitetura e Engenharia Civil
AIA	Instituto Americano de Arquitetura
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BIM	<i>Building Information Modeling</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CBIC	Câmara Brasileira da Indústria da Construção
CCEE	Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
IEC	Comissão Eletrotécnica Internacional (<i>International Electrotechnical Commission</i>)
LOD	Nível de desenvolvimento (<i>Level Of Development</i>)
kV	Quilo volt
NBR	Norma Brasileira
NEMA	<i>National Electrical Manufacturers Association</i>
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PRODIST	Procedimento de Distribuição
QR	<i>Quick Responde</i>
RA	Realidade Aumentada
RV	Realidade Virtual
SF6	Hexafluoreto de Enxofre
SIN	Sistema Interligado Nacional
TC	Transformador de Corrente
TP	Transformador de Potencial

URL *Uniform Resource Locator*

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Justificativa	13
1.2	Definição do Problema	14
1.3	Objetivo Geral.....	14
1.4	Objetivos Específicos.....	15
1.5	Estrutura do Trabalho.....	15
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1	Subestação	16
2.1.1	Tipos de arranjo de uma subestação	18
2.1.1.1	<i>Barramento simples</i>	<i>18</i>
2.1.1.2	<i>Barramento Principal e Transferência.....</i>	<i>19</i>
2.1.1.3	<i>Barramento Duplo -Disjuntor simples – 3 chaves</i>	<i>19</i>
2.1.1.4	<i>Barramento Duplo -Disjuntor simples – 5 chaves</i>	<i>20</i>
2.1.1.5	<i>Barramento Duplo -Disjuntor Duplo – 4 chaves</i>	<i>21</i>
2.1.1.6	<i>Barramento em anel simples.....</i>	<i>22</i>
2.1.1.7	<i>Barramento duplo com Disjuntor e meio</i>	<i>23</i>
2.1.2	Principais equipamentos de uma Subestação	23
2.1.2.1	<i>Transformador de Potencial</i>	<i>24</i>
2.1.2.2	<i>Transformador de Corrente.....</i>	<i>26</i>
2.1.2.3	<i>Transformador de Potência.....</i>	<i>26</i>
2.1.2.4	<i>Para-raios.....</i>	<i>27</i>
2.1.2.5	<i>Isoladores.....</i>	<i>28</i>
2.1.2.6	<i>Disjuntor.....</i>	<i>30</i>
2.1.2.7	<i>Chave seccionadora</i>	<i>31</i>
2.1.2.8	<i>Banco de capacitores.....</i>	<i>33</i>
2.1.2.9	<i>Transformador de Aterramento.....</i>	<i>34</i>
2.2	Metodologia BIM	34
2.2.1	BIM – Conceito e Definição.....	35
2.2.1.1	<i>Marco Regulatório do BIM no Brasil: Decreto 10.306/2020</i>	<i>36</i>
2.2.1.2	<i>Compatibilização de projetos CAD X BIM</i>	<i>36</i>
2.2.2	Fundamentos do BIM.....	37
2.2.3	Fluxo de processos	39
2.2.4	Dimensões do BIM.....	40
2.2.5	Níveis de desenvolvimento LOD do BIM.....	41
2.3	Famílias do Revit.....	42

2.3.1	Propriedades das Famílias.....	44
2.3.2	Parâmetros das Famílias	44
2.4	Realidade Virtual e Aumentada.....	46
2.4.1	Realidade Virtual.....	47
2.4.2	Realidade Aumentada.....	48
2.4.3	Trabalhos relacionados de Realidade Virtual.....	49
3	IMPLEMENTAÇÃO BIM	52
3.1	Projeto 2D em DWG	52
3.2	Criação e Parametrização de Famílias	53
3.2.1	Ferramentas Utilizadas	54
3.2.1.1	<i>Revolução</i>	<i>54</i>
3.2.1.2	<i>Extrusão.....</i>	<i>56</i>
3.2.1.3	<i>Varredura</i>	<i>57</i>
3.2.2	Principais Equipamentos da Subestação	59
3.2.2.1	<i>Definição e Categoria da Família.....</i>	<i>59</i>
3.2.2.2	<i>Modelagem</i>	<i>59</i>
3.2.2.3	<i>Parâmetros.....</i>	<i>64</i>
3.2.2.4	<i>Desafios e soluções</i>	<i>64</i>
3.2.3	Conectores.....	65
3.2.3.1	<i>Definição e Categoria da Família.....</i>	<i>65</i>
3.2.3.2	<i>Modelagem</i>	<i>65</i>
3.2.3.3	<i>Parâmetros.....</i>	<i>67</i>
3.2.3.4	<i>Desafios e soluções</i>	<i>68</i>
3.3	Arranjo - Inserção dos Equipamentos, Conectores e modelagem dos cabos.....	68
3.3.1	Inserção dos Equipamentos.....	69
3.3.2	Inserção dos Conectores	70
3.4	Modelagem dos cabos.....	73
3.5	Realidade Virtual	74
4	RESULTADOS.....	77
4.1	Resultado do Arranjo Eletromecânico	77
4.2	Resultado da realidade virtual	80
4.3	Análise dos Resultados da implementação BIM	84
4.4	Análise sobre o Arranjo eletromecânico.....	84
5	COMENTÁRIOS FINAIS.....	86
	REFERÊNCIAS	88
	APÊNDICES	93
	APÊNDICE A – PLANTA BAIXA - SUBESTAÇÃO.....	94
	APÊNDICE B – ISOMÉTRICO - SUBESTAÇÃO.....	95

APÊNDICE C – CORTE - BAY DISJUNTOR E MEIO	96
APÊNDICE D – CHAVE SECCIONADORA – CORTE E DETALHES	97
APÊNDICE E – REATOR – CORTE E DETALHES.....	98

1 INTRODUÇÃO

Ao longo dos anos, a infraestrutura elétrica no Brasil tem enfrentado desafios de modernização para atender ao crescimento contínuo da demanda por energia elétrica. Segundo a Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE, 2023) no ano de 2021 para 2022, o consumo de energia elétrica no Brasil aumentou 1,5%. Com o aumento da demanda, é preciso utilizar ferramentas e métodos mais eficientes na concepção, planejamento e implementação de infraestruturas elétricas, em particular, subestações elétricas.

Segundo o Módulo 1 do Procedimento de Distribuição - PRODIST (ANEEL, 2021), subestações elétricas caracterizam-se como “parte do sistema de potência que compreende os dispositivos de manobra, controle, proteção, transformação e demais equipamentos, condutores e acessórios”. As subestações podem ser abaixadoras ou elevadoras de tensão, cada uma delas com uma aplicação diferente ao Sistema Interligado Nacional (SIN).

Fazer o projeto de uma subestação é uma tarefa complexa, que envolve diversos componentes, equipamentos, detalhes e demanda ferramentas que possam oferecer precisão e flexibilidade. Com isso, na modelagem de uma subestação, surge o uso de ferramentas mais eficientes como o Autodesk Revit, que proporciona uma abordagem mais dinâmica e detalhada, transitando para uma representação tridimensional.

O Revit não só facilita a visualização espacial dos componentes da subestação, como também permite a integração de parâmetros técnicos, tornando a modelagem visualmente informativa e tecnicamente robusta.

1.1 Justificativa

Diante da evolução tecnológica, a forma como os projetos de engenharia é desenvolvida e apresentada mudou. Uma das ferramentas que emergiram nesse cenário foi o Autodesk Revit, que proporciona avanços significativos na modelagem e visualização das estruturas e equipamentos dos projetos

Quando se trata de projetos de subestações, a modelagem vai além de representações gráficas. É necessário um entendimento detalhado da interação entre os equipamentos e componentes do projeto, além da organização espacial e implicações da dimensão de cada equipamento. Outra parte importante em projetos de subestação é a compatibilização das áreas. O processo de compatibilização visa antecipar problemas, evitar atrasos e consequentemente, minimizar custos adicionais (GRAZIANO, 2003).

Nesse contexto, a plataforma Revit tem a capacidade de representação tridimensional, o que torna as representações mais realistas e facilita a detecção de problemas na modelagem e compatibilização, além de otimizar tempo e ajustes necessários. No Brasil, a relevância e consolidação da metodologia BIM (*Building Information Modeling*) é evidenciada pela implementação do Decreto n. 10.306/2020. O decreto estabelece sua utilização como ferramenta fundamental, salientando a necessidade de precisão dos projetos, otimização de prazos e redução de custos.

Dado o crescimento atual e futuro da demanda por projetos das instalações elétricas de subestações e da necessidade de integração entre equipes multidisciplinares, o uso do Revit na modelagem de subestações elétricas se justifica não apenas como uma tendência, mas como uma necessidade iminente.

1.2 Definição do Problema

Considerando a importância das subestações para o fornecimento de energia no país, é necessário entender a concepção e implementação desses projetos. Arranjos como barramento disjuntor e meio, exigem precisão no desenvolvimento do projeto.

Com o avanço da tecnologia, a utilização de ferramentas como Autodesk Revit e metodologia BIM, tornaram a visualização e desenvolvimentos dos projetos com mais clareza, otimização e precisão. A modelagem tridimensional apresenta uma representação mais detalhada e permite a integração de áreas e parâmetros técnicos.

Além dos avanços tecnológicos relacionados ao desenvolvimento de projetos, outra inovação na área é a integração de diferentes tecnologias. Uma abordagem importante é a integração da realidade virtual nos projetos de subestação. Essa integração tem a possibilidade de potencializar a compreensão, análise, visualização e validação de pontos técnicos, permitindo uma imersão completa no ambiente da subestação antes mesmo da sua implementação.

Diante disso, como a modelagem BIM, aplicada através da plataforma Autodesk Revit, pode ser utilizada na concepção de uma subestação com arranjo de barramento duplo disjuntor e meio? Qual a maneira de visualizar essa modelagem em realidade virtual, permitindo uma representação tridimensional, atendendo os requisitos técnicos, compatibilização e otimização de projetos?

1.3 Objetivo Geral

O objetivo do trabalho é apresentar a modelagem BIM de uma subestação com arranjo de barramento duplo disjuntor e meio e visualizando a montagem eletromecânica em realidade virtual, explicando as ferramentas de modelagem dos equipamentos e do arranjo e apresentando as formas de representar o projeto em realidade virtual.

1.4 Objetivos Específicos

A fim de atingir o objetivo geral do trabalho e definir o âmbito do estudo, serão estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- a) dissertar sobre subestações e seus principais equipamento;
- b) apresentar uma pesquisa sobre a metodologia BIM, Revit, realidade virtual e suas aplicações em projetos de engenharia;
- c) elaborar a modelagem tridimensional de uma subestação com arranjo barramento disjuntor e meio;
- d) visualizar o arranjo eletromecânico da subestação em realidade virtual.

1.5 Estrutura do Trabalho

O presente trabalho está organizado em 4 capítulos. O primeiro capítulo desempenha um papel introdutório, abordando os objetivos do estudo, a justificativa para a escolha do tema e a definição clara do problema a ser abordado.

No segundo capítulo, é realizada uma revisão teórica abrangente sobre o tema em questão. Nesse sentido, são apresentados os princípios conceituais relacionados à modelagem BIM e de famílias no Revit, assim como realidade virtual. Essa revisão teórica servirá como base para o entendimento aprofundado do assunto.

O terceiro capítulo concentra-se na descrição detalhada da metodologia utilizada no desenvolvimento deste trabalho. São apresentados os métodos, técnicas e ferramentas adotados para a coleta e análise dos dados, assim como a estrutura da pesquisa realizada.

No quarto e último capítulo são apresentados os resultados obtidos e uma discussão proposta sobre o processo de modelagem do arranjo eletromecânico da subestação, bem como a incorporação da realidade virtual no projeto.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesse capítulo são apresentados os princípios conceituais relacionados à subestação, tipos de arranjo de uma subestação, modelagem BIM e de famílias no Revit, assim como realidade virtual.

2.1 Subestação

A subestação desempenha um papel fundamental no sistema elétrico de potência, pois faz a interface entre a geração e a rede de transmissão de energia. Entre as principais funções de uma subestação destacam-se: monitorar as grandezas elétricas, modificar o nível de tensão e proporcionar recursos operacionais no sistema elétrico de potência. São classificações quanto a função, instalação e seu nível de tensão (APRENDER ELÉTRICA, 2021).

As funções de uma subestação podem ser divididas em sete tipos: elevadora, abaixadora, distribuição, manobra, conversoras, industrial e móvel. As subestações elevadoras são responsáveis por elevar a tensão a partir de uma fonte de energia elétrica, direcionando a potência correspondente às linhas de transmissão. Tanto as subestações abaixadoras quanto as de distribuição desempenham a função de reduzir a tensão elétrica. No entanto, as subestações abaixadoras direcionam a potência para as redes de distribuição, enquanto as subestações de distribuição ajustam a tensão para atender às exigências regulatórias específicas da região (MAMEDE, 2021).

As subestações de manobra têm a finalidade de realizar o processo de chaveamento ou comutação de linhas de transmissão que possuem tensões variando entre 230 kV e 750 kV. As conversoras são integradas nos sistemas de transmissão de corrente contínua, podendo ser retificadora ou conversora. A subestação industrial recebe energia de uma rede de distribuição pública ou linhas de transmissão, diminuindo a tensão para uso industrial. Por fim, a subestação móvel é montada sobre um veículo para situações de emergência (MAMEDE, 2021).

As instalações das subestações podem ser classificadas em três tipos: abrigadas, ao tempo ou blindadas. Segundo a ABNT (Associação Brasileira de

Normas Técnicas) NBR (Norma Brasileira) Nº 14039, de 12/2021, as subestações são abrigadas quando os seus componentes e equipamentos estão ao abrigo das intempéries, ou seja, protegidos de condições climáticas ou ambientais. Ao abrigar os componentes, essas subestações garantem maior durabilidade e confiabilidade dos equipamentos. Entre os problemas que podem ser causados pelas intempéries, está a corrosão, acúmulo de sujeira e exposição direta à umidade.

De acordo com a NBR 14039 de 12/2021, diferente das abrigadas, as subestações ao tempo não oferecem proteção dos componentes contra as intempéries. Portanto, é necessário utilizar equipamentos mais resistentes, aumentar a frequência de manutenção e adotar medidas de segurança para evitar acesso de pessoas e animais. Essa condição exige maior atenção nas distâncias entre os componentes, visando garantir a segurança operacional e o funcionamento adequado dos equipamentos expostos às condições climáticas.

Por fim, as subestações blindadas são construídas em locais abrigados e possuem equipamentos completamente isolados em óleo ou em gás. O isolamento em óleo ou gás proporciona um melhor controle de temperatura e isolamento elétrico. A instalação de uma subestação blindada pode ocorrer devido à falta de espaço adequado em áreas urbanas ou devido ao alto custo do terreno nessa região (DUAILIBE, 1999).

Em relação ao nível de tensão, as subestações podem ser classificadas em: baixa tensão, tensão de distribuição e extra / alta tensão de transmissão e subtransmissão. As subestações de baixa tensão possuem com níveis de 127V a 440V e são destinadas a instalações residenciais, de iluminação, motores e tração urbana. Já, as subestações de tensão de distribuição possuem níveis que variam de 2,3 kV até 34,5kV e são direcionadas à transmissão de energia no âmbito urbano e rural. Por último, as subestações de tensão extra / alta tensão, com níveis variando de 69 kV à 750 kV, tem como objetivo a transmissão de energia de Usinas para cidades (APRENDER ELÉTRICA, 2021).

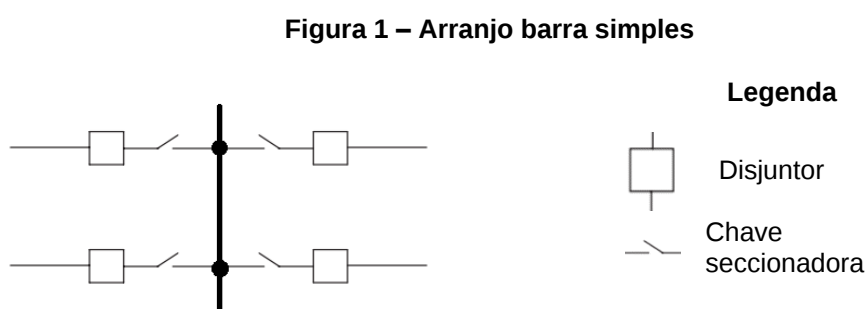
2.1.1 Tipos de arranjo de uma subestação

A seleção do arranjo de uma subestação desempenha um papel importante na determinação da confiabilidade e segurança do sistema elétrico. A decisão sobre o arranjo influencia diretamente o desempenho operacional, a adaptabilidade às expansões futuras e a viabilidade da manutenção contínua. Portanto, compreender a significância de optar pelo arranjo mais adequado para cada subestação é de suma importância. Este tópico explora os diversos tipos de arranjos, abordando sua relevância, aplicabilidade, benefícios e desafios inerentes.

2.1.1.1 Barramento simples

O barramento simples representa uma das configurações mais básicas de barras, adequado para subestações de médio e alto porte, particularmente aplicado em ambientes de distribuição ou indústria (FROTIN, 2013).

De acordo com Mamede (2021), a utilização do barramento simples se destaca por envolver investimentos reduzidos e uma operação de fácil compreensão. No entanto, é importante destacar que sua confiabilidade é limitada, uma vez que qualquer falha no barramento ou no disjuntor principal resulta no desligamento completo da subestação. Além disso, é necessário ressaltar que a manutenção em disjuntores ou chaves também requer a interrupção total das atividades da subestação. A Figura 1 apresenta a configuração em barra simples.



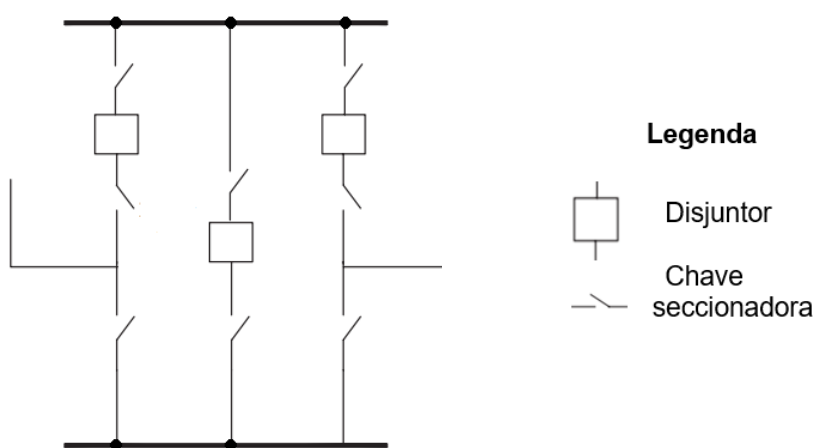
Fonte: McDonald (2012).

2.1.1.2 Barramento Principal e Transferência

O arranjo de barra principal e transferência é aplicado em subestações de média e alta tensão, sendo inclusive encontrado em algumas subestações de extra-alta tensão no Brasil. Nesse contexto, as chaves *by-pass* (desvio), barra e o *bay* (baia) de transferência possibilitam a liberação de um disjuntor e garantem a proteção individual do circuito (FROTIN, 2013).

De acordo com Mamede (2021), na configuração do barramento principal e de transferência, a continuidade de fornecimento de energia aumenta e quando disjuntores apresentam defeitos não é necessário desligar a subestação inteira. Com tudo, se houver algum defeito no barramento principal, é obrigado o desligamento da subestação. A Figura 2 apresenta a configuração de barramento principal e de transferência.

Figura 2 – Arranjo barramento principal e de transferência



Fonte: McDonald (2012).

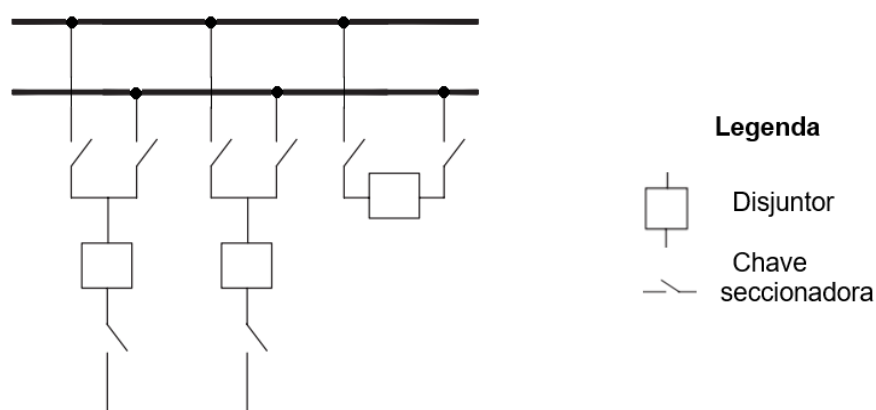
2.1.1.3 Barramento Duplo -Disjuntor simples – 3 chaves

A configuração barramento duplo com disjuntor simples a 3 chaves permite a conexão de cada circuito do sistema em qualquer uma das duas barras através das chaves seletoras. As duas barras operam normalmente, com transformadores de corrente no *bay* de interligação que permitem a segmentação das zonas de proteção,

melhorando a disponibilidade da subestação perante falhas nas barras (FROTIN, 2013).

O arranjo consiste em dois barramentos e um disjuntor de interligação, que oferece certa praticidade no contexto da manutenção, especialmente no que diz respeito à manutenção do próprio barramento. No entanto, a manutenção dos disjuntores nos circuitos de linha continuaria a requerer manobras e interrupções (McDONALD, 2012). A Figura 3 apresenta a configuração barramento duplo com disjuntor simples a 3 chaves.

Figura 3 – Arranjo barramento duplo - disjuntor simples - 3 chaves



Fonte: McDonald (2012).

2.1.1.4 Barramento Duplo -Disjuntor simples – 5 chaves

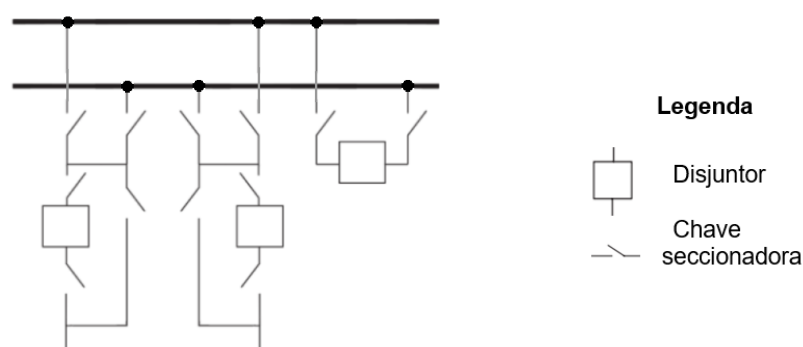
De acordo com Frotin (2013), a configuração barramento duplo com disjuntor simples a cinco chaves é bastante utilizada no Brasil, mais especificamente em tensões de 138 e 230 kV e em algumas subestações de 345 kV.

Este arranjo apresenta diversas vantagens no que diz respeito à continuidade do fornecimento de energia e à realização de manutenções. Em caso de falha de qualquer disjuntor, a carga associada é interrompida de forma temporária. Além disso, a ocorrência de uma perda em um dos barramentos não tem impacto no fornecimento de carga, resultando em uma alta continuidade de fornecimento de energia. Contudo, apesar de exibir uma confiabilidade significativa, é importante mencionar que o investimento necessário para implementar esse arranjo é consideravelmente elevado. Adicionalmente, devido à presença de uma quantidade

substancial de chaves, há uma exposição aumentada a possíveis falhas, o que deve ser considerado (MAMEDE, 2021).

A figura 4 apresenta a configuração barramento duplo com disjuntor simples a cinco chaves.

Figura 4 – Arranjo barramento duplo com disjuntor simples a 5 chaves



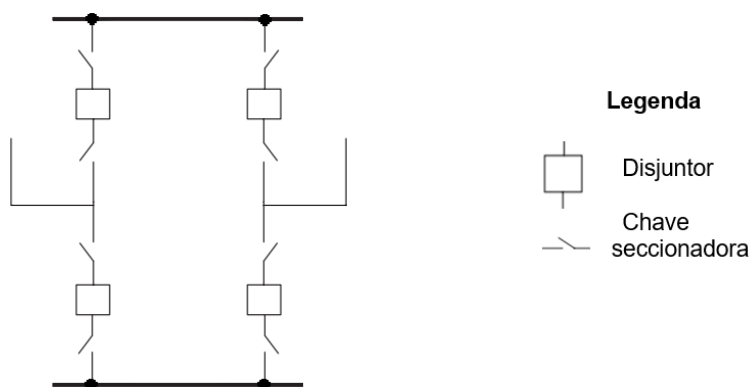
Fonte: McDonald (2012) Adaptado.

2.1.1.5 Barramento Duplo -Disjuntor Duplo – 4 chaves

Conforme descrito por Mamede (2021), o arranjo de barramento duplo com dois disjuntores e quatro chaves, conforme ilustrado na Figura 5, é aplicado em subestações com tensões variando entre 69 kV e 230 kV, e possui alta confiabilidade e continuidade.

Segundo McDonalds (2012), a ocorrência de um defeito em um dos barramentos pode ser isolada sem interromper os circuitos ou cargas correspondentes. Assim como, falhas em circuitos específicos não afetam os demais circuitos do barramento. Por fim, a manutenção dos dispositivos de comutação é simplificada e permite a retirada dos dispositivos enquanto os circuitos operam com proteção parcial por meio de relés de linha.

Figura 5 – Arranjo barramento duplo com disjuntor duplo a 4 chaves



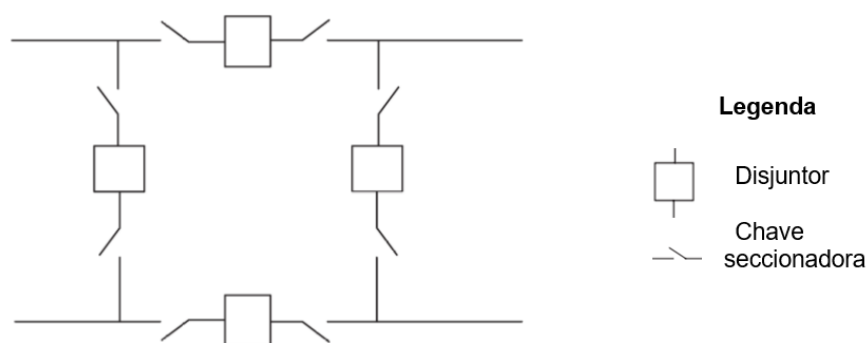
Fonte: McDonald (2012).

2.1.1.6 Barramento em anel simples

Nesta disposição, os disjuntores são dispostos em um arranjo de anel, com os circuitos interconectados entre dois disjuntores, como demonstrado na figura 6. Isso resulta em uma maior confiabilidade para os circuitos. Quando ocorre falha em uma seção específica do barramento, resultará somente na interrupção do circuito ligado a essa seção, sem afetar outros dispositivos. Adicionalmente, o arranjo oferece boa flexibilidade quando associado a manutenções (McDONALDS, 2012).

Segundo Froitin (2013), podem surgir desafios de projeto relacionados à expansão desse arranjo. Além disso, dependendo das trajetórias das linhas e da disposição do pátio de transformadores, pode ocorrer a necessidade de cruzamentos entre circuitos para as conexões à subestação.

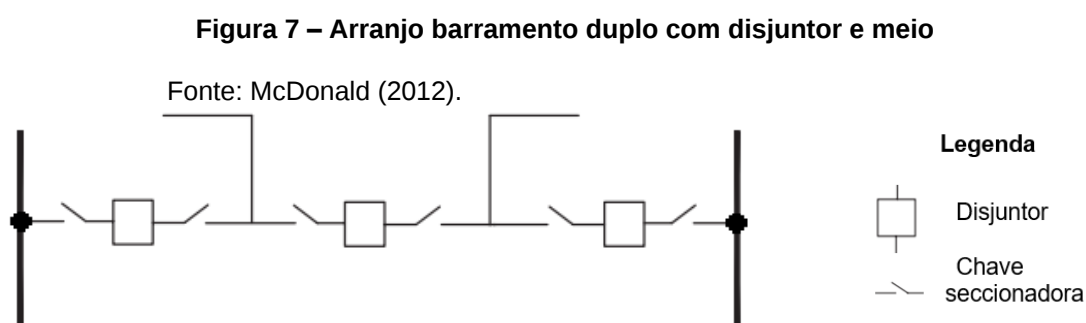
Figura 6 – Arranjo barramento anel simples



Fonte: McDonald (2012).

2.1.1.7 Barramento duplo com Disjuntor e meio

Segundo Frotin (2013), em casos em que a segurança se apresenta como um elemento essencial para determinadas barras do sistema, é viável optar por uma disposição de maior desempenho, tal como a configuração de barra dupla com disjuntor e meio, conforme ilustrado na Figura 7.



Essa configuração apresenta semelhança com o arranjo de barramento em anel ao oferecer alta confiabilidade. Com proteção adequada de relés em funcionamento, uma falha em um circuito individual não resultará na interrupção dos demais circuitos. Ademais, ao contrário do esquema de barramento em anel, um defeito em uma seção do barramento não afetará a operação dos circuitos (McDONALDS, 2012).

Segundo o submódulo 2.6 do ONS, o arranjo de barra dupla com disjuntor e meio é amplamente utilizado em subestações iguais ou superiores a 345 kV. Além disso, se destaca por ser flexível em questões operacionais, possuir facilidade de expansão e por sua disposição dos equipamentos no pátio de manobra. Porém, comparada com outras configurações de barramento, apresenta um custo relativamente mais elevado (Frotin, 2013).

2.1.2 Principais equipamentos de uma Subestação

Nesta seção, são abordados os principais equipamentos de uma subestação elétrica, destacando suas funções e aplicações no contexto do sistema elétrico. Será apresentado um panorama geral dos componentes fundamentais, como

transformadores, disjuntores, chaves seccionadoras e para-raios, além de dispositivos de controle e proteção.

2.1.2.1 Transformador de Potencial

Os transformadores de potencial são componentes fundamentais em sistemas elétricos, pois permitem a redução da alta tensão do sistema para uma tensão mais baixa, possibilitando a medição precisa de grandezas elétricas e também a proteção de equipamentos sensíveis, como relés e disjuntores. Além disso, a fim de garantir segurança, tem como função também isolar eletricamente o circuito de média ou alta tensão dos circuitos de medição e proteção. Segundo Mamede (2022), a função dos transformadores de potencial é prover uma tensão reduzida para os instrumentos de medição que possuem uma impedância elevada, como voltímetro e relés de tensão, conectados no secundário do transformador. É comum a instalação estar em conjunto com o transformador de corrente.

Segundo Frotin (2013) os transformadores de potencial são divididos em dois tipos, indutivo e capacitivo. Os transformadores de potencial indutivo possuem dois ou mais enrolamentos no mesmo núcleo, com a relação de transformação definida pela relação de espiras, sendo que sua unidade é eletromagnética. A Figura 8 mostra a estrutura de um transformador de potencial indutivo

Diagrama de um transformador de potência com as seguintes legendas:

- Terminal primário
- Sistema de expansão
- Óleo isolante
- Pó de quartzo (redução do volume de óleo isolante)
- Isolador de porcelana ou material polimérico
- Papel isolante
- Enrolamento primário
- Enrolamento secundário
- Núcleo magnético

Os transformadores de potencial capacitivo possuem células ligadas em série que formam o condensador, imersas no interior de um invólucro de porcelana. A Figura 9 mostra a estrutura de um transformador de potencial capacitivo.

Diagrama de um transformador de potência com as seguintes legendas:

- Terminal primário
- Sistema de expansão
- Elementos capacitivos
- Isolador de porcelana ou material polimérico
- Tap de tensão intermediária
- Reator de compensação
- Núcleo magnético
- Enrolamento primário e secundário

25

2.1.2.2 Transformador de Corrente

Os transformadores de corrente permitem a alteração no valor da corrente, a fim de garantir segurança e sem precisar dos valores nominais; padronizando e tornando adequada para medição e proteção através de instrumentos. Segundo Mamede (2022), os transformadores de corrente possuem dois enrolamentos, um primário com poucas espiras e o secundário, geralmente com corrente igual a 5 A. Assim, os instrumentos de medição e proteção podem possuir um tamanho reduzido e baixa resistência elétrica. A transformação da corrente do primário para o secundário é feita por um fenômeno de conversão eletromagnética, onde a corrente primária gera um fluxo magnético induzindo força eletromotriz no segundo enrolamento.

Segundo Frotin (2013), os transformadores de corrente podem ser classificados de acordo com sua estrutura. Os TCs de corrente tipo enrolado possuem um enrolamento primário composto por uma ou mais espiras, que envolve mecanicamente o núcleo do transformador. Já, os do tipo barra e janela possuem um enrolamento primário com uma barra fixada através do núcleo. Os TCs do tipo bucha são semelhantes ao tipo janela, mas sua instalação é feita na bucha dos equipamentos. Além disso, os transformadores podem ser classificados pelo tipo de núcleo, podendo ter um núcleo dividido ou vários núcleos fixados em diversos enrolamentos secundários. Por fim, eles podem ter vários enrolamentos primários, que são distintos e isolados entre si.

2.1.2.3 Transformador de Potência

O transformador de potência é o equipamento mais importante e essencial de uma subestação, sendo responsável por elevar e reduzir a tensão, viabilizando a transmissão de grandes quantidades de energia em longas distâncias. Além disso, é um equipamento de alto custo e crucial para a operação e confiabilidade do sistema elétrico como um todo, uma vez que é capaz de garantir a estabilidade e a qualidade do fornecimento de energia elétrica para os consumidores. Na perspectiva de uma usina fotovoltaica, o transformador desempenha uma função importante de isolar eletricamente o sistema fotovoltaico, garantindo segurança e proteção dos equipamentos contra danos causados por possíveis variações de tensão ou curtos-circuitos.

Segundo Frotin (2013) os transformadores consistem em dois ou mais enrolamentos conectados no mesmo fluxo magnético, onde a corrente presente no enrolamento primário altera o fluxo magnético em ambos os circuitos, primário e secundário. O circuito secundário é projetado para estar sob influência direta do campo magnético estabelecido no circuito primário e como resultado da indução magnética, uma corrente alternada em um enrolamento produz corrente alternada no outro enrolamento.

2.1.2.4 Para-raios

O Brasil é um país com alta incidência de raios atmosféricos, portanto, em uma rede de transmissão é comum que aconteçam descargas atmosféricas nas estruturas, provocando elevadas tensões no sistema e queimando equipamentos. Para isso, é necessário que o sistema esteja protegido contra esses eventos para garantir a integridade dos equipamentos. Para esse fim, são instalados equipamentos apropriados para essas situações, denominado para-raios.

Segundo Frotin (2013) os para-raios são compostos por elementos resistivos não lineares organizados em um conjunto, podendo ter configuração série ou série-paralela e acompanhados ou não por um centelhador e são encapsulados em invólucros feitos de porcelana, polímeros amorfos ou cristalinos. O para-raios age como um circuito aberto quando está em condição normal de operação, ou seja, como um isolador. No entanto, assim que ocorrer uma sobretensão, o centelhador, se presente, será rompido e uma descarga de corrente ocorrerá e fluirá pelo elemento resistivo nele presente. Esta corrente evita que a tensão nos terminais do para-raios ultrapasse um valor pré-determinado adequado à classe de tensão do sistema.

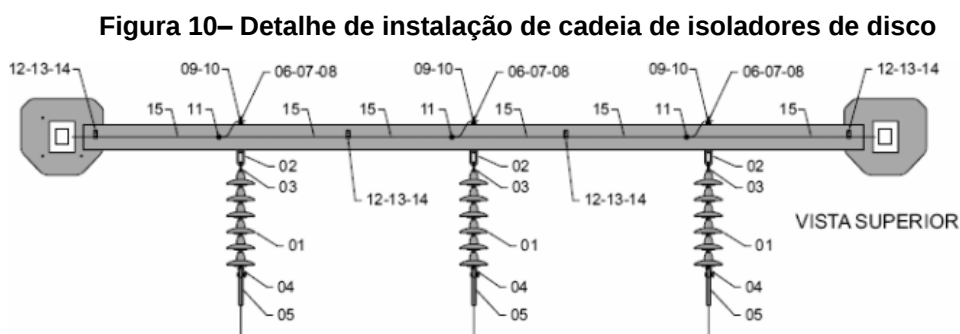
A escolha do para-raios é definida a partir de diversos fatores, como o nível de proteção solicitado, níveis de tensões e correntes de descargas nominais como também a suportabilidade a faltas. Os para-raios são classificados e divididos em classes, influenciadas pela importância dos equipamentos a serem protegidos e distribuídas de acordo com as tensões do sistema elétrico. Em grandes subestações, com tensões acima de 138 kV são utilizados para-raios classe estação, projetados para suportar altas tensões; em subestações menores com faixa de tensões entre 35kV e 138kV, os para-raios são de classe intermediária de absorção de energia, e

por fim, com valores de tensão abaixo de 35 kV se referem a para-raios de distribuição (APRENDER ELÉTRICA, 2021).

2.1.2.5 Isoladores

Segundo Mamede (2022), os isoladores são componentes sólidos e possuem propriedades mecânicas que são capazes de suportar os esforços exercidos pelos condutores. A sua função é fornecer isolamento elétrico, mantendo os condutores protegidos de descargas elétricas ou curto circuito. Além disso, os isoladores são classificados em dois grupos básicos: os isoladores não regenerativos, são aqueles que o dielétrico não possui a capacidade de se regenerar após ser submetido a sobretensões; os isoladores auto regenerativos, ao contrário dos não regenerativos consegue se recuperar após uma sobretensão, podendo ser denominados como isoladores suporte de barramento, buchas de equipamentos, isoladores de linhas de transmissão e redes de distribuição.

Os isoladores do tipo disco ou isolador de suspensão, são utilizados em linhas de transmissão ou redes de distribuição, podendo ser fixados nas estruturas de ancoragem de amarração ou nas estruturas de alinhamento. Esses isoladores são instalados em série, na composição de cadeia (MAMEDE, 2022). A Figura 10 mostra como é feita a instalação de uma cadeia de isoladores e a Figura 11 apresenta a relação de materiais da instalação.



Fonte: Mamede Filho (2021).

Figura 11 – Relação de Materiais

RELAÇÃO DE MATERIAIS			
ITEM	UNID.	QUANT.	DESCRIÇÃO
01	PÇ	18	ISOLADOR DE DISCO 69 kV
02	PÇ	03	OLHAL PARAFUSO M20, AÇO ZINCADO 12000 daN
03	PÇ	03	GANCHO-BOLA, AÇO ZINCADO, 12000 daN
04	PÇ	03	CONCHA-GARFO EM AÇO ZINCADO 16 mm, 12000 daN
05	PÇ	03	GRAMPO TERMINAL PARA CABO CAL 160 mm²
06	PÇ	03	PARAFUSO CABEÇA QUADRADA AÇO ZINCADO M20 >= 350 mm, COM PORCA
07	PÇ	06	ARRUELA REDONDA, AÇO ZINCADO 44 " 5 " 22 mm
08	PÇ	06	ARRUELA, PRESSÃO AÇO ZINCADO 28 " 4 " 22 mm
09	PÇ	03	CONECTOR DE ATERRAMENTO PARA CABO DE COBRE 16-70 mm²
10	PC	03	CHAPA CURVA PARA ATERRAMENTO EM AÇO ZINCADO D=22 m
11	PC	03	CONECTOR FENDIDO PARA CABO DE COBRE 35-70 mm² TR 16-70 mm² DR
12	PC	12	ABRACADEIRA TIPO UNHA PARA CABO 70 mm²
13	PC	12	BUCHA NAILON S-8 PARA PARAFUSO 4,8 " 50 mm
14	PC	12	PARAFUSO AUTOTARRACHANTE AÇO ZINCADO 4,8 " 50 mm
15	KG	25	CABO DE COBRE NU 70mm² 19 FIOS, TEMPERA MEIO DURA
16	PC	02	PÓ DE SOLDA EXOTÉRMICA CARTUCHO 90g

Fonte: Mamede Filho (2021).

O isolador de apoio pedestal tem suas peças formadas em série, contendo uma base e um topo para cada peça, em uma estrutura de suporte de aço. As peças são fixadas no suporte através de parafusos de ferro galvanizado. Em subestações abrigadas geralmente são utilizados os isoladores de pedestal em porcelana vitrificada. A figura 12 apresenta um exemplo de aplicação de isoladores pedestal, em subestação.

Figura 12– Isolador tipo pedestal em subestação



Fonte: Mamede Filho (2022).

2.1.2.6 Disjuntor

Os disjuntores são dispositivos usados na baixa e alta tensão, com o objetivo de proteger as instalações elétricas presentes. São utilizados para interromper o fluxo de corrente elétrica quando são detectadas condições anormais no sistema elétrico. Sua função é interromper correntes de falta, curto-circuito, correntes capacitivas de bancos de capacitores e correntes de magnetização de transformadores e reatores. A interrupção da corrente deve ser rápida o suficiente para evitar danos aos equipamentos, sendo idealmente concluída em dois ciclos após estarem fechados há um longo período (FROTIN, 2013).

Além da proteção às instalações, os disjuntores desempenham um papel importante para a realização de manutenção preventiva e monitoramento. O monitoramento permite o controle remoto e detecção precoce de algumas condições anormais ou problemas potenciais, isso permite a eficiência do sistema. Quando é necessário realizar a manutenção de um determinado equipamento, como um transformador por exemplo, é possível ser feita a abertura dos disjuntores para inspeção, reparo ou substituição, garantindo a segurança da execução dessas atividades. Visto isso, a seguir serão abordados os principais tipos de disjuntores.

Os disjuntores a óleo são comumente utilizados em sistemas de média tensão e aplicados em subestações de pequeno e médio porte. Existem duas variações principais: os de grande volume de óleo, que possuem três polos instalados em um recipiente contendo uma grande quantidade de óleo mineral; e os de pequeno volume de óleo, nos quais os contatos são colocados dentro de câmaras de extinção montadas junto à caixa do mecanismo de comando, em uma estrutura de cantoneiras de ferro galvanizado. Apesar de serem mais econômicos e possuírem uma operação simples, os disjuntores a óleo têm perdido espaço no mercado para os disjuntores a vácuo (MAMEDE, 2022).

Os disjuntores a vácuo são caracterizados pelo uso da câmara de vácuo para extinguir o arco elétrico. Cada pólo é constituído por uma câmara a vácuo, suportada por isoladores de epóxi em uma caixa de manobra. Em instalações que exigem um grande número de manobras e em redes que necessitam de religamento,

recomenda-se o uso do disjuntor a vácuo devido à longa vida útil dos contatos e à ausência de meios extintores líquidos ou gasosos, respectivamente (MAMEDE, 2022)

Os disjuntores a ar comprimido operam por meio de um sistema de extinção do arco elétrico que envolve a introdução de ar comprimido nas câmaras do disjuntor. É importante ressaltar que esses disjuntores requerem uma pressão mínima constante na câmara para funcionarem corretamente, o que demanda uma manutenção frequente. Além disso, durante a operação dos disjuntores, ocorre a exaustão de ar para a atmosfera, resultando em um ruído significativo (FROTIN, 2013).

Por fim, os disjuntores SF6 utilizam o gás SF6 (Hexafluoreto de Enxofre) como meio isolante e para a extinção do arco. Esse gás possui propriedades isolantes superiores às do ar, impedindo a formação do arco e interrompendo a corrente elétrica. Outra função importante é a propriedade autolimpante, capaz de remover resíduos dos contatos durante a extinção do arco, o que aumenta a confiabilidade do disjuntor. É válido ressaltar as questões ambientais sobre o uso do SF6 devido ao agravamento da depleção da camada de ozônio e do efeito estufa em caso de vazamento. (FROTIN, 2013).

2.1.2.7 Chave seccionadora

Segundo Mamede (2022), a chave seccionadora pode ser definida como um dispositivo de manobra responsável por abrir e fechar circuitos após a interrupção ou restabelecimento de uma corrente desprezível. Essas chaves desempenham um papel crucial na realização de manobras em subestações, garantindo o isolamento dos equipamentos. Além disso, nas redes de distribuição aérea, as chaves seccionadoras são utilizadas para seccionar os alimentadores, permitindo manobras durante os procedimentos de manutenção.

Segundo a NBR IEC 62271-102 as correntes desprezíveis podem ser definidas como as correntes capacitivas presentes nas buchas, barramentos de conexão e em cabos de comprimento muito curto. Essas correntes também englobam as correntes resultantes das impedâncias dos disjuntores conectados permanentemente, assim como as correntes provenientes de transformadores e

divisores de tensão. Além disso, as correntes desprezíveis se referem a valores inferiores a 0,5 A para $U_r > 420$ kV.

As chaves seccionadoras podem ser selecionadas de acordo com o tipo de abertura, sendo essa escolha baseada principalmente no espaço disponível na instalação. O Quadro 1 indica os tipos de abertura disponíveis e suas devidas funções e aplicações.

Quadro 1 – Tipos de abertura – chave seccionadora

Tipo	Função/Aplicação
Abertura Lateral	- Tensão de trabalho até 145 kV - Não recomendado para níveis de curto-circuito acima de 25 kV - Aplicações que requerem otimização de espaço; montagem com polos paralelos.
Dupla Abertura Lateral	- Variação com acionamento simples, com mais esforço durante o fechamento - Variação com acionamento duplo, com rotação da lâmina e melhor desempenho em situações de curto-circuito
Abertura Vertical	- Pouco espaço horizontal requerido para a operação - Utilizada principalmente em subestações de transmissão devido à excelente suportabilidade de curto-circuito
Abertura Vertical Reversa	- Posição da lâmina é contrária ao tipo de abertura vertical - Pode ser instalado diretamente em barramento ou viga de subestação
Abertura central	- Isoladores montados em mancais rotativos, onde cada um é responsável por acionar metade da lâmina - Espaçamento maior - Utilizada em subestações industriais
Abertura Semi Pantográfica Horizontal	- Utilizado em tensões acima de 245 kV - Pode ser utilizada em áreas com limitação de espaço dado seu porte mais compacto
Abertura Semi Pantográfica Vertical	- Modelo mais utilizado para transferência de barras - Classes de tensão acima 145/245 kV - Montagem dos polos na diagonal ou alinhado

Abertura Pantográfica	- Alta capacidade e suportabilidade a curto-circuito - Utilizados em transferência de barras - Facilidade de ajuste da área de contatos
--------------------------	---

Fonte: Adaptado de Aprender Elétrica (2021).

2.1.2.8 Banco de capacitores

Segundo a NBR 8763 são aplicadas algumas definições para complementar e compreender o banco de capacitores, sendo elas: elemento capacitivo, unidade capacitiva, fase de um banco de capacitores série, segmento de um banco de capacitores em série e por último, o banco de capacitores série (ou banco).

Um elemento capacitivo é constituído de placas separadas por um dielétrico e a parte indivisível de um capacitor de potência. Já uma unidade capacitiva é constituída de elementos capacitivos. A fase de um banco de capacitores é compreendida como um conjunto de unidades capacitivas ligadas em uma mesma fase. Um segmento de um banco de capacitores é parte de uma fase em um banco de capacitores série. Ele é composto por grupos de unidades capacitivas conectadas tanto em série quanto em paralelo, além de dispositivos de proteção e controle. Esses componentes são montados em uma plataforma isolada da terra para garantir a segurança e o desempenho adequados do segmento. Com isso, pode-se definir um banco de capacitores como três fases de um banco, sendo operadas em comum (NBR Nº 8763, 1998).

Além das unidades capacitivas, um banco de capacitores pode incluir dispositivos suplementares, como disjuntores, chaves seccionadoras, para-raios, reatores de amortecimento, relés e transformadores de corrente e/ou potencial para medição. Esses componentes desempenham funções específicas, como proteção, controle e medição, e são integrados ao banco para garantir um funcionamento adequado e seguro do sistema capacitivo (APRENDER ELÉTRICA, 2021).

O disjuntor SF6 é um dos equipamentos de manobras mais utilizados nos bancos de capacitores. A seleção adequada dos equipamentos de manobra depende de diversos fatores essenciais, incluindo a capacidade de interrupção de correntes de curto-circuito dos dispositivos, o número de operações de manobra esperadas e

outros critérios relevantes. Além disso, é importante que os dispositivos apresentem uma baixa probabilidade de reacendimento do arco durante o processo de abertura do banco de capacitores (FROTIN, 2013).

2.1.2.9 Transformador de Aterramento

O transformador de aterramento é um equipamento utilizado para fazer conexão a terra em sistemas elétricos, com o objetivo de criar uma referência terra confiável. Em tensões de 230 kV é feito o mesmo sistema de estabelecer um ponto de conexão à terra. Nesses sistemas, os enrolamentos primários dos transformadores são conectados na configuração estrela com o ponto neutro aterrado, enquanto os enrolamentos secundários são conectados em triângulo. Sendo assim, para criar uma ligação à terra no secundário do transformador de potência, é comum utilizar um transformador de aterramento, geralmente com enrolamentos conectados em uma configuração de zigue-zague (MAMEDE, 2021).

Segundo Costa (2014), o transformador de aterramento zigue-zague é composto por um núcleo magnético de três colunas, apresentando dois enrolamentos idênticos em cada uma delas. No sistema trifásico, os vetores das bobinas individuais das três colunas presentes no transformador, acompanham as polaridades estabelecidas nas respectivas bobinas. A ligação das três é feita de forma alternada entre os núcleos, de maneira específica para formar a configuração zigue zague.

2.2 Metodologia BIM

Neste item, apresenta-se a abordagem metodológica do BIM que guiará a exploração do conceito, ciclo de vida, seus fundamentos e fluxo de processos. A metodologia delinea as etapas que serão adotadas para investigar, analisar e compreender a implementação e os efeitos do BIM em diferentes contextos.

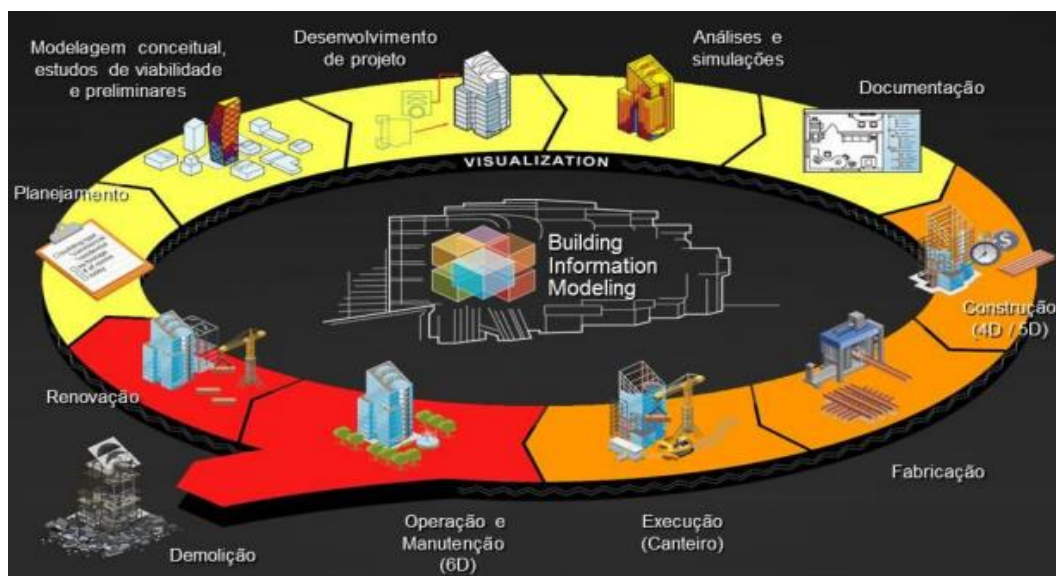
2.2.1 BIM – Conceito e Definição

O *National Building Information Model Standard Project Committee* define BIM da seguinte forma:

O *Building Information Modeling* (BIM) é uma representação digital das características físicas e funcionais de uma instalação. Um BIM é um recurso de conhecimento compartilhado para informações sobre uma instalação formando uma base confiável para decisões durante seu ciclo de vida; definido como existente desde a concepção inicial até a demolição (NATIONAL BIM STANDARD, 2023, tradução nossa).

O conceito sobre BIM, enfatiza sua integração ao longo das múltiplas fases que compõem o ciclo de vida de um projeto, conforme definido na figura 13, abrangendo a etapa de concepção, execução e operação, graças a intercambialidade de informações.

Figura 13– Ciclo de vida BIM



Fonte: Mello (2012).

A maior parcela do ciclo, representada em amarelo, abrange a etapa de planejamento, modelagem, desenvolvimento do projeto, análises, simulações e documentação. Na coloração laranja, temos a abordagem da construção, orçamentação e início da execução da obra. Finalmente, em vermelho, englobam-se as fases de operação e manutenção após a conclusão da construção.

2.2.1.1 *Marco Regulatório do BIM no Brasil: Decreto 10.306/2020*

A consolidação da metodologia BIM para projetos e gestão de obras no Brasil se deu em 1 de abril de 2020, com a publicação do Decreto nº 10.306. O decreto estabelece a utilização do *Building Information Modelling - BIM* como ferramenta para a elaboração de projetos de engenharia e arquitetura e execução de obras e serviços de engenharia realizados pelos órgãos da administração pública.

O decreto confirma a relevância da metodologia BIM para o setor de engenharia e construção ao estabelecer etapas para sua implementação. Esta abordagem garante uma adoção gradual e obrigatória do BIM, visando melhorar a qualidade e precisão dos projetos, reduzir custos e otimizar prazos.

2.2.1.2 *Compatibilização de projetos CAD X BIM*

A compatibilização dos projetos é uma parte essencial do projeto e visa garantir a integração de diferentes disciplinas. A compatibilização permite que problemas encontrados possam ser sanados antes da obra, evitando atrasos e custos adicionais.

O processo de coordenação e compatibilização de projetos tem seu ponto de partida na fase de estudos preliminares, avança durante a etapa de anteprojetos e conclui-se ao atingir uma coordenação parcial e, por fim, abrangente durante os estágios de projetos executivos. Esse procedimento de compatibilização desempenha um papel fundamental, assegurando que as múltiplas abordagens dimensionais, tecnológicas e estéticas estejam perfeitamente alinhadas entre si e integradas no contexto global dos projetos em questão (MARIA, 2004).

Segundo Graziano (2003), as complicações encontradas na atividade de compatibilização de projetos derivam tanto da conduta do projetista quanto do cliente. Em determinadas situações, o projetista pode apresentar desafios ao processo devido à falta de comprometimento com a coordenação entre os diferentes projetos e uma compreensão limitada das técnicas construtivas utilizadas no projeto. O cliente também pode contribuir para as dificuldades ao adiar decisões importantes e fornecer informações incompletas, o que impacta negativamente o avanço do projeto.

Na compatibilização de projetos em 2D, surgem maiores dificuldades, conforme enfatizado por Pereira e Souza. Nesse contexto, o esforço do projetista em simplificar o desenho acaba por excluir informações importantes para outras disciplinas, as quais são consideradas "óbvias" para o especialista encarregado do projeto. Além disso, as informações omitidas, juntamente com possíveis detalhes essenciais desconhecidos por outras áreas, tendem a ser negligenciadas.

Nos projetos em BIM, a compatibilização ocorre em duas etapas: durante a modelagem do projeto e após a integração dos elementos de todas as disciplinas envolvidas. A natureza tridimensional possibilita uma detecção mais rápida e eficaz, visto que na hora da inserção dos elementos já é possível ver as interferências. Além disso, a capacidade de criar diferentes cortes e vistas em qualquer ponto amplifica a capacidade visual e possibilita, mais facilmente, a identificação de problemas, fato que não ocorre nos projetos 2D (SENA, 2012)

2.2.2 Fundamentos do BIM

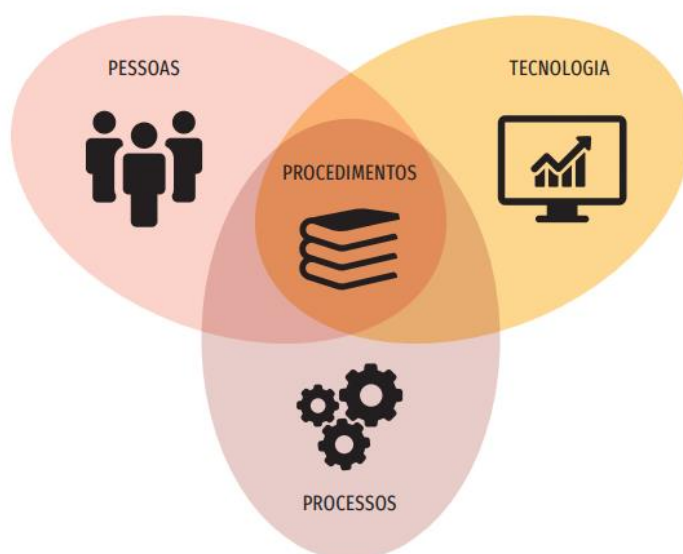
Atualmente, a entrega de projetos de AEC (Arquitetura e Engenharia Civil) enfrenta desafios devido à dependência de métodos tradicionais de comunicação baseados em documentos físicos. Os equívocos registrados nos papéis acarretam em custos não esperados, atrasos e conflitos. Algumas medidas já foram tomadas a fim de melhorar a comunicação das informações, como o design-build e plataformas online. Porém, mesmo com as mudanças, a frequência de conflitos resultante dos registros físicos e eletrônicos não diminuiu. O maior desafio nessas entregas é a geração tardia de informações de avaliação crítica do projeto, levando a ajustes na engenharia de valor, comprometendo o projeto original (EASTMAN, 2011).

O BIM possibilita o proprietário de desenvolver uma compreensão das características e necessidades do projeto. Além disso, o BIM engloba o planejamento, design, desenvolvimento e análise do projeto, gestão da construção e administração das operações. Adicionalmente, o modelo com informações quantitativas pode ser vinculado com uma base de dados de custo, gerando estimativas alinhadas e atualizadas ao modelo 3D (GRILO, 2010).

A implantação da metodologia BIM é baseada em três dimensões fundamentais que incluem: tecnologia, pessoas e processos. Essas dimensões são conectadas entre si através de procedimentos, normas e boas práticas, conforme ilustrado na Figura 14 (ABDI, 2017).

A tecnologia compreende os elementos fundamentais para o desenvolvimento, abrangendo hardware, software, conexão de internet, segurança, armazenamento, treinamento e aculturação adequado dos usuários no processo BIM. Quando se trata de pessoas, é importante ressaltar que, os profissionais envolvidos devem possuir a experiência necessária, capacidade para colaborar efetivamente em equipes internas e externas, se adaptável a mudanças e se manter atualizados em relação à tecnologia. A abordagem de foco no processo envolve novos procedimentos internos e interempresariais, incluindo planejamento, fluxo de trabalho, cronograma, entregáveis, comunicação, funções, centralização de dados e detalhamento, garantindo uso do modelo em todo ciclo de vida (ABDI, 2017).

Figura 14 – Os fundamentos do BIM

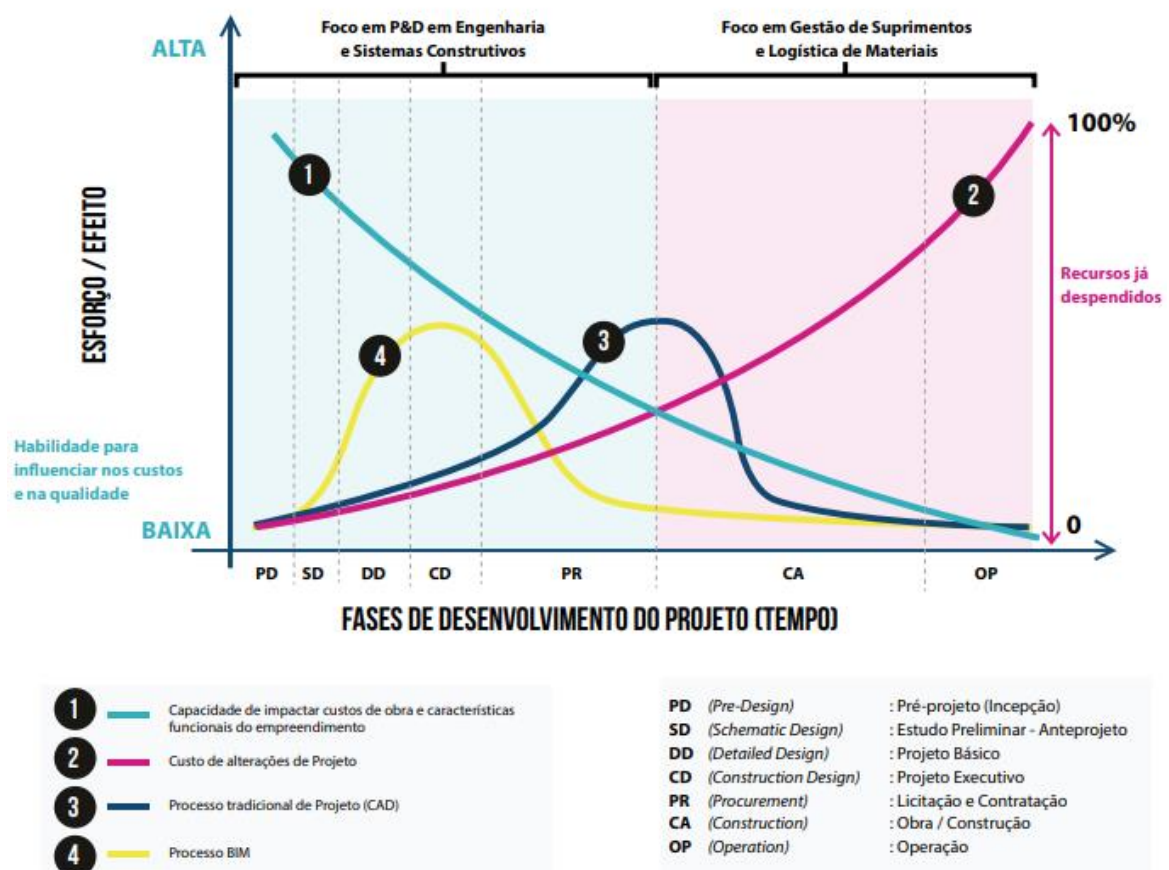


Fonte: ABDI (2017).

2.2.3 Fluxo de processos

O fluxo de processos envolve uma sequência organizada de atividades de uma tarefa ou projeto, podendo visualizar cada etapa. Na busca pela aprimoração da eficiência em várias áreas, o entendimento e a otimização dos fluxos de processos se tornaram cruciais. A Figura 15 mostra um gráfico comparativo das fases de desenvolvimento de um projeto em CAD e BIM, também conhecida como curva de MacLeamy. A curva em azul escuro representa o processo tradicional de projeto (CAD) e a curva amarela representa o processo BIM.

Figura 15 – Gráfico comparativo entre o processo tradicional de desenvolvimento de projetos (CAD) e o processo BIM



Fonte: CBIC (2016).

Durante as fases de pré-projeto, estudo preliminar, projeto básico, executivo, licitação e contratação, estão situadas as oportunidades mais importantes de reduzir custos e estabelecer otimizações. Durante essas etapas é importante focar nas atividades de concepção, pesquisa e soluções. Já nas fases de obra e operação, qualquer mudança pode impactar significativamente no custo do projeto, então, a maioria das especificações e decisões concernentes aos métodos construtivos já terá sido estabelecida e finalizada (CBIC 2016).

Essa análise leva à conclusão de que a habilidade de influenciar nos custos declina à medida que o projeto progride entre suas diferentes fases. Consequentemente, à medida que o projeto avança, o custo associado a alterações no projeto aumenta, ressaltando a importância de uma definição sólida nas fases iniciais para evitar impactos financeiros significativos posteriormente.

2.2.4 Dimensões do BIM

Convencionalmente, a representação visual de um projeto ocorre em formatos 2D ou 3D, ilustrando as dimensões físicas de um objeto nos eixos das coordenadas (x,y,z). No entanto, a modelagem paramétrica aplicada no BIM, introduz a possibilidade de incorporar dimensões virtuais adicionais. Isso resulta na ampliação do escopo do projeto com informações de fundamental importância durante todo o ciclo de vida (FERREIRA, 2020).

Segundo Arnal (2018), para desenvolver a teoria das 10 dimensões foi estabelecido um ciclo de ferramentas/meio/finalidade. Esse ciclo permitiu a compreensão mais profunda do processo construtivo, através da integração de ferramentas digitais de modelação tridimensional com uma base de dados. Essa abordagem resultou na evolução para uma nova forma de trabalho denominada "processos colaborativos", com a finalidade de alinhar os diversos agentes envolvidos ao longo do ciclo de vida de edificações ou infraestruturas, culminando no estágio de construção industrializada. As 10 dimensões são mostradas na Figura 16.

Figura 16– Dimensões do BIM, do 3D ao 10D

Fonte: José Darós (2019).



Na visão de Arnal (2018), as 10 dimensões podem ser categorizadas da seguinte maneira:

- 1D - Implementação de Protocolos BIM em escalas nacionais ou organizacionais, estabelecendo a base para a adoção do BIM;
- 2D - Aplicação de fluxos de trabalho colaborativos, conduzindo a novas formas de contratualização e a uma ênfase em soluções integradas de gestão;
- 3D – Modelagem digital e captura da realidade;
- 4D – Planejamento temporal dos elementos;
- 5D – Economia do projeto, custos e despesas de manutenção
- 6D – Sustentabilidade ambiental e contabilidade de CO2;
- 7D – Operação e manutenção de instalações e ativos manufaturados, promovendo a longevidade e eficiência;
- 8D – Segurança e saúde;
- 9D - Gerenciamento enxuto no setor, visando aprimorar a eficiência sob a alcunha de "construção enxuta";
- 10D - A industrialização da construção por meio da incorporação de novas tecnologias e sua digitalização.

2.2.5 Níveis de desenvolvimento LOD do BIM

O AIA (Instituto Americano de Arquitetura) concebeu e estabeleceu os níveis de desenvolvimento LOD (Nível de Desenvolvimento). Esses cinco níveis de

desenvolvimento são representados em uma escala que varia de 100 a 500, com incrementos de 100 unidades. Tem como objetivo oferecer uma compreensão da quantidade e qualidade das informações e da apresentação do projeto, permitindo, assim, avaliar o grau de confiabilidade dos dados (AIA, 2013).

De acordo com o AIA, é possível classificar os níveis de desenvolvimento da seguinte maneira:

- LOD 100 – A Volumetria geral da edificação, com identificação da área, altura, volume, localização e orientação, podendo ser modelada em três dimensões ou representada por outros dados;
- LOD 200 – Elementos do modelo representados como sistemas ou conjuntos generalizados com quantidades aproximadas, tamanho, forma, localização e orientação. Podendo ter informações não geométricas associadas aos Elementos do Modelo;
- LOD 300 - Elementos do modelo representados como montagens específicas, precisas em relação a quantidade, tamanho, forma, localização e orientação. Podendo ter informações não geométricas associadas aos Elementos do Modelo;
- LOD 400 - Elementos do modelo representados como montagens específicas, que são precisas em relação ao tamanho, forma, localização, quantidade e orientação, contendo informações completas de fabricação, montagem e detalhamento. Podendo ter informações não geométricas associadas aos Elementos do Modelo; e
- LOD 500 - Elementos do modelo representados como montagens construídas, reais e precisas em termos de tamanho, forma, localização, quantidade e orientação. Podendo ter informações não geométricas associadas aos Elementos do Modelo.

2.3 Famílias do Revit

Entender o conceito de famílias no Revit é fundamental, pois elas são componentes que formam a base de qualquer projeto no BIM e contêm diversas

informações em sua estrutura. De acordo com Revit (2023), “uma família é um grupo de elementos com um conjunto comum de propriedades chamado de parâmetros e uma representação gráfica relacionada”.

As famílias tornam a organização do projeto e criação do modelo um processo fácil. Além disso, com conhecimento em modelagem e parametrização, é possível criar e modificar essas famílias sem a necessidade de programação adicional (NETTO, 2015).

De acordo com o Revit (2023), as famílias são classificadas em três categorias principais: famílias do sistema, famílias carregáveis e famílias no local. Enquanto as famílias do sistema e famílias carregáveis são as mais utilizadas nos projetos, as famílias no local são geralmente empregadas para elementos fora do padrão ou personalizados.

As famílias carregáveis são criadas com base em modelos preexistentes, como famílias de vegetação e de móveis e podem ser inseridas no projeto. O usuário tem a liberdade de determinar as propriedades do conjunto e as representações gráficas (ZONTA *et al*, 2019).

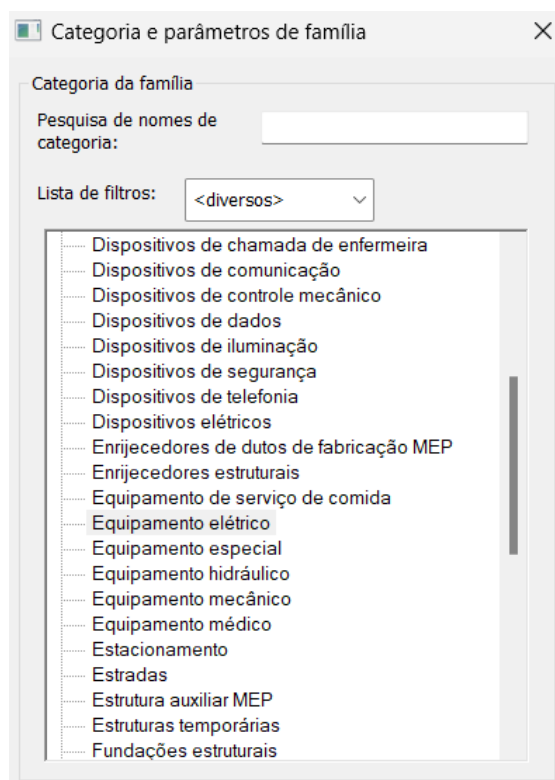
As famílias do sistema são as famílias que já vem instaladas no software, podendo ser elementos modelo ou de anotação e não podem ser apagadas. A partir de famílias do sistema podem ser criados outros tipos de famílias. Isso é feito ao duplicar uma família do sistema existente e realizar as modificações necessárias (NETTO, 2015).

Por último, as famílias no local se diferenciam das demais porque são modeladas diretamente dentro do arquivo do projeto, em vez de serem criadas como arquivos RFA separados. Estas são indicadas para casos muito específicos e geralmente não são reutilizadas em outros projetos. Se uma família for utilizada repetidas vezes, é recomendável criar um arquivo RFA para otimizar a produtividade (NETTO, 2015).

2.3.1 Propriedades das Famílias

Dentro do software é possível explorar diversas categorias de famílias, pois o Revit oferece uma “árvore” de famílias, conforme ilustrado na Figura 17. É importante desde o começo da criação, escolher a categoria correta, pois é nela que vai estar as especificidades necessárias dos parâmetros. Porém, a categoria da família pode ser alterada posteriormente, desde que estejam no mesmo tipo (Modelo e Anotação) (MAINARDI, 2011).

Figura 17– Categoria de família



Fonte: Revit (2023).

2.3.2 Parâmetros das Famílias

Quando é inserido um tipo de família no Revit, automaticamente são incluídos os parâmetros correspondentes a esse tipo de família. Esses parâmetros

abrangem informações como, dimensões, materiais e características operacionais, ou seja, informações que são relevantes ao projeto. Porém, a flexibilidade do sistema permite que o usuário personalize seus parâmetros, podendo adicionar ou remover, não ficando restrito apenas aos parâmetros pré estabelecidos.

De acordo com o Revit (2023), os parâmetros servem como um repositório de informações sobre todos os elementos de um modelo. Tem como função definir e modificar os elementos, além de serem fundamentais para comunicação de informações através de indicadores e tabelas. As propriedades associadas aos parâmetros de família são apresentadas na Figura 18.

Figura 18– Categoria de família

Propriedades de parâmetros

Tipo de parâmetro

☒ Parâmetro de família
(Não pode aparecer em tabelas ou identificadores)

☐ Parâmetros compartilhados
(Pode ser compartilhado por múltiplos projetos e famílias, exportado para ODBC, e aparecer em tabelas e identificadores)

Selecionar... Exportar...

Dados de parâmetro

Nome:

Disciplina:

Tipo de dados:

Parâmetro de grupo em:

Descrição da dica de
<Nenhuma descrição de dica de ferramenta. Edite este parâmetro para gravar

Editar dica de ferramenta...

[Como posso criar os parâmetros de família?](#)

OK Cancelar

Fonte: Revit (2023).

Os parâmetros são categorizados em dois tipos principais: parâmetros de família e parâmetros compartilhados. Os parâmetros de família são específicos para uma determinada família, servem para regular as variáveis dentro dela e também podem controlar os atributos de uma família aninhada. Os parâmetros compartilhados

são versáteis, podendo ser aplicados em múltiplas famílias e funcionar como parâmetros de projeto ou de família.

De acordo com Mainardi (2011) a seção de dados dos parâmetros, diversas informações devem ser especificadas. Estas incluem, nome, disciplina, tipo de dados, parâmetro de grupo, bem como se ele é um parâmetro do tipo ou da instância e se faz parte dos parâmetros do relatório.

- **Nome:** Nome que será atribuído ao parâmetro;
- **Disciplina:** Determina as informações que serão alteradas em “Tipo de dados”. As escolhas disponíveis podem ser: comum, estrutural e elétrica;
- **Tipo de dados:** Indica o tipo de informação especificada no parâmetro, como unidade de distância, modelo, entre outros. Para evitar erros nos cálculos ao utilizar parâmetros em fórmulas, é importante definir corretamente esse campo;
- **Parâmetro de grupo:** Com o objetivo de organizar os parâmetros na janela, essa categoria define o grupo que o parâmetro pertence
- **Tipo:** Indica que quando um parâmetro é modificado na janela de edição do tipo, a mudança se aplica em todas as instâncias desse tipo no projeto;
- **Instância:** pode ser ajustado individualmente para cada instância da família no projeto, por meio da janela de propriedades.
- **Parâmetros de Relatório:** Extrai informações para serem usadas em outro contexto.

2.4 Realidade Virtual e Aumentada

A realidade virtual e a realidade aumentada vêm ganhando destaque ao oferecer experiências imersivas, cada qual com suas particularidades. Nesse tópico será abordado os conceitos e aplicações de ambas.

2.4.1 Realidade Virtual

Dentro do contexto da realidade virtual, percebe-se diversas possibilidades e perspectivas sobre o assunto, que ultrapassam a mera imersão em ambientes digitais. Com o passar dos anos, surgiram diferentes definições de realidade virtual, suas aplicações e técnicas.

Kirner e Siscouto (2006) destacam que a realidade virtual pode ser compreendida como uma “interface avançada do usuário”. Essa interface permite aplicações rodadas em computadores e se caracterizam pela capacidade de visualizar e se movimentar em ambientes virtuais e interagir com elementos presentes nesses ambientes. Os autores ressaltam também que, ao estimular os sentidos de tato e audição, a experiência de realidade virtual pode ser aumentada significativamente.

Segundo Lavalle (2020), a realidade virtual não deve ser definida como dispositivos específicos visto que a tecnologia está evoluindo rapidamente. O autor define realidade virtual como o processo de provocar um comportamento através da estimulação sensorial artificial em um organismo que tem o mínimo ou nenhum reconhecimento da interferência.

De acordo com Cardoso *et al.* (2007), a realidade virtual pode ser categorizada em dois tipos: Realidade Virtual Imersiva e Realidade Virtual não Imersiva:

- Realidade Virtual Imersiva – A realidade Virtual Imersiva busca total imersão do usuário no mundo virtual, com a utilização de dispositivos que bloqueiam os sentidos do ambiente, concentrando apenas nos estímulos do ambiente virtual.
- Realidade Virtual não Imersiva – permite que o usuário interaja com o mundo virtual usando dispositivos convencionais, sem um completo afastamento do mundo real. Nesse contexto, são empregados óculos 3D, oferecendo uma experiência semi-imersiva.

Segundo Kirner e Gonçalves (2011), as características que definem a realidade virtual são:

- Informações multissensoriais produzidas e manipuladas em tempo real, tais como imagens dinâmicas, sons espaciais, reação de tato e força, etc.
- Interação em tempo real e em detrimento da quantidade de informação
- Processamento gráfico, sonoro e háptico com alta capacidade
- Atuação no espaço 3D
- Interação multissensorial com dispositivos especiais
- Adaptação e treinamento do usuário para ajuste ao mundo virtual

De acordo com Tori (2018), a RV apresenta dois componentes básicos:

- **HARDWARE** – Integra diversos componentes para facilitar a interação do usuário, incluindo dispositivos de entrada como rastreadores, luvas eletrônicas, mouse 3D, teclado e joysticks. Porém, a saída sensorial também é importante, indo além dos displays visuais e incorporando elementos hápticos e de áudio.;
- **SOFTWARE** – Softwares especializados, como game engines (Unreal e Unity 3D), desempenham um papel importante na preparação do ambiente virtual. Devido a versatilidade e abrangência em suporte a dispositivos, os engines são os mais utilizados e fundamentais para a modelagem 3D, texturização, sonorização e animação.

2.4.2 Realidade Aumentada

Segundo Tori (2018), a realidade aumentada é considerada uma vertente da realidade virtual, apesar de terem sido desenvolvidas indistintamente. Além disso, o autor afirma que a RA (Realidade Aumentada) adiciona objetos sintetizados computacionalmente em um ambiente físico, possibilitando a coexistência de objetos reais e virtuais.

A realidade aumentada permite que o usuário continue no ambiente físico e os objetos virtuais são transportados para o mesmo ambiente do usuário, assim, é

possível a interação sem a necessidade de adaptação ao mundo virtual. Uma maneira de deixar a experiência da RA melhor é a utilização de objetos reais com as mãos para interagir com o mundo virtual (KIRNER E SISCOUTO, 2006).

Segundo Molins (2013), a noção de que a realidade aumentada se define pela adição de informações ao mundo físico é tão ampla que poderia considerar praticamente qualquer coisa como uma forma de realidade aumentada. Para ele, as características que efetivamente definem a realidade aumentada são as seguintes:

- As informações digitais são sobrepostas ao ambiente real, ampliando o mundo físico.
- As informações são sincronizadas com o mundo físico e dependem da localização do mundo real.
- A experiência da realidade aumentada é interativa.
- O grau de interação pode variar, indo desde simples alterações na perspectiva visual até a manipulação e criação de novos dados ou informações.

2.4.3 Trabalhos relacionados de Realidade Virtual

Esta seção explora trabalhos correlatos que se concentram na aplicação da realidade virtual no setor elétrico. Os trabalhos focam em treinamento e simulação.

O primeiro trabalho apresenta um simulador baseado em operações do sistema elétrico. Segundo Santos e Fonseca (2013), o simulador oferece o modo de operação manual e demonstrativo. No manual o operador pode simular uma troca de isoladores e outros procedimentos liberados conforme seu desempenho. Além disso, o operador adquire conhecimentos como escolha de equipamentos, uso adequado do vestuário de segurança e de manuseio. A figura 19 ilustra a simulação de uma operação de troca de isolador em linha viva.

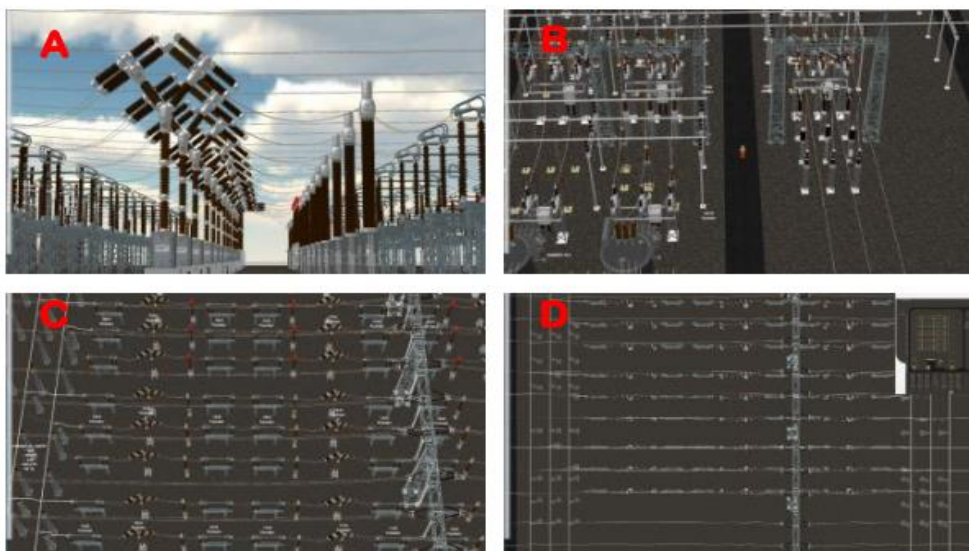
Figura 19 –Troca de isolador em linha viva



Fonte: Santos e Fonseca (2013).

O segundo trabalho apresenta um sistema de realidade virtual para monitoramento e controle de subestações de energia elétrica. Segundo Silva et al (2013), o estudo tem como objetivo aumentar a sensação de imersão para operadores durante atividades em subestações de energia. Além disso, o autor utiliza a plataforma Unity3D para a criação de um sistema de realidade virtual, focado em operações em tempo real e diretrizes de segurança. A Figura 20 mostra a representação das formas de navegação do sistema.

Figura 20 –Visão das 4 possíveis formas de navegação do sistema



Fonte: Silva et al (2013).

Por fim, o último trabalho aborda o desenvolvimento de um sistema de realidade virtual semi-imersivo, direcionado a treinamentos de atividades de manutenção em linha viva. De acordo com Rosendo *et al* (2011), o objetivo deste estudo, chamado de RV-COPEL, consiste em aprimorar o treinamento em manutenção de linha viva através de RV e considerar aspectos culturais e de segurança, expandindo o processo educacional. A Figura 21 mostra um dos passos da atividade realizada.

Figura 21– Captura de tela mostrando um dos passos da atividade já realizados



Fonte: Rosendo *et al* (2013).

3 IMPLEMENTAÇÃO BIM

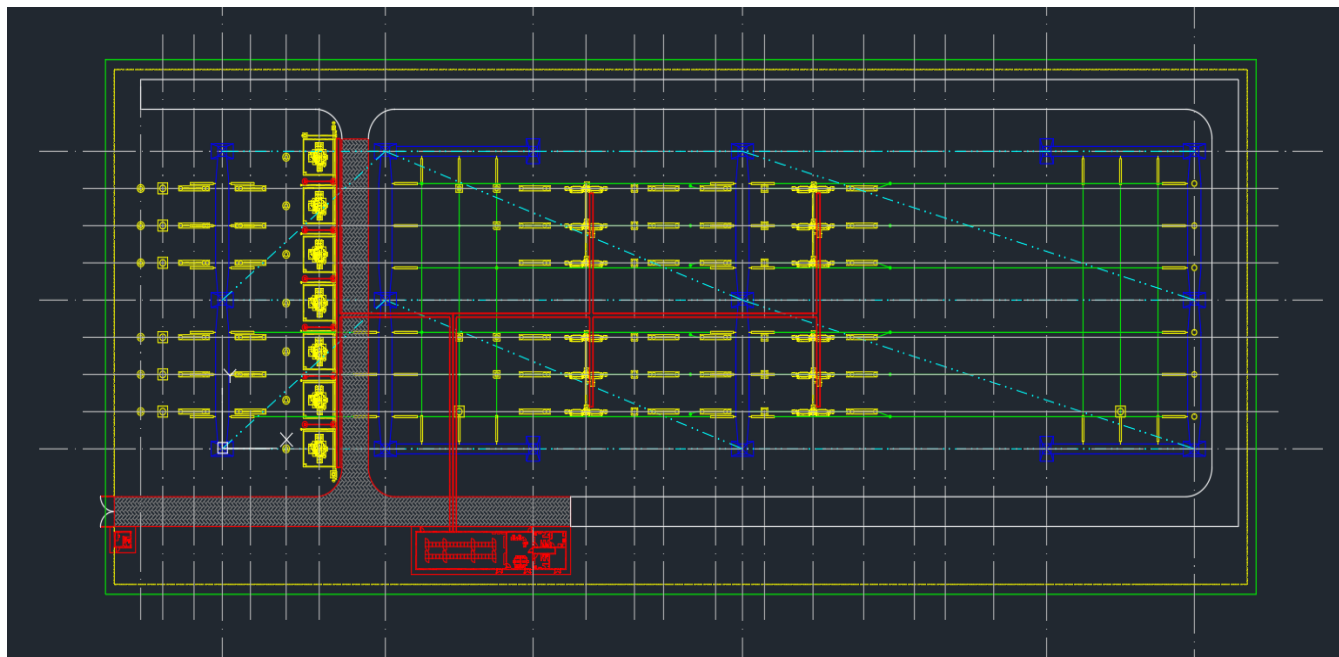
Este tópico tem como objetivo apresentar a aplicação prática de um projeto de subestação, utilizando a metodologia BIM. Será apresentado uma sequência lógica iniciada pelo projeto em 2D, evoluindo até o ambiente tridimensional. O foco do projeto é um Bay de 500 kV, que inclui os equipamentos essenciais de uma subestação.

3.1 Projeto 2D em DWG

O uso de projetos 2D serve como um alicerce fundamental para a elaboração de modelos 3D no Revit. As dimensões básicas e elementos contidos nos projetos bidimensionais facilitam no desenvolvimento e organização dos arranjos tridimensionais. Quando é necessário criar uma família do zero, o projeto 2D serve como um guia detalhado para otimizar o resultado final, refletindo em um melhor acabamento e maior detalhamento do componente tridimensional. Sendo assim, o 2D age como um esboço, facilitando a transição mais precisa do 2D para o 3D.

O modelo tridimensional da subestação, criado em colaboração com a empresa Araxá Engenharia, baseia-se no projeto bidimensional do arranjo, que está ilustrado na Figura 22. Representando um bay de 500 kV, o arranjo disjuntor e meio inclui os equipamentos fundamentais para o funcionamento da subestação. Entre esses equipamentos estão reatores, transformadores de corrente (TC), transformadores de potencial (TP), chaves seccionadoras, disjuntores, isoladores de pedestal, para-raios e cadeias de isoladores.

Figura 22 – Arranjo 2D do Bay de 500 kV



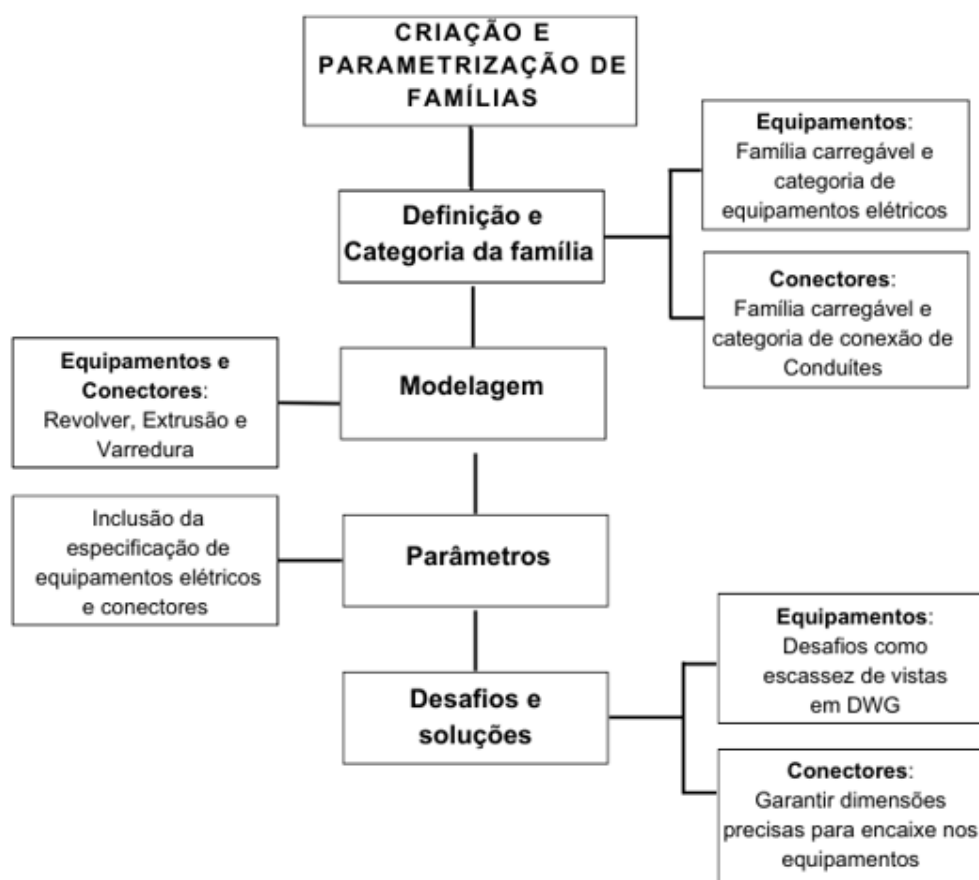
Fonte: Elaboração própria (2023).

3.2 Criação e Parametrização de Famílias

A criação de famílias é uma etapa importante do desenvolvimento do projeto, pois elas são responsáveis por fornecer os equipamentos, conectores e estruturas personalizadas necessárias para o projeto da subestação. As famílias foram elaboradas de acordo com os projetos 2D, utilizados como referência para as dimensões e detalhamentos.

A etapa de criação de famílias abrangeu a modelagem dos principais equipamentos encontrados em uma subestação, como reatores, transformadores de corrente e de potencial, disjuntores, chaves seccionadoras, isoladores de pedestal, para-raios e cadeias de isoladores. Além desses componentes centrais, famílias para conectores e estruturas de suporte, tais como suportes de equipamento e pórticos, também foram desenvolvidas. A figura 23 abaixo ilustra o fluxograma da criação e parametrização das famílias.

Figura 23– Fluxograma da Criação e Parametrização das Famílias



Fonte: Elaboração própria (2023).

3.2.1 Ferramentas Utilizadas

Neste tópico, são abordadas algumas das ferramentas utilizadas para facilitar e otimizar a criação das famílias no Revit.

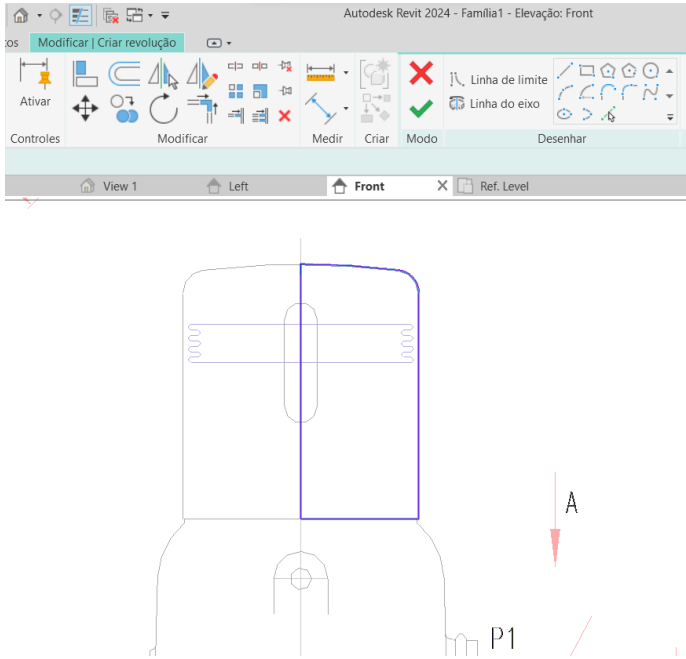
3.2.1.1 Revolução

De acordo com Revit (2023), a revolução é realizada para criar formas que se assemelham a círculos ou frações de círculos, utilizando um eixo como referência. Se a forma em rotação tocar esse eixo, resulta em um sólido. No entanto, ao desenhar diretamente no eixo, a geometria resultante apresentará uma cavidade central.

Tomando como exemplo a cabeça de um TC (Transformador de Corrente), a modelagem pode ser realizada através da revolução. Como ilustrado na Figura 24,

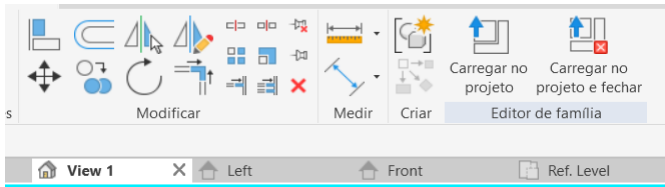
o eixo toca a figura que será revolvida, e assim é obtido uma forma sólida que representa a cabeça do TC, conforme a Figura 25.

Figura 24– Modelagem cabeça do TC



Fonte: Elaboração própria (2023).

Figura 25– Modelagem cabeça do TC



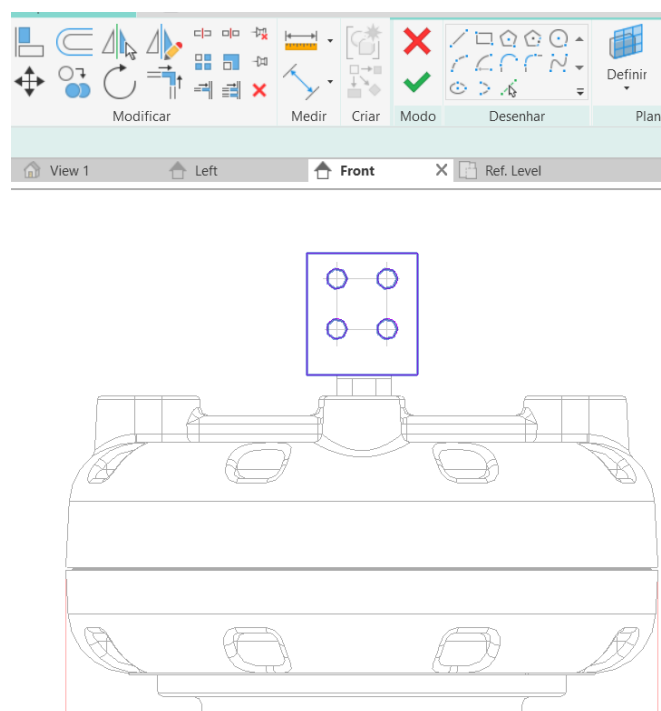
Fonte: Elaboração própria (2023).

3.2.1.2 Extrusão

De acordo com o Revit (2023), a extrusão pode ser feita através de um perfil 2D, fazendo um croqui nesse plano e efetuando a extrusão perpendicular a esse croqui. Além disso, a extrusão pode ser sólida ou vazia e é a forma mais fácil de criar no Revit.

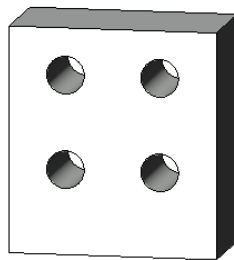
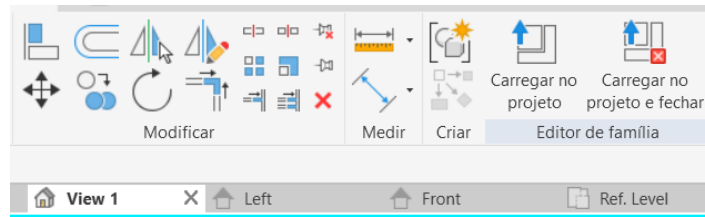
Tomando como exemplo a conexão de um TP (Transformador de Potencial), a modelagem pode ser realizada através da extrusão. Como ilustrado na Figura 26, o croqui é efetuado no plano 2D, e assim é obtido uma forma sólida perpendicular a este plano que representa a conexão do TP, conforme a Figura 27.

Figura 26– Modelagem conexão do TP



Fonte: Elaboração própria (2023).

Figura 27– Modelagem conexão do TP

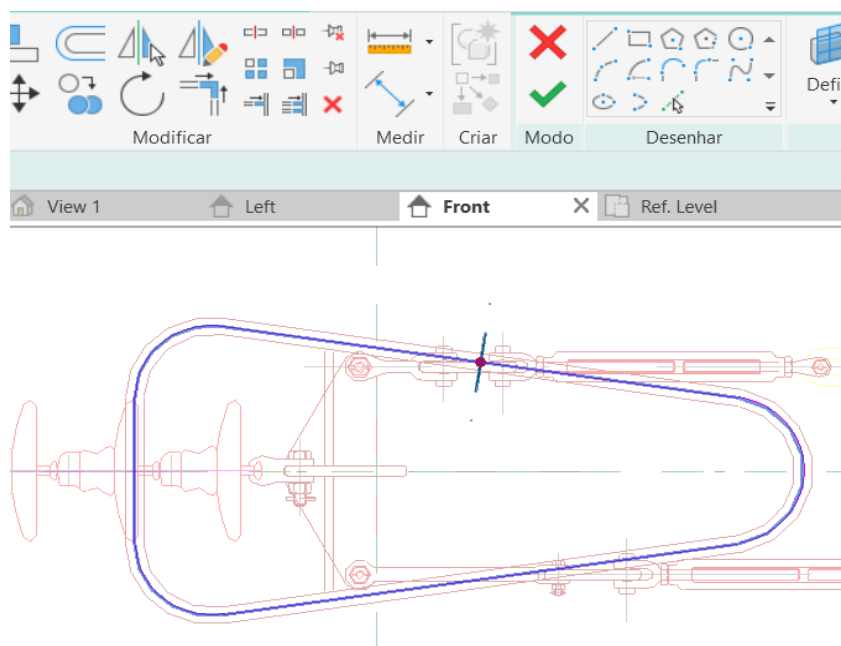


Fonte: Elaboração própria (2023).

3.2.1.3 Varredura

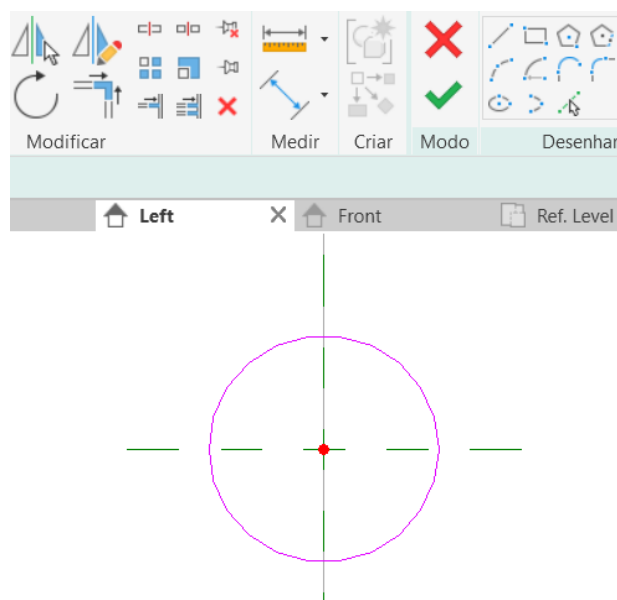
A varredura é semelhante com a extrusão. No entanto, a diferença é que, na varredura o caminho em que o croqui percorrerá é previamente definido. Tomando como exemplo o anel anticorona da chave seccionadora, a modelagem pode ser realizada através da varredura. Como ilustrado na Figura 28, o primeiro passo é definir o trajeto que o croqui seguirá. Após essa definição, o croqui é esboçado, conforme mostrado na Figura 29. Por fim, é obtida uma forma que representa o anel anticorona da cadeia de ancoragem, conforme a Figura 30.

Figura 28– Modelagem do anel anticorona



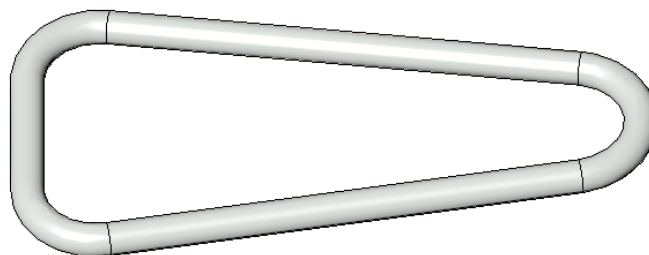
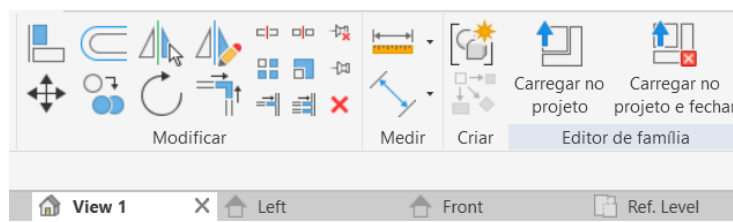
Fonte: Elaboração própria (2023).

Figura 29– Modelagem do anel anticorona



Fonte: Elaboração própria (2023).

Figura 30– Modelagem do anel anticorona



Fonte: Elaboração própria (2023).

3.2.2 Principais Equipamentos da Subestação

O objetivo deste tópico é explorar como os equipamentos foram modelados em Revit. Serão abordadas questões como a categorização de famílias, modelagem 3D, parâmetros associados e os desafios enfrentados.

3.2.2.1 Definição e Categoria da Família

Os principais equipamentos foram categorizados como uma família carregável, dentro da categoria de equipamentos elétricos. Essa escolha foi feita pois a família carregável permite um maior detalhamento, incluindo a especificação e atributos elétricos, fundamentais para um projeto de subestação.

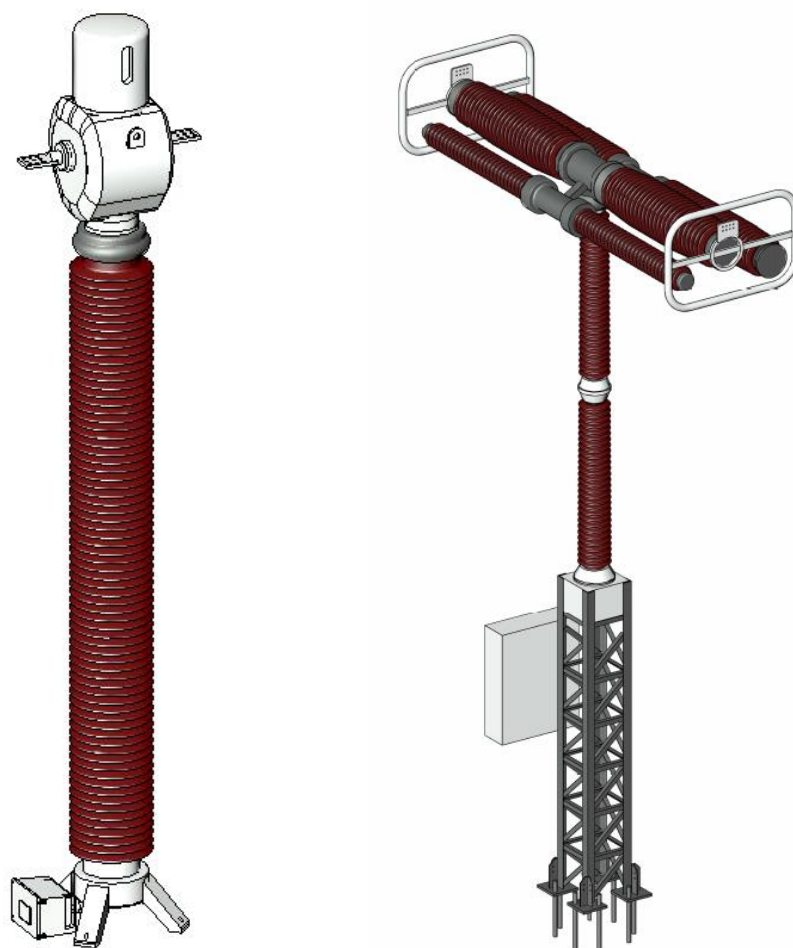
3.2.2.2 Modelagem

Para a modelagem dos equipamentos, foram utilizadas as ferramentas de criação de família do Revit, como revolver, extrusão, varredura e dando foco aos detalhes estruturais e funcionais. Enquanto a técnica de "revolver" foi utilizado para modelar formatos cilíndricos, como o reservatório intermediário de SF6 do

disjuntor, por exemplo, a "extrusão" foi empregada para criar componentes mais práticos, como a caixa dos terminais secundários do transformador de corrente. Além disso, foram consideradas as devidas escalas, proporções e posicionamento para garantir a integração com o resto do projeto da subestação.

A Figura 31 mostra a modelagem realizada para o transformador de corrente e disjuntor.

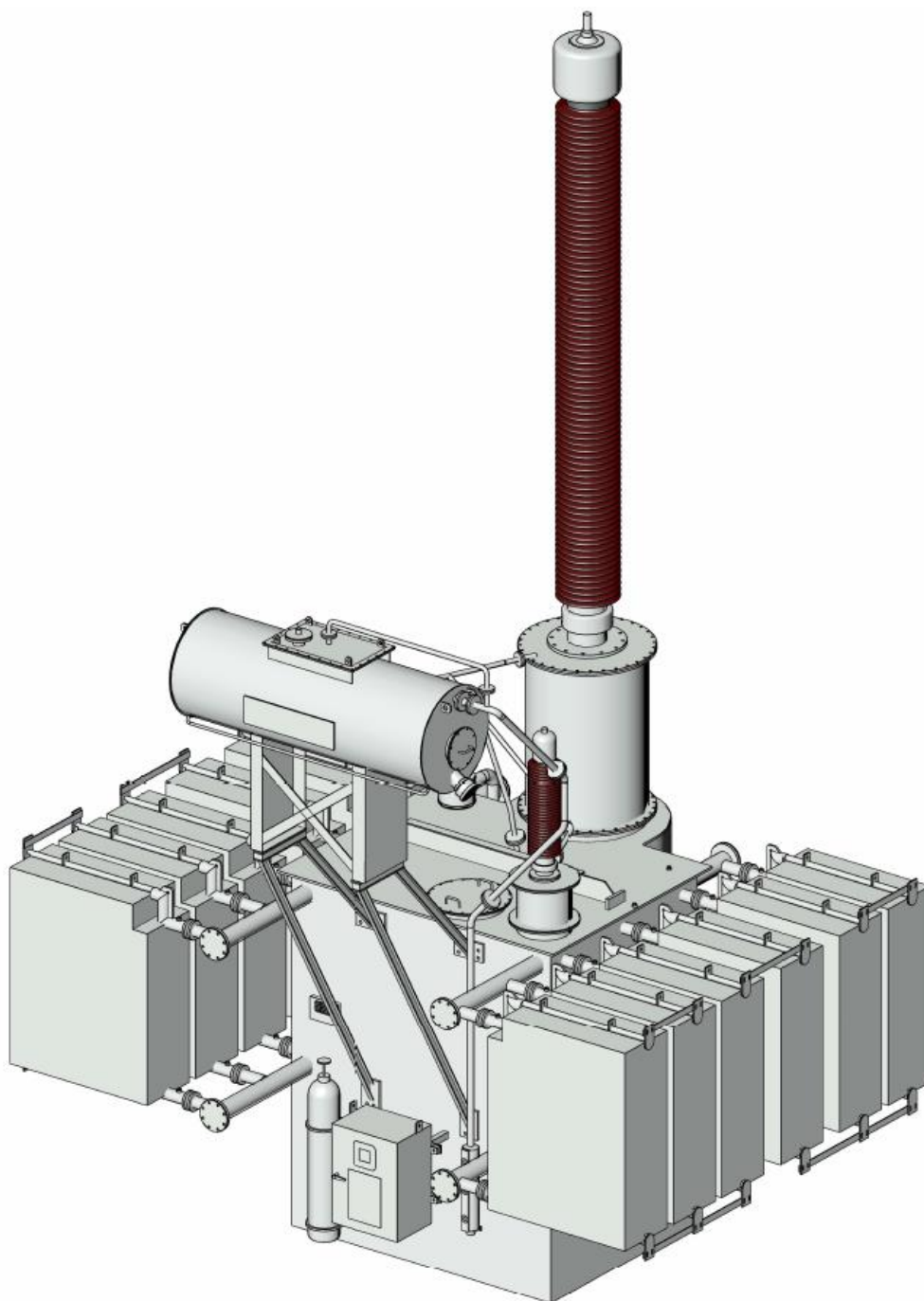
Figura 31– Modelagem do Transformador de Corrente e Disjuntor



Fonte: Elaboração própria (2023).

A Figura 32 mostra a modelagem realizada para o reator

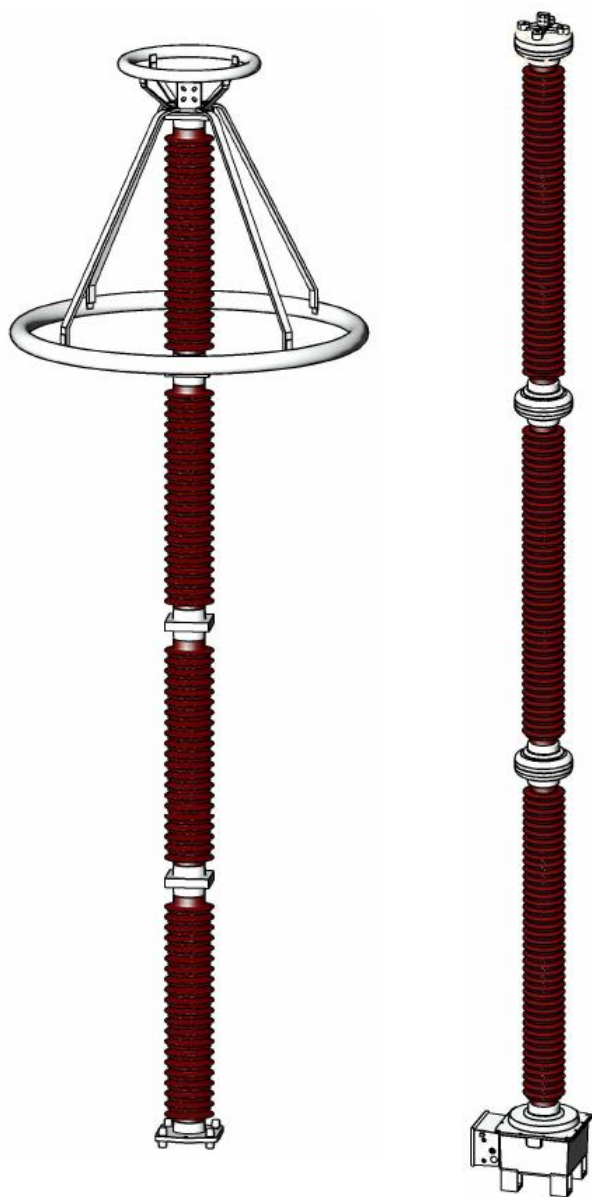
Figura 32– Modelagem do Reator



Fonte: Elaboração própria (2023).

A Figura 33 mostra a modelagem realizada para o para raio e transformador de potencial, respectivamente

Figura 33– Modelagem para raio e transformador de potencial



Fonte: Elaboração própria (2023).

A Figura 34 mostra a modelagem realizada para a chave seccionadora

Figura 34– Modelagem chave seccionadora



Fonte: Elaboração própria (2023).

3.2.2.3 Parâmetros

A inclusão dos parâmetros associados aos equipamentos foi uma parte importante do projeto. Especificações como tensão e capacidade não apenas enriquecem o projeto com um nível de detalhamento técnico, mas também são essenciais para geração de listas de materiais e estimativa de orçamento. A Figura 35 mostra a lista dos equipamentos em processo.

Figura 35– Lista de Equipamentos Elétricos

<Equipamentos Elétrico>		
A	B	C
Código de montagem	Descrição	Contagem
001	Para-Raio 500kV	13
002	Transformador de Potência 500kV	8
003	Transformador de Corrente 500kV	12
004	Isolador de Pedestal 500kV	14
006	Reator de Linha 500kV	7
008	Disjuntor 500kV	4
009	Grupo Gerador Diesel	1

Fonte: Elaboração própria (2023).

3.2.2.4 Desafios e soluções

O principal desafio enfrentado durante a modelagem dos equipamentos, foi a escassez das vistas disponíveis no arquivo DWG. Essas representações bidimensionais nem sempre incluem todas as perspectivas do elemento, dificultando a transição do 2D para o 3D. Pois, devido à falta de determinadas vistas, o detalhamento do equipamento poderia ficar comprometido.

Com isso, para aprimorar o detalhamento do equipamento, uma estratégia adotada foi a consulta de imagens fotográficas dos equipamentos obtidas durante visitas técnicas. Essa abordagem contribuiu para que a modelagem do

equipamento ficasse mais precisa do equipamento real, facilitando a integração com o restante do projeto.

3.2.3 Conectores

O objetivo deste tópico é explorar como os equipamentos foram modelados em Revit. Serão abordadas questões como a categorização de famílias, modelagem 3D, parâmetros associados e os desafios enfrentados.

3.2.3.1 *Definição e Categoria da Família*

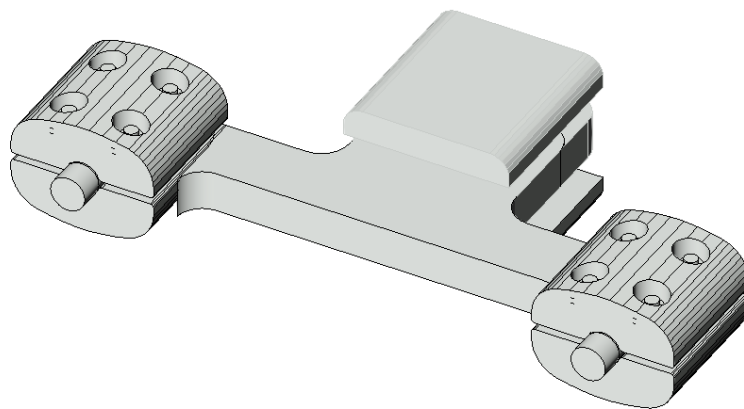
Os conectores foram categorizados como uma família carregável, dentro da categoria de conexão de conduites. Essa escolha foi feita pois a família carregável permite um maior detalhamento, incluindo a especificação e atributos elétricos, fundamentais para um projeto de subestação.

3.2.3.2 *Modelagem*

Para a modelagem dos conectores, foram utilizadas as ferramentas de criação de família do Revit, como revolver, extrusão, varredura e dando foco aos detalhes estruturais e funcionais. Enquanto a técnica de "revolver" foi utilizada para modelar formatos cilíndricos, como os parafusos dos conectores, por exemplo, a "extrusão" foi empregada para criar componentes mais práticos, como a tampa dos conectores. Além disso, foram consideradas as devidas escalas, proporções e posicionamento para garantir a integração com o resto do projeto da subestação.

A Figura 36 mostra a modelagem realizada para a o conector de 9 furos NEMA (National Electrical Manufacturers Association).

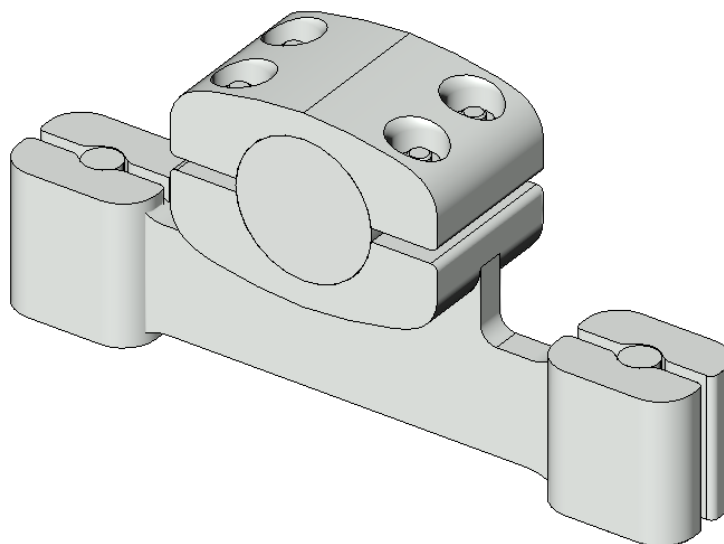
Figura 36– Conector 9 furos NEMA



Fonte: Elaboração própria (2023).

A Figura 37 mostra a modelagem realizada para a o conector de cabo / barramento de 5”

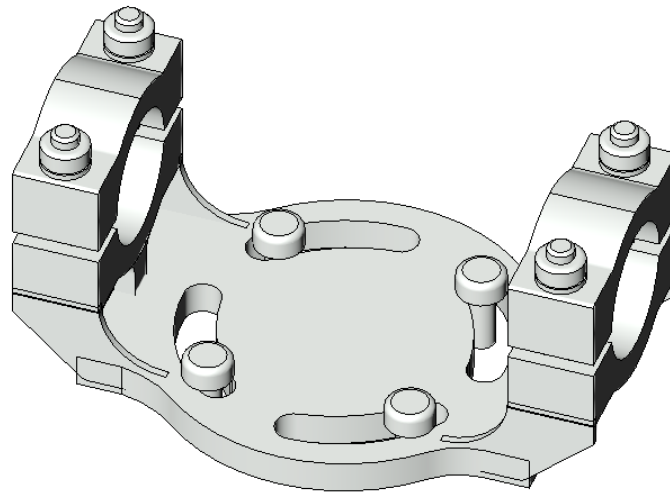
Figura 37 – Conector cabo / barramento



Fonte: Elaboração própria (2023).

A Figura 38 mostra a modelagem realizada para a o conector do isolador para barramento de 3”

Figura 38– Conector isolador para barramento



Fonte: Elaboração própria (2023).

3.2.3.3 Parâmetros

A inclusão dos parâmetros associados aos conectores foi uma parte importante do projeto. Especificações como tensão e dimensões não apenas enriquecem o projeto com um nível de detalhamento técnico, mas também são essenciais para geração de listas de materiais e estimativa de orçamento. A Figura 39 mostra a lista dos conectores em processo.

Figura 39– Lista de Conectores

<Conectores>		
A	B	C
Código de montagem	Descrição	Contagem
2005	Conector terminal reto 6 furos NEM	1
2008	Conector Terminal para 02 cabos	6
2025	Espaçador 457mm p/ 2 cabos Man	37

Fonte: Elaboração própria (2023).

3.2.3.4 Desafios e soluções

O principal desafio enfrentado durante a modelagem dos conectores, foi garantir que suas dimensões fossem precisas para que pudessem se encaixar nos equipamentos designados. Esta etapa é importante pois é preciso assegurar que os conectores sejam compatíveis com a conexão dos equipamentos. As dimensões dos furos e distância entre eles precisam ser exatas para garantir não só a coesão do design, mas também segurança e funcionalidade.

Com isso, para aprimorar o detalhamento dos conectores, foram adotadas algumas estratégias. Primeiramente, foram analisadas as especificações e conexões dos equipamentos. Em seguida, recorreu-se a consulta de imagens obtidas em visitas técnicas. Por fim, foi preciso garantir que as medidas no projeto 2D eram precisas, assegurando a transição exata do 2D para o 3D.

3.3 Arranjo - Inserção dos Equipamentos, Conectores e modelagem dos cabos

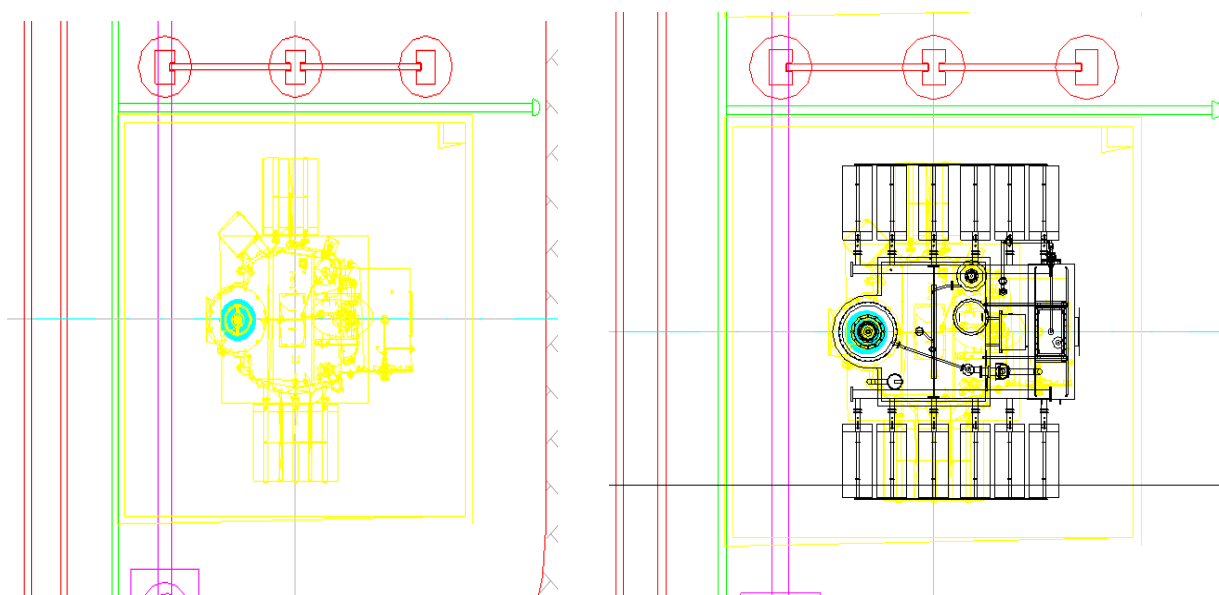
Uma das etapas iniciais no desenvolvimento do arranjo eletromecânico da subestação no BIM é a inserção dos equipamentos previamente modelados. Para garantir uma colocação precisa destes equipamentos, utilizou-se o projeto eletromecânico em formato DWG, pois o arquivo pode ser importado para o Revit servindo como referência visual e geométrica na hora da inserção. Embora o uso da planta do projeto em DWG auxilie na precisão, a inserção dos equipamentos pode ser realizada utilizando cotas e distâncias mínimas entre eles.

Segundo Costa (2015), uma das distâncias de segurança importantes para o desenvolvimento do projeto é a distância dielétrica. Essa distância se refere aos valores mínimos permitidos entre partes vivas da subestação, para que não ocorram descargas dielétricas entre estas partes e também em equipamentos e pessoas. Uma norma a ser seguida para definir essas distâncias é a norma IEC 61936-1- *Power Installations Exceeding 1 kV AC - Part 1 - Common Rules*.

3.3.1 Inserção dos Equipamentos

Os equipamentos foram inseridos todos em planta, utilizando o arranjo desenvolvido no AutoCAD como referência. Como os equipamentos foram todos criados como família, para inserir basta ir no ícone inserir > carregar família e posicionar o equipamento junto ao desenho em planta. A Figura 40 apresenta a comparação entre a planta sem o reator e com o reator posicionado em cima do desenho.

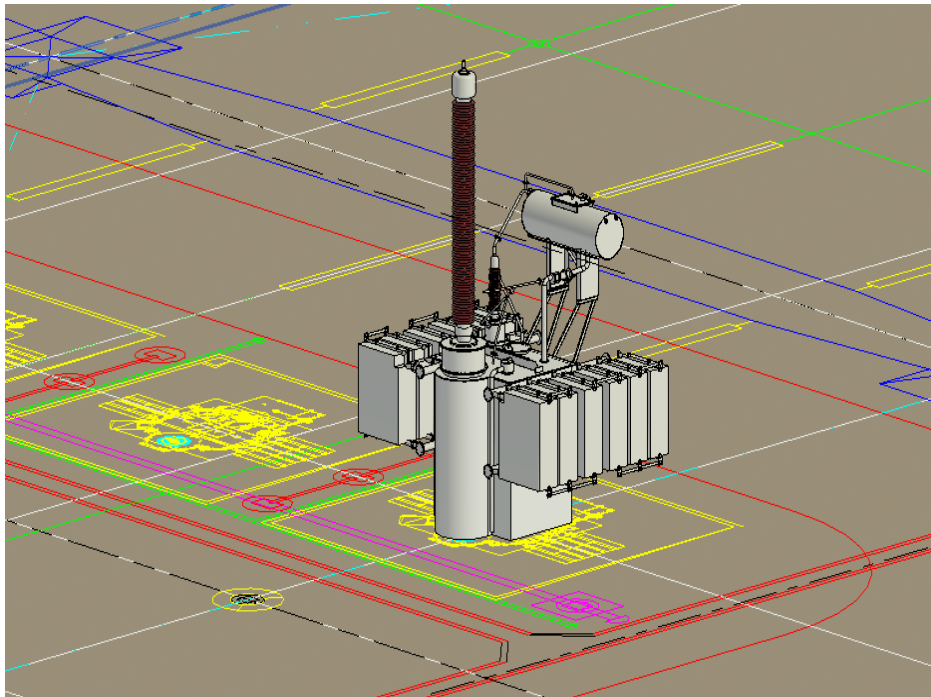
Figura 40– Comparação entre a planta sem equipamento e com equipamento inserido



Fonte: Elaboração própria (2023).

Algumas ferramentas de posicionamento como “girar” podem ser utilizadas no 3D para uma melhor visualização da locação do equipamento. Além disso, a utilização dessas ferramentas no 3D facilita a compreensão espacial tanto dos equipamentos quanto do projeto. A Figura 41 apresenta o reator inserido no Revit.

Figura 41– Reator inserido no Revit

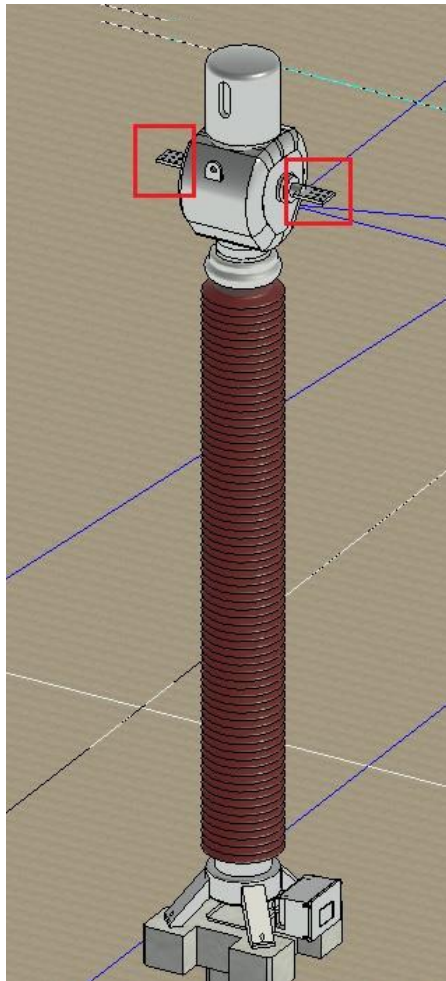


Fonte: Elaboração própria (2023).

3.3.2 Inserção dos Conectores

Os conectores precisam ser inseridos somente após os equipamentos serem locados, pois cada equipamento possui a sua conexão. Assim, torna-se necessário conhecer a altura e a posição específicas da conexão no equipamento para seguir de maneira adequada. Ilustrando isso com um exemplo, a Figura 42 mostra a conexão do transformador de corrente.

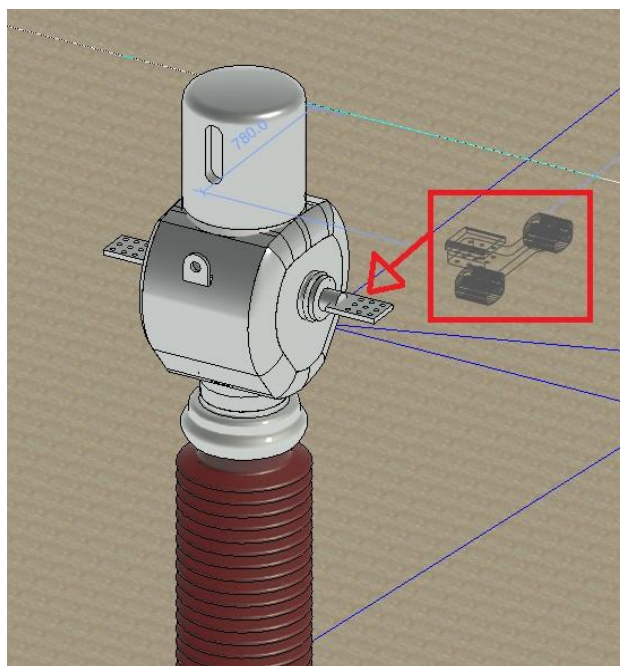
Figura 42– Conexão do Transformador de Corrente



Fonte: Elaboração própria (2023).

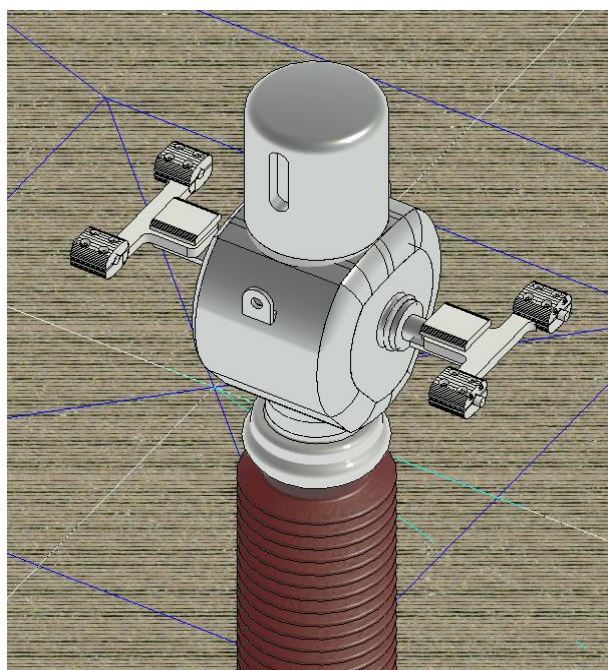
Diferente dos equipamentos, inserir os conectores no modelo 3D é mais simples, especialmente ao tomar como referência o ponto de conexão do equipamento onde o conector será posicionado. Sendo assim, é possível carregar a família do conector como mostra na figura 43 e escolher o ponto de conexão no modelo 3D, como apresentado na Figura 44.

Figura 43– Carregando o conector 9 NEMA



Fonte: Elaboração própria (2023).

Figura 44– Conector 9 NEMA inserido



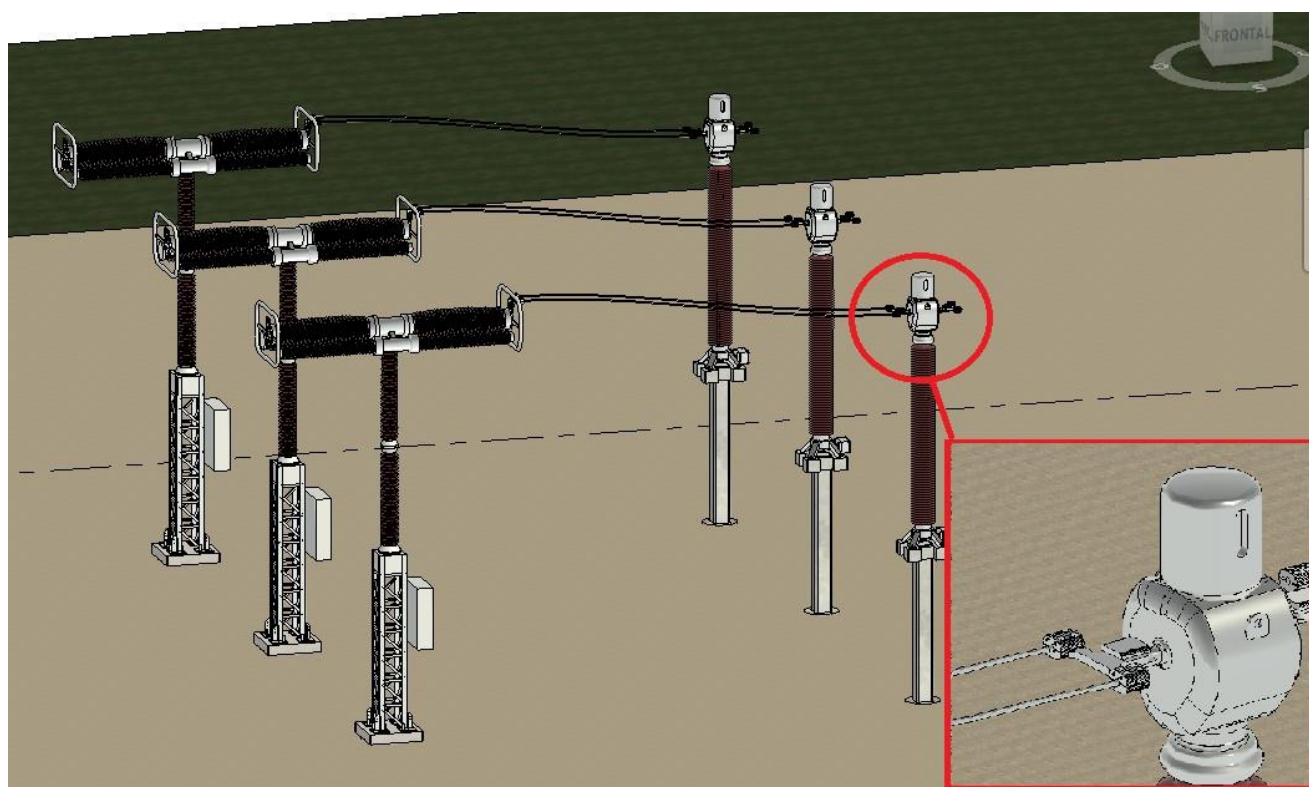
Fonte: Elaboração própria (2023).

3.4 Modelagem dos cabos

A modelagem dos cabos é uma das etapas finais a serem executadas, pois requer que todas as estruturas e equipamentos já estejam alocados em seus lugares determinados. Assim como os conectores, a modelagem dos cabos é realizada no modelo 3D, feita através da ferramenta “tubo flexível” e sendo inserida nos pontos de conexão dos conectores ou cadeia de isoladores conforme mostra a Figura 45.

Uma das vantagens de modelar os cabos no Revit é ter a noção de como os cabos ficaram dispostos no projeto, facilitando a detecção de conflitos com outros elementos do projeto, seja estruturais ou de sistemas.

Figura 45– Modelagem do cabo do disjuntor para o TC



Fonte: Elaboração própria (2023).

3.5 Realidade Virtual

O Revit oferece uma ferramenta que permite visualizar o projeto por meio de óculos de realidade virtual: a renderização. Esse processo é fundamental para dar ao modelo do projeto um aspecto o mais realista possível. Para utilizar essa ferramenta, primeiramente é necessário criar uma imagem usando o comando "câmera". Depois, na aba "Vista", seleciona-se a opção "renderizar". Há diversas maneiras de renderizar a imagem selecionada, mas, para fins de realidade virtual, a renderização deve ser no formato panorâmico estéreo.

Segundo Revit (2024), as renderizações podem ser armazenadas ou compartilhadas. As renderizações são criadas na nuvem e podem ser acessadas com a mesma conta do Revit em que foi criada a renderização através do Autodesk Rendering. A galeria na nuvem foi feita para aprimorar a qualidade e o resultado final das renderizações. As Figuras 46 e 47 são renderizações feitas no Revit de dois lugares diferentes do arranjo da subestação

Figura 46 – Renderização 1 360°



Fonte: Elaboração própria (2023).

Figura 47– Renderização 2 360° ¹



Fonte: Elaboração própria (2023).

A renderização pode ser compartilhada através do link gerado pelo Autodesk Rendering. Adicionalmente, para uma experiência mais imersiva usando óculos de realidade virtual, é possível visualizar a renderização em um celular através de um link URL ou QR code fornecido pelo software. Para aproveitar melhor essa visualização em realidade virtual, existem aplicativos específicos que podem ser baixados.

Um dos aplicativos que podem ser usados é o Unity Reflect. O Unity Reflect permite a transferência de modelos do Revit para experiências de realidade virtual. Ele permite visualizar os modelos do Revit em RV e acessar os modelos em qualquer

¹ As Figuras 46 e 47 representam uma renderização panorâmico estéreo. Esta técnica de renderização cria uma experiência imersiva em um ambiente de realidade virtual, permitindo a sensação de estar dentro da subestação, com a capacidade de olhar ao redor em todas as direções.

dispositivo. Além disso, é possível que várias pessoas tenham acesso simultâneo 3D em tempo real (UNITY, 2023).

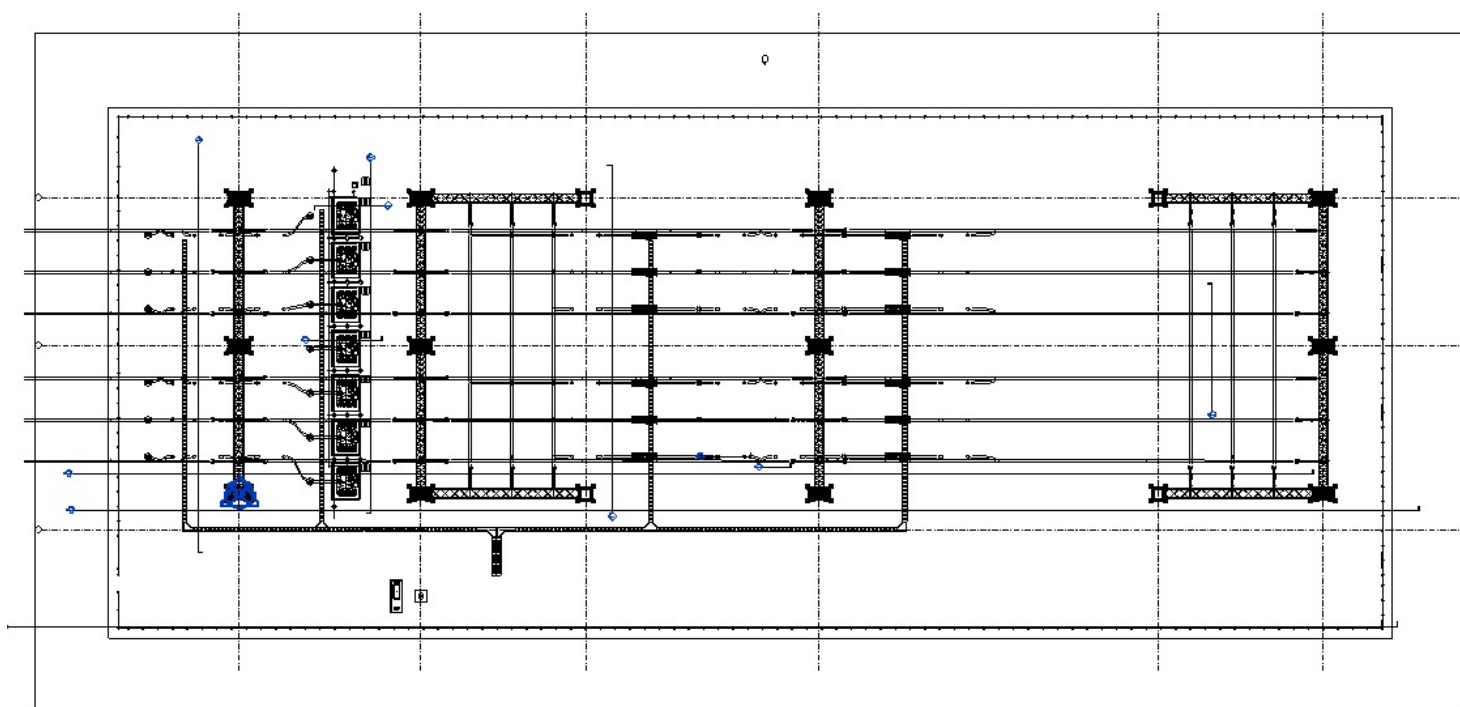
4 RESULTADOS

Este tópico tem como finalidade apresentar todos os resultados alcançados após a conclusão das modelagens e dos processos realizados no software Revit.

4.1 Resultado do Arranjo Eletromecânico

A seguir serão apresentados os resultados alcançados com o arranjo eletromecânico da subestação, sua planta e respectivos cortes. A Figura 48 mostra o arranjo eletromecânico obtido no Revit.

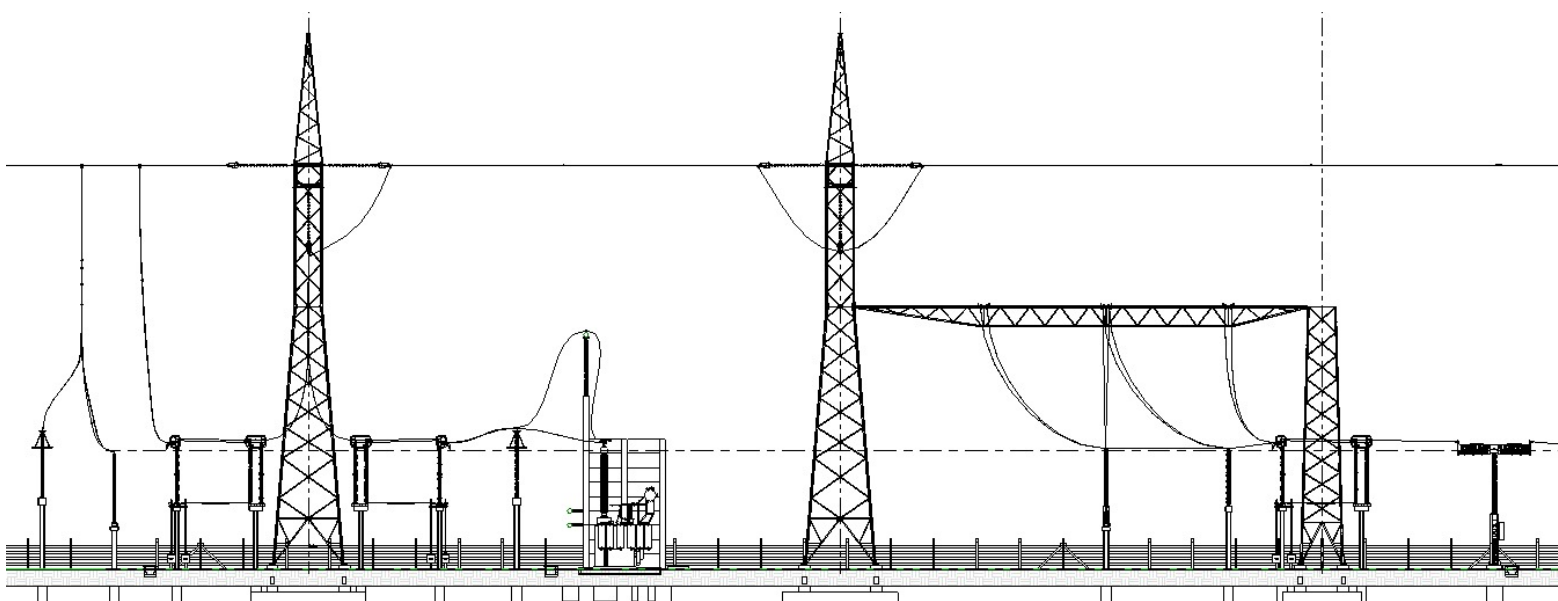
Figura 48– Arranjo Eletromecânico



Fonte: Elaboração própria (2023).

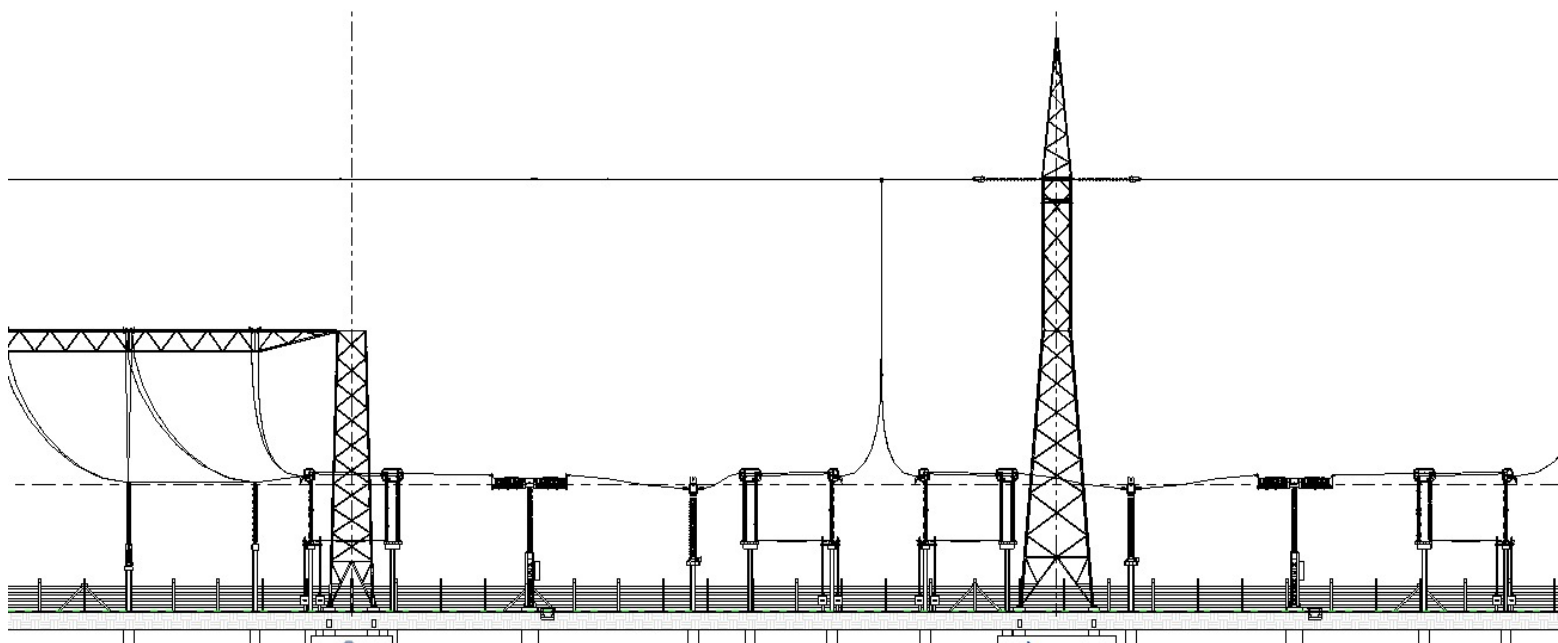
As Figuras 49 a 53 representam os cortes da subestação criados no Revit.

Figura 49 – Vista do Bay de Disjuntor e Meio – Parte 1



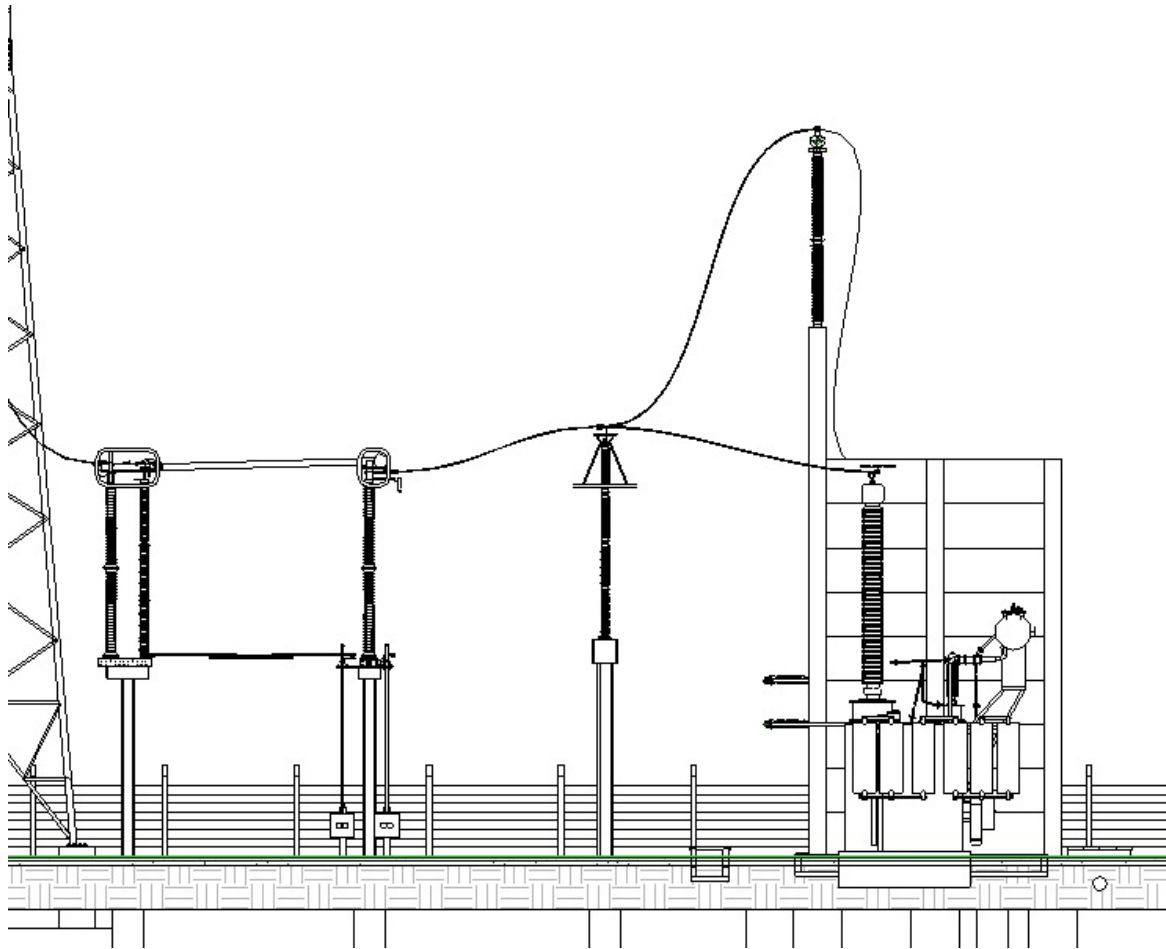
Fonte: Elaboração própria (2023).

Figura 50– Vista do Bay de Disjuntor e Meio – Parte 2



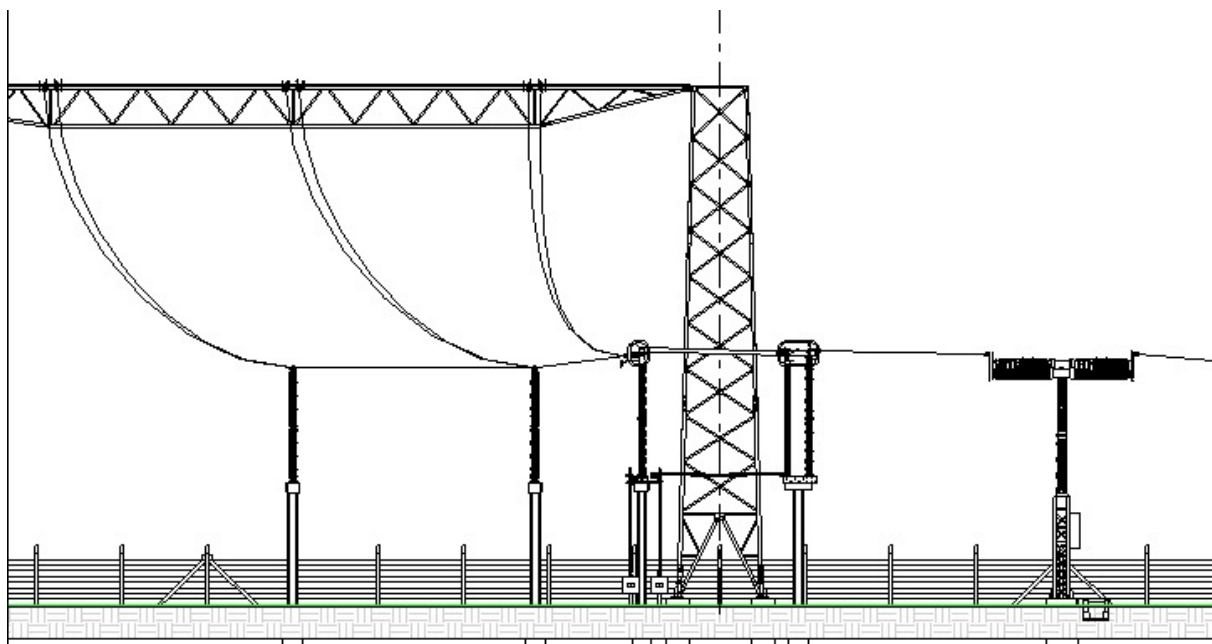
Fonte: Elaboração própria (2023).

Figura 51– Corte - Primário do Reator



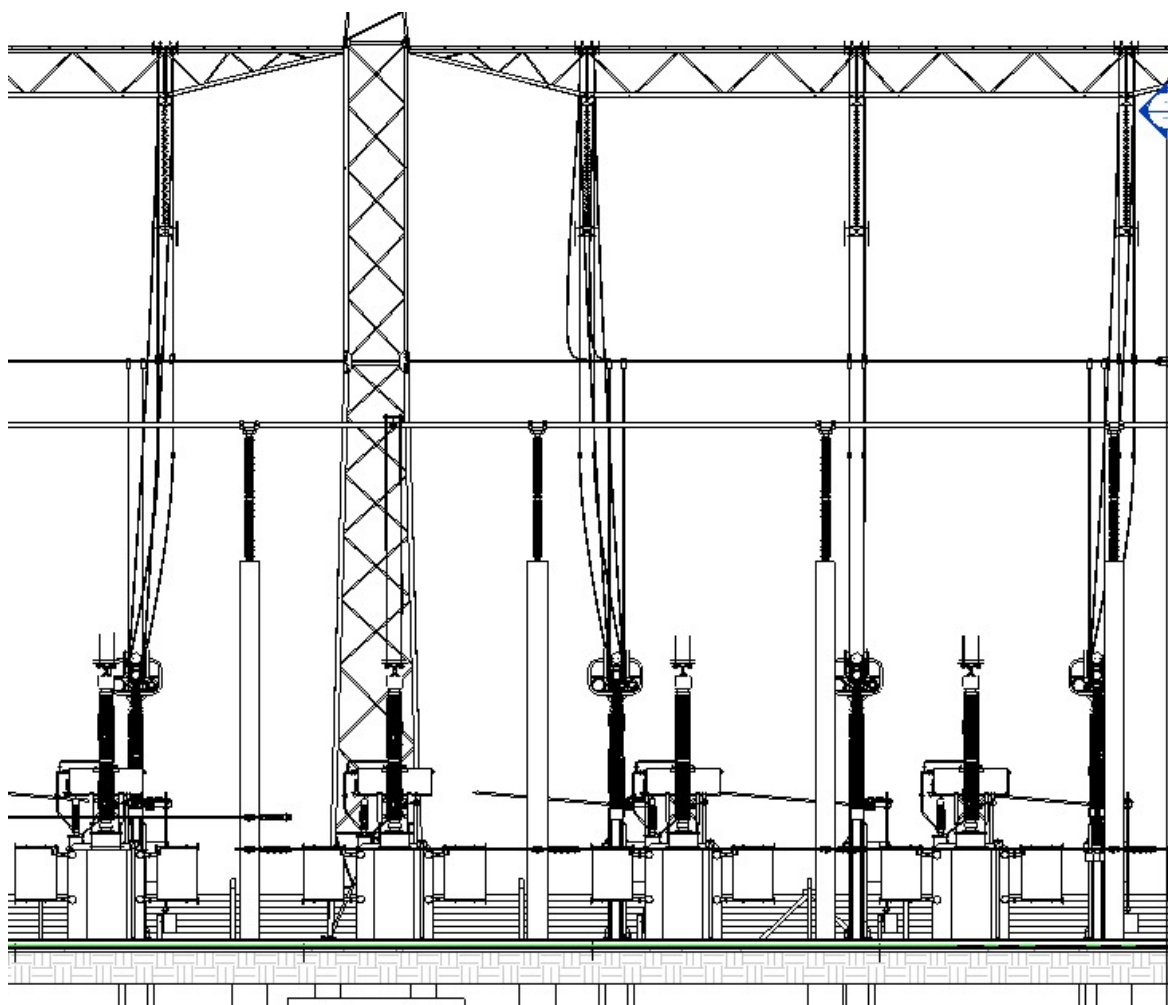
Fonte: Elaboração própria (2023).

Figura 52– Corte saída do barramento



Fonte: Elaboração própria (2023).

Figura 53– Corte Reatores



Fonte: Elaboração própria (2023).

4.2 Resultado da realidade virtual

A seguir são apresentados os resultados alcançados com realidade virtual aplicada na modelagem BIM da subestação. As Figuras 54 a 59 mostram as renderizações obtidas no Revit.

Figura 54– Renderização 1



Fonte: Elaboração própria (2023).

Figura 55– Renderização 2



Fonte: Elaboração própria (2023).

Figura 56– Renderização 3



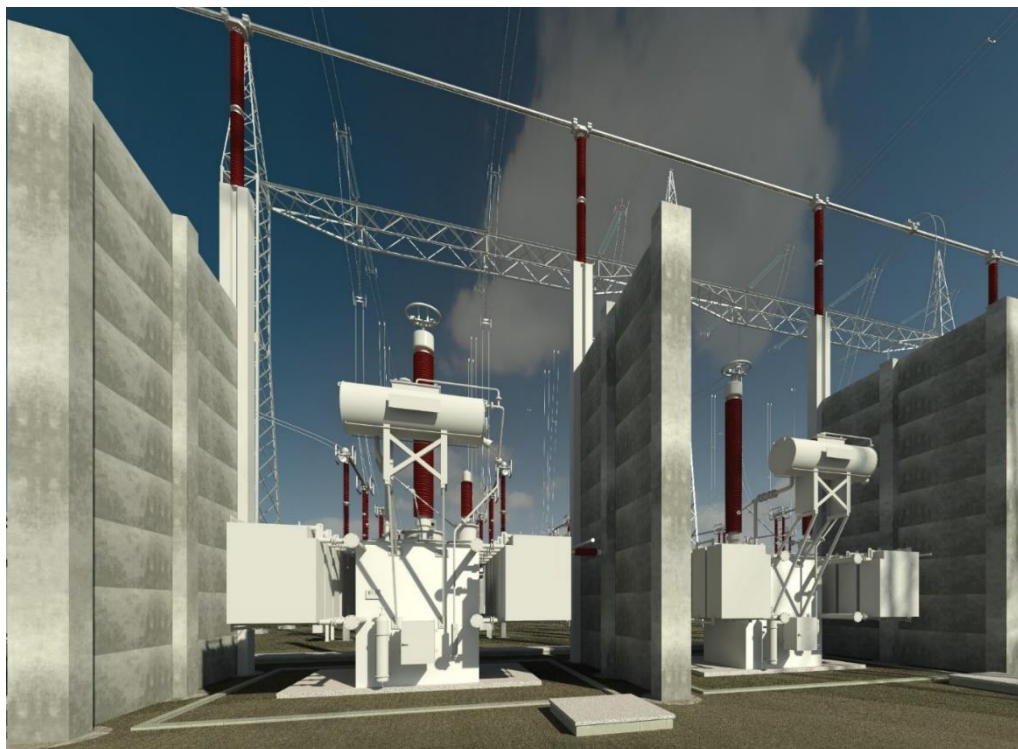
Fonte: Elaboração própria (2023).

Figura 57– Renderização 4



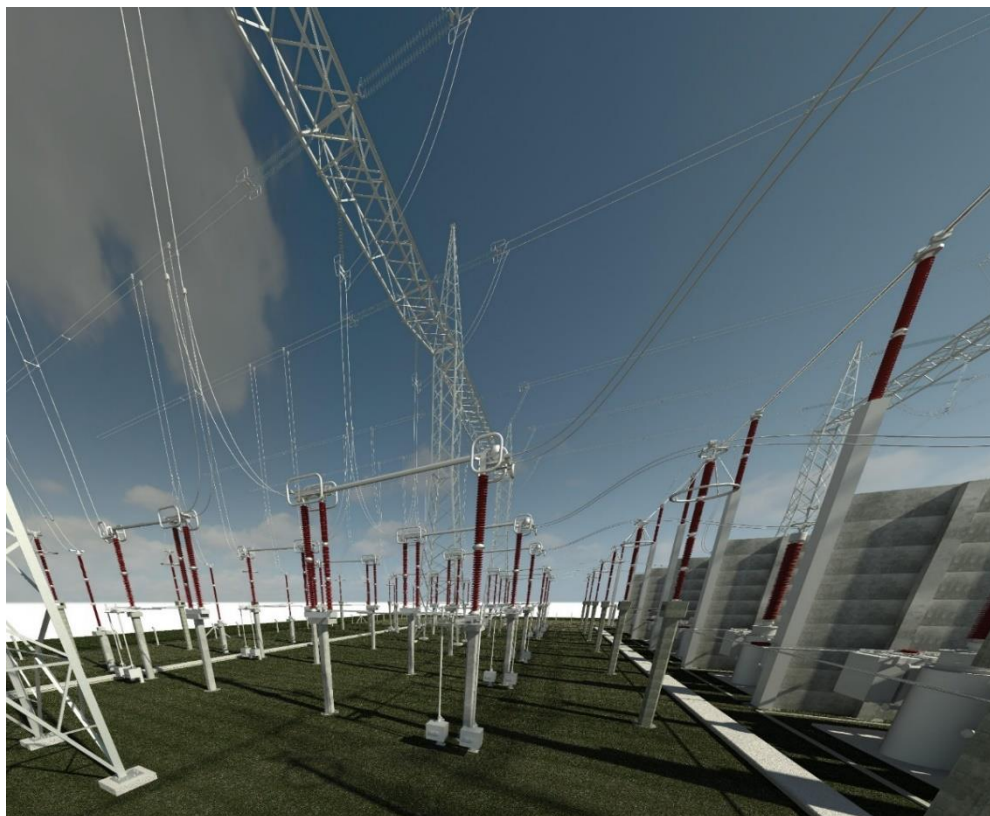
Fonte: Elaboração própria (2023).

Figura 58– Renderização 5



Fonte: Elaboração própria (2023).

Figura 59– Renderização 6



Fonte: Elaboração própria (2023).

4.3 Análise dos Resultados da implementação BIM

Foi possível perceber que as famílias desempenham um papel fundamental em um projeto no Revit, pois a maior parte das informações essenciais é armazenada nelas, permitindo que sejam modificadas ou criadas conforme necessário. Algumas famílias foram desenvolvidas com variações para se adaptarem a funções específicas.

As famílias são essenciais para um projeto e podem se mostrar desafiadoras. Cada família de equipamento possui suas particularidades e requer um sólido entendimento técnico. A principal limitação durante a modelagem foi a dificuldade de encontrar referências adequadas para a transição do desenho 2D para o modelo 3D, uma vez que os desenhos em 2D frequentemente careciam de informações detalhadas.

O maior desafio enfrentado na modelagem foi a criação dos detalhes dos equipamentos. Modelar os detalhes de um equipamento, como uma chave seccionadora, por exemplo, pode ser um processo demorado e complexo devido à intrincada natureza dos detalhes e à falta de vistas e cortes abrangentes do equipamento como um todo.

4.4 Análise sobre o Arranjo eletromecânico

A interação de diferentes disciplinas em um arranjo eletromecânico é constante. E a posição de cada equipamento, conector e interação desses elementos impactam na fase de construção do projeto. Durante a modelagem ficou evidente a importância da alocação correta de cada componente e utilizando o BIM foi possível testar várias soluções de locação e resolver os conflitos durante a fase de modelagem, evitando retrabalhos e custos adicionais durante a construção.

A etapa de inserção das famílias e modelagem dos cabos é essencial para uma representação funcional do projeto. Durante a modelagem de todo o arranjo, foi possível notar que a complexidade depende da preparação das famílias. A modelagem correta dos equipamentos e conectores é o alicerce de uma boa inserção e modelagem dos cabos.

Com os pontos de conexão já estabelecidos, a inserção dos conectores e cabos se torna uma tarefa mais fluida. Sendo assim, quando os elementos se alinham, a inserção dos equipamentos, conectores e cabos tornou a representação mais próxima da realidade.

Por fim, pode-se afirmar que a inserção e modelagem dos cabos foi uma das etapas mais gratificantes, uma vez que o arranjo vai tomando forma a cada elemento adicionado. A modelagem no BIM permitiu a compreensão entre os espaços entre os equipamentos e ao redor, suas locações e conexões.

5 COMENTÁRIOS FINAIS

Diversas vantagens foram observadas na aplicação da modelagem BIM e da realidade virtual no desenvolvimento do projeto da subestação de 500 kV. Alguns dos benefícios da modelagem BIM e aplicação da realidade virtual serão destacados. A transição do projeto legado para o projeto em BIM trouxe melhorias significativas, desde visualização a integração dos projetos. Abaixo estão listadas algumas das vantagens encontradas durante a modelagem:

- Visualização: a representação 3D é mais realista e permitiu uma melhor compreensão do tamanho e posicionamento dos equipamentos, conectores e cabos.
- Detecção de erros: Modelando em BIM foi possível identificar os conflitos entre componentes do arranjo e solucioná-los antes da fase de construção.
- Integração com tecnologias: com o modelo em BIM também foi possível integrar a realidade virtual no projeto, deixando a representação mais realista, com iluminação.
- Colaboração: o BIM permitiu que todas as equipes multidisciplinares pudessem trabalhar simultaneamente.
- Flexibilidade de Design: a modelagem BIM permitiu que se fizessem alterações rápidas e análise imediata dos impactos dessa alteração.
- Automatização de Tarefas: no Revit as famílias criadas contêm uma gama de informações detalhadas, com isso, foi possível automatizar as listas de materiais e equipamentos. Além disso, o Revit facilitou a criação de cortes e vistas, concluindo em apenas alguns minutos.

A realidade virtual permitiu uma compreensão de todos os elementos envolvidos no projeto e impactou positivamente em diversos aspectos. Alguns dos benefícios encontrados durante a representação em realidade virtual são descritos abaixo:

- Imersão total: a imersão profunda permitiu uma compreensão de espaço, proporções e representação dos equipamentos, conectores e demais elementos do projeto.
- Detecção de problemas: a visualização da realidade virtual auxiliou nas discussões e decisões, permitindo a identificação de possíveis problemas na concepção do projeto.
- Redução de custos: com os problemas identificados na fase de projeto, os custos significativos podem ser evitados.
- Formação e treinamento: observou-se que a realidade virtual oferece uma ferramenta valiosa para o treinamento de equipes. Ela permite que os membros da equipe se familiarizem com o ambiente antes mesmo da fase de construção. Além disso, do ponto de vista acadêmico, os estudantes têm a oportunidade de explorar subestações, emergindo completamente no ambiente virtual sem enfrentar quaisquer riscos associados.

Por fim, este trabalho abre caminho para uma série de trabalhos futuros. Uma sugestão é avaliar as variações nos parâmetros do projeto e também diferentes condições operacionais, para serem simuladas e visualizadas em um ambiente de realidade virtual. Essa abordagem permite otimizar o projeto e a manutenção da subestação, permitindo uma análise mais detalhada e interativa dos impactos das variáveis operacionais.

REFERÊNCIAS

ANEEL. Resolução Normativa nº 956, 7 de dezembro de 2021. PRODIST: Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – Anexo I: **Módulo 1**: Glossário de termos técnicos do PRODIST. Disponível em: https://www2.aneel.gov.br/cedoc/aren2021956_2.pdf. Acesso em: 5 abr 2023

ANEEL. Resolução Normativa nº 956, 7 de dezembro de 2021. PRODIST: Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – Anexo III: **Módulo 8**: Conexão ao Sistema de Distribuição de Energia Elétrica. Disponível em: https://www2.aneel.gov.br/cedoc/aren2021956_2_2.pdf. Acesso em: 5 abril 2023

APRENDER ELÉTRICA. **Subestações de Energia - Definições, Conceitos e Aplicações**. São Paulo: Aprender Elétrica, 2021.

ABNT. **NBR 7571 - SECCIONADORES: Características técnicas e dimensionais**. Rio de Janeiro, 2011.

ABNT. **NBR 8763 - CAPACITORES SÉRIE PARA SISTEMAS DE POTÊNCIA**. Rio de Janeiro, 1998.

ABNT. **NBR 14039 - INSTALAÇÕES ELÉTRICAS DE MÉDIA TENSÃO DE 1,0 KV A 36,2 KV**. Rio de Janeiro, 2021.

ABNT. **NBR IEC 62271-102: MANOBRA E COMANDO DE ALTA TENSÃO PARTE 102: Seccionadoras e seccionadoras de aterramento em corrente alternada**. Rio de Janeiro, 2022.

AUTODESK Revit 2024. **Sobre parâmetros**. Disponível em: <https://help.autodesk.com/view/RVT/2024/PTB/?guid=GUID-AEBA08ED-BDF1-4E59-825A-BF9E4A871CF5>. Acesso em: 12 set. 2023.

AUTODESK Revit 2024. **Parâmetros**. Disponível em: <https://help.autodesk.com/view/RVT/2024/PTB/?guid=GUID-D927E0DC-F720-4F7D-AACD-8B06787793CB>. Acesso em: 12 set. 2023.

AUTODESK Revit 2024. **Sobre as famílias**. Disponível em: <https://help.autodesk.com/view/RVT/2024/PTB/?guid=GUID-6DDC1D52-E847-4835-8F9A-466531E5FD29>. Acesso em: 12 set. 2023.

AUTODESK Revit 2024. **Criar uma revolução**. Disponível em: <https://help.autodesk.com/view/RVT/2024/PTB/?guid=GUID-791BBD4C-ABFA-40D7-9B4F-8C39F50164CE>. Acesso em: 12 set. 2023.

AUTODESK Revit 2024. **Criar uma extrusão**. Disponível em: <https://help.autodesk.com/view/RVT/2024/PTB/?guid=GUID-3643FF3B-5196-4F91-821F-A2D12999B2EF>. Acesso em: 12 set. 2023.

AUTODESK Revit 2024. **Galerias de renderização**. Disponível em: <https://help.autodesk.com/view/ARENDERING/PTB/?guid=GUID-5D915190-85F4-4076-B5D2-1DE4873DECB9>. Acesso em: 1 out. 2023.

AUTODESK Revit 2024. **Para trabalhar com panorâmicas em estéreo**. Disponível em: <https://help.autodesk.com/view/ARENDERING/PTB/?guid=GUID-04ABDDCA-4F5D-4EB7-B360-2A164C221A68>. Acesso em: 1 out. 2023.

AUTODESK Revit 2024. **Notas de versão do Autodesk Redering**. Disponível em: <https://help.autodesk.com/view/ARENDERING/PTB/?guid=GUID-9AB24E42-4D4D-4AA0-B166-296D10531A48>. Acesso em: 1 out. 2023.

BRASIL. **Decreto nº 10.306, de 2 de abril de 2020**. Estabelece a utilização do Building Information Modelling - BIM. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/decreto/D10306.htm. Acesso em: 28 set. 2023.

CARDOSO, *et al.* **Tecnologia para o Desenvolvimento de Sistemas de Realidade Virtual e Aumentada**. Pernambuco: UFPE, 2018.

CCEE. **Consumo brasileiro de energia elétrica subiu 1,5% em 2022, mostra balanço da CCEE**. Disponível em: <https://www.ccee.org.br/pt/web/guest/-/consumo-brasileiro-de-energia-eletrica-subiu-1-5-em-2022-mostra-balanco-da-ccee#:~:text=O%20consumo%20de%20energia%20el%C3%A9trica,pela%20pandemia%20de%20COVID%2D19>. Acesso em: 16 abr. 2023.

CCEE. **Balanço 2022**. Disponível em: https://www.ccee.org.br/o/ccee/documentos/CCEE_1068101. Acesso em: 6 abril. 2023.

CCEE. **Perguntas frequentes relativas à contratação de energia reserva**. Disponível em: https://www.ccee.org.br/ccee/documentos/CCEE_046437. Acesso em: 19 maio 2023.

COSTA, Paulo F. **CAPÍTULO V: Transformadores de aterramento parte I**. Belo Horizonte: Revista Setor Elétrico, 2014.

COSTA, Paulo F. **CAPÍTULO VI: Transformadores de aterramento parte II**. Belo Horizonte: Revista Setor Elétrico, 2014.

COSTA, *et al.* **Processo de projeto BIM**: Coletânea Guias BIM ABDI-MDIC. Brasília: SIG, 2017

CRAIG, Alan B. **Understanding Augmented Reality**. Waltham: ELSEVIER, 2013.

DUALIBE, Paulo. **Subestações: Tipos, Equipamentos e Proteção**. Rio de Janeiro: CEFET, 1999.

EASTMAN, Paul T. **BIM Handbook: A guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers, and contractors**. New Jersey: John Wiley & Sons, 2011.

EUA. American Institute of Architects. **E202: Building Information Modeling Protocol Exhibit**. 2020. Disponível em:
https://zdassets.aiacontracts.org/ctrzdweb02/zdpdfs/Preview_E202-2022.pdf?_gl=1*2c1he*_ga*NjgyNTkxMjE3LjE2NjQyNzY3Mzk.*_ga_E3VWY9JRK3*MTY2NDI3NjczOS4xLjEuMTY2NDI3NjgwNC42MC4wLjA. Acesso em: 13 set 2023.

FERREIRA, Rita C. Características da representação 2D e suas limitações na etapa de compatibilização espacial do projeto. São Paulo, nov. 2007. USP Portal de revistas. Disponível em :
<https://www.revistas.usp.br/gestaodeprojetos/article/view/50918/54998>. Acesso em: 10 set. 2023.

FERREIRA, Edgar H. Utilização de Simulação 4D para visualização e acompanhamento do avanço físico de projetos. **.Net**, Rio de Janeiro, ago. 2020. Revista Boletim do Gerenciamento. Disponível em:
<https://nppg.org.br/revistas/boletimdogerenciamento/article/view/487/351>. Acesso em: 20 set. 2023.

FROTIN, Sergio O. **EQUIPAMENTOS DE ALTA TENSÃO: Prospecção e Hierarquização de Inovações Tecnológicas**. Brasília: Goya Editora LTDA, 2013.

GRAZIANO, F. P. Compatibilização de projetos. Instituto de Pesquisas tecnológicas – IPT (Mestrado Profissionalizante), São Paulo, 2003.

GRILO, A.; Jardim-Goncalves, R. Value proposition on interoperability of BIM and col-laborative working environments, Automation and Construction. 19, 2010, p522–530, <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2009.11.003>.

Kirner, Claudio. **Fundamentos e tecnologias de realidade virtual e aumentada**. Belém: SBC, 2006.

KIRNER, Claudio. Evolução e Tendências da Realidade Virtual e da Realidade aumentada. **.Net**, Uberlândia, maio. 2011. XIII Symposium on Virtual and Augmented Reality. Disponível em: http://www.de.ufpb.br/~labteve/publi/2011_svrps.pdf. Acesso em: 27 set. 2023.

LAVALLE, Steven M. **Virtual Reality**. Cambridge: Cambridge University Press, 2020.

MAINARDI, Ivo. **Revit: Famílias paramétricas**. **.Net**, Uberlândia, 2011. Autodesk University 2011. Disponível em:
https://damassets.autodesk.net/content/dam/au/Brasil-2014/documents/materialapoio/2011/AUBR_23-Revit%20Familias%20parametricas.pdf. Acesso em: 28 set. 2023.

MAMEDE FILHO, João. **SUBESTAÇÕES DE ALTA TENSÃO**. Rio de Janeiro: LTC-Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda, 2021.

MAMEDE FILHO, João. **MANUAL DE EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS**. Rio de Janeiro: LTC-Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda, 2022.

MANZIONE, Leonardo. **Proposição de uma Estrutura Conceitual de Gestão do Processo de Projeto Colaborativo com o uso do BIM**. 343f. 2013. Tese de Doutorado (Doutor em Engenharia) – Escola da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3146/tde-08072014-124306/publico/TESE_LEONARDO_MANZIONE.pdf. Acesso em: 17 set. 2023.

NETTO, Claudia C. **Autodesk Revit Architecture 2015: Conceitos e Aplicações**. São Paulo: ÉRICA, 2015.

McDonald, John, D. **Electric Power Substations Engineering**. New York: CRC Press, 2012.

ONS. **Submódulo 2.10**: Requisitos técnicos mínimos para a conexão às instalações de transmissão. 3 out. 2022. Disponível em: https://apps08.ons.org.br/ONS.Sintegre.Proxy/ecmprsite/ecmfragmentsdocuments/Subm%C3%B3dulo%202.10-RQ_2022.10.pdf. Acesso em: 5 abr 2023

ONS. **Submódulo 2.6**: Requisitos mínimos para subestações e seus equipamentos. 10 ago. 2022. Disponível em: https://apps08.ons.org.br/ONS.Sintegre.Proxy/ecmprsite/ecmfragmentsdocuments/Subm%C3%B3dulo%202.6-RQ_2021.08.docx_261430f7-8a33-4963-a75b-26578bef0c0f.pdf. Acesso em: 9 set 2023

ONS. **Evolução da capacidade instalada no SIN – Abril 2023/dezembro 2027**. Disponível em: <https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-sistema-em-numeros>. Acesso em: 16 abr. 2023.

ROSENDO, et al. Plataforma Baseada em Realidade Virtual para Treinamento de Atividades em Linha Viva. **.Net**, Fortaleza, ago. 2011. VI Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica . Disponível em: <https://www.cgti.org.br/publicacoes/wp-content/uploads/2016/03/Plataforma-Baseada-em-Realidade-Virtual-para-Treinamento-de-Atividades-em-Linha-Viva.pdf>. Acesso em: 21 set. 2023.

Santos, Felipe. Desenvolvimento de um Simulador para o Treinamento de Operações para Profissionais do Setor Elétrico. **.Net**, Goiás, mar. 2013. EnAcomp. Disponível em: <https://www.enacomp.com.br/2013/anais/>: 17 set. 2023.

SENA, Thiago S. **A aplicação da metodologia BIM para a compatibilização de projetos**. 81f. 2012. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso Superior de Engenharia Civil) – Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2012. Disponível em:

<http://www.gpsustentavel.ufba.br/downloads/BIM%20Compatibiliza%C3%A7%C3%A3o.pdf>. Acesso em: 10 set. 2023

SILVA, Maria M. **As atividades de coordenação e a gestão do conhecimento nos projetos de edificações**. 216f. 2004. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-Graduação em Construção Civil) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2004. Disponível em:

<https://repositorio.ufscar.br/bitstream/handle/ufscar/4675/DissMVMFPS.pdf?sequencia=1&isAllowed=y>. Acesso em: 10 set. 2023

SILVA, *et al.* **Uso da Engine de Jogos Unity3D para Sistemas de Realidade Virtual Aplicado a Monitoramento e Controle de Subestações de Energia Elétrica.**

.Net, Uberlândia, out. 2013. ResearchGate. Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/273444930_Uso_da_Engine_de_Jogos_Unity3D_para_Sistemas_de_Realidade_Virtual_Aplicado_a_Monitoramento_e_Control_e_de_Subestacoes_de_Energia_Eletrica: 16 set. 2023.

TORI, Romero. **Introdução a Realidade Virtual e Aumentada**. São Paulo: SBC, 2004.

UNITY. **Unity Reflect para Autodesk revit**. Disponível

em: <https://unity.com/pt/pages/unity-reflect-revit>. Acesso em: 19 out. 2023.

Utilizando BIM. **Guia completo: BIM 10D construção industrializada**. Disponível em: <https://utilizandobim.com/blog/bim-10d-construcao-industrializada/>. Acesso em: 13 set. 2023.

ZONTA, *et al.* **Apostila Autodesk Revit**. Rio Grande do Sul: UFRGS, 2019.

APÊNDICES

ARRANJO GERAL

1 : 400

REV.	DATA	NATUREZA DA REVISÃO	ELAB.	VERS.	APROV.
1	18/09	APROVADO	RAF	J.C.	RAA

HISTÓRICO DE REVISÕES

ARAXÁ ENGENHARIA

SUBESTAÇÃO PILOTO BIM

PROJETO PILOTO

SUBESTAÇÃO PILOTO BIM 600KV

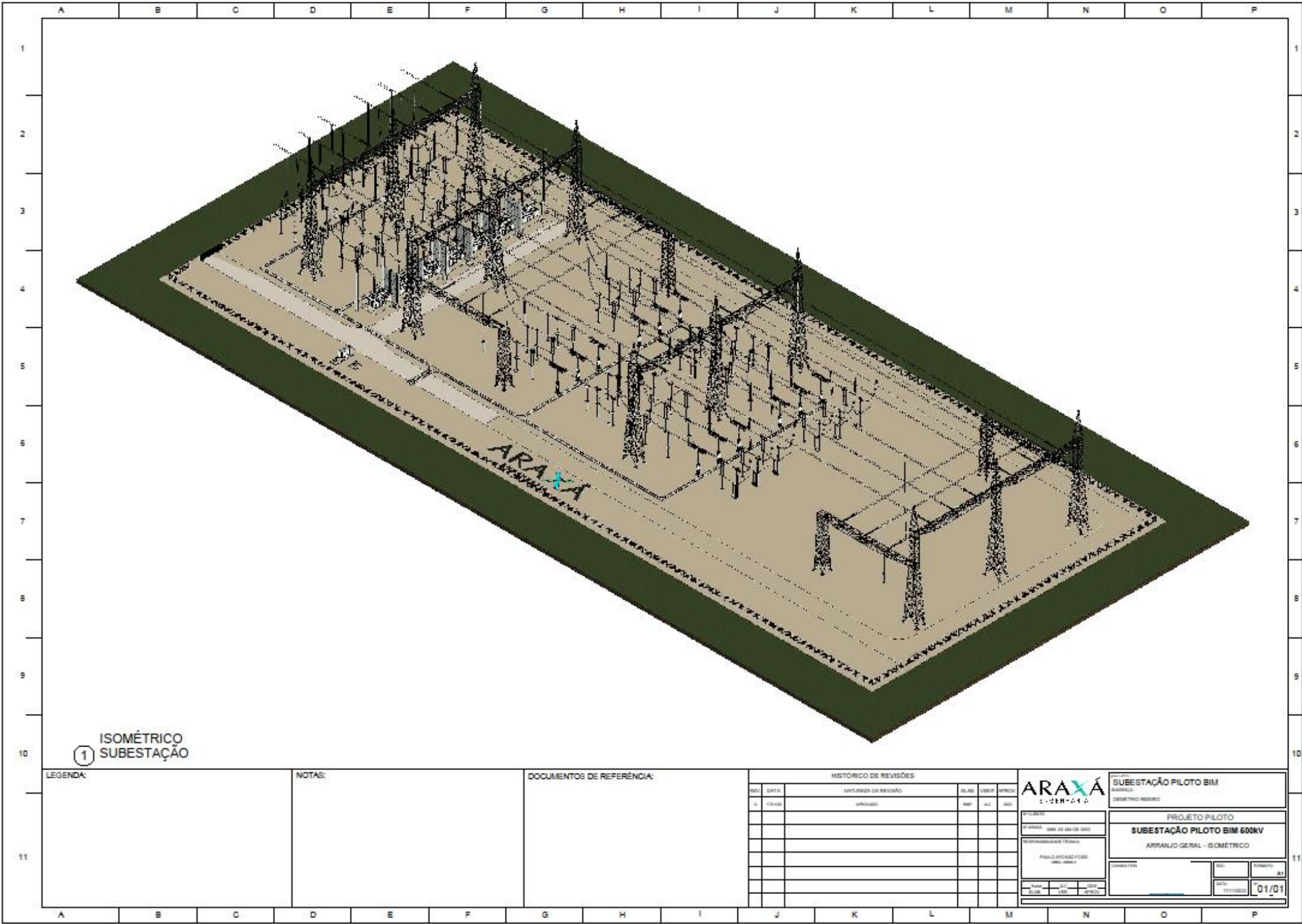
ARRANJO GERAL - PLANTA

LEGENDA:

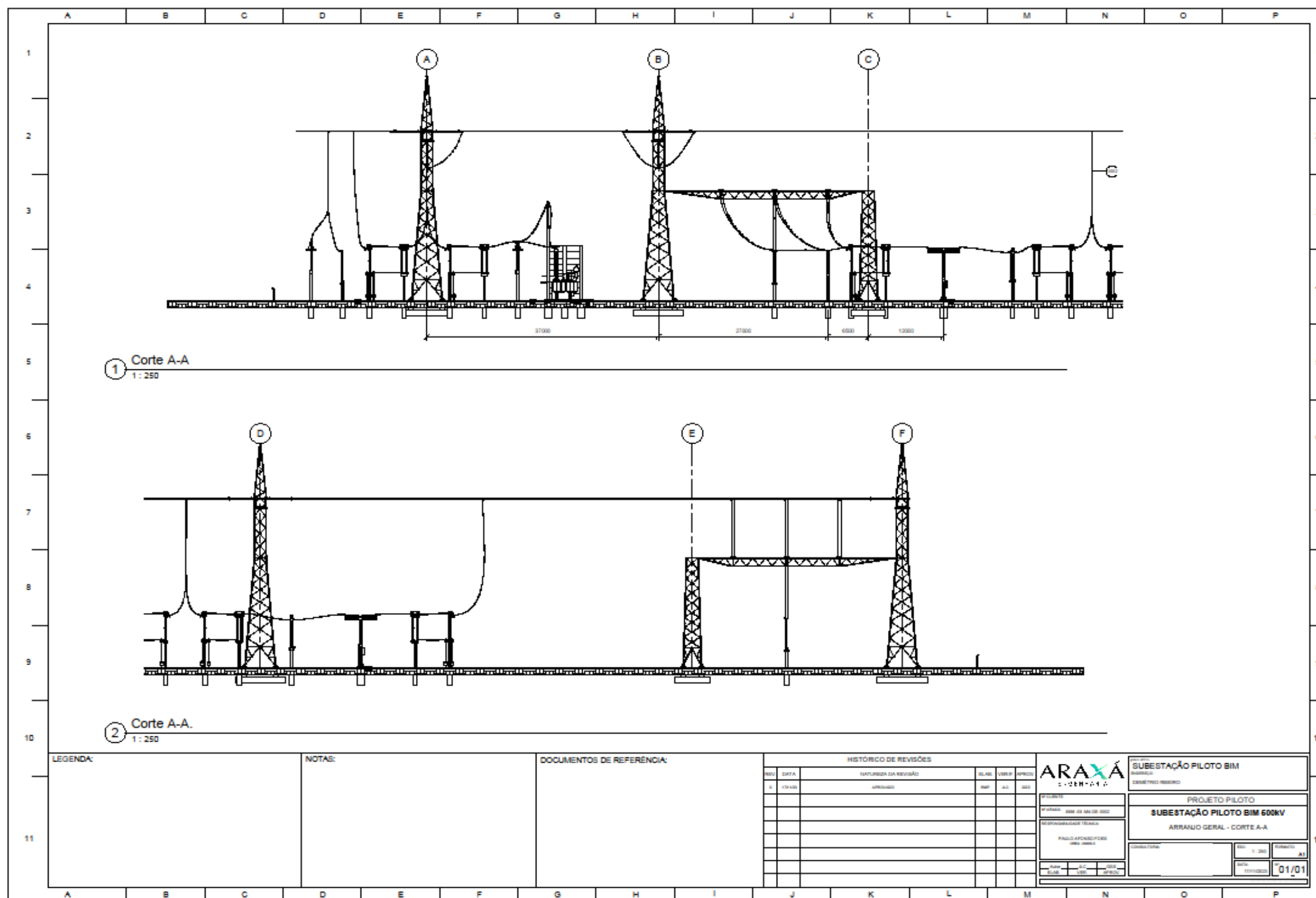
NOTAS:

DOCUMENTOS DE REFERÊNCIA:

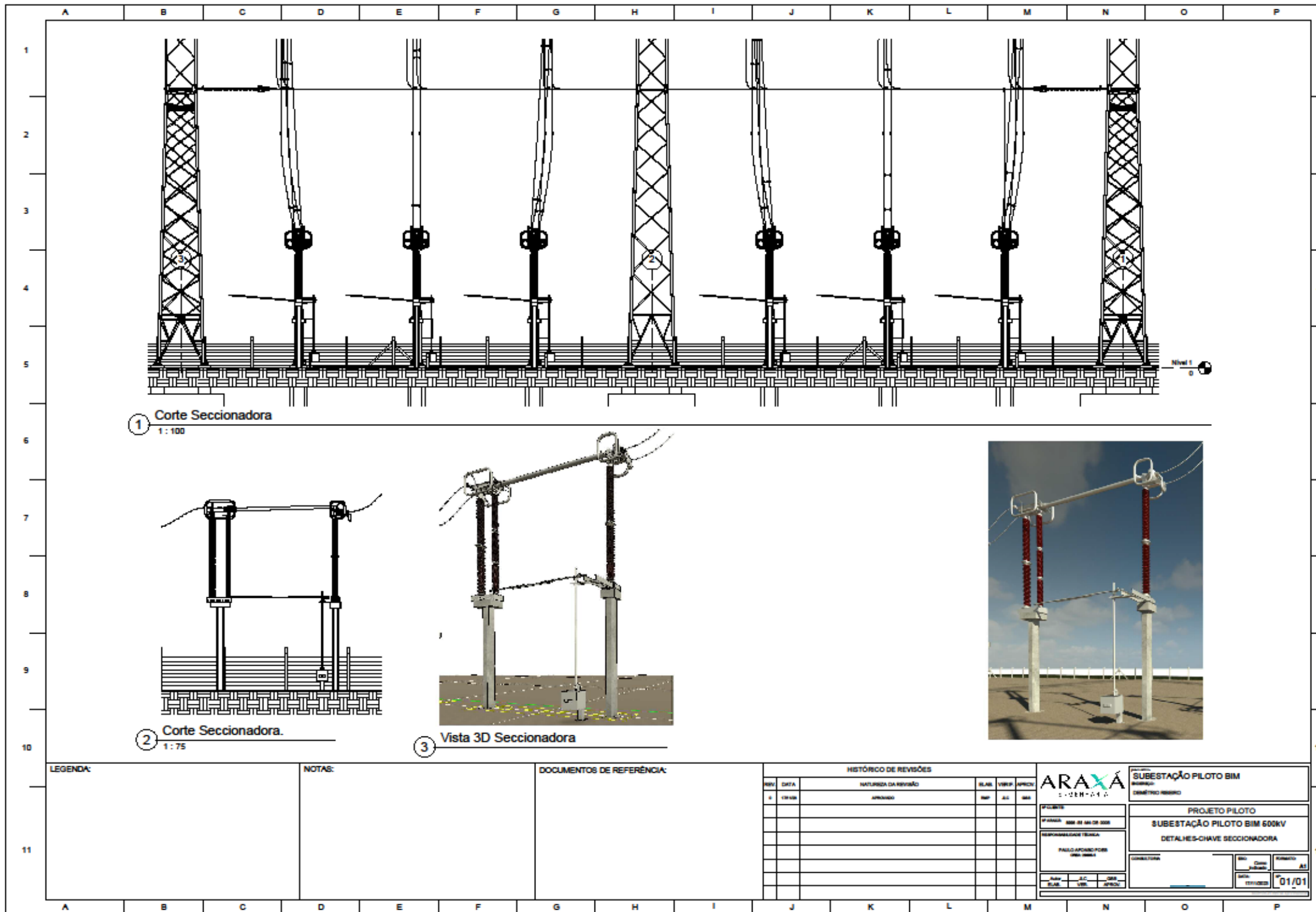
APÊNDICE B – ISOMÉTRICO – SUBESTAÇÃO



APÊNDICE C – CORTE - BAY DISJUNTOR E MEIO



APÊNDICE D – CHAVE SECCIONADORA – CORTE E DETALHES



APÊNDICE E – REATOR – CORTE E DETALHES

