

Universidade de Brasília - UnB  
Faculdade UnB Gama - FGA  
Engenharia de Energia

# Utilização da metodologia BIM para o projeto de subestações em média tensão

Autor: Bruno de Castro Silva  
Orientador: Dr. Alex Reis

Brasília, DF  
2023





Bruno de Castro Silva

## **Utilização da metodologia BIM para o projeto de subestações em média tensão**

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia de Energia da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia.

Universidade de Brasília - UnB

Faculdade UnB Gama - FGA

Orientador: Dr. Alex Reis

Brasília, DF

2023

---

Bruno de Castro Silva

Utilização da metodologia BIM para o projeto de subestações em média tensão/ Bruno de Castro Silva. – Brasília, DF, 2023-

94 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Dr. Alex Reis

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília - UnB  
Faculdade UnB Gama - FGA , 2023.

1. Palavra-chave01. 2. Palavra-chave02. I. Dr. Alex Reis. II. Universidade de Brasília. III. Faculdade UnB Gama. IV. Utilização da metodologia BIM para o projeto de subestações em média tensão

CDU 02:141:005.6

---

Bruno de Castro Silva

## **Utilização da metodologia BIM para o projeto de subestações em média tensão**

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia de Energia da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia.

Trabalho aprovado. Brasília, DF, 13 de março de 2024 – Data da aprovação do trabalho:

---

**Dr. Alex Reis**  
Orientador

---

**Dra. Loana Nunes Velasco**  
Convidado 1

---

**Dr. Augusto César de Oliveira Dias**  
Convidado 2

Brasília, DF  
2023



# Resumo

Este estudo aborda de maneira abrangente o projeto de subestações elétricas em média tensão utilizando a metodologia BIM (*Building Information Modeling*). Iniciando com uma introdução que destaca a importância crítica da eletricidade na sociedade contemporânea e a crescente demanda por eficiência energética, o trabalho justifica a adoção do BIM para otimizar o desenvolvimento de projetos complexos. O referencial teórico explora os fundamentos do BIM e as normas técnicas aplicáveis, além de detalhar a função e os requisitos das subestações elétricas. A metodologia apresentada descreve a abordagem detalhada para o desenvolvimento do projeto de referência, incluindo requisitos específicos de projeto e a modelagem detalhada dos componentes da subestação. Os resultados obtidos demonstram a eficácia do BIM na criação de modelos tridimensionais precisos e na simulação virtual da construção, refletindo uma abordagem modular e adaptável. Nas considerações finais, enfatiza-se o potencial transformador do BIM no setor elétrico, recomendando sua adoção contínua para melhorar eficiência, reduzir custos e promover resultados superiores em projetos futuros de infraestrutura elétrica.

**Palavras-chave:** Projeto elétrico; BIM; subestações.





# Abstract

This study comprehensively explores the design of medium-voltage electrical substations using Building Information Modeling (BIM). Beginning with an introduction that underscores the critical importance of electricity in contemporary society and the growing demand for energy efficiency, the research justifies the adoption of BIM to optimize the development of complex projects. The theoretical framework delves into BIM fundamentals, applicable technical standards, and details the function and requirements of electrical substations. The methodology outlines a detailed approach for developing the reference project, including specific design requirements and the detailed modeling of substation components. The results demonstrate the effectiveness of BIM in creating precise three-dimensional models and virtual simulations of construction, reflecting a modular and adaptable approach. In the concluding remarks, the transformative potential of BIM in the electrical sector is emphasized, recommending its continuous adoption to enhance efficiency, reduce costs, and achieve superior outcomes in future electrical infrastructure projects.

**Key-words:** Electrical project; BIM; substations.



# Lista de ilustrações

Figura 1 – Diagrama simplificado do sistema elétrico de potência . . . . .	30
Figura 2 – Subestação em alvenaria com ramal de entrada aéreo . . . . .	36
Figura 3 – Subestação com transformador com flanges superior e lateral . . . . .	37
Figura 4 – Subestação ao tempo de instalação no nível do solo . . . . .	38
Figura 5 – Espaçamentos para proteção parcial por colocação fora de alcance . . . . .	47
Figura 6 – Esquema de aterramento TNR . . . . .	49
Figura 7 – Esquema de aterramento TTN . . . . .	49
Figura 8 – Esquema de aterramento TTS . . . . .	50
Figura 9 – Esquema de aterramento ITR . . . . .	50
Figura 10 – Esquema de aterramento ITN . . . . .	50
Figura 11 – Esquema de aterramento ITS . . . . .	51
Figura 12 – Diagrama unifilar de referência . . . . .	62
Figura 13 – Arquivo modelo para criação de famílias . . . . .	70
Figura 14 – Utilização de planos de referência para criação de famílias . . . . .	71
Figura 15 – Restrição de formas em planos de referência . . . . .	72
Figura 16 – Caixa de propriedades de parâmetros . . . . .	72
Figura 17 – Caixa de propriedades da família . . . . .	73
Figura 18 – Opções de modelos do disjuntor de média tensão . . . . .	78
Figura 19 – Modelo de disjuntor de média tensão . . . . .	79
Figura 20 – Visão isométrica do modelo genérico da cabine . . . . .	80
Figura 21 – Vista isométrica da subestação . . . . .	82
Figura 22 – Vistas da cabine de entrada de energia . . . . .	83
Figura 23 – Vistas da cabine de medição em média tensão . . . . .	84
Figura 24 – Vistas da cabine de seccionamento . . . . .	85
Figura 25 – Vistas da cabine de proteção geral em média tensão . . . . .	86
Figura 26 – Vistas da cabine de transformação . . . . .	87
Figura 27 – Vistas da cabine de proteção geral em baixa tensão . . . . .	88
Figura 28 – Vista frontal da subestação referencial . . . . .	89
Figura 29 – Variante 1 da subestação referencial . . . . .	89
Figura 30 – Variante 2 da subestação referencial . . . . .	90



# Lista de tabelas

Tabela 1 – Níveis de tensão usuais do Brasil . . . . .	34
Tabela 2 – Espaçamentos para instalações internas . . . . .	48
Tabela 3 – Distâncias mínimas x tensão nominal da instalação . . . . .	48
Tabela 4 – $T_{máx}$ das superfícies externas dos equipamentos elétricos . . . . .	53
Tabela 5 – Dimensões mínimas do barramento quanto ao formato . . . . .	63
Tabela 6 – Famílias utilizadas no projeto da subestação . . . . .	77



# Lista de abreviaturas e siglas

3D	Tridimensional
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
AIS	<i>Air-Insulated Switchgear</i>
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BIM	<i>Building Information Modeling</i>
BWG	<i>Birmingham Wire Gauge</i>
CEB	Companhia Energética de Brasília
CIGRE	<i>International Council on Large Electric Systems</i>
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
EPR	Borracha etileno-propileno
GIS	<i>Gas-Insulated Switchgear</i>
HVAC	<i>Heating, Ventilating and Air Conditioning</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
MTS	<i>Mixed-Technology Switchgear</i>
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
NTD	Norma Técnica de Distribuição
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PE	Condutor de proteção
PEN	Condutor de proteção com função combinada de neutro
PGBT	Painel geral de baixa tensão
PVC	Policloreto de vinila

SE	Subestação
SEP	Sistema elétrico de potência
SF <sub>6</sub>	Hexafluoreto de enxofre
SIN	Sistema Interligado Nacional
TC	Transformador de corrente
TP	Transformador de potencial
Trafo	Transformador
VDE	<i>Verband der Elektrotechnik</i>
XLPE	Polietileno reticulado



# Lista de símbolos

°C	Grau Celsius
A	Ampère
h	Hora
Hz	Hertz
in	Polegada
kg	Quilograma
kV	Quilovolt
kVA	Quilovolt-ampère
kW	Quilowatt
L	Litro
m	Metro
mm	Milímetro
mm <sup>2</sup>	Milímetro quadrado
μm	Micrometro
R <sub>A</sub>	Resistência do eletrodo de aterramento das massas da instalação
R <sub>n</sub>	Resistência do eletrodo de aterramento do neutro
R <sub>P</sub>	Resistência do eletrodo de aterramento da subestação
R <sub>Pn</sub>	Resistência do eletrodo de aterramento comum à massa da subestação e do neutro
R <sub>PnA</sub>	Resistência do eletrodo de aterramento comum à massa da subestação, do neutro e das massas da instalação
V	Volt



# Sumário

<b>I</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>19</b>
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO GERAL</b> . . . . .	<b>21</b>
1.1	Objetivo Geral . . . . .	22
1.2	Objetivos Específicos . . . . .	22
1.3	Estrutura do Trabalho . . . . .	22
<b>II</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b>	<b>25</b>
<b>2</b>	<b>BUILDING INFORMATION MODELING (BIM)</b> . . . . .	<b>27</b>
2.1	Introdução . . . . .	27
2.2	Normas técnicas aplicáveis . . . . .	28
<b>3</b>	<b>SUBESTAÇÕES ELÉTRICAS</b> . . . . .	<b>29</b>
3.1	Introdução . . . . .	29
3.2	Normas técnicas aplicáveis . . . . .	31
3.3	Classificações . . . . .	32
3.3.1	Quanto à isolação . . . . .	32
3.3.2	Quanto ao nível de tensão . . . . .	34
3.3.3	Quanto à função no sistema elétrico . . . . .	35
3.3.4	Quanto à instalação em relação ao meio ambiente . . . . .	36
3.4	<b>Componentes e equipamentos</b> . . . . .	<b>39</b>
3.4.1	Componentes . . . . .	39
3.4.2	Equipamentos de manobra e comando . . . . .	40
3.4.3	Equipamentos de proteção . . . . .	41
3.4.4	Equipamentos de transformação . . . . .	42
3.5	<b>Requisitos de projeto</b> . . . . .	<b>44</b>
3.5.1	Especificações . . . . .	44
3.5.2	Proteções . . . . .	46
3.5.3	Generalidades da seleção e instalação dos componentes . . . . .	56
3.5.4	Documentação . . . . .	57
<b>III</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>59</b>
<b>4</b>	<b>REQUISITOS DE PROJETO</b> . . . . .	<b>61</b>
4.1	Considerações iniciais . . . . .	61

4.2	<b>Características construtivas</b>	<b>61</b>
4.3	<b>Especificações dos componentes e equipamentos</b>	<b>63</b>
4.3.1	Barramento	63
4.3.2	Bucha de passagem	64
4.3.3	Cabo de média tensão	64
4.3.4	Cabo de baixa tensão	64
4.3.5	Chave seccionadora	64
4.3.6	Disjuntor de média tensão	64
4.3.7	Disjuntor de baixa tensão	64
4.3.8	Haste de aterramento	64
4.3.9	Para-raio	65
4.3.10	Transformador de potência	65
4.4	<b>Instalação dos componentes e equipamentos</b>	<b>65</b>
5	<b>MODELAGEM</b>	<b>69</b>
5.1	<b>Criação de famílias</b>	<b>69</b>
5.2	<b>Posicionamento das famílias</b>	<b>74</b>
<b>IV</b>	<b>RESULTADOS E CONCLUSÃO</b>	<b>75</b>
6	<b>RESULTADOS</b>	<b>77</b>
6.1	<b>Modelagem dos componentes e equipamentos</b>	<b>77</b>
6.2	<b>Modelagem das cabines</b>	<b>79</b>
6.3	<b>Modelagem dos demais elementos</b>	<b>81</b>
6.4	<b>Construção da subestação</b>	<b>81</b>
6.5	<b>Cabine de entrada de energia</b>	<b>83</b>
6.6	<b>Cabine de medição em média tensão</b>	<b>84</b>
6.7	<b>Cabine de seccionamento</b>	<b>85</b>
6.8	<b>Cabine de proteção em média tensão</b>	<b>86</b>
6.9	<b>Cabine de transformação</b>	<b>87</b>
6.10	<b>Cabine de proteção em baixa tensão</b>	<b>88</b>
6.11	<b>Considerações finais</b>	<b>89</b>
7	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>91</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>93</b>

Parte I

Introdução



# 1 INTRODUÇÃO GERAL

É inquestionável que a eletricidade é uma das descobertas mais significativas da história da humanidade, uma vez que sua importância é tão abrangente que impacta praticamente todos os aspectos da vida humana. Essa relevância é ainda mais evidente na relação de dependência que existe entre o consumo de energia elétrica e o exercício das atividades humanas. Somado a isso, o crescimento populacional e o avanço tecnológico impulsionam uma demanda cada vez maior por energia, reforçando a necessidade de um fornecimento elétrico eficiente e confiável em todo o mundo.

Entretanto, assegurar esse fornecimento não é uma tarefa trivial e requer um complexo sistema elétrico de potência que envolve a geração, a transmissão e a distribuição da energia elétrica até o consumidor final. Nesse contexto, as subestações elétricas desempenham um papel crucial, pois são responsáveis por controlar e proteger o fluxo de energia ao longo dos trechos desse sistema. Elas permitem a adequação dos níveis de tensão para transmissão eficiente, além da realização de manobras e reconfigurações necessárias para garantir a continuidade do fornecimento elétrico, prevenindo sobrecargas e interrupções indesejadas. Assim, as subestações são fundamentais para assegurar a estabilidade e confiabilidade do fornecimento de energia elétrica.

Diante disso, as exigências por um sistema elétrico robusto se tornaram inevitáveis para garantir um fornecimento ininterrupto de energia. Isso ressalta não apenas a importância de garantir infraestruturas elétricas bem projetadas, mas também a necessidade de profissionais altamente qualificados na área. Especialistas que dominam as ferramentas mais modernas do mercado são essenciais para agilizar o desenvolvimento de projetos, melhorar a precisão e aumentar a eficiência e a segurança, sem comprometer a conformidade com as normas técnicas e com os requisitos operacionais específicos.

Nos últimos anos, o desenvolvimento de projetos de engenharia passou por modernizações significativas, impulsionadas pela implementação de novas metodologias que visam aprimorar e otimizar os trabalhos realizados. Entre essas metodologias, o *Building Information Modeling* (BIM) se destaca para projetos elétricos de baixa e média tensão, incluindo projetos de subestações, pois é uma ferramenta que permite a integração de informações e a colaboração de diferentes disciplinas de engenharia e arquitetura por meio de modelos tridimensionais detalhados. Com isso, o BIM não só melhora a visualização da infraestrutura do projeto, mas também permite análises detalhadas para identificar e resolver potenciais conflitos antes da fase de construção. Isso otimiza o processo como um todo, reduzindo prazos e custos, além de elevar a qualidade geral do projeto por meio de informações mais precisas e detalhadas.

Assim, a aplicação da metodologia BIM no projeto de infraestruturas elétricas é uma potencial ferramenta transformadora para o setor elétrico. Ao integrar informações detalhadas e facilitar a colaboração eficiente entre diversas disciplinas, o BIM contribui significativamente para a eficiência, sustentabilidade e segurança das infraestruturas. Portanto, este trabalho busca destacar as vantagens, os desafios e a contribuição dessa tecnologia para a inovação no setor elétrico, com foco específico nas subestações.

## 1.1 Objetivo Geral

O escopo principal deste trabalho consiste no desenvolvimento de um projeto de referência de uma subestação abrigada em invólucro metálico de classe de tensão 15 kV com respeito às premissas da metodologia BIM.

## 1.2 Objetivos Específicos

- Compreender os fundamentos da metodologia BIM;
- Compreender os fundamentos e a composição das subestações de média tensão;
- Compreender as exigências mínimas a que devem obedecer as instalações elétricas de média tensão, conforme ABNT NBR 14039:2021;
- Compreender as exigências mínimas a que devem obedecer as subestações de média tensão, conforme a norma técnica da concessionária local;
- Aplicar as diretrizes das normas no desenvolvimento do projeto de referência da subestação de média tensão;
- Desenvolver um projeto referencial customizável que facilite a sua adaptação para atender diversas configurações.

## 1.3 Estrutura do Trabalho

Este trabalho está organizado em quatro partes principais que visam explorar de maneira abrangente o projeto de subestações elétricas utilizando as premissas da metodologia BIM. Na Parte I, Introdução, o capítulo inicial justifica a relevância do tema abordado e delinea os objetivos principais desta pesquisa. O objetivo geral é investigar e desenvolver um projeto de subestação elétrica aplicando os princípios do BIM, enquanto os objetivos específicos detalham as metas individuais que norteiam o estudo.

A Parte II, Referencial Teórico, compreende dois capítulos. O primeiro capítulo descreve os fundamentos do BIM, além de explorar as normas técnicas relevantes para sua



implementação. O segundo capítulo desta parte é dedicado às subestações elétricas, iniciando com uma contextualização sobre sua importância no sistema elétrico, seguida pela análise das normas técnicas que regulam seu projeto e construção. São abordadas também as diferentes classificações das subestações conforme suas características específicas, além dos principais componentes, equipamentos e requisitos de projeto que as envolvem.

A Parte III, Metodologia, descreve a abordagem metodológica adotada para o desenvolvimento do projeto de referência. Ela é composta por dois capítulos. O primeiro deles, Requisitos de Projeto, inicia com considerações iniciais importantes seguidas pela descrição das características construtivas que influenciam na elaboração da subestação. São detalhadas também as especificações técnicas dos principais componentes e equipamentos elétricos, bem como os procedimentos e considerações para a instalação correta desses componentes. O segundo capítulo, Modelagem, explora o processo de criação e adaptação de famílias BIM específicas para os componentes da subestação, além dos métodos e estratégias para o posicionamento correto dessas famílias no modelo.

Finalmente, a Parte IV, Resultados e Conclusão, apresenta os resultados obtidos da modelagem do projeto e as conclusões gerais do trabalho. O capítulo de Resultados detalha o processo de modelagem em BIM dos componentes e equipamentos da subestação, assim como a construção efetiva da mesma e a modelagem das diferentes cabines que a compõem. O capítulo de Conclusão reúne as considerações finais sobre os resultados alcançados, destacando suas contribuições para o campo de estudo e sugerindo possíveis direções para futuras pesquisas na área.



## Parte II

### Referencial teórico



## 2 Building Information Modeling (BIM)

Este capítulo tem o objetivo de descrever os fundamentos da metodologia BIM.

### 2.1 Introdução

A Modelagem da Informação da Construção, BIM (*Building Information Modeling*), é uma abordagem revolucionária que transformou a maneira como projetos de construção são concebidos, executados e gerenciados. Em contraste com métodos tradicionais baseados em desenhos bidimensionais, o BIM utiliza modelos digitais tridimensionais para integrar todas as informações relacionadas a um projeto de construção.

No centro do BIM está o conceito de “modelo de informação”, que não se limita apenas à representação gráfica, mas simula todos os elementos físicos e funcionais do projeto. Esse modelo permite que arquitetos e engenheiros trabalhem de maneira integrada. A interoperabilidade entre diferentes disciplinas (arquitetura, estrutura, elétrica, HVAC etc.) é fundamental no BIM, pois todos compartilham um ambiente de trabalho comum, evitando conflitos e melhorando a coordenação durante todas as fases do projeto.

A colaboração facilitada pelo BIM reduz significativamente erros e retrabalhos. Os profissionais podem visualizar e analisar o projeto de forma conjunta, identificando conflitos antes mesmo do início da construção. Isso não só economiza tempo e recursos, mas também melhora a precisão e a eficiência do projeto como um todo.

Além da coordenação aprimorada, o BIM possibilita análises avançadas e simulações detalhadas. Os modelos BIM permitem simular o desempenho estrutural, energético e ambiental do edifício, auxiliando na tomada de decisões desde a fase inicial do projeto até a operação pós-construção. Isso inclui avaliações de eficiência energética, conforto térmico, acústico e outras variáveis críticas que impactam o desempenho, a sustentabilidade e a operação eficiente do edifício ao longo de sua vida útil.

Além de melhorar a eficiência do projeto, o BIM também facilita a gestão da construção. A capacidade de extrair automaticamente informações como quantidades de materiais, cronogramas e custos a partir do modelo BIM melhora a precisão das estimativas e simplifica a gestão de recursos durante o ciclo de vida do projeto.

A aplicação bem-sucedida do BIM requer não apenas investimentos em tecnologia avançada, mas também um entendimento profundo das necessidades específicas de cada projeto e uma habilidade significativa na interpretação dos dados gerados. A capacidade de colaboração entre diferentes disciplinas é essencial para maximizar os benefícios do BIM e integrar efetivamente todas as informações relevantes em um único modelo digital.

## 2.2 Normas técnicas aplicáveis

A seguir, serão listadas algumas normas brasileiras em vigor durante o período de elaboração deste trabalho e que pertencem ao escopo de BIM.

1. ABNT NBR 15965-1:2011 - Sistema de classificação da informação da construção - Parte 1: Terminologia e estrutura
2. ABNT NBR 15965-2:2012 - Sistema de classificação da informação da construção - Parte 2: Características dos objetos da construção
3. ABNT NBR 15965-3:2014 - Sistema de classificação da informação da construção - Parte 3: Processos da construção
4. ABNT NBR 15965-4:2021 - Sistema de classificação da informação da construção - Parte 4: Recursos da construção
5. ABNT NBR 15965-5:2022 - Sistema de classificação da informação da construção - Parte 5: Resultados da construção
6. ABNT NBR 15965-6:2022 - Sistema de classificação da informação da construção - Parte 6: Unidades e espaços da construção
7. ABNT NBR 15965-7:2015 - Sistema de classificação da informação da construção - Parte 7: Informação da construção
8. ABNT NBR ISO 12006-2:2018 - Construção de edificação - Organização de informação da construção - Parte 2: Estrutura para classificação
9. ABNT NBR ISO 19650-1:2022 - Organização da informação acerca de trabalhos da construção - Gestão da informação usando a modelagem da informação da construção - Parte 1: Conceitos e princípios
10. ABNT NBR ISO 19650-2:2022 - Organização da informação acerca de trabalhos da construção - Gestão da informação usando a modelagem da informação da construção - Parte 2: Fase de entrega de ativos

## 3 SUBESTAÇÕES ELÉTRICAS

Este capítulo tem o objetivo de descrever sucintamente os fundamentos das subestações elétricas, com foco em seus conceitos básicos, suas classificações, os elementos que as compõem e as diretrizes para seus projetos.

### 3.1 Introdução

A [ABNT \(1992, p. 49\)](#)<sup>1</sup> define subestação como

parte de um sistema de potência, concentrada em um dado local, compreendendo primordialmente as extremidades de linhas de transmissão e/ou de distribuição, com os respectivos dispositivos de manobra, controle e proteção, incluindo as obras civis e estruturas de montagem, podendo incluir também transformadores, equipamentos conversores e/ou outros equipamentos.

Essa definição, embora descreva genericamente aspectos de localização e constituição das subestações no contexto de sistema elétrico de potência, não é suficiente para se ter uma boa compreensão sobre o que é e para que serve uma subestação. Devido à necessidade de sua abrangência, algumas características fundamentais, como a importância e a função das subestações, são difíceis de identificar até mesmo em suas entrelinhas. Portanto, para se ter um bom entendimento, é necessário analisar essa definição em partes e em paralelo com outros conceitos.

Ao definir que subestação é parte de um sistema elétrico de potência, o primeiro passo é saber o que é um sistema elétrico de potência. A [ABNT \(1992, p. 44\)](#) o define em sentido amplo e sentido restrito. Em sentido amplo, é o conjunto de todas as instalações e equipamentos destinados à geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. Já em sentido restrito, é um conjunto definido de linhas e subestações que assegura a transmissão e/ou a distribuição de energia elétrica, cujos limites são definidos por meio de critérios apropriados, tais como localização geográfica, concessionário, tensão etc.

A definição de SEP em sentido restrito fornece o principal objetivo das subestações, que é assegurar o fornecimento de energia elétrica para o consumidor. Além disso, a definição em sentido amplo menciona os três principais trechos que compõem o SEP, enquanto a definição em sentido restrito sugere que cada trecho possui parâmetros que

---

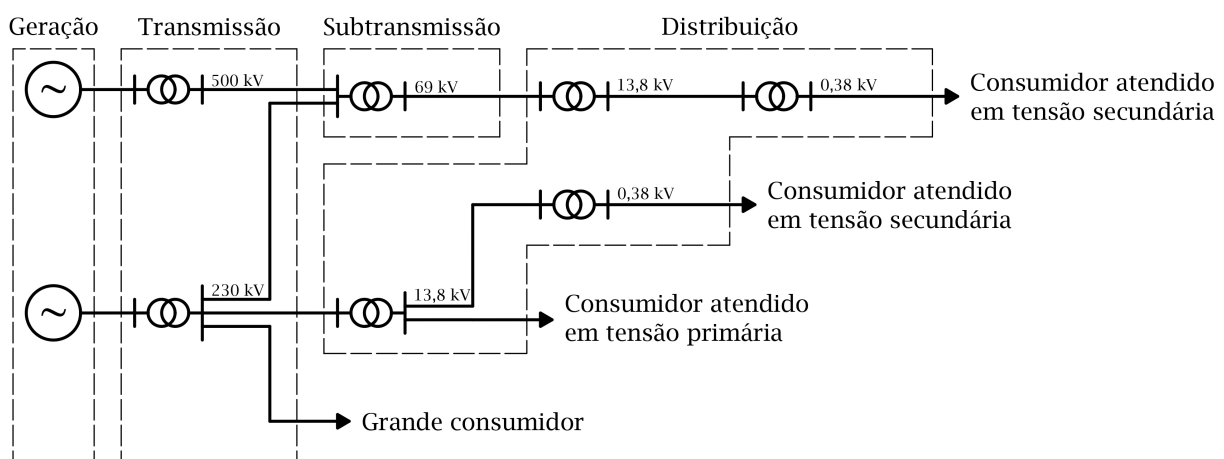
<sup>1</sup> A NBR 5460 define termos relacionados a sistemas elétricos de potência e é baseada na norma internacional IEC 60050. Todas as terminologias do Vocabulário Eletrotécnico Internacional da IEC estão disponíveis em <<https://www.electropedia.org/>>.

os diferenciam entre si, permitindo que cada um seja analisado individualmente, ou seja, sistema de geração, sistema de transmissão e sistema de distribuição.

De cada trecho, temos que a geração é a parte do SEP que ocorre a conversão de uma forma qualquer de energia em energia elétrica (ABNT, 1992, p. 23). A transmissão é o transporte da energia elétrica caracterizado pelo valor nominal de tensão nos seguintes casos: entre a subestação elevadora de uma usina elétrica e a subestação abaixadora em que se inicia a subtransmissão, ou que alimenta um sistema de distribuição, ou que fornece energia elétrica a um grande consumidor; ou entre as subestações que fazem a interligação dos sistemas elétricos de dois concessionários, ou áreas diferentes do sistema de um mesmo concessionário (ABNT, 1992, p. 55). Já a distribuição é a transferência de energia elétrica para os consumidores, a partir dos pontos onde se considera terminada a transmissão (ou subtransmissão), até a medição da energia, inclusive (ABNT, 1992, p. 16). Por fim, a subtransmissão, termo inserido nas definições anteriores, é a transmissão de energia elétrica entre uma subestação abaixadora de um sistema de transmissão e uma ou mais subestações de distribuição (ABNT, 1992, p. 51).

Diante dos conceitos acima, fica claro onde as subestações estão localizadas e o quanto são importantes no SEP. Assim como afirma CIGRE (2019, p. 2), elas atuam como “nós” entre as linhas do sistema, interligando-as e/ou ramificando-as, como mostra a figura 1. Além disso, o nível de tensão é o principal parâmetro que define os sistemas de transmissão, subtransmissão e distribuição, sendo as SEs as responsáveis por seu controle através dos transformadores de potência. Porém, é importante ressaltar que esses equipamentos não são obrigatórios nas SEs, como sua própria definição indica, o que implica que a elevação ou a redução dos níveis de tensão não é necessariamente a sua principal função, mas monitorar, manobrar e proteger as linhas e seus parâmetros para assegurar o transporte adequado da energia elétrica dos centros de geração até o consumidor final.

Figura 1 – Diagrama simplificado do sistema elétrico de potência





## 3.2 Normas técnicas aplicáveis

Nesta seção, serão listadas as principais normas brasileiras em vigor durante o período de elaboração deste trabalho pertencentes ao escopo de projetos de subestações elétricas em média tensão. Vale ressaltar que a maioria delas não serão referidas ao longo do texto, fazendo desta uma seção informativa e não bibliográfica. No entanto, a leitura completa dessas normas é indispensável para qualquer engenheiro que atue ou queira atuar na área de projetos elétricos.

1. ABNT NBR 5410:2004 - Instalações elétricas de baixa tensão
2. ABNT NBR 5419-1:2015 - Proteção contra descargas atmosféricas - Parte 1: Princípios gerais
3. ABNT NBR 5419-2:2015 - Proteção contra descargas atmosféricas - Parte 2: Gerenciamento de risco
4. ABNT NBR 5419-3:2015 - Proteção contra descargas atmosféricas - Parte 3: Danos físicos a estruturas e perigos à vida
5. ABNT NBR 5419-4:2015 - Proteção contra descargas atmosféricas - Parte 4: Sistemas elétricos e eletrônicos internos na estrutura
6. ABNT NBR 11301:1990 - Cálculo da capacidade de condução de corrente de cabos isolados em regime permanente (fator de carga 100%)
7. ABNT NBR 13231:2015 - Proteção contra incêndio em subestações elétricas
8. ABNT NBR 14039:2021 - Instalações elétricas de média tensão de 1,0 kV a 36,2 kV
9. ABNT NBR 15751:2013 - Sistemas de aterramento de subestações - Requisitos
10. NR 10:2019 - Instalações e serviços em eletricidade
11. NR 23:2022 - Proteção contra incêndios
12. NR 26:2022 - Sinalização de segurança
13. NR 33:2022 - Segurança e saúde nos trabalhos em espaços confinados

Além dessas, é importante destacar a existência de várias outras normas técnicas específicas para cada um dos componentes e equipamentos utilizados em uma subestação. Essas normas definem os requisitos técnicos mínimos que os fabricantes devem seguir na produção de seus produtos. Portanto, também é importante ter conhecimento dessas normas para que, na seleção e compra dos materiais, o engenheiro possa verificar a referência normativa do produto e garantir que ele atenda às especificações mínimas exigidas.

## 3.3 Classificações

Dadas as diversas possibilidades de classificação das subestações, esta seção tem o objetivo de filtrar e descrever suas principais formas de classificação.

### 3.3.1 Quanto à isolação

A primeira classificação a ser abordada é em relação à forma que os equipamentos das subestações são isolados em relação ao ambiente, os quais podem ser isolados a ar (AIS), isolados a gás (GIS) ou de tecnologia mista (MTS). É importante destacar primeiramente essa classificação porque as abordagens tratadas na literatura são completamente diferentes quanto à escolha desses diferentes tipos de solução.

#### 3.3.1.1 Subestação AIS

A IEC (2023) se refere à subestação do tipo AIS como subestação de tipo aberta<sup>2</sup> e a define como uma subestação em que o isolamento à terra e entre condutores de fase é fornecido principalmente pelo ar à pressão atmosférica e na qual algumas partes vivas não estão fechadas.

Essas subestações são totalmente compostas de componentes de tecnologia de isolação a ar e são o tipo mais usual que existe, representando mais de 70% das subestações em todo o mundo (CIGRE, 2019, p. 143).

Esse tipo de subestação tem a vantagem significativa de o equipamento ser geralmente o mais barato de adquirir. Entretanto, tem a desvantagem de ocupar mais espaço devido aos espaçamentos necessários para manter o isolamento a ar, assim como a desvantagem de o equipamento ficar exposto a intempéries. Contudo, se houver espaço disponível para a subestação, o custo do terreno não for elevado e a área não for susceptível à poluição salina ou industrial significativa, então o tipo AIS ainda será provavelmente a solução mais adequada. Também tem a vantagem de ser relativamente simples de expandir e adaptar conforme as necessidades da subestação evoluem (CIGRE, 2019, p. 13).

#### 3.3.1.2 Subestação GIS

A IEC (2023) define subestação do tipo GIS<sup>3</sup> como uma subestação que possui os equipamentos em invólucro metálico em que o isolamento é obtido, pelo menos parcialmente, por um gás isolante diferente do ar à pressão atmosférica.

Esse tipo de subestação geralmente utiliza o gás SF<sub>6</sub> como meio isolante, que é um gás incolor, inodoro, não tóxico e não inflamável, sendo cinco vezes mais pesado que o ar e extremamente estável. Esse gás fornece alta rigidez dielétrica e excelentes propriedades

<sup>2</sup> Código 605-02-13 para busca na Electropedia.

<sup>3</sup> Código 441-12-05 para busca na Electropedia.

de extinção de arco elétrico. No entanto, a alta capacidade de absorção de calor torna o SF<sub>6</sub> um forte gás de efeito estufa com uma contribuição equivalente a 23.900 vezes maior que a contribuição do CO<sub>2</sub> para o potencial de aquecimento global, ou seja, 1 kg de SF<sub>6</sub> liberado na atmosfera contribui para o aquecimento global tanto quanto 23.900 kg de CO<sub>2</sub>. Por esse motivo, todo o ciclo de vida e toda utilização desse gás é rigorosamente controlado por normas internacionais (KOCH, 2022, p. 70).

Apesar disso, esse tipo de subestação proporciona inúmeras vantagens e sua aplicação se faz necessária em diversos casos. Devido às ótimas propriedades elétricas do gás isolante, os GIS têm a capacidade de isolar em centímetros o que os AIS equivalentes necessitam de metros de isolamento de ar. Isso implica em uma grande vantagem por serem muito compactos, fazendo seu uso essencial em locais onde há limitação de espaço físico, como em áreas urbanas, plantas industriais, locais subterrâneos e plataformas *offshore* (MCDONALD, 2012; CIGRE, 2019; KOCH, 2022).

Outra grande vantagem dos GIS é o confinamento em invólucro metálico, o que implica que não são expostos às intempéries do local. Isso faz seu uso necessário, por exemplo, em locais costeiros sujeitos à poluição salina ou em locais industriais cuja poluição atmosférica pode ser grave. Essas características de confinamento e isolamento dos equipamentos também implicam em uma grande vantagem em relação à segurança de operação da subestação, pois não há exposição de elementos energizados que possam entrar em contato com as pessoas (CIGRE, 2019; KOCH, 2022).

No entanto, quando comparado com os AIS, o tipo GIS é geralmente a opção mais cara (CIGRE, 2019; KOCH, 2022). Em relação à expansibilidade, o tipo GIS também possui desvantagem, já que as subestações do tipo AIS podem ser expandidas mais facilmente. Outra desvantagem a destacar é em relação à manutenção, pois os procedimentos de manutenção dos GIS requerem treinamento adicional e as peças de reposição podem não estar tão prontamente disponíveis (KOCH, 2022, p. 66-69).

### 3.3.1.3 Subestação MTS

As subestações MTS utilizam o conceito de compartimentos e misturam tecnologias AIS e GIS, onde alguns dos compartimentos são feitos de componentes de tecnologia AIS e outros são feitos de componentes de tecnologia GIS ou de uma combinação de componentes de ambas as tecnologias (CIGRE, 2019, p. 493). Essa combinação permite a criação de soluções de tamanho reduzido que ainda são consideravelmente mais econômicas do que as subestações GIS. Essa solução pode ser usada onde os custos do terreno são moderados e a poluição não é um problema significativo, proporcionando uma solução compacta e econômica para novas subestações. Além disso, essa solução também é utilizada de forma muito eficaz para a expansão de subestações AIS existentes onde o espaço é limitado, sem a necessidade de aquisição de mais terreno (CIGRE, 2019, p. 13).

### 3.3.2 Quanto ao nível de tensão

A segunda classificação a ser abordada é em relação ao nível de tensão, o qual é o principal parâmetro que caracteriza os trechos do SEP e que determina os critérios de projeto das subestações e das linhas elétricas.

A ANEEL (2021) categoriza os níveis de tensão de distribuição em 3 grupos: baixa, média e alta tensão de distribuição. A baixa tensão de distribuição corresponde a tensão entre fases cujo valor eficaz é inferior a 2,3 kV. A média tensão de distribuição corresponde a tensão entre fases cujo valor eficaz é igual ou superior a 2,3 kV e inferior a 69 kV. Por fim, a alta tensão de distribuição corresponde a tensão entre fases cujo valor eficaz é igual ou superior a 69 kV e inferior a 230 kV, ou instalações em tensão igual ou superior a 230 kV quando especificamente definidas pela ANEEL.

Já a NBR 14039 padroniza as tensões nominais das instalações elétricas de média tensão em 3 kV, 4,16 kV, 6 kV, 13,8 kV, 23,1 kV e 34,5 kV (ABNT, 2021a, p. 11). Ou seja, infere-se que para a ABNT, em discordância à ANEEL, qualquer tensão nominal acima de 34,5 kV já é considerada alta tensão. Dessas tensões padronizadas, temos 13,8 kV e 34,5 kV as mais usuais nas linhas de distribuição do Brasil.

Em relação à transmissão, os níveis de tensão utilizados pelo ONS (2023) na Rede Básica do SIN são 230 kV, 345 kV, 440 kV, 500 kV, 525 kV e 765 kV em corrente alternada e 600 kV e 800 kV em corrente contínua. Com isso, nota-se que há um *gap* de 34,5 kV a 230 kV, então, para tal intervalo, é assumido o nível de tensão da subtransmissão.

A tabela 1 mostra os níveis de tensão em corrente alternada mais usuais nas linhas de transmissão, subtransmissão e distribuição do Brasil.

Tabela 1 – Níveis de tensão usuais do Brasil

Tensão nominal do sistema (kV)	Tensão máxima (kV fase-fase, eficaz)	Aplicação mais usual
13,8	14,5	Distribuição
34,5	36,2	Distribuição
69	72,5	Subtransmissão
88	92,4	Subtransmissão
138	145	Subtransmissão
230	242	Transmissão
345	362	Transmissão
440	460	Transmissão
500 ou 525	550	Transmissão
765	800	Transmissão

Fonte: Adaptado de ONS (2022, p. 6)

### 3.3.3 Quanto à função no sistema elétrico

A terceira classificação a ser abordada é em relação à função das subestações no SEP. Como visto em 3.1, a adequação do nível de tensão entre os trechos do SEP é a função predominante das subestações, mas elas não se limitam a isso. Portanto, serão apresentadas três das principais funções podem desempenhar.

#### 3.3.3.1 Subestação de transformação

A subestação de transformação, ou transformadora, é a subestação cuja finalidade principal é modificar o nível de tensão da energia elétrica entre a entrada e a saída (ABNT, 1992, p. 51). Ela pode ser do tipo elevadora ou abaixadora. Na subestação elevadora, a tensão de saída é maior do que a tensão de entrada (ABNT, 1992, p. 50), sendo utilizada principalmente na saída dos centros de geração. Já na subestação abaixadora, a tensão de saída é menor do que a tensão de entrada (ABNT, 1992, p. 50), sendo utilizada principalmente nos “nós” de transmissão-subtransmissão, transmissão-distribuição, subtransmissão-distribuição e, obviamente, distribuição-consumidor.

#### 3.3.3.2 Subestação de manobra

A subestação de manobra, ou comutadora, é a subestação cuja finalidade principal é modificar a configuração de um sistema elétrico mediante modificação das interligações entre linhas de transmissão (ABNT, 1992, p. 50). Essa subestação é utilizada quando é necessário interligar dois ou mais circuitos em quantidade menor, ou quando é necessário ramificar um ou mais circuitos em quantidade maior, sem alteração do nível de tensão.

#### 3.3.3.3 Subestação de conversão

A subestação de conversão, ou conversora, é a subestação cuja finalidade principal é converter parâmetros da rede. Os parâmetros podem ser corrente ou frequência. Ou seja, ela pode ser do tipo conversora de corrente ou conversora de frequência.

A subestação de conversão de corrente tem o objetivo de converter corrente alternada para corrente contínua e vice-versa (ABNT, 1992, p. 50). Ela pode ser do tipo inversora ou retificadora. A SE inversora opera apenas no sentido da corrente contínua para a corrente alternada, sem previsão para conversão no sentido oposto (ABNT, 1992, p. 51). Já a SE retificadora opera apenas no sentido da corrente alternada para a corrente contínua, sem previsão para conversão no sentido oposto (ABNT, 1992, p. 51).

Analogamente, a subestação de conversão de frequência tem o objetivo de converter corrente alternada de uma determinada frequência para outra (ABNT, 1992, p. 50).

### 3.3.4 Quanto à instalação em relação ao meio ambiente

A quarta, e última, classificação a ser abordada é em relação à instalação dos componentes das subestações em relação ao meio ambiente. Nesse contexto, as subestações podem ser abrigadas ou ao tempo.

#### 3.3.4.1 Subestação abrigada

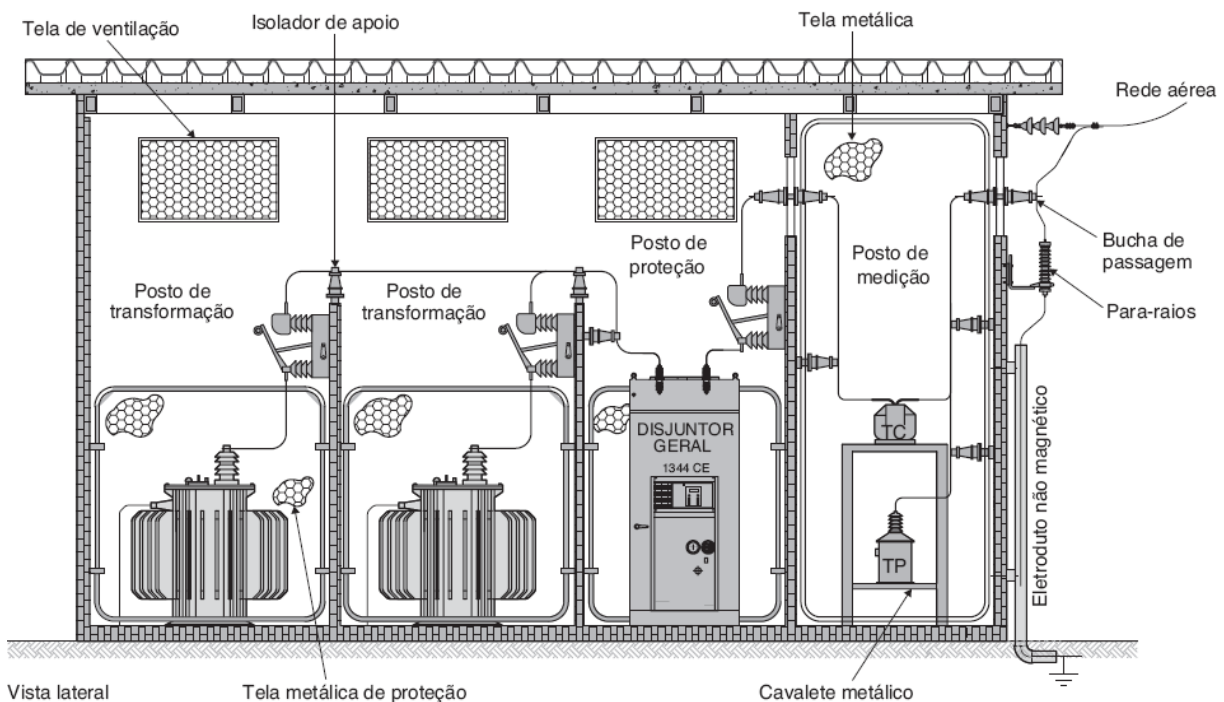
As subestações abrigadas são aquelas nas quais os seus componentes estão ao abrigo das intempéries (ABNT, 2021a, p. 91). Essas subestações podem ser construídas em alvenaria ou em invólucro metálico.

##### 3.3.4.1.1 Construção em alvenaria

Segundo Filho (2023, p. 559), a construção em alvenaria é o tipo mais comum de subestação utilizado em indústrias. Esse tipo construtivo apresenta um custo reduzido, de fácil montagem e manutenção, mas requer uma área disponível para sua construção relativamente grande. A sua aplicação é mais notável em instalações industriais que tenham espaços disponíveis próximos aos centros de carga.

As subestações em alvenaria podem ser classificadas quanto ao tipo do ramal de entrada, podendo ser alimentada por ramal de entrada aéreo (figura 2) ou subterrâneo, cada um com suas respectivas particularidades (FILHO, 2023, p. 561-563).

Figura 2 – Subestação em alvenaria com ramal de entrada aéreo

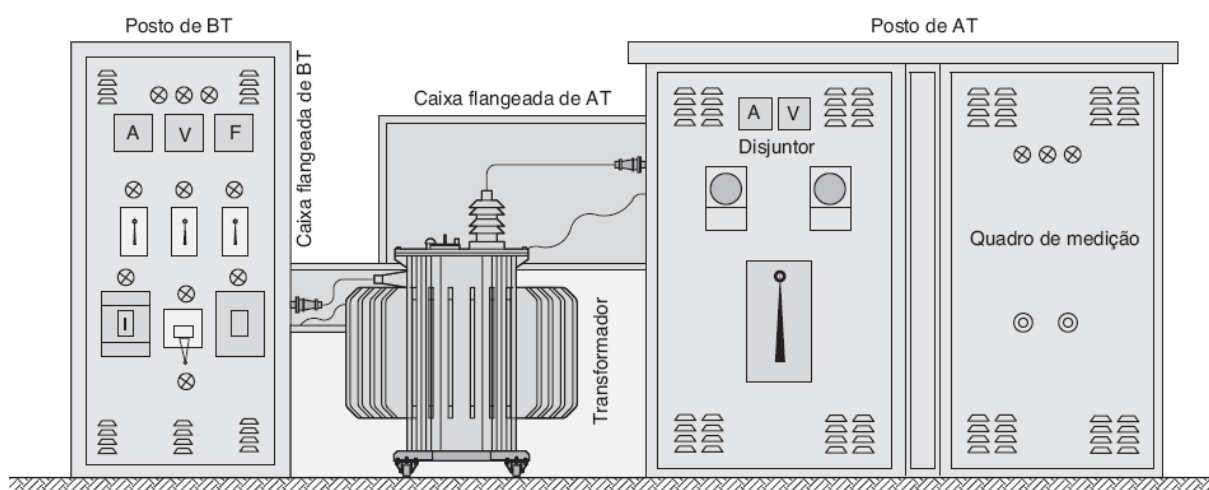


### 3.3.4.1.2 Construção em invólucro metálico

Segundo Filho (2023, p. 563), a construção em invólucro metálico, por ser mais compacta, é frequentemente adotada em indústrias e outras edificações onde o espaço disponível é mais reduzido. Esse tipo construtivo pode ser para uso interno ou ao tempo.

As subestações em invólucro metálico podem ser classificadas em quatro tipos básicos conforme sua construção, sendo elas: subestação com transformador com flanges laterais; subestação com transformador com flanges superior e lateral (figura 3); subestação com transformador enclausurado em posto metálico em tela aramada; e subestação com transformador e demais equipamentos enclausurados em posto metálico em chapa de aço. Ademais, existem outros modelos de fabricação comercial, mas todos eles são de concepção derivada de um desses quatro tipos básicos (FILHO, 2023, p. 563-565).

Figura 3 – Subestação com transformador com flanges superior e lateral



Fonte: Filho (2023, p. 568)

### 3.3.4.2 Subestação ao tempo

As subestações ao tempo são aquelas nas quais os seus componentes estão sujeitos à ação das intempéries (ABNT, 2021a, p. 93). Essas subestações podem ser instaladas em plano elevado ou no nível do solo.

#### 3.3.4.2.1 Instalação em plano elevado

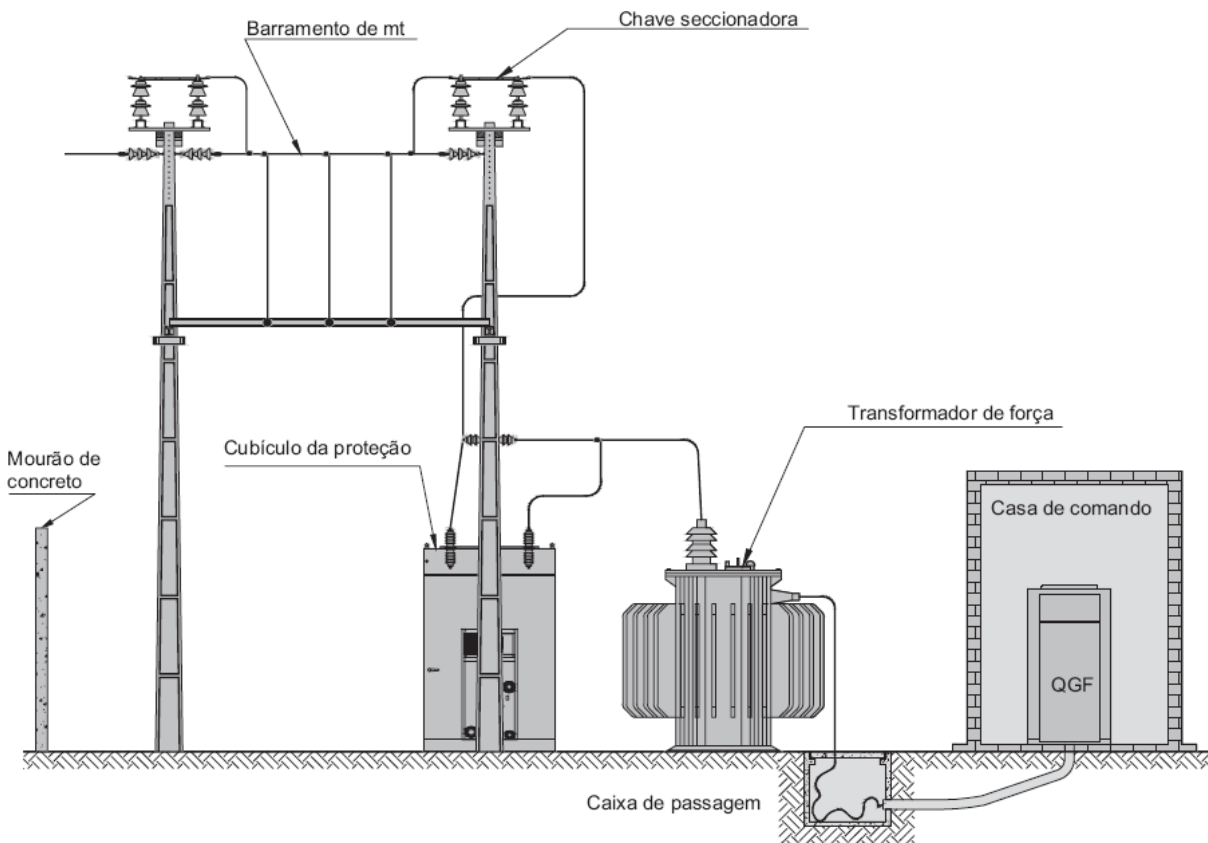
As subestações de instalação em plano elevado admitem diferentes métodos de instalação para os equipamentos, sendo eles: em postes ou torres de aço, concreto ou madeira adequada; em plataformas elevadas sobre estrutura de aço, concreto ou madeira adequada; ou em áreas sobre cobertura de edifícios, inacessíveis a pessoas não qualificadas ou providas de proteção externa. Nesse tipo construtivo, todas as partes vivas não

protegidas são instaladas, no mínimo, a 5 m acima do piso (FILHO, 2023, p. 566-568). Esse tipo de subestação é muito comum em áreas urbanas, onde os transformadores são instalados majoritariamente no alto dos postes.

### 3.3.4.2.2 Instalação no nível do solo

As subestações de instalação no nível do solo possuem alguns equipamentos, tais como disjuntores e transformadores, instalados em bases de concreto construídas no nível do solo e os demais, tais como para-raios, chaves fusíveis e seccionadoras, montados em estrutura aérea, como pode ser observado na figura 4 (FILHO, 2023, p. 571). Esse tipo construtivo é o mais comum e de menor custo para os projetos de subestações de alta tensão iguais ou superiores a 69 kV (FILHO, 2021, p. 10).

Figura 4 – Subestação ao tempo de instalação no nível do solo



Fonte: Filho (2023, p. 574)



## 3.4 Componentes e equipamentos

Esta seção tem o objetivo de categorizar e descrever os principais componentes e equipamentos que compõem as subestações em média tensão.

### 3.4.1 Componentes

Os componentes são partes individuais que integram o sistema. Nesta subseção, serão tratados os condutores, as buchas de passagem e os isoladores.

#### 3.4.1.1 Conductor

Conductor é um produto metálico, de seção transversal invariável e de comprimento muito maior do que a sua maior dimensão transversal, utilizado para transportar energia elétrica ou transmitir sinais elétricos (ABNT, 1986, p. 1). O cobre e o alumínio são os dois metais mais utilizados na fabricação dos condutores, tendo em vista suas propriedades elétricas e mecânicas, assim como os custos (COTRIM, 2009, p. 139).

Os condutores são os principais componentes das linhas elétricas e podem ser de diversas formas. Dentre elas, as mais usuais são os cabos isolados, cabos uni e multipolares, cordoalha, vergalhão, tubo oco e barra retangular. Os condutores são escolhidos conforme aplicação, disponibilidade e custo. Já o dimensionamento deve ser feito principalmente com base na capacidade de condução de corrente em sua respectiva aplicação, considerando fatores como tipo de instalação, queda de tensão, fator de agrupamento etc.

#### 3.4.1.2 Bucha de passagem

Filho (2022, p. 232) afirma que as buchas são elementos isolantes próprios para instalação em cubículos metálicos ou de alvenaria e em equipamentos diversos cuja finalidade é permitir a passagem de um circuito de um determinado ambiente para outro. Nesse sentido, as buchas recebem três classificações: buchas para interior, cujas duas extremidades são projetadas para utilização em ar ambiente, sob pressão atmosférica e não expostas a condições de ambientes exteriores; buchas para exterior, cujas duas extremidades são projetadas para utilização em exposição a condições de ambientes exteriores; e buchas para interior-exterior, onde uma extremidade é projetada para utilização em exposição e a outra sem exposição a condições de ambientes exteriores ABNT (2014, p. 4).

#### 3.4.1.3 Isolador

Isolador é um componente destinado a isolar eletricamente e a fixar e/ou fornecer suporte para um condutor ou para um equipamento elétrico que estão submetidos a potenciais elétricos diferentes (ABNT, 2012b, p. 4).

### 3.4.2 Equipamentos de manobra e comando

A IEC (2023) define que os dispositivos de manobra<sup>4</sup> são projetados para estabelecer ou interromper a corrente em um ou mais circuitos elétricos e são destinados, em princípio, ao uso em conexão com geração, transmissão, distribuição e conversão de energia elétrica. Já os dispositivos de comando<sup>5</sup> são destinados, em princípio, ao controle de equipamentos consumidores de energia elétrica.

#### 3.4.2.1 Seccionadora

Segundo a ABNT (2022, p. 3), seccionadora é o dispositivo mecânico de manobra que assegura, na posição aberta, uma distância de seccionamento de acordo com os requisitos especificados. Esse dispositivo é capaz de abrir e fechar um circuito quando um corrente desprezível<sup>6</sup> é interrompida ou estabelecida, ou quando não ocorre qualquer mudança significativa da tensão nos terminais de cada um dos seus polos. Ela também é capaz de suportar as correntes nas condições normais do circuito e de suportar as correntes durante um tempo especificado nas condições anormais, como as de curto-circuito.

Complementando, Filho (2022, p. 242) afirma que as seccionadoras são utilizadas nas subestações para manobrar circuitos, sem carga, permitindo a isolação de um equipamento, o *by-pass* de equipamentos ou a transferência de carga entre barramentos. A operação com o circuito em carga provoca desgaste nos contatos e põe em risco a vida do operador. Porém, podem ser operadas quando são previstas, no circuito, pequenas correntes como as correntes capacitivas das buchas, dos barramentos, das conexões, dos comprimentos muito curtos de cabos e das impedâncias dos disjuntores conectados permanentemente e as correntes de transformadores e divisores de tensão.

Quanto aos tipos construtivos, existem diversas variantes de seccionadoras cuja escolha depende, dentre outros, do tipo de uso (interno ou externo). Além disso, elas podem ser fabricadas em unidades monopolares ou tripolares, sendo as tripolares equipadas com um mecanismo que exige a abertura simultânea dos três polos. As seccionadoras também podem ser de operação manual ou motorizada (FILHO, 2022, p. 243-259).

#### 3.4.2.2 Disjuntor

A IEC (2023) define disjuntor<sup>7</sup> como dispositivo mecânico de manobra capaz de estabelecer, conduzir e interromper correntes em condições normais do circuito, assim como estabelecer, conduzir por tempo especificado e interromper correntes em condições anormais especificadas do circuito, tais como as de curto-circuito.

<sup>4</sup> Códigos 441-11-02 e 441-14-01 para busca na Electropedia.

<sup>5</sup> Código 441-11-03 para busca na Electropedia.

<sup>6</sup> Para sistemas com tensão igual ou inferior a 420 kV, é considerada corrente desprezível aquela que não excede 0,5 A.

<sup>7</sup> Código 441-14-20 para busca na Electropedia.

Embora seja um dispositivo de manobra, o disjuntor é projetado para garantir a segurança da instalação elétrica e dos equipamentos a ele conectados. Segundo Filho (2022, p. 317), a função principal do disjuntor é interromper as correntes de defeito do circuito no menor intervalo de tempo possível, além de ser capaz de interromper o circuito operando sob carga plena ou a vazio, bem como energizar o mesmo circuito durante condições de operação normal ou em falta. No entanto, a eficácia do disjuntor depende da utilização adequada de relés, que são componentes responsáveis pelo monitoramento das condições elétricas do circuito. Os relés analisam parâmetros como corrente, tensão e frequência, e, com base nas análises feitas por sensores previamente ajustados, enviam ou não a ordem de comando para a interrupção do circuito. Sem os relés, o disjuntor é apenas uma excelente chave de manobra, sem qualquer característica de proteção.

Quanto aos tipos construtivos, existem diversas variantes de disjuntores cuja escolha depende, dentre outros, dos meios que utilizam para a extinção do arco. Diante disso, há duas características importantes que os diferenciam, as quais são o sistema de interrupção do arco e o sistema de acionamento. Quanto ao sistema de interrupção do arco, os disjuntores podem ser a óleo, a sopro magnético, a vácuo, a SF<sub>6</sub> ou a ar comprimido. Quanto ao sistema de acionamento, os sistemas podem ser de mola, de solenoide, a ar comprimido ou hidráulico (FILHO, 2022, p. 322-340).

### 3.4.3 Equipamentos de proteção

A IEC (2023) define proteção<sup>8</sup> como disposições para detectar falhas ou outras condições anormais em um sistema de energia, para permitir a eliminação de falhas, para encerrar condições anormais e para iniciar sinais ou indicações. Logo, um dispositivo de proteção é aquele destinado a desempenhar uma ou mais funções de proteção especificadas.

#### 3.4.3.1 Dispositivo fusível

Segundo a ABNT (2023, p. 5), dispositivo fusível é o dispositivo de proteção que, pela fusão de uma parte especialmente projetada e dimensionada, abre o circuito em que está inserido e interrompe a corrente quando esta excede um valor especificado durante um intervalo de tempo especificado. Esses dispositivos podem ser usados para proteção geral de uma subestação, desde que respeitadas algumas condições, ou para a proteção parcial de vários equipamentos individualmente (FILHO, 2022, p. 278).

#### 3.4.3.2 Para-raios de resistor não linear

Para-raios é um dispositivo de proteção contra sobretensões provocadas por descargas atmosféricas, manobras de chaveamento e outras fontes de surtos de tensão. Os

---

<sup>8</sup> Código 448-11-01 para busca na Electropedia.

para-raios são utilizados para proteger os diversos equipamentos que compõem uma subestação ou simplesmente um único transformador de distribuição instalado em um poste. Os para-raios limitam as sobretensões a um valor máximo, sendo esse valor tomado como o nível de proteção que o para-raios oferece ao sistema (FILHO, 2022, p. 1).

Os para-raios utilizados em subestações são compostos por resistores não lineares de óxido de metálico<sup>9</sup>, os quais são formados basicamente pela sinterização de óxidos metálicos que, por sua característica não linear de tensão-corrente, apresentam uma baixa resistência frente a sobretensões e uma alta resistência na condição normal de operação (ABNT, 2012a, p. 2). Ou seja, quando ocorrem sobretensões no sistema elétrico, como descargas atmosféricas, a alta resistência diminui rapidamente, direcionando a corrente de sobretensão para o aterramento e protegendo os equipamentos sensíveis da subestação contra danos. Após a sobretensão, o resistor recupera sua alta resistência.

### 3.4.4 Equipamentos de transformação

Os equipamentos de transformação das subestações são os transformadores. Segundo a ABNT (2010, p. 1), transformador é um equipamento elétrico estático que, por indução eletromagnética, transforma tensão e corrente alternadas entre dois ou mais enrolamentos sem mudança de frequência. Nas subestações, há três tipos de transformadores: transformador de corrente, transformador de potencial e transformador de potência.

O TC e o TP são classificados como transformadores para instrumentos<sup>10</sup>, os quais são destinados a transmitir um sinal de informação aos instrumentos de medição, medidores e dispositivos de controle ou de proteção (IEC, 2023).

#### 3.4.4.1 Transformador de corrente

Transformador de corrente é um transformador para instrumentos cuja corrente secundária, em condições normais de uso, é substancialmente proporcional à corrente primária (ABNT, 2021c, p. 7). Os TCs são equipamentos que permitem que os instrumentos de medição e proteção funcionem adequadamente, sem a necessidade de operar diretamente com as correntes nominais do circuito ao qual estão conectados. Em sua forma mais simples, esses equipamentos possuem um enrolamento primário geralmente composto por poucas espiras e um enrolamento secundário cuja corrente nominal transformada é normalmente igual a 5 A. Isso permite que os instrumentos de medição e proteção sejam dimensionados em tamanhos reduzidos, com bobinas de corrente constituídas por poucos fios de cobre (FILHO, 2022, p. 171).

Os TCs podem ser construídos de diferentes formas e para diversos usos. Em relação ao tipo construtivo, eles podem ser classificados, dentre outros, como: tipo barra,

<sup>9</sup> Único tipo de para-raios com NBR em vigor durante o período de elaboração deste trabalho.

<sup>10</sup> Código 321-01-01 para busca na Electropedia.

tipo bucha, tipo janela e tipo pedestal. Quanto ao uso, podem ser para serviço de medição ou para serviço de proteção, cada um suas particularidades (ABNT, 2021c; FILHO, 2022).

#### 3.4.4.2 Transformador de potencial

Transformador de potencial é um transformador para instrumentos cuja tensão secundária, em condições normais de uso, é substancialmente proporcional à tensão primária (ABNT, 2021b, p. 6). Os TPs são equipamentos que permitem que os instrumentos de medição e proteção funcionem adequadamente, sem a necessidade de possuir tensão de isolamento conforme o circuito ao qual estão conectados. Em sua forma mais simples, esses equipamentos possuem um enrolamento primário composto por muitas espiras e um enrolamento secundário por meio do qual se obtém a tensão desejada, permitindo que os instrumentos de medição e proteção sejam dimensionados em tamanhos reduzidos, com bobinas e demais componentes constituídos de baixa isolação (FILHO, 2022, p. 208).

Os TPs podem ser do tipo indutivo ou capacitivo. Segundo Filho (2022, p. 209), basicamente todos os TPs até 138 kV são do tipo indutivo em virtude do custo de produção menor, pois são constituídos apenas por uma ou mais unidades eletromagnéticas, cuja relação de transformação é definida primordialmente pela relação de espiras de seus enrolamentos (ABNT, 2021b, p. 7). Devido a limitações construtivas desse tipo, são utilizados os TPs capacitivos<sup>11</sup> para tensões mais elevadas, pois são constituídos por uma unidade capacitiva divisora de tensão e uma unidade eletromagnética interconectadas (IEC, 2023).

#### 3.4.4.3 Transformador de potência

No geral, os transformadores de potência, cujo objetivo é transmitir potência elétrica, são os principais e mais complexos equipamentos das subestações. Suas características variam conforme o local de instalação, tensões nos terminais primário e secundário, potência demandada e vários outros fatores, como o tipo de refrigeração.

Uma classificação importante a destacar é o meio isolante, que pode ser líquido ou seco. Os transformadores em líquido isolante possuem a parte ativa<sup>12</sup> imersa em líquido isolante, geralmente óleo mineral, sendo o tipo mais empregado em todo o SEP. Contudo, seu uso requer cuidados especiais devido ao risco de incêndio, pois o óleo mineral é inflamável. Já os transformadores a seco não possuem a parte ativa imersa em líquido isolante, sendo utilizados mais especificamente em instalações com alto risco de incêndio, tais como refinarias de petróleo, indústrias petroquímicas e grandes centros comerciais, onde os documentos normativos proíbem o uso de transformadores a óleo mineral. Embora mais seguro, esse tipo tem o custo mais elevado (ABNT, 2010; FILHO, 2022).

<sup>11</sup> Código 321-03-14 para busca na Electropedia.

<sup>12</sup> Parte ativa é o conjunto formado pelo núcleo, enrolamentos e suas partes acessórias.

## 3.5 Requisitos de projeto

Esta seção tem o objetivo de descrever os principais requisitos que devem ser considerados nos projetos de subestações em média tensão.

### 3.5.1 Especificações

Para o desenvolvimento adequado de um projeto de subestação, é fundamental, em primeiro lugar, especificar claramente todos os seus requisitos. Para isso, todas as informações relevantes relacionadas ao local e aos circuitos de entrada devem estar muito bem definidas. Com base nisso, [CIGRE \(2019\)](#) fornece diretrizes para as especificações convencionais de projetos de grande porte para fins de ajuda nesta fase do projeto, mas os conceitos também podem ser aplicados, em menor escala, em projetos de pequeno porte.

#### 3.5.1.1 Localização e restrições espaciais

A localização do terreno deve ser definida indicando as coordenadas de latitude e longitude de um dos cantos do terreno. Um desenho deve ser fornecido, mostrando a área máxima disponível do terreno com dimensões nas direções leste/oeste e norte/sul. Esse desenho deve incluir informações sobre pontos de referência, se disponíveis, bem como as localizações de todas as entradas dos circuitos externos (atuais e futuras, se conhecidas). Além disso, o nível do terreno em relação ao nível do mar e quaisquer variações de nível no terreno devem ser apresentados nesse mesmo desenho ([CIGRE, 2019](#), p. 102).

#### 3.5.1.2 Efeitos do meio ambiente na subestação

As seguintes condições ambientais para o local devem ser conhecidas: as condições de vento, que podem ser expressas em termos de velocidade do vento ou pressão; os níveis máximos de acumulação de neve, bem como informações sobre o congelamento do solo; as temperaturas máximas e mínimas e também a temperatura média máxima a ser considerada no projeto; e os dados percentuais médios de umidade e precipitação para cada mês do ano no local ([CIGRE, 2019](#), p. 102).

Além disso, podem ser necessárias as seguintes informações: a espessura do gelo nos condutores; o nível sísmico; o nível de fuga necessário, conforme especificado na norma IEC 60815 em mm/kV; e o nível Keraunic, que representa a quantidade de dias de tempestade por ano. Em determinados casos, também podem ser necessárias as informações sobre níveis de inundação, tempestades de areia e outros fatores relevantes.

#### 3.5.1.3 Informações básicas para obras civis

Deve ser fornecida a tensão admissível do solo, a resistividade do solo e a resistividade térmica do solo, juntamente com quaisquer relatórios de investigação do local e

resultados de sondagens. Também deve ser informado o nível do lençol freático no local, se conhecido. Devem ser especificados os requisitos para os níveis finais do terreno no local, incluindo se são planos, inclinados ou em socacos. É importante indicar se há necessidade de remoção de entulho e se há presença de solo contaminado. Deve-se definir a área alocada para a instalação do canteiro de obras. Além disso, devem ser estabelecidos os requisitos de cercamento e segurança a serem aplicados. Deve ser mencionado os pontos de interface com estradas, fornecimento de água e drenagem. Também devem ser fornecidos detalhes sobre os requisitos de qualquer edificação no local, incluindo as dimensões dos ambientes, requisitos de aquecimento, ventilação e ar condicionado, bem como requisitos de acabamento. Por fim, as localizações de quaisquer serviços subterrâneos conhecidos dentro dos limites do terreno devem ser identificadas (CIGRE, 2019, p. 103-104).

#### 3.5.1.4 Parâmetros básicos do sistema

Deve ser fornecida a tensão nominal, a tensão máxima e a tensão mínima do sistema. Além disso, é necessário especificar a tensão de impulso atmosférico e a tensão de impulso de manobra, bem como a tensão de frequência fundamental de curta duração. Os níveis de curto-circuito para operação monofásica e trifásica, juntamente com a duração da corrente de curto-circuito. A configuração do aterramento do neutro do sistema e da subestação, assim como o tempo máximo do fator de fuga à terra. Também é essencial fornecer dados relacionados à frequência e à variação permitida da mesma. Por fim, o deslocamento de fase entre sistemas de tensão (CIGRE, 2019, p. 104).

#### 3.5.1.5 Normas e regulamentos

É necessário definir os requisitos legais que devem ser aplicados na subestação. A maioria das concessionárias normalmente terá um conjunto de padrões ou especificações próprios relativos não apenas à subestação, mas também aos vários equipamentos a serem instalados. Essas especificações geralmente estarão em conformidade com normas nacionais e internacionais, como ABNT, IEC, ANSI e VDE (CIGRE, 2019, p. 106).

#### 3.5.1.6 Saúde, segurança e meio ambiente

Devem ser estabelecidos os requisitos de saúde, segurança e meio ambiente. Os requisitos de segurança abrangem todos os aspectos de segurança que devem ser considerados no projeto, construção, operação e manutenção da subestação. Quanto aos requisitos ambientais, deve ser controlado o impacto que qualquer equipamento possa ter no meio ambiente, podendo ser necessário definir o nível máximo de ruído para o local, o campo elétrico ao nível do solo, o campo magnético em um limite especificado, requisitos estéticos específicos, prevenção de danos por óleo, restrições arqueológicas e quaisquer leis ou regulamentos ambientais específicos que devam ser cumpridos (CIGRE, 2019, p. 106).

## 3.5.2 Proteções

A NBR 14039 determina as medidas de proteção que visam assegurar a segurança de pessoas, animais e a conservação dos bens e do meio ambiente contra os perigos e danos que possam resultar da utilização das instalações elétricas de média tensão em condições que possam ser previstas (ABNT, 2021a). Portanto, se tratam de diretrizes obrigatórias.

### 3.5.2.1 Proteção contra choques elétricos

As pessoas e os animais devem ser protegidos contra os perigos que possam resultar de um contato com partes vivas da instalação (contato direto) ou massas colocadas acidentalmente sob tensão (contato indireto) (ABNT, 2021a, p. 5).

A proteção contra contatos diretos deve ser assegurada por meio de proteção por isolamento das partes vivas, proteção por meio de barreiras ou invólucros, proteção por meio de obstáculos e proteção parcial por colocação fora de alcance. Já a proteção contra contatos indiretos deve ser garantida pelo aterramento, pela equipotencialização das massas e pelo seccionamento automático da alimentação.

#### 3.5.2.1.1 Proteção por isolamento das partes vivas

A isolamento é destinada a impedir todo contato com as partes vivas da instalação elétrica. As partes vivas devem ser completamente recobertas por uma isolamento que só possa ser removida através de sua destruição (ABNT, 2021a, p. 20).

#### 3.5.2.1.2 Proteção por meio de barreiras ou invólucros

As barreiras ou os invólucros são destinados a impedir todo contato com as partes vivas da instalação elétrica. As partes vivas devem estar no interior de invólucros ou atrás de barreiras que confirmam pelo menos o grau de proteção IP3X. As superfícies superiores das barreiras ou dos invólucros horizontais que sejam facilmente acessíveis devem atender pelo menos ao grau de proteção IP4X. As barreiras e invólucros devem ser fixados de forma segura e possuir robustez e durabilidade suficientes para manter os graus de proteção e a apropriada separação das partes vivas nas condições normais de serviço, levando-se em conta as condições de influências externas relevantes (ABNT, 2021a, p. 20).

#### 3.5.2.1.3 Proteção por meio de obstáculos

Os obstáculos são destinados a impedir os contatos fortuitos com partes vivas, mas não os contatos voluntários por uma tentativa deliberada de contorno do obstáculo. Os obstáculos devem impedir uma aproximação física não intencional das partes vivas e contatos não intencionais com partes vivas por ocasião de operação de equipamentos sob tensão (ABNT, 2021a, p. 21).

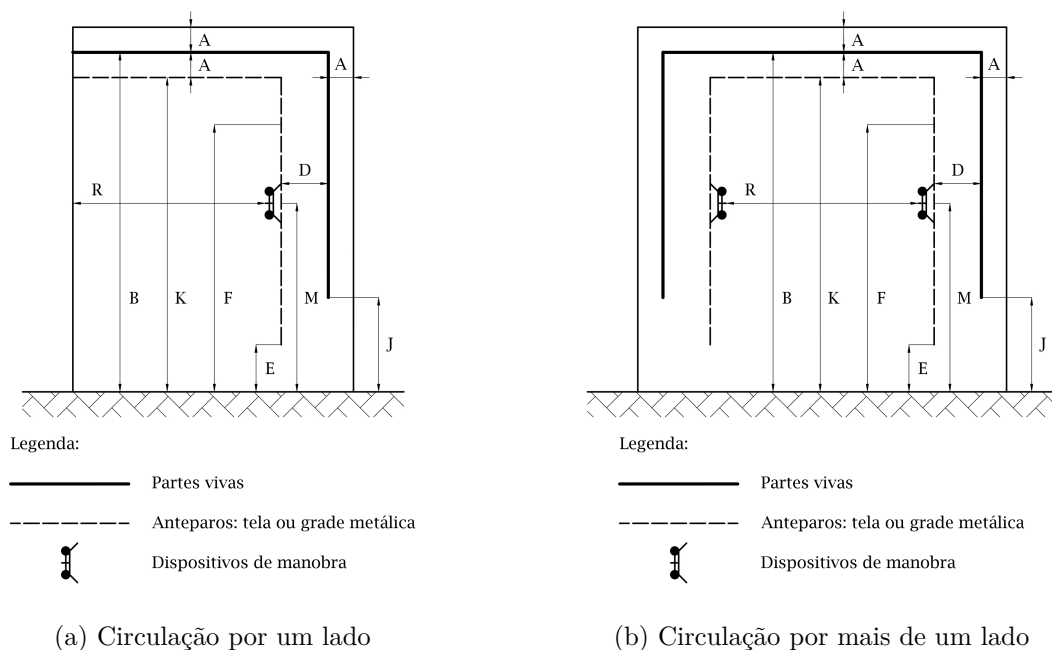


### 3.5.2.1.4 Proteção parcial por colocação fora de alcance

A colocação fora de alcance é somente destinada a impedir os contatos fortuitos com as partes vivas. Quando há o espaçamento, este deve ser suficiente para que se evite que pessoas circulando nas proximidades das partes vivas em média tensão possam entrar em contato com essas partes, seja diretamente ou por intermédio de objetos que elas manipulem ou transportem (ABNT, 2021a, p. 21).

Os espaçamentos mínimos e máximos previstos para as instalações internas são definidos nas figuras 5a e 5b com os valores das tabelas 2 e 3.

Figura 5 – Espaçamentos para proteção parcial por colocação fora de alcance



Fonte: Adaptado de ABNT (2021a, p. 21-22)

É importante mencionar que os afastamentos mínimos indicados na tabela 3 devem ser tomados entre as extremidades mais próximas e não de centro a centro. Os valores mínimos podem ser aumentados, a critério do projetista, em função da classificação das influências externas (ABNT, 2021a, p. 24).

### 3.5.2.1.5 Aterramento

As massas devem ser ligadas a condutores de proteção nas condições especificadas para cada esquema de aterramento. Massas simultaneamente acessíveis devem ser ligadas à mesma rede de aterramento individualmente, por grupos ou coletivamente (ABNT, 2021a, p. 24). Os esquemas de aterramento considerados na NBR 14039 são seis: TNR, TTN, TTS, ITR, ITN e ITS.

Para a classificação dos esquemas de aterramento, é utilizada a seguinte simbologia: a primeira letra se refere à situação da alimentação em relação à terra: “T” representa

Tabela 2 – Espaçamentos para instalações internas

<b>Dimensões mínimas (mm)</b>		
D	300 até 24,2 kV 400 para 36,2 kV	Distância entre a parte viva e um anteparo vertical
A		Valores de distâncias mínimas da tabela 3
R	1200	Locais de manobra
B	2700	Altura mínima de uma parte viva com circulação
K	2000	Altura mínima de um anteparo horizontal
F	1700	Altura mínima de um anteparo vertical
J	E + 300	Altura mínima de uma parte viva sem circulação
<b>Dimensões máximas (mm)</b>		
E	300	Distância máxima entre a parte inferior de um anteparo vertical e o piso
M	1200	Altura dos punhos de acionamento manual
malha	20	Abertura da malha

Fonte: Adaptado de ABNT (2021a, p. 22)

Tabela 3 – Distâncias mínimas x tensão nominal da instalação

<b>Tensão nominal da instalação (kV)</b>	<b>Tensão de ensaio à frequência industrial (kV)</b>	<b>Tensão suportável nominal de impulso atmosférico (kV)</b>	<b>Distância mínima fase/terra e fase/fase (mm)</b>
13,8	34	95	160
		110	180
		125	220
23,1	50	95	160
		125	220
34,5	70	145	270
		170	320

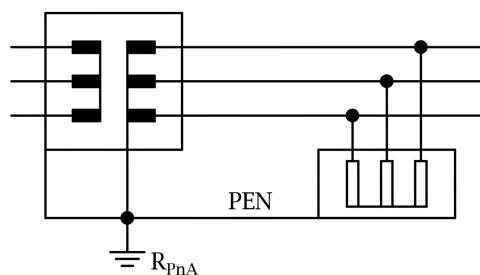
Fonte: Adaptado de ABNT (2021a, p. 24)

um ponto de alimentação diretamente aterrado; “I” representa isolação de todas as partes vivas em relação à terra ou aterramento de um ponto através de uma impedância; a segunda letra se refere à situação das massas da instalação elétrica em relação à terra: “T” representa massas diretamente aterradas, independentemente do aterramento eventual de ponto de alimentação; “N” representa massas ligadas diretamente ao ponto de alimentação aterrado; por fim, a terceira letra se refere à situação de ligações eventuais com as massas da subestação: “R” representa as massas da subestação ligadas simultaneamente ao aterramento do neutro da instalação e às massas da instalação; “N” representa as massas da subestação ligadas diretamente ao aterramento do neutro da instalação,

mas não estão ligadas às massas da instalação; “S” representa as massas da subestação ligadas a um aterramento eletricamente separado daquele do neutro e daquele das massas da instalação (ABNT, 2021a, p. 7).

O esquema de aterramento TNR, mostrado na figura 6, possui um ponto da alimentação diretamente aterrado, sendo as massas da instalação e da subestação ligadas a esse ponto através de condutores de proteção ou condutor de proteção com função combinada de neutro. Nesse esquema, toda corrente de falta direta fase-massa é uma corrente de curto-circuito (ABNT, 2021a, p. 7).

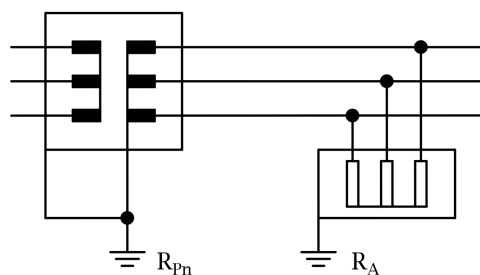
Figura 6 – Esquema de aterramento TNR



Fonte: Adaptado de ABNT (2021a, p. 8)

O esquema de aterramento TTN, mostrado na figura 7, possui um ponto da alimentação diretamente aterrado, estando as massas da instalação ligadas a eletrodos de aterramento eletricamente distintos do eletrodo de aterramento da subestação. Nesse esquema, as correntes de falta direta fase-massa devem ser inferiores a uma corrente de curto-circuito, sendo, porém, suficientes para provocar o surgimento de tensões de contato perigosas. O condutor neutro e o condutor de proteção das massas da subestação são ligados a um único eletrodo de aterramento (ABNT, 2021a, p. 8).

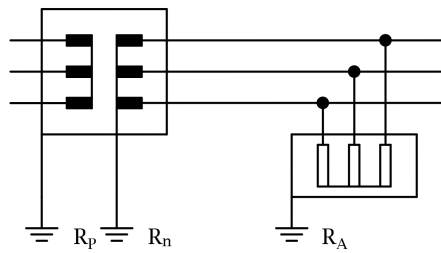
Figura 7 – Esquema de aterramento TTN



Fonte: Adaptado de ABNT (2021a, p. 8)

O esquema de aterramento TTS, mostrado na figura 8, é igual ao esquema TTN, a diferença é que o condutor neutro e o condutor de proteção das massas da subestação são ligados a eletrodos de aterramento distintos (ABNT, 2021a, p. 8).

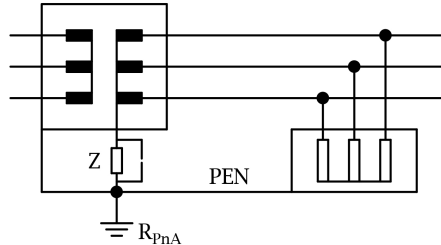
Figura 8 – Esquema de aterramento TTS



Fonte: Adaptado de ABNT (2021a, p. 9)

O esquema de aterramento ITR, mostrado na figura 9, não possui qualquer ponto da alimentação diretamente aterrado ou possui um ponto da alimentação aterrado através de uma impedância, estando as massas da instalação ligadas a seus próprios eletrodos de aterramento. Nesse esquema, a corrente resultante de uma única falta fase-massa não deve ter intensidade suficiente para provocar o surgimento de tensões de contato perigosas. O condutor neutro, os condutores de proteção das massas da subestação e da instalação são ligados a um único eletrodo de aterramento (ABNT, 2021a, p. 9).

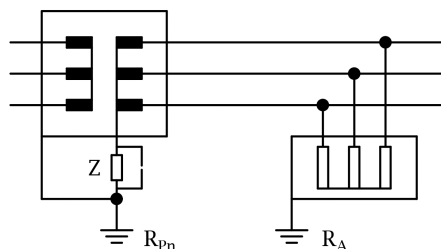
Figura 9 – Esquema de aterramento ITR



Fonte: Adaptado de ABNT (2021a, p. 10)

O esquema de aterramento ITN, mostrado na figura 10, é igual ao esquema ITR, a diferença é que o condutor neutro e o condutor de proteção das massas da subestação são ligados a um único eletrodo de aterramento e as massas da instalação ligadas a um eletrodo distinto (ABNT, 2021a, p. 9).

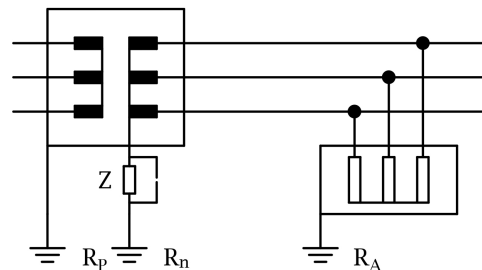
Figura 10 – Esquema de aterramento ITN



Fonte: Adaptado de ABNT (2021a, p. 9)

O esquema de aterramento ITS, mostrado na figura 11, também é igual ao esquema ITR, porém o condutor neutro, os condutores de proteção das massas da subestação e da instalação são ligados a eletrodos de aterramento distintos (ABNT, 2021a, p. 9).

Figura 11 – Esquema de aterramento ITS



Fonte: Adaptado de ABNT (2021a, p. 10)

#### 3.5.2.1.6 Equipotencialização

A tensão de contato em qualquer ponto da instalação não pode ser superior à tensão de contato limite de 50 V para áreas internas e 25 V para áreas externas para corrente alternada entre 15 Hz e 1000 Hz. Esta regra é satisfeita se em cada edificação existir uma ligação equipotencial principal, reunindo: os condutores de proteção principais; os condutores de equipotencialidade principais ligados a canalizações metálicas de utilidades e serviços e a todos os demais elementos condutores estranhos à instalação, incluindo os elementos metálicos da construção e outras estruturas metálicas; os condutores de aterramento; e os eletrodos de aterramento de outros sistemas (por exemplo, de sistemas de proteção contra descargas atmosféricas) (ABNT, 2021a, p. 25).

#### 3.5.2.1.7 Seccionamento automático da alimentação

O seccionamento automático da alimentação destina-se a evitar que uma corrente se mantenha por um tempo que possa resultar em sobreaquecimento na instalação. Esta medida de proteção requer a coordenação entre o esquema de aterramento adotado e as características dos condutores de proteção e dos dispositivos de proteção. Um dispositivo de proteção deve seccionar automaticamente a alimentação do circuito ou equipamento protegido contra contatos indiretos por este dispositivo, sempre que uma falta entre parte viva e massa no circuito ou equipamento considerado der origem a uma tensão de contato superior aos valores mencionados em 3.5.2.1.6 (ABNT, 2021a, p. 25).

#### 3.5.2.2 Proteção contra efeitos térmicos

As pessoas, os componentes fixos de uma instalação elétrica, bem como os materiais fixos adjacentes, devem ser protegidos contra os efeitos prejudiciais do calor ou

radiação térmica produzida pelos equipamentos elétricos, particularmente quanto a riscos de queimaduras, prejuízos no funcionamento seguro de componentes da instalação e combustão ou deterioração de materiais (ABNT, 2021a, p. 27).

#### 3.5.2.2.1 Proteção contra incêndio

Os componentes elétricos não devem apresentar perigo de incêndio para os materiais vizinhos. Os componentes fixos, cujas superfícies externas possam atingir temperaturas que venham a causar perigo de incêndio a materiais adjacentes, devem: ser montados sobre materiais ou contidos no interior de materiais que suportem tais temperaturas e sejam de baixa condutância térmica; ou ser separados dos elementos da construção do prédio por materiais que suportem tais temperaturas e sejam de baixa condutância térmica; ou ser montados de modo a permitir a dissipação segura do calor, a uma distância segura de qualquer material em que tais temperaturas possam ter efeitos térmicos prejudiciais, sendo que qualquer meio de suporte deve ser de baixa condutância térmica. Os componentes fixos que apresentem efeitos de focalização ou concentração de calor devem estar a uma distância suficiente de qualquer objeto fixo ou elemento do prédio, de modo a não submetê-los, em condições normais, a elevação perigosa de temperatura. Os materiais dos invólucros dispostos em torno de componentes elétricos devem suportar a maior temperatura susceptível de ser produzida pelo componente (ABNT, 2021a, p. 27).

#### 3.5.2.2.2 Proteção contra queimaduras

As partes acessíveis de equipamentos elétricos que estejam situadas na zona de alcance normal não devem atingir temperaturas que possam causar queimaduras em pessoas e devem atender aos limites de temperatura indicados na tabela 4. Todas as partes da instalação que possam, em serviço normal, atingir, ainda que por períodos curtos, temperaturas que excedam os limites dados na tabela 4, devem ser protegidas contra qualquer contato acidental (ABNT, 2021a, p. 27).

#### 3.5.2.3 Proteção contra sobrecorrentes

Todo circuito deve ser protegido por dispositivos que interrompam a corrente nesse circuito quando esta, em pelo menos um de seus condutores, ultrapassar o valor da capacidade de condução de corrente nominal. Essa interrupção deve ocorrer em caso de passagem prolongada ou curto-circuito, devendo a interrupção ocorrer num tempo suficientemente curto para evitar a deterioração da instalação (ABNT, 2021a, p. 5).

O dispositivo de proteção geral deve estar situado entre o ponto de entrega de energia e a origem da instalação em média tensão e deve atender os mínimos requisitos a depender da capacidade instalada da subestação. Em uma subestação unitária com

Tabela 4 – Temperaturas máximas das superfícies externas dos equipamentos elétricos dispostos no interior da zona de alcance normal

Tipo de superfície	$T_{\text{máx}}$ (°C)
Superfícies de alavancas, volantes ou punhos de dispositivos de controle manuais:	
metálicas	55
não-metálicas	65
Superfícies previstas para serem tocadas em serviço normal, mas não destinadas a serem mantidas à mão de forma contínua:	
metálicas	70
não-metálicas	80
Superfícies acessíveis, mas não destinadas a serem tocadas em serviço normal:	
metálicas	80
não-metálicas	90

Fonte: Adaptado de [ABNT \(2021a, p. 28\)](#).

capacidade instalada menor ou igual a 300 kVA, a proteção geral na média tensão deve ser realizada por meio de um disjuntor acionado através de relés secundários com as funções 50 e 51, fase e neutro (onde é fornecido o neutro), ou por meio de chave seccionadora e fusível, sendo que, neste caso, adicionalmente, a proteção geral deve ser realizada através de disjuntor na baixa tensão. Já em uma subestação com capacidade instalada maior que 300 kVA, a proteção geral na média tensão deve ser realizada exclusivamente por meio de um disjuntor acionado através de relés secundários com as funções 50 e 51, fase e neutro (onde é fornecido o neutro) ([ABNT, 2021a, p. 28](#)).

Os dispositivos de proteção devem ser escolhidos entre dispositivos que garantem simultaneamente a proteção contra correntes de sobrecarga e curto-circuito ou dispositivos que garantem apenas a proteção contra correntes de curto-circuito.

Se forem utilizados relés com as funções 50 e 51 do tipo microprocessado, digital, auto-alimentados ou não, deve ser garantida, na falta de energia, uma fonte de alimentação de reserva, com autonomia mínima de 2 h, que garanta a sinalização dos eventos ocorridos e o acesso à memória de registro dos relés. Os transformadores para instrumentos conectados aos relés secundários devem ser instalados sempre a montante do disjuntor ou chave a ser atuado, garantindo assim a proteção contra falhas do próprio dispositivo. Para qualquer tipo de relé, deve ser instalado um dispositivo exclusivo que garanta a energia necessária ao acionamento da bobina de abertura do disjuntor, que permita teste individual. O sistema geral de proteção da unidade consumidora deve permitir coordenação com o sistema de proteção da concessionária, ser dimensionado e ajustado de modo a permitir adequada seletividade entre os dispositivos de proteção da instalação ([ABNT, 2021a, p. 29](#)).

Já os dispositivos que garantem apenas a proteção contra correntes de curto-circuito podem ser utilizados quando a proteção contra sobrecargas for realizada por outros meios ou quando se admitir a omissão da proteção contra sobrecargas. Esses dispositivos devem poder interromper qualquer corrente de curto-circuito menor ou igual à corrente de curto-circuito presumida. Não são aceitos relés com princípio de funcionamento com retardo a líquido. Podem ser utilizados disjuntores acionados através de relés com a função 50 ou dispositivos fusíveis limitadores de corrente e do tipo expulsão para uso exclusivo em instalações externas (ABNT, 2021a, p. 29).

#### 3.5.2.4 Proteção contra sobretensões

As pessoas, os animais e os bens devem ser protegidos contra as consequências prejudiciais devidas a uma falta elétrica entre partes vivas de circuitos com tensões nominais diferentes e a outras causas que possam resultar em sobretensões (ABNT, 2021a, p. 5). O uso adequado de para-raios de resistência não linear é uma medida de proteção contra sobretensão de origem atmosférica (ABNT, 2021a, p. 29).

#### 3.5.2.5 Proteção contra mínima e máxima tensão e falta de tensão

Devem ser consideradas medidas de proteção quando uma queda de tensão significativa (ou sua falta total) e o posterior restabelecimento desta forem suscetíveis de criar perigo para pessoas e bens ou de perturbar o bom funcionamento da instalação. No caso da proteção contra quedas e faltas de tensão, normalmente são utilizados relés de subtenção acoplados a dispositivos de seccionamento. Quando aplicável, a proteção de máxima tensão deve atuar no dispositivo de seccionamento apropriado (ABNT, 2021a, p. 30).

#### 3.5.2.6 Proteção contra inversão de fase

Quando aplicável, as instalações devem ser protegidas contra inversão de fase de forma que o relé de proteção correspondente atue no dispositivo de seccionamento apropriado (ABNT, 2021a, p. 30).

#### 3.5.2.7 Proteção das pessoas que trabalham nas instalações elétricas de média tensão

As instalações elétricas devem ser construídas e instaladas de forma que possam ser empregadas as medidas necessárias para garantir a proteção das pessoas que trabalham nas instalações elétricas. Os equipamentos devem ser providos de meios que permitam, quando necessário, o seu isolamento da instalação. Além disso, equipamentos devem ser providos para que a instalação completa, ou parte dela, possa ser isolada. A instalação completa ou partes das instalações que possam ser energizadas por várias fontes devem ser dispostas de forma que todas as fontes possam ser isoladas. Se os terminais de neutro



de vários equipamentos estiverem ligados em paralelo, deve ser possível isolá-los individualmente. Devem ser providos meios para descarregar os equipamentos que ainda possam transferir potencial elétrico mesmo após a sua desconexão da instalação. Os equipamentos empregados com o propósito de isolamento devem ser providos de dispositivos elétricos e/ou mecânicos apropriados que garantam a sua condição de isolamento. Os equipamentos operados manualmente devem permitir o uso de dispositivos de travamento mecânico para evitar o seu religamento. Cada parte de uma instalação que possa ser isolada de outras partes deve possuir dispositivos que permitam o seu aterramento e curto-circuito. Para cada parte da instalação, devem ser providos pontos de conexão, facilmente acessíveis e apropriadamente dimensionados, ao sistema de aterramento e às partes vivas para permitir a conexão dos dispositivos de aterramento e curto-circuito. Os mecanismos existentes em cubículos ou compartimentos devem ser projetados de forma a permitir a conexão manual dos dispositivos de aterramento e curto-circuito (ABNT, 2021a, p. 30-31).

#### 3.5.2.8 Proteção contra fuga de líquido isolante

As instalações que contenham 100 L ou mais de líquido isolante devem ser providas de tanque de contenção. Nas instalações abrigadas, pisos impermeáveis com soleira apropriada podem ser utilizados como depósito se não mais que três transformadores ou outros equipamentos estiverem instalados e se cada um deles contiver menos de 100 L. Nas instalações ao tempo, pisos impermeáveis com soleira apropriada podem ser utilizados como depósito que não seja destinado a conter todo o líquido, mesmo sem tanques de contenção, se a superfície poluída puder ser removida e se o líquido não for destinado aos sistemas de drenagem ou córregos. Isto não se aplica a áreas de contenção, a zonas de proteção de mananciais e outros casos especiais, nos quais as autoridades competentes devem ser consultadas (ABNT, 2021a, p. 31).

#### 3.5.2.9 Proteção contra perigos resultantes de faltas por arco

Os dispositivos e equipamentos que podem gerar arcos durante a sua operação devem ser selecionados e instalados de forma a garantir a segurança das pessoas que trabalham nas instalações (ABNT, 2021a, p. 31).

### 3.5.3 Generalidades da seleção e instalação dos componentes

A NBR 14039 determina que a escolha de cada componente e sua instalação devem permitir que sejam obedecidas as medidas de proteção para garantir a segurança, as prescrições para garantir um funcionamento adequado ao uso da instalação e as prescrições apropriadas às condições de influência externas previsíveis (ABNT, 2021a, p. 32).

Os componentes devem satisfazer as normas brasileiras que lhes sejam aplicáveis e, na falta destas, as normas IEC e ISO. As condições de serviço devem ser adequadas à tensão nominal e frequência nominal da instalação e à corrente de projeto em condições normais, bem como em condições anormais, considerando a duração da passagem de uma tal corrente, em função das características de funcionamento dos dispositivos de proteção. Os componentes escolhidos segundo suas características de potência devem ser adequados às condições normais de serviço, considerando os regimes de carga que possam ocorrer. Também é necessário assegurar a compatibilidade dos componentes para evitar efeitos prejudiciais aos demais elementos do sistema e à rede de alimentação, incluindo condições de manobra. Cuidados específicos devem ser observados no caso do emprego de condutores de alumínio. Além disso, a seleção e instalação devem considerar as influências externas, sendo as características dos componentes determinadas por grau de proteção ou conformidade com ensaios (ABNT, 2021a, p. 32-33).

Os componentes, inclusive as linhas elétricas, devem ser dispostos de modo a facilitar sua operação, sua inspeção, sua manutenção e o acesso às suas conexões. Tais possibilidades não devem ser significativamente reduzidas pela montagem de equipamentos nos invólucros ou compartimentos (ABNT, 2021a, p. 38).

Devem ser utilizadas placas indicativas ou outros meios adequados de identificação para permitir a identificação da finalidade dos dispositivos de comando e proteção. Se o funcionamento de um dispositivo de comando e proteção não puder ser observado pelo operador e disso puder resultar perigo, uma placa indicativa, ou um dispositivo de sinalização, deve ser colocado em local visível ao operador (ABNT, 2021a, p. 38).

As linhas elétricas devem ser dispostas ou marcadas de modo a permitir sua identificação quando da realização de verificações, ensaios, reparos ou modificações da instalação. Quanto aos cabos, todo cabo unipolar ou veia de cabo multipolar deve ser identificado conforme sua função e esta identificação deve estar indicada nos diagramas e desenhos. Em caso de identificação por cor, na veia do cabo multipolar ou na cobertura do cabo unipolar, deve ser usada a cor azul-claro para o condutor neutro, a dupla coloração verde-amarela (cores exclusivas da função de proteção) ou somente a cor verde para o condutor PE, a cor azul-claro com identificação verde-amarela nos pontos visíveis ou acessíveis para o condutor PEN, e as cores vermelha para a fase A, branca para a fase B e marrom para a fase C para o condutor fase (ABNT, 2021a, p. 38).

Quando existirem, na mesma instalação, tensões diversas ou diferente espécies de correntes, os equipamentos e materiais dedicados a cada uma delas devem ser agrupados e separados dos outros, bem como ser facilmente identificáveis. Os dispositivos de proteção devem estar dispostos e identificados de forma que seja fácil reconhecer os respectivos circuitos protegidos. Para as chaves seccionadoras, o deslocamento mecânico vertical da alavanca ou punho de manobra para baixo deve corresponder ao equipamento desligado. Para disjuntores, os cabos ou barramentos provenientes da fonte devem estar conectados aos bornes superiores de entrada (ABNT, 2021a, p. 39).

### 3.5.4 Documentação

Todo projeto de engenharia deve possuir uma documentação apropriada. A ABNT determina que toda instalação elétrica de média tensão deve ser executada a partir de um projeto específico que deve conter, no mínimo, plantas, esquemas (unifilares e outros que se façam necessários), detalhes de montagem (quando necessários), memorial descritivo e especificação dos componentes (ABNT, 2021a, p. 39).

#### 3.5.4.1 Plantas

Consiste em desenhos técnicos detalhados que representam a disposição, dimensões e especificações dos componentes de uma construção ou sistema. Segundo Filho (2021, p. 160), os projetos de subestações devem possuir planta de situação, planta arquitetônica, planta estrutural, planta eletromecânica e detalhes de montagem.

#### 3.5.4.2 Esquema unifilar

Consiste em uma representação gráfica simplificada de um sistema elétrico que utiliza linhas simples para ilustrar o caminho da corrente elétrica e a conexão entre os componentes principais. Este tipo de diagrama facilita a visualização e o entendimento da topologia do sistema, permitindo uma análise clara e direta das interconexões e fluxos de energia, essencial para o planejamento, operação e manutenção de instalações elétricas.

#### 3.5.4.3 Memorial descritivo

É um documento técnico que detalha descritivamente as características, materiais, métodos e especificações de um projeto de engenharia ou arquitetura.

#### 3.5.4.4 Especificação dos componentes

É um documento que detalha as características técnicas dos itens utilizados em um projeto de engenharia. Na especificação técnica de qualquer equipamento é necessária a indicação das normas técnicas envolvidas na sua fabricação.



Parte III

Metodologia



## 4 REQUISITOS DE PROJETO

Este capítulo tem o objetivo de apresentar a metodologia empregada para o levantamento dos requisitos necessários ao desenvolvimento do projeto referencial da subestação, baseando-se na norma técnica de distribuição vigente no Distrito Federal.

### 4.1 Considerações iniciais

O projeto a ser desenvolvido neste trabalho se trata de um modelo genérico de subestação de consumidor, cujo objetivo é a produção de um produto BIM de referência que seja facilmente customizável para atender diferentes regiões, condições e configurações.

Para isso, o local de referência será o Distrito Federal, cuja distribuição está sob concessão da Neoenergia Brasília. Assim, a norma técnica de fornecimento de energia elétrica em tensão primária de distribuição adotada como referência é a NTD 6.05 da CEB, a qual é a norma que está em vigor durante o período de elaboração deste trabalho.

A NTD 6.05 determina um fornecimento na tensão nominal de operação de 13,8 kV para consumidores com carga instalada superior a 75 kW e demanda contratada igual ou inferior a 2500 kW (CEB, 2013, p. 20). Portanto, esse será o escopo deste trabalho.

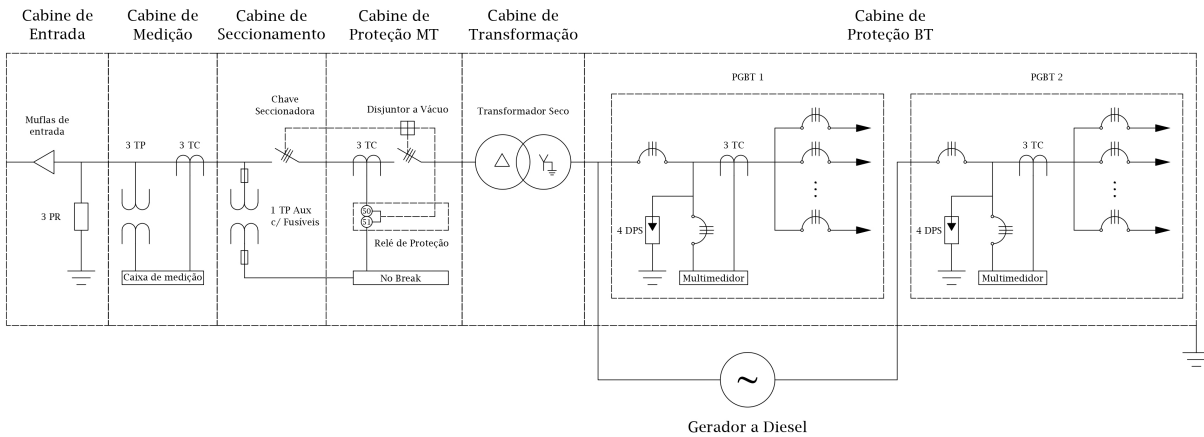
Por opção, a carga instalada a ser atendida possuirá uma potência demandada de 750 kVA. A subestação será do tipo construtivo abrigada em invólucro metálico e será instalada exposta ao tempo. O local não possui poluição significativa de nenhuma natureza e a limitação de espaço físico não será um problema a ser considerado. Logo, a subestação será de fabricação convencional, tendo como dielétrico o ar à pressão atmosférica.

Por se tratar de um modelo genérico, os requisitos de localização da subestação no interior da propriedade e os requisitos de ramal de ligação e ramal de entrada a montante das muflas de entrada da subestação não fazem parte do escopo deste trabalho.

### 4.2 Características construtivas

A subestação será constituída de cabines individuais com funções específicas. Assim, o modelo será modular, ou seja, que possibilita a reconfiguração da subestação apenas com aquilo que for desejável. Neste projeto, serão modeladas as cabines de entrada de energia, de medição em média tensão, de seccionamento, de proteção de média tensão, de transformação e de proteção de baixa tensão. A figura 12 mostra o esquema unifilar da subestação a ser desenvolvida.

Figura 12 – Diagrama unifilar de referência



Fonte: Autoria própria

Além do que for obrigatório estabelecido pela NTD 6.05, no projeto também será prevista a integração com um grupo gerador a diesel. Esse gerador de emergência deverá alimentar cargas prioritárias em caso de falta de energia. Assim, a cabine de proteção de baixa tensão será modelada com dois PGBTs, sendo um para cargas prioritárias com suporte do grupo gerador e outro para cargas não prioritárias sem o suporte do grupo gerador. Além disso, também serão previstos multimedidores de grandezas elétricas particulares, instalados um em cada PGBT.

Em relação à norma, a NTD 6.05 aborda os principais requisitos construtivos das subestações em invólucro metálico para instalação ao tempo, além da seleção e instalação dos principais equipamentos que as compõem. Quanto às características construtivas, essas podem ser categorizadas em espaçamentos, cercamento, acessos, drenagem e configuração.

Quanto a exigências de espaçamentos, deve ser mantido um espaço livre suficiente para facilitar a operação, manutenção e remoção dos equipamentos ao redor do conjunto metálico. Esse espaço livre deve ser de pelo menos 700 mm entre a extremidade das portas, quando abertas a 90°, e as paredes, ou uma faixa com largura mínima de 1000 mm para permitir a livre circulação dos operadores ao redor da subestação (CEB, 2013, p. 50).

Quanto a exigências de cercamento e acessos, a norma sugere limitar o recinto da subestação com telas metálicas ou muros de alvenaria, com altura mínima de 2000 mm. Quando usada tela como proteção externa para limitar o recinto, esta deve ter malhas de abertura máxima de 50 mm e ser constituída de aço zincado de diâmetro 3 mm, no mínimo, ou material de resistência mecânica equivalente. A parte inferior da proteção externa deve ficar no máximo 100 mm acima da superfície do solo e, se metálica, deve ser ligada ao eletrodo de aterramento. O acesso a pessoas deve ser feito por meio de porta, abrindo para fora, com dimensões mínimas de 800 mm x 2100 mm. Quando utilizada também para acesso de materiais, a porta deve ter dimensões adequadas e ser provida de fecho de segurança externo, permitindo livre abertura do lado interno. Devem ser fixadas



placas com os dizeres “Perigo de morte” e um símbolo bem visível do lado externo, em todas as faces da proteção externa e junto ao acesso (CEB, 2013, p. 51).

Quanto a exigências de drenagem, a subestação deve ser dotada de cobertura com inclinação mínima de 1% para o escoamento de águas e possuir vedação contra penetração de água. A área utilizada para sua montagem deve possuir sistema adequado de escoamento de águas pluviais e não deve estar sujeita a enxurradas. Nessa área, deve ser construída base de concreto para sustentação do conjunto, sendo que o piso acabado da faixa de circulação ao seu redor deve apresentar, a partir da base superior, uma declividade de 5% no sentido de impedir que as águas penetrem sob a subestação (CEB, 2013, p. 51).

Quanto a exigências de configuração, o conjunto metálico deve possuir cubículos separados pelo menos para circuito de entrada, medição de energia e proteção geral de média tensão. O cubículo de medição deve possibilitar a instalação dos TCs e TPs e deve ser provido de dispositivos para colocação de lacres e tubulação para interligação na caixa de medição. A medição convencional em tensão primária é obrigatória quando a potência do transformador for superior a 300 kVA. O cubículo da chave seccionadora deve estar situado antes do compartimento do disjuntor geral de média tensão (CEB, 2013, p. 50).

## 4.3 Especificações dos componentes e equipamentos

Nesta seção, serão dadas as especificações sumárias com as características mínimas dos principais componentes e equipamentos que compõem as subestações de classe de tensão 15 kV conforme determinado na NTD 6.05.

### 4.3.1 Barramento

O barramento deve ser de cobre eletrolítico para 13,8 kV. As cores devem ser vermelha para a fase A, branca para a fase B e marrom para a fase C. Os formatos podem ser barra retangular, redondo maciço (vergalhão) ou tubular (CEB, 2013, p. 64).

As dimensões mínimas do barramento devem ser as apresentadas na tabela 5.

Tabela 5 – Dimensões mínimas do barramento quanto ao formato

Potência do trafo kVA	Retangular		Redondo maciço		Tubular	
	in	mm	Diâmetro (mm)	Seção (mm <sup>2</sup> )	Diâmetro (mm)	Espessura (mm)
Até 700	1/2 x 1/8	12,70 x 3,17	5,6	25	20	2
701 a 2500	3/4 x 3/16	19,05 x 4,76	6,8	35		

Fonte: Adaptado de CEB (2013, p. 88)

### 4.3.2 Bucha de passagem

A bucha de passagem deve ser de tensão nominal de 15 kV, de corrente nominal de 100 A e de tensão suportável de impulso de 95 kV (CEB, 2013, p. 64).

### 4.3.3 Cabo de média tensão

O cabo para média tensão deve ser unipolar isolado para 8,7/15 kV, em XLPE ou EPR, com cobertura em PVC, de tensão suportável de impulso de 150 kV, de temperatura mole, de encordoamento classe 2 e de temperatura para serviço contínuo de 90 °C. O material condutor pode ser de cobre ou alumínio e o dimensionamento deve ser feito conforme as diretrizes estabelecidas na NBR 14039 (CEB, 2013, p. 66).

### 4.3.4 Cabo de baixa tensão

O cabo para baixa tensão deve ser de cobre e pode ser unipolar ou isolado. O cabo unipolar deve ser em XLPE ou EPR e classe de tensão 0,6/1 kV. Já o cabo isolado deve ser em PVC e de classe de tensão 0,75 kV (CEB, 2013, p. 65). O cabo deve ser dimensionado conforme as diretrizes estabelecidas na NBR 5410.

### 4.3.5 Chave seccionadora

A chave seccionadora deve ser tripolar, de uso interno, de comando simultâneo, acionada manualmente através de alavanca de manobra, de corrente nominal de 200 A, de classe de tensão 15 kV e de tensão suportável de impulso de 95 kV (CEB, 2013, p. 67).

### 4.3.6 Disjuntor de média tensão

O disjuntor de média tensão deve ser tripolar, de acionamento frontal, de tensão nominal de utilização 15,2 kV, de corrente nominal de 400 A, de tensão suportável de impulso de 95 kV e provido de relé secundário de sobrecorrente com dispositivo para lacre (CEB, 2013, p. 68).

### 4.3.7 Disjuntor de baixa tensão

O disjuntor de baixa tensão deve ser tripolar termomagnético, de acionamento manual frontal e de tensão nominal 660 V (CEB, 2013, p. 67).

### 4.3.8 Haste de aterramento

A haste de aterramento deve ser de aço-cobreada, de diâmetro mínimo de 15 mm, com núcleo de aço carbono ABNT 1010 a 1020 e recoberta com camada de cobre eletrolítico.

tico de alta camada com, no mínimo, 95% de pureza, espessura mínima média de 254  $\mu\text{m}$  e comprimento de 2400 mm (CEB, 2013, p. 70).

### 4.3.9 Para-raio

O para-raios deve ser de resistor não linear a óxido de zinco, sem centelhador, de invólucro polimérico, com desligador automático, de tensão nominal 12 kV, de corrente de descarga nominal 10 kA, de máxima tensão disruptiva a impulso sob onda normalizada de 70 kV, de máxima tensão residual de descarga de 54 kV e máxima tensão disruptiva à frequência industrial de 18 kV (CEB, 2013, p. 70).

### 4.3.10 Transformador de potência

O transformador de potência deve ser trifásico, de tensão nominal primária de 13,8 kV, com TAPES primários com pelo menos quatro estágios, dispondo de ligação dos enrolamentos primários em triângulo e secundários em estrela com neutro acessível e tensão suportável de impulso de 95 kV (CEB, 2013, p. 71).

## 4.4 Instalação dos componentes e equipamentos

A NTD 6.05 especifica alguns critérios que devem ser observados quanto à instalação dos equipamentos nas subestações. Entretanto, é importante observar primeiramente a proteção geral da subestação. Quando a capacidade da subestação for igual ou inferior a 300 kVA, a proteção geral pode ser realizada por chave seccionadora tripolar para abertura sob carga equipada com fusíveis limitadores de corrente. Quando a capacidade da subestação for superior a 300 kVA, a proteção geral da instalação deve ser realizada exclusivamente por meio de disjuntor (CEB, 2013, p. 35). Como a subestação do projeto modelo terá capacidade de 750 kVA, a segunda opção será adotada na modelagem.

Em relação à chave seccionadora, a subestação que utilizar disjuntor para proteção geral deve ser provida de uma chave seccionadora tripolar, com os contatos visíveis, instalada imediatamente antes do disjuntor. Neste caso, deve ser previsto o intertravamento elétrico e mecânico dos equipamentos. Se o disjuntor for do tipo extraível, a critério do projetista, a chave pode ser dispensada. A chave seccionadora deve ser dispostas de forma que, quando aberta, as partes móveis não estejam sob tensão e instalada de forma a impedir seu fechamento pela ação da gravidade. O punho de manobra da chave seccionadora deve ser instalado na altura de 1200 mm e seu deslocamento vertical para baixo deve corresponder a chave desligada (CEB, 2013, p. 33).

Em relação ao disjuntor de média tensão e seus equipamentos associados, há uma série de observações. Os cabos ou barramentos provenientes da fonte devem ser conectados

nos bornes superiores de entrada do disjuntor. O seu acionamento deve ser realizado por relés secundários dotados de unidades instantâneas (50) e temporizadas (51) de fase e de neutro. Os TPs e TCs de proteção conectados aos relés secundários devem ser instalados antes do disjuntor, porém após a chave de seccionamento que precede o disjuntor. Deve ser instalada fonte de alimentação de reserva com autonomia mínima de duas horas para garantir, na falta de energia, a sinalização dos eventos ocorridos e o acesso à memória de registro dos relés. A fonte de alimentação de reserva deve ser exclusiva para o relé e deve ser ligada através de TP auxiliar. O TP auxiliar deve ser instalado antes da chave seccionadora situada entre os cubículos de medição e de proteção e não pode ser alojado no interior do cubículo de medição. O TP auxiliar deve ser protegido por fusíveis, tanto do lado da tensão primária quanto da secundária. As partes sob tensão das buchas primárias do TP auxiliar devem se distanciar no mínimo de 1000 mm do solo (CEB, 2013, p. 34-36).

Em relação aos para-raios, esses devem ser instalados um em cada fase e devem ser localizados obedecendo os seguintes critérios: se o ramal de entrada for aéreo, devem ser instalados na estrutura de transformação quando a subestação for ao tempo e antes das buchas de passagem, na parte externa da cabine, quando a subestação for em alvenaria; se o ramal de entrada for subterrâneo, são instalados no poste de derivação, antes das muflas do cabo do ramal de entrada subterrâneo, e fica a critério do projetista a instalação de para-raios internamente à subestação. O condutor de ligação do para-raios ao eletrodo de aterramento deve ser de cobre com seção mínima de 35 mm<sup>2</sup> (CEB, 2013, p. 37-38).

Em relação a extintores de incêndio, a subestação deve ser provida com pelo menos um extintor de incêndio portátil, com capacidade mínima de 6 kg para o tipo dióxido de carbono e 4 kg para o tipo pó químico seco, próprios para uso em fogos das classes B e C. O extintor deve ser posicionado em local abrigado, próximo à porta de entrada da subestação, pelo lado externo, e fixado na parede a uma altura inferior a 1600 mm. O local destinado ao extintor deve ser assinalado por um círculo vermelho ou por uma seta larga, vermelha, com bordas amarelas, conforme a NR 23. Deve ser pintada de vermelho uma área do piso embaixo do extintor, a qual não poderá ser obstruída de forma alguma. Essa área deve ser no mínimo de 1000 mm x 1000 mm (CEB, 2013, p. 38-39).

Em relação ao eletrodo de aterramento, esse deve circundar todo o perímetro da subestação, formando assim uma malha enterrada a uma profundidade mínima de 500 mm a partir do nível da terraplenagem. Os equipamentos da subestação de entrada de energia devem estar sobre a área ocupada pelo eletrodo de aterramento. A área ocupada pelo eletrodo de aterramento pode exceder os limites físicos da subestação para abranger o espaço utilizado pelo operador para o acionamento de equipamentos de manobra e proteção. A distância mínima entre as hastes de aterramento deve corresponder ao comprimento efetivo de uma haste. A interligação entre as hastes de aterramento deve ser feita com cabo de cobre nu, meio duro, com seção mínima de 50 mm<sup>2</sup> (CEB, 2013, p. 39-40).

Em relação ao condutor de proteção, esse deve ser constituído por cabo de cobre nu e deve efetuar a equipotencialização dos seguintes componentes da subestação: estruturas metálicas em geral, tais como suportes das chaves seccionadoras, suportes dos isoladores de apoio, suportes dos transformadores de medição, chapas de passagem, telas de proteção, portas, etc.; caixas de medição; carcaças de equipamentos, tais como TP, TC, disjuntores, transformadores de potência, etc.; blindagem de condutores; cada um dos cubículos em invólucros metálicos, mesmo que estejam acoplados. A seção mínima do condutor de proteção destes componentes é de  $16 \text{ mm}^2$  (CEB, 2013, p. 41).

Em relação à cabine de medição, o medidor deve ser de três elementos, exigindo, portanto, na medição indireta, a instalação de três TPs e três TCs de medição. Os TPs devem ser ligados antes dos TCs, no sentido fonte-carga, devendo ser fixados em suportes apropriados. Deve ser previsto um ponto exposto do eletrodo de aterramento localizado o mais próximo possível onde serão instalados os TPs e TCs de medição, para que os enrolamentos secundários desses transformadores sejam aterrados nesse único ponto. A face superior das caixas de medição deve ser posicionada a uma altura de  $1600 \pm 50 \text{ mm}$  em relação ao piso acabado. A caixa de medição deve ser instalada externamente à subestação, nas suas paredes. Entretanto, para subestação blindada, a caixa de medição pode ser instalada no seu corpo, em cubículo específico (CEB, 2013, p. 52-53).



# 5 MODELAGEM

Este capítulo tem o objetivo apresentar a metodologia empregada na modelagem do projeto referencial da subestação, realizada no *software* Revit 2024.

## 5.1 Criação de famílias

Foi utilizada a versão estudantil do *software* Revit 2024 para o desenvolvimento deste projeto. Tal escolha foi tomada pelo fato de o programa ser o mais popular no campo BIM e possuir uma vasta quantidade de conteúdo educativo gratuito disponível na internet, além de ter licença gratuita para estudantes durante 1 ano. Outro ponto importante é que esse *software*, inclusive na versão de estudante, dispõe de todas as ferramentas necessárias para o completo desenvolvimento do projeto, de modo que não é necessária a utilização de outros programas para suprir restrições ou limitações.

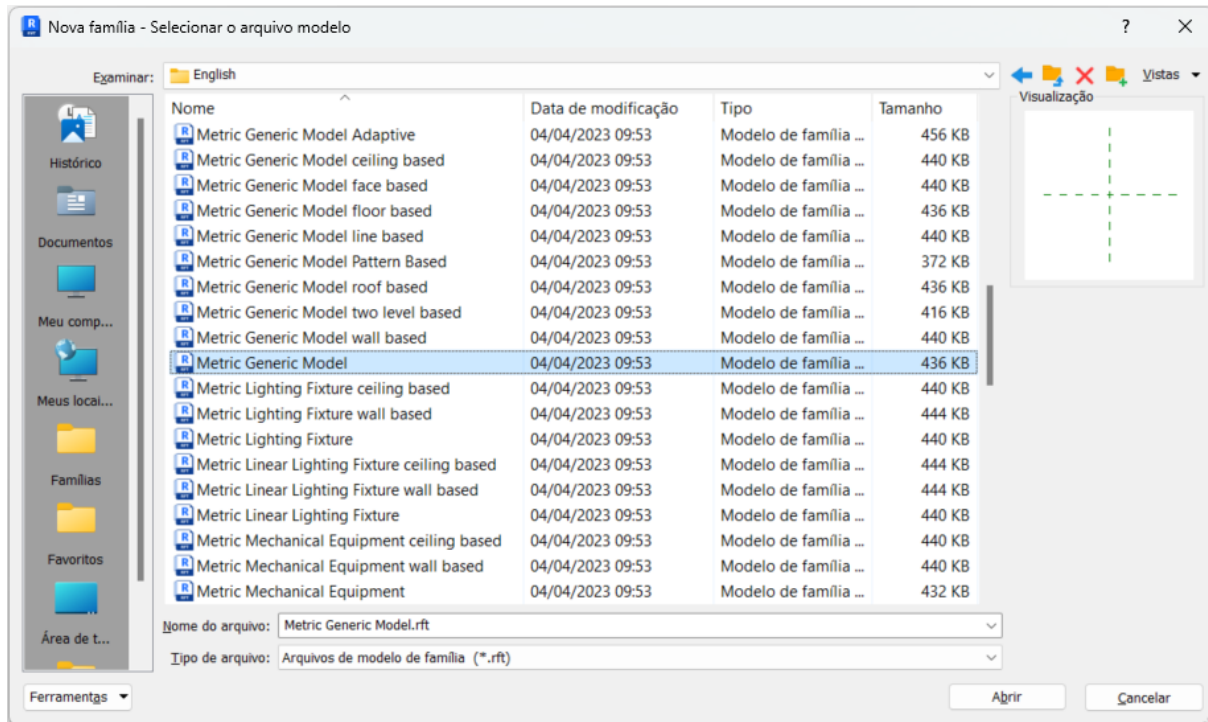
Entretanto, apesar de ser um programa poderoso para a elaboração de projetos de edificações e afins, a sua utilização não é trivial e requer empenho no aprendizado. O programa oferece uma vasta gama de funcionalidades, permitindo aos projetistas uma ampla liberdade criativa em seus trabalhos. Essa característica é vantajosa, porém pode tornar as fases iniciais de sua utilização particularmente desafiadoras, especialmente quando ainda não se tem familiaridade com os recursos disponíveis. Diante disso, é importante conhecer inicialmente os conceitos básicos de criação de famílias e o uso das principais ferramentas a serem utilizadas para as suas criações.

Netto (2020, p. 42) afirma que os objetos do Revit são definidos como elementos e todos eles pertencem a uma família, as quais reúnem objetos do mesmo tipo que compartilham os mesmos parâmetros e comportamentos. Por exemplo, uma família de minidisjuntores que possuem a mesma geometria, mas características elétricas diferentes. Nesse caso, todas as variantes pertencem a uma família, mas no projeto só é utilizada a que for desejável. Assim, o que difere os elementos que constituem uma família são os valores atribuídos a seus parâmetros específicos. Esses parâmetros podem ser de várias naturezas, como comprimento, ângulo, potência, material, texto, etc. No exemplo anterior, um parâmetro de texto pode ser utilizado para diferenciar a descrição dos minidisjuntores idênticos em aparência. Em outro exemplo, é possível criar uma família de portas que compartilham o mesmo *design*, variando apenas as suas dimensões de altura e largura por meio de parâmetros de comprimento. Esse é o conceito básico de famílias parametrizadas.

Neste trabalho, quase todas as famílias foram modeladas a partir do arquivo modelo *Metric Generic Model*, mostrado na figura 13. Esse modelo não possui e nem exige

praticamente nenhuma configuração inicial, sendo vantajoso para modelar quase qualquer elemento do zero. Contudo, é importante ajustar as unidades de projeto, a categoria da família e definir o número *OmniClass* mais adequado antes de iniciar a modelagem.

Figura 13 – Arquivo modelo para criação de famílias



Fonte: Autoria própria

A criação dos objetos é baseada basicamente em extrusões e formas de vazio, que são ferramentas que operam sobre um conceito similar, mas com resultados opostos. Enquanto a extrusão adiciona volume a um desenho, a forma de vazio remove volume de um objeto já existente. Ao desenhar a forma de base em uma vista de planta ou de elevação, essa forma é estendida ao longo de uma trajetória reta para criar um objeto 3D, o qual pode ser utilizado para adicionar ou retirar material. Portanto, o uso inteligente dessas ferramentas permite a criação de geometrias complexas com relativa facilidade.

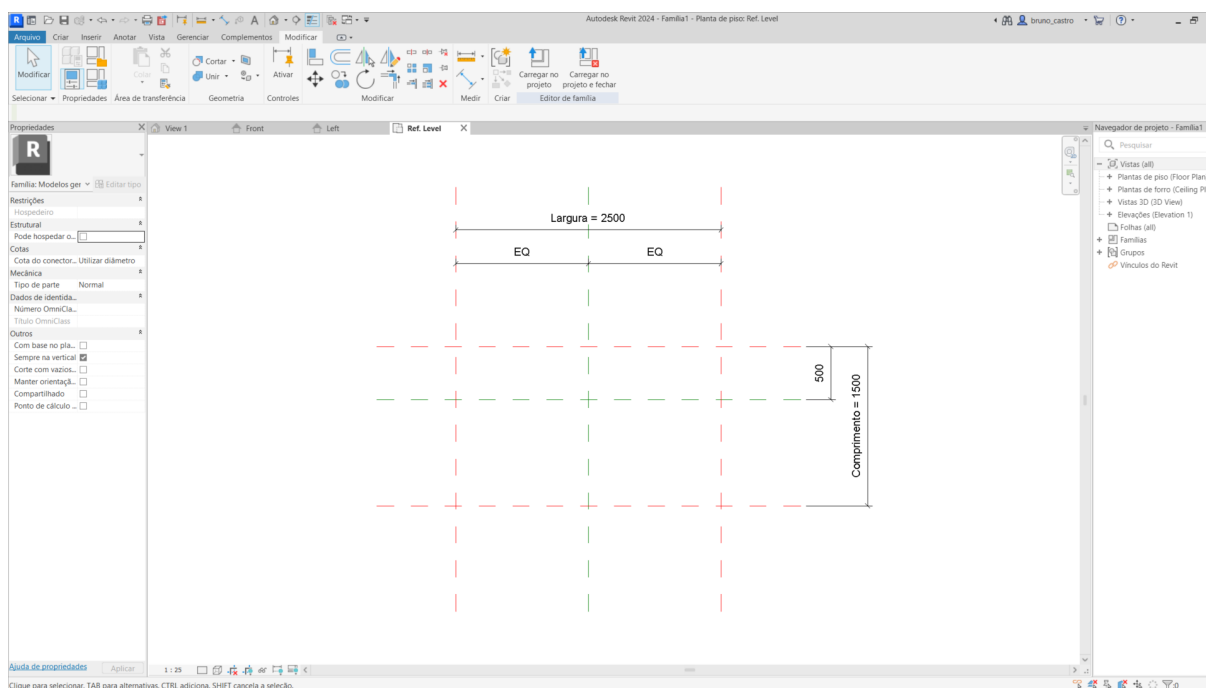
Outra ferramenta fundamental para a criação de famílias são os planos de referência. Eles funcionam como guias para a manipulação da geometria dos objetos, servindo como base para o alinhamento, dimensionamento e estabelecimento de relações paramétricas entre os diferentes elementos de um modelo. Ao definir dimensões e restrições vinculadas a esses planos, é possível garantir o ajuste automático da família ao modificar a posição de um plano de referência em relação a outro. Para isso, ao criar uma nova família, há por padrão três planos de referência fixos que definem a origem e a partir deles é possível adicionar quantos planos forem necessários e configurar relações entre eles.

Para criar relações entre os planos, é necessário adicionar cotas entre eles e atribuir um parâmetro a essa cota se for desejada a sua variação, ou restringir o valor da cota



para fixar a sua medida. Na figura 14, as linhas centrais tracejadas na cor verde são os planos de referência padrão do modelo (primários) e que definem a origem na planta de piso, já as linhas adjacentes tracejadas na cor vermelha são os planos de referência adicionados manualmente (secundários). Entre os planos secundários, foram estabelecidos parâmetros de largura e comprimento. Entre os planos secundários que definem a largura, foi estabelecida uma relação de simetria na qual o plano primário foi definido como o eixo de simetria. Entre os planos secundários que definem o comprimento, foi restringida uma cota de 500 mm entre um dos planos e o plano central.

Figura 14 – Utilização de planos de referência para criação de famílias

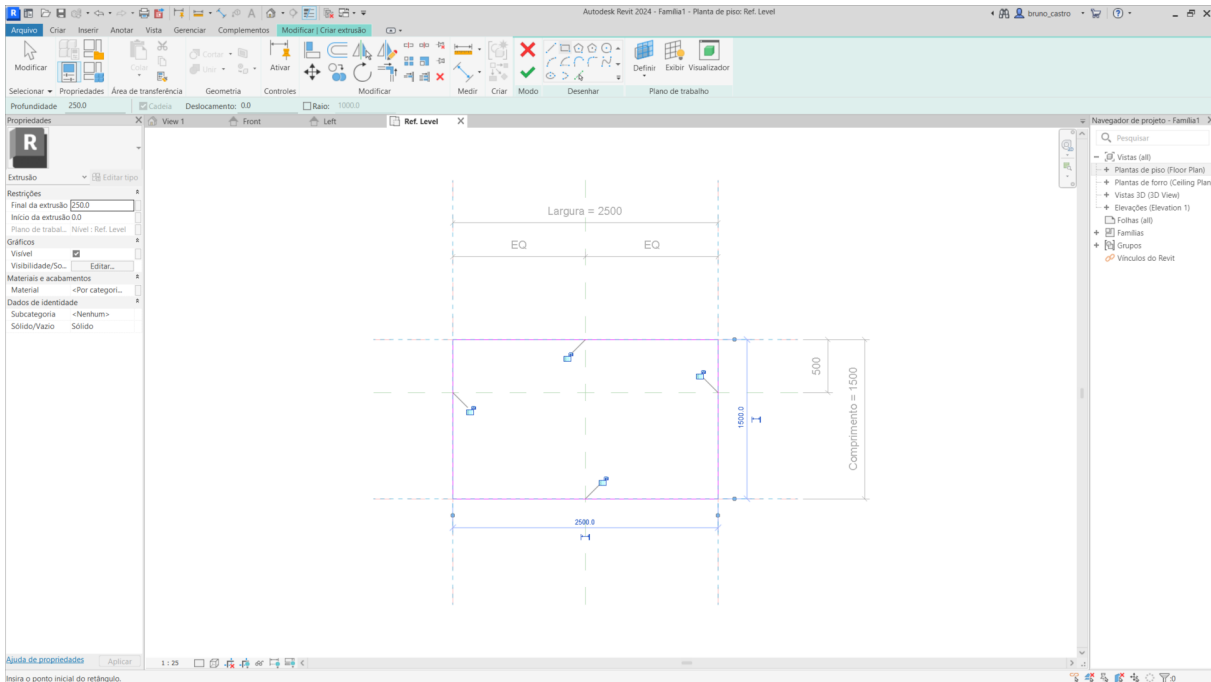


Fonte: Autoria própria

No exemplo da figura 14, as restrições de simetria da largura e a distância de 500 mm entre o plano superior e o plano primário são mantidas ao alterar os valores dos parâmetros de largura e comprimento para quaisquer que sejam.

Para vincular uma extrusão ou forma de vazio aos planos de referência e tornar o objeto parametrizado, é necessário alinhar as arestas do desenho aos planos ou definir uma distância fixa deles. A figura 15 mostra o momento que um retângulo é desenhado sobre os planos de referência. Os cadeados abertos indicam que as arestas não estão restritas aos respectivos planos. Ao clicar em cada cadeado, eles são trancados e passam a indicar que as arestas estão vinculadas aos respectivos planos. Assim, quando os valores dos parâmetros são alterados, as arestas do desenho acompanham essas alterações, modificando a geometria do objeto. A mesma ideia pode ser utilizada para parametrizar a altura da extrusão. Um plano de referência pode ser adicionado em uma das vistas de elevação e ser utilizado para vincular o início ou o fim da extrusão.

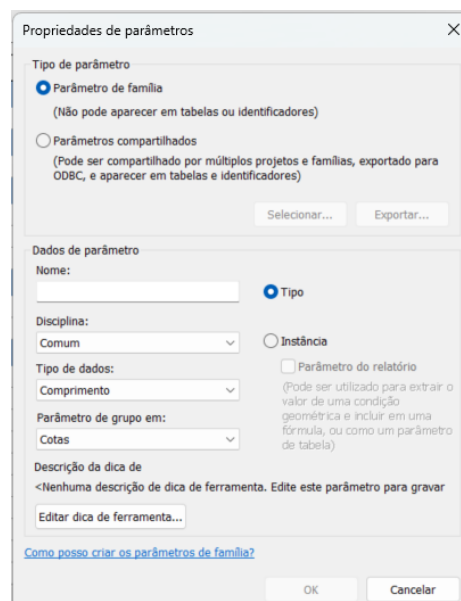
Figura 15 – Restrição de formas em planos de referência



Fonte: Autoria própria

Com a modelagem da geometria do objeto finalizada, o próximo passo é definir os materiais que constituem os elementos do modelo. Muitas vezes essa informação de material não é relevante, mas é uma boa prática fazer essa definição para dar uma aparência mais realista ao objeto e não deixá-lo com uma tonalidade padrão de cinza opaco. Por outro lado, se a informação de material for relevante, é possível criar um parâmetro de material e alterar o tipo de material dos elementos da família de acordo com a necessidade.

Figura 16 – Caixa de propriedades de parâmetros



Fonte: Autoria própria

A última tarefa essencial a ser feita é adicionar as informações da família. Essas informações são particulares de cada modelo e cabe ao projetista filtrar o que for relevante. Todas as informações são adicionadas em parâmetros. Os parâmetros são organizados em disciplinas, cada uma dispondo de tipos de dados específicos. Além disso, os parâmetros são classificados como de família ou compartilhados. Os parâmetros de família são criados e definidos dentro de uma família específica no Revit, enquanto os parâmetros compartilhados são definidos em um arquivo de texto externo e podem ser usados em múltiplas famílias e projetos, facilitando a padronização e a consistência dos dados. Contudo, a maior diferença entre esses tipos é a extração das informações para tabelas ou identificadores, uma vez que os parâmetros de família não permitem essa extração. Por fim, os parâmetros podem ser de tipo ou de instância. Ao serem alterados, os parâmetros de tipo afetam todos os elementos da família no projeto, enquanto os parâmetros de instância alteram apenas o elemento selecionado.

A figura 16 mostra a caixa de propriedades do parâmetro, já a figura 17 mostra a caixa de propriedades da família, onde é possível fazer a criação e a edição das propriedades e dos valores de cada parâmetro. Os parâmetros que possuem “padrão” entre parênteses ao lado do nome são os parâmetros de instância. Nesse exemplo, cada objeto dessa família carregado no projeto terá o comprimento, a largura e o material independentes entre si, mas a altura será comum para todos por se tratar de um parâmetro de tipo.

Figura 17 – Caixa de propriedades da família

Parâmetro	Valor	Fórmula	Bloquear
<b>Restrições</b>			
Elevação padrão	0.0	=	<input type="checkbox"/>
<b>Materiais e acabamentos</b>			
Material (padrão)	Ouro	=	
<b>Cotas</b>			
Altura	1000.0	=	<input type="checkbox"/>
Comprimento (padrão)	1500.0	=	<input type="checkbox"/>
Largura (padrão)	2500.0	=	<input type="checkbox"/>
<b>Parâmetros IFC</b>			
Tipo IFC predefinido [Tipo]		=	
Exportar tipo para IFC como		=	
<b>Dados de identidade</b>			
Tipo de imagem		=	
Nota-chave		=	
Modelo		=	
Fabricante		=	
Comentários de tipos		=	
URL		=	
Descrição		=	
Código de montagem		=	
Custo		=	

Fonte: Autoria própria

## 5.2 Posicionamento das famílias

Criadas todas as famílias de componentes necessárias, a próxima etapa é iniciar um novo projeto. O arquivo modelo utilizado foi o de arquitetura. Ao iniciar um novo projeto, é importante configurar, assim como na criação de famílias, as unidades de projeto, bem como os níveis em alguma vista de elevação.

É importante mencionar que as famílias se dividem em três categorias principais: famílias de sistema, famílias carregáveis e famílias no local. Famílias de sistema criam elementos básicos que serão montados em um terreno de construção, como paredes, telhados, pisos, dutos e encanamentos. Essas famílias são predefinidas no Revit e não podem ser salvas ou carregadas a partir de arquivos externos. Famílias carregáveis são utilizadas para criar componentes de construção que são normalmente adquiridos, entregues e instalados, como janelas, portas, mobiliário e acessórios. Essas famílias são altamente personalizáveis e são criadas em arquivos externos que podem ser importados para os projetos. Famílias no local são elementos únicos criados especificamente para um projeto atual, permitindo a criação de geometria personalizada que se ajusta à geometria do projeto existente.

Para o projeto deste trabalho, todas as famílias, com exceção do piso e do alambrado, são do tipo carregável, pois foram criadas externamente ao ambiente do arquivo de projeto. Portanto, é necessário carregar as famílias de todos os componentes que serão utilizados no projeto. O próximo passo é o posicionamento. Esse processo começa com a inserção das famílias no ambiente do projeto principal. É importante que esse processo comece sempre com as cabines, que servirão de abrigo para os demais equipamentos. A localização e os parâmetros de instância devem ser ajustados previamente para se adequar à utilização. Em seguida, é interessante posicionar primeiro os componentes principais, como transformadores e disjuntores, de acordo com o *layout* planejado.

O Revit dispõe de várias ferramentas para ajustar o posicionamento dos elementos, como o mover, o alinhar e o rotacionar. A função de alinhamento é especialmente útil quando se trabalha com múltiplos elementos que precisam estar alinhados entre si ou com elementos existentes no projeto. Ao utilizar essa função, é possível selecionar os elementos que deseja alinhar e escolher um ponto de referência, como uma aresta, um vértice ou até mesmo os planos de referência contidos em cada família. O uso de referências e restrições é fundamental para manter alinhamentos e distâncias consistentes entre os componentes, garantindo que os componentes fiquem no lugar certo mesmo após grandes alterações.

Feito isso, são posicionadas os demais componentes secundários e, após finalizada essa etapa, é feito o ajuste fino em todo o projeto. É essencial realizar verificações para garantir que o projeto esteja de acordo com as especificações e normas técnicas. Identificar e corrigir interferências entre componentes, revisar as conectividades elétricas e validar os parâmetros das famílias são fundamentais para assegurar a qualidade do projeto.

## Parte IV

### Resultados e Conclusão



## 6 Resultados

Este capítulo tem o objetivo de descrever a aplicação da metodologia empregada e apresentar os resultados do projeto desenvolvido.

### 6.1 Modelagem dos componentes e equipamentos

Todos os componentes e equipamentos modelados neste projeto seguiram a metodologia dos princípios fundamentais descrita na seção 5.1. Em alguns deles foram utilizadas outras ferramentas, como mesclar e revolver, para executar tarefas específicas que não são atendidas apenas com o uso de extrusões e formas de vazio, mas seus princípios de funcionamento não diferem muito do que já foi apresentado.

Vale mencionar que nem todas as famílias precisaram ser modeladas, pois é possível encontrar diversas famílias disponíveis para *download* gratuito na internet. Por exemplo, a família do transformador de potência do modelo Geafol da Siemens foi baixada e utilizada neste projeto. Além disso, é possível importar modelos 3D de outros *softwares* com a extensão de arquivo *.step* para uso no Revit. No entanto, esses objetos importados são apenas modelos 3D, sem qualquer parametrização ou informação contida neles.

Tabela 6 – Famílias utilizadas no projeto da subestação

<b>Família</b>	<b>Fabricante</b>	<b>Série</b>	<b>Origem</b>
Bucha de passagem	Aliem	BDP	Manual
Chave seccionadora	Rehtom	RSS	Manual
Conector a pressão	Conimel	TCC	Manual
Disjuntor de baixa tensão	ABB	Tmax T8	Manual
Disjuntor de baixa tensão	ABB	Formula	Manual
Disjuntor de média tensão	ABB	VD4	Manual
Haste de aterramento	Intelli	IH	Manual
Isolador de baixa tensão	Aliem	BTP	Manual
Isolador de média tensão	Aliem	MTS	Manual
Nobreak	Intelbras	ATTIV	Manual
Relé de proteção	Pextron	URP/URPE	Manual
Para-raio	Maurizio	MPD	Manual
Transformador de corrente	Balteau	SC	Manual
Transformador de potencial	Balteau	VFI	Manual
Transformador de potência	Siemens	Geafol	<i>Download</i>

Fonte: Autoria própria

A estratégia da importação não foi utilizada e todas as famílias foram modeladas dentro do próprio Revit com base em produtos comercializados no Brasil. A pesquisa foi feita em catálogos de fabricantes que oferecem desenhos técnicos contendo as principais dimensões dos equipamentos e suas características elétricas. Dessa forma, a volumetria de todas as famílias corresponde fielmente aos modelos reais, apesar de ter sido necessário usar a liberdade criativa para completar os desenhos em alguns casos. A tabela 6 mostra todas as famílias de componentes e equipamentos utilizadas no projeto.

Nota-se que a tabela 6 informa a série, ou seja, as linhas de produtos que foram modeladas. Como os *templates* de projetos BIM devem ser versáteis, não faz sentido produzir apenas um modelo muito específico, mas a família que corresponde uma série de produtos para atender diferentes necessidades. Baseado nisso, foram adicionados diferentes modelos em cada família, como exemplificado na figura 18, que mostra as diferentes opções que podem ser escolhidas para o disjuntor de média tensão.

Figura 18 – Opções de modelos do disjuntor de média tensão

Tipos de famílias

Digite o nome: VD4 17.06.32 p210

Parâmetros de: VD4 17.06.16 p210  
VD4 17.06.20 p210  
VD4 17.06.25 p210  
VD4 17.06.32 p210  
VD4 17.12.16 p210  
VD4 17.12.20 p210  
VD4 17.12.25 p210  
VD4 17.12.32 p210  
VD4 17.12.40 p210  
VD4 17.16.20 p210  
VD4 17.16.25 p210  
VD4 17.16.32 p210  
VD4 17.16.40 p210  
VD4 17.20.20 p210  
VD4 17.20.25 p210  
VD4 17.20.32 p210  
VD4 17.20.40 p210

Parâmetros	VD4 17.06.32 p210		
Exportar tipo	VD4 17.16.40 p210		
Tipo IFC pred	VD4 17.20.20 p210		
Dados	VD4 17.20.25 p210		
	VD4 17.20.32 p210		
	VD4 17.20.40 p210		
_Tensão nominal	11,2 kV	=	11,2 kV
_Tensão suportável de impulso	95,00 kV	=	95 kV
_Corrente nominal	0,63 kA	=	
_Corrente de curto-circuito	31,50 kA	=	
_Frequência nominal	60,00 Hz	=	60 Hz
<b>Dados de identidade</b>			
_Descrição	Disjuntor de média tensão a vácuo	=	"Disjuntor de média tensão a vácuo"
_Fabricante	ABB	=	"ABB"
_Modelo	VD4 17.06.32 p210	=	
Comentários de tipos		=	
Custo		=	
Código de montagem		=	
Descrição	IEC indoor vacuum circuit breaker VD4	=	"IEC indoor vacuum circuit breaker VD4"
Fabricante	ABB	=	"ABB"
Modelo	VD4 17.06.32 p210	=	
Nota-chave		=	
Tipo de imagem	<Nenhum>	=	
URL	https://new.abb.com/medium-voltage/apparatus/cir	=	

Gerenciar tabelas de pesquisa...

Como posso gerenciar meus tipos de família?

OK Cancelar Aplicar

Fonte: Autoria própria

Na figura 18 também é possível visualizar alguns parâmetros de dados elétricos julgados relevantes para compor a família e diferenciar os tipos, assim como os quatro parâmetros de dados de identidade mais importantes que foram utilizados em todas as famílias: descrição, fabricante, modelo e URL. Os três primeiros dados são suficientes para

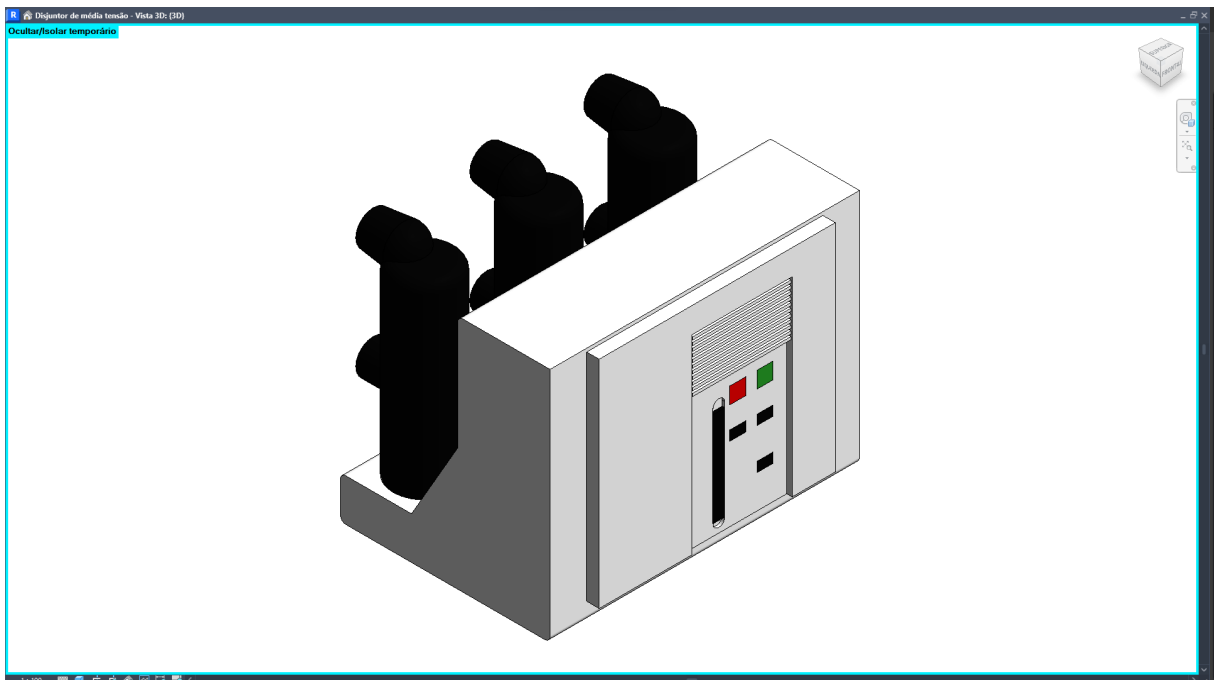


caracterizar qualquer produto que existe, enquanto o URL foi utilizado para direcionar o usuário ao site oficial do fabricante para acesso mais detalhado às suas informações.

É possível notar também uma duplicidade de parâmetros. Os parâmetros iniciados com *underline* são parâmetros compartilhados, ou seja, cujas informações podem ser extraídas em tabelas de quantitativo e afins, enquanto os parâmetros que não iniciam com *underline* são parâmetros de família. Toda família do Revit é criada com alguns parâmetros predefinidos que não podem ser removidos, como é o caso dos parâmetros de dados de identidade. Portanto, não é possível evitar essa duplicidade.

A figura 19 mostra o disjuntor selecionado na figura 18.

Figura 19 – Modelo de disjuntor de média tensão



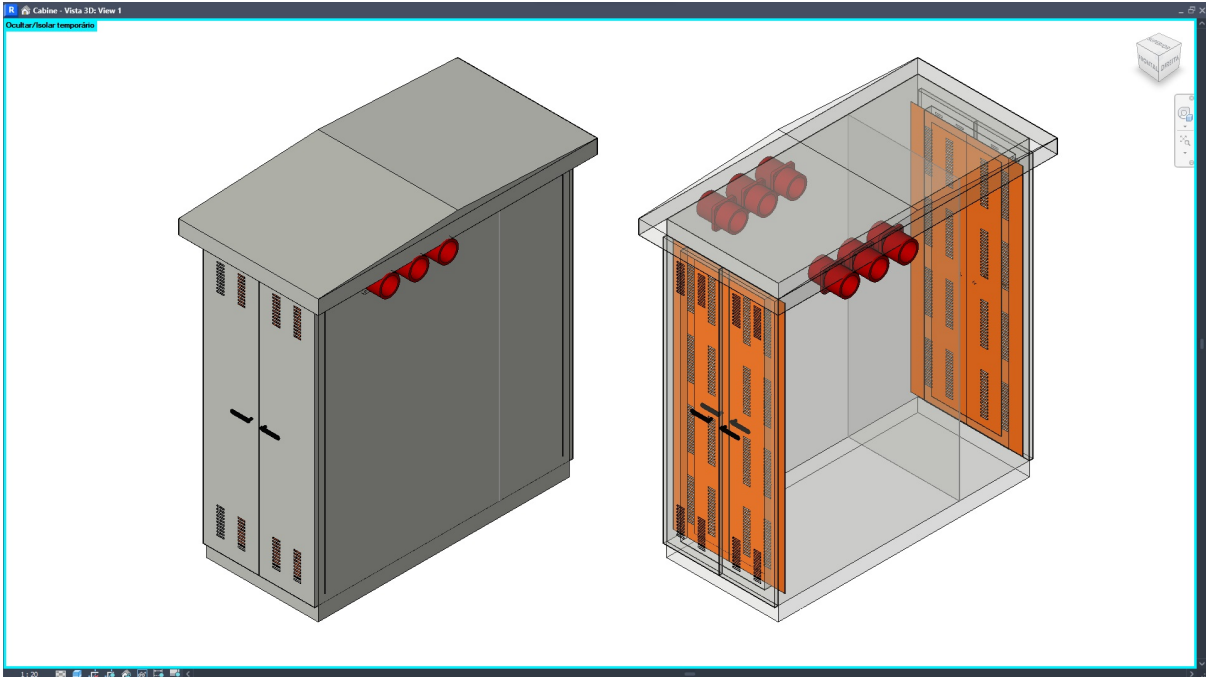
Fonte: Autoria própria

## 6.2 Modelagem das cabines

Como o objetivo deste trabalho é fazer um projeto genérico que seja facilmente customizável para atender diversas necessidades, houve bastante esforço na modelagem das cabines. Diante disso, foi criado um modelo genérico de cabine altamente parametrizável. Esse modelo é autoral, mas foi baseado em diversos fabricantes de subestações blindadas, tais como Romagnole, VR Painéis e Gazquez Painéis Elétricos. A figura 20 mostra a cabine desenvolvida.

O modelo é constituído de paredes de aço galvanizado com espessura de 2 mm, com aberturas nas faces frontal e posterior, e dois conjuntos de portas em cada abertura.

Figura 20 – Visão isométrica do modelo genérico da cabine



Fonte: Autoria própria

Porém, é possível desabilitar a abertura indesejada caso o projetista deseje apenas uma abertura. Por padrão, foram adicionadas buchas de passagem de média tensão do tipo interno-interno em ambas as paredes laterais para integração com cabines adjacentes, mas também é possível desabilitar qualquer uma que não seja desejada, inclusive as duas. Além disso, a distância entre as buchas e a distância entre a bucha e a parede mais próxima podem ser ajustadas, bem como a altura das buchas de cada lado. Uma parede interna foi prevista para dividir o interior da cabine em duas partes, caso necessário; caso contrário, ela pode ser desabilitada. O posicionamento dessa parede também pode ser ajustado, ampliando um espaço interno ao passo que o outro diminui.

As portas externas e internas, assim como as buchas de passagem, são famílias carregadas e possuem parâmetros de visibilidade. Isso permite ocultar as portas e permitir a visualização dos componentes internos. Alternativamente, uma funcionalidade interessante do Revit é a possibilidade de alterar a transparência dos materiais justamente para possibilitar a visão do interior da cabine. A figura 20 mostra a mesma cabine com o material das paredes configurado com percentuais de transparência distintos.

Em relação às dimensões, é possível alterar a altura, largura, comprimento, altura da base e rebaixar o teto mantendo a altura da cabine. A cobertura pode ser ocultada, e seus parâmetros de inclinação e prolongamento além das paredes externas podem ser ajustados. Por padrão, a cobertura tem inclinação de 3° (equivalente a 5,24%) e se estende além das paredes externas por 100 mm. Para evitar sobreposição com cabines adjacentes, é possível cancelar o prolongamento da cobertura para a direita e/ou para a esquerda.

Por fim, a altura e a largura das portas devem ser ajustadas manualmente para maior precisão do projetista, mas elas sempre estarão centralizadas nas paredes.

Todas as customizações foram implementadas em parâmetros de instância, ou seja, cada cabine pode ser modificada no projeto sem afetar outras cabines já existentes.

## 6.3 Modelagem dos demais elementos

Alguns elementos exigiram uma modelagem particularmente especial, como foi o caso do alambrado e dos barramentos, que foram modelados como família de sistema. Para a modelagem do alambrado, foi necessário criar uma textura específica com espaços vazios para representar sua malha de arame. Além disso, ele foi modelado como um guarda-corpo, que possui a característica de fazer o lançamento automático dos postes tubulares e o espaçamento uniforme entre eles, respeitando uma distância máxima predefinida.

Quanto ao tipo de barramento, foi adotado o vergalhão, que é o tipo redondo maciço apresentado na tabela 5. A modelagem do vergalhão, assim como da cordoalha de aterramento, foi feita a partir da configuração de um novo tipo de conduíte. Essa estratégia foi adotada porque facilita o lançamento desses elementos, bem como a quantificação em listas de materiais ou tabelas. Para o vergalhão, também foi necessário modelar famílias de conectores concêntricos a pressão para permitir suas curvas ortogonais e derivações. O uso de conduíte nessa aplicação permite o lançamento automático dos conectores sempre que é feita uma curva de 90° em qualquer direção.

Outras famílias menos significativas também foram modeladas, mas que contribuem para a composição geral do projeto, tais como o balde de aterramento, o suporte que abriga o disjuntor de média tensão e seus acessórios, o quadro metálico para circuitos auxiliares, a chapa metálica onde são construídos os quadros e painéis de baixa tensão etc. Esses modelos são mais genéricos e não foram retirados de nenhum catálogo específico.

## 6.4 Construção da subestação

A configuração da subestação segue o esquema da figura 12 e respeita os requisitos apresentados no capítulo 4. O posicionamento dos elementos seguiu a metodologia descrita na seção 5.2, sendo primeiramente definido o nível de implantação 100 mm acima do nível do terreno e adicionado um piso estrutural genérico para servir de base para a subestação.

As cabines foram inseridas logo na sequência. Ao todo, são seis cabines com as seguintes propriedades compartilhadas: 2,10 m de altura, 1,80 m de comprimento, piso interno da cabine 100 mm acima do nível da implantação, teto sem rebaixamento, distanciamento das fases de 250 mm (centro a centro), distância entre fase (centro) e parede mais próxima de 400 mm, inclinação da cobertura de 3°, prolongamento da cobertura

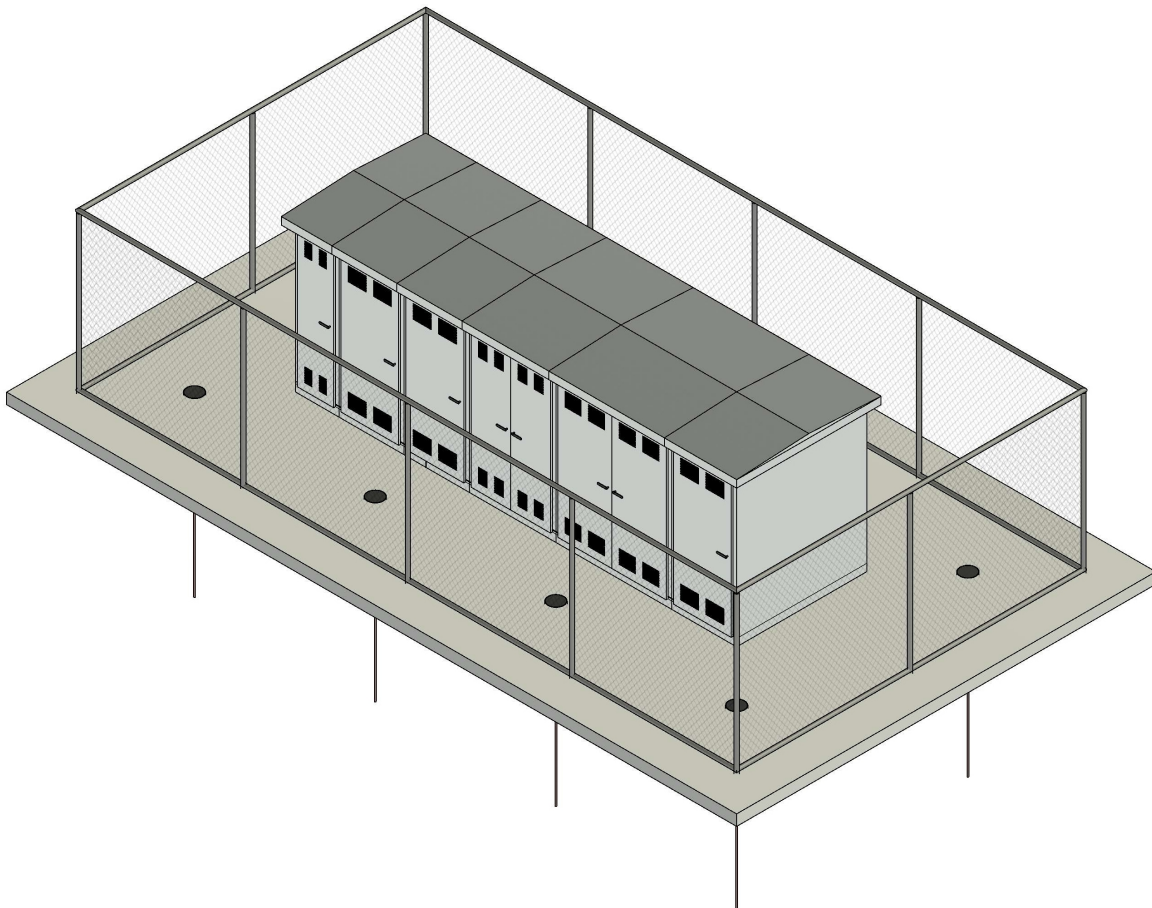
além das paredes externas de 100 mm e altura das portas de 1,80 m. As demais propriedades são variáveis de cada cabine, como largura, adição ou não de divisória interna e altura das buchas de passagem. As cabines com divisória interna seguiram o padrão de recuo de 500 mm da parede mais próxima. A largura das portas seguiu o padrão de ser 200 mm menor que largura da respectiva cabine.

O espaço livre entre as paredes da subestação e a proteção externa é de 1,50 m em todas as faces. A proteção externa é feita com tela aramada de malha de abertura de 2" (50,8 mm), fio galvanizado BWG 10 (3,4 mm) e postes tubulares de 2" de diâmetro com altura de 2,20 m distanciados, no máximo, de 2,50 m.

O aterramento é constituído por oito hastes de núcleo em aço-carbono com revestimento de cobre eletrolítico, de 2,40 m de comprimento, que circundam a subestação formando um anel. As hastes das extremidades estão distanciadas 0,70 m ortogonalmente das paredes da subestação e as demais estão igualmente espaçadas. A malha de aterramento é constituída de cabo de cobre nu de 50 mm<sup>2</sup> enterrados a 0,50 m de profundidade, interligando as hastes, o alambrado, a subestação e seus componentes metálicos.

A figura 21 mostra a parte externa da subestação.

Figura 21 – Vista isométrica da subestação

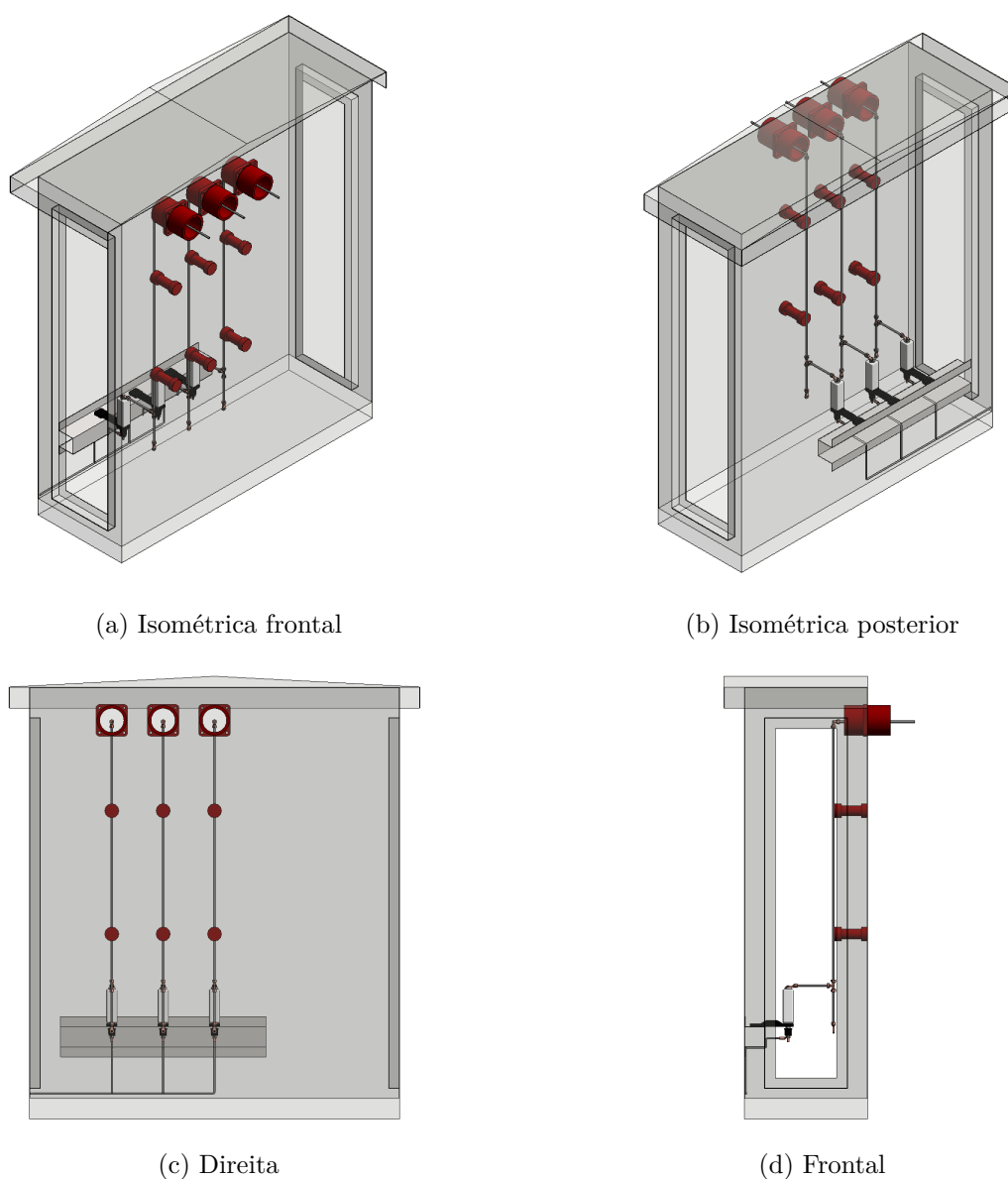


Fonte: Autoria própria

## 6.5 Cabine de entrada de energia

A cabine de entrada de energia, mostrada na figura 22, possui 0,60 m de largura e é composta basicamente pelos para-raios. Estes estão instalados sobre uma ripa metálica, a uma altura de 350 mm da base do para-raio até o piso da cabine. Os terminais primários estão conectados aos barramentos e os secundários estão ligados ao eletrodo de aterramento. No início de cada barramento, há um terminal central reto para a conexão das mufas. Cada barramento está fixado sobre dois isoladores de 160 mm.

Figura 22 – Vistas da cabine de entrada de energia

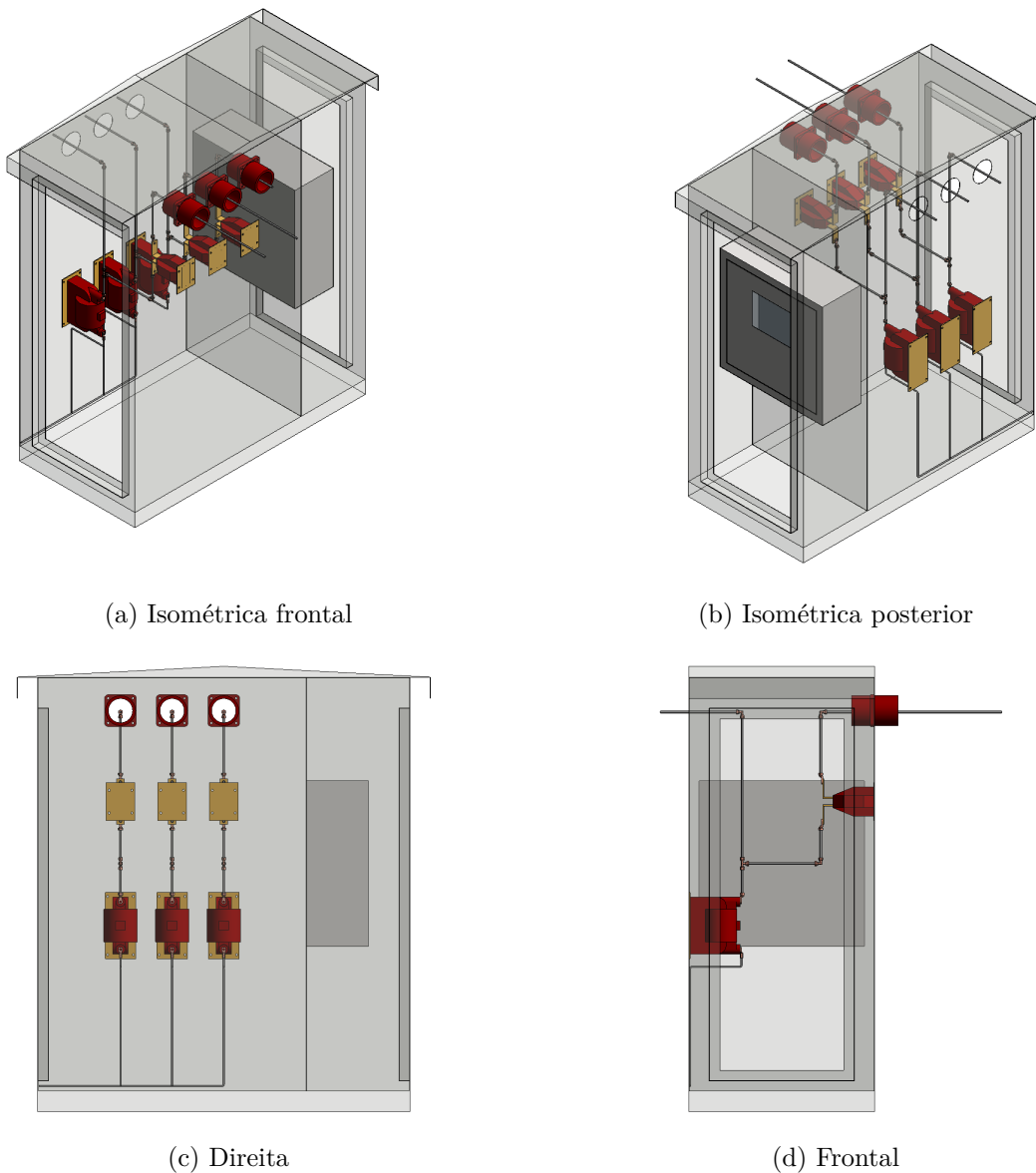


Fonte: Autoria própria

## 6.6 Cabine de medição em média tensão

A cabine de medição em média tensão, mostrada na figura 23, tem 0,90 m de largura e é composta por três TPs e três TCs. Os TPs estão instalados antes dos TCs e em um nível mais baixo, com seus terminais primários a 1,00 m do piso da cabine e seus terminais secundários conectados ao eletrodo de aterramento. Uma parede interna separa o quadro de medição dos equipamentos de média tensão. A superfície superior do quadro de medição está a 1,60 m do nível da implantação.

Figura 23 – Vistas da cabine de medição em média tensão

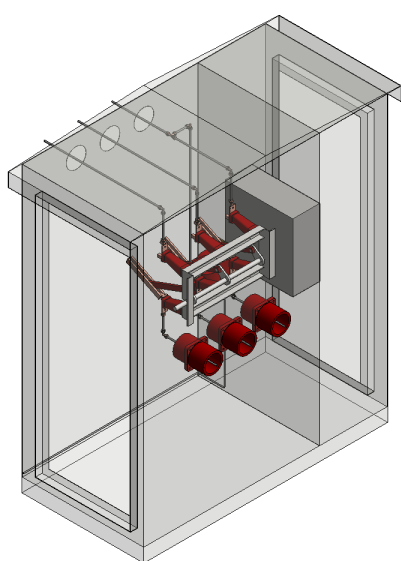


Fonte: Autoria própria

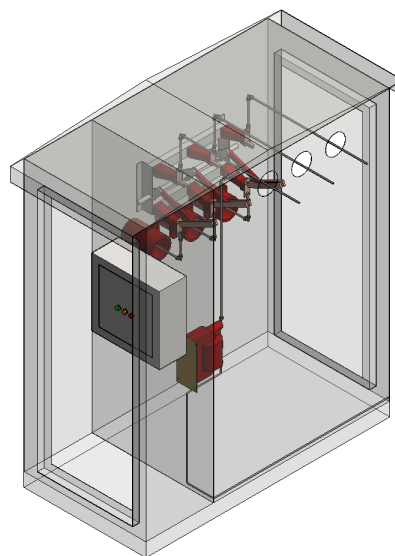
## 6.7 Cabine de seccionamento

A cabine de seccionamento, mostrada na figura 24, tem 0,90 m de largura e é composta por uma chave seccionadora de acionamento sem carga e um TP auxiliar conectado antes da chave e protegido por fusível. Assim como na cabine de medição, o terminal primário do TP auxiliar está a 1,00 m do piso da cabine. Uma parede interna separa o quadro de circuitos auxiliares e o punho de manobra dos equipamentos de média tensão.

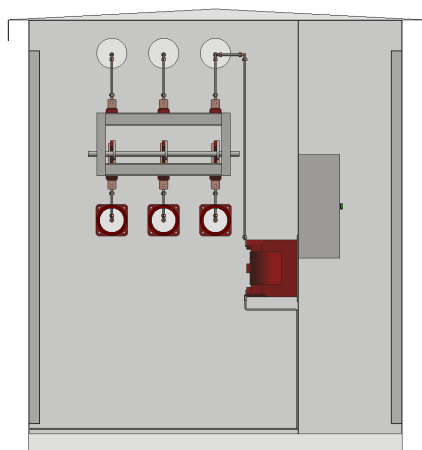
Figura 24 – Vistas da cabine de seccionamento



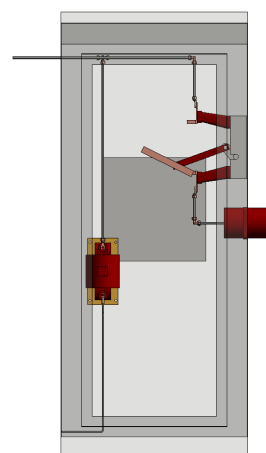
(a) Isométrica frontal



(b) Isométrica posterior



(c) Direita



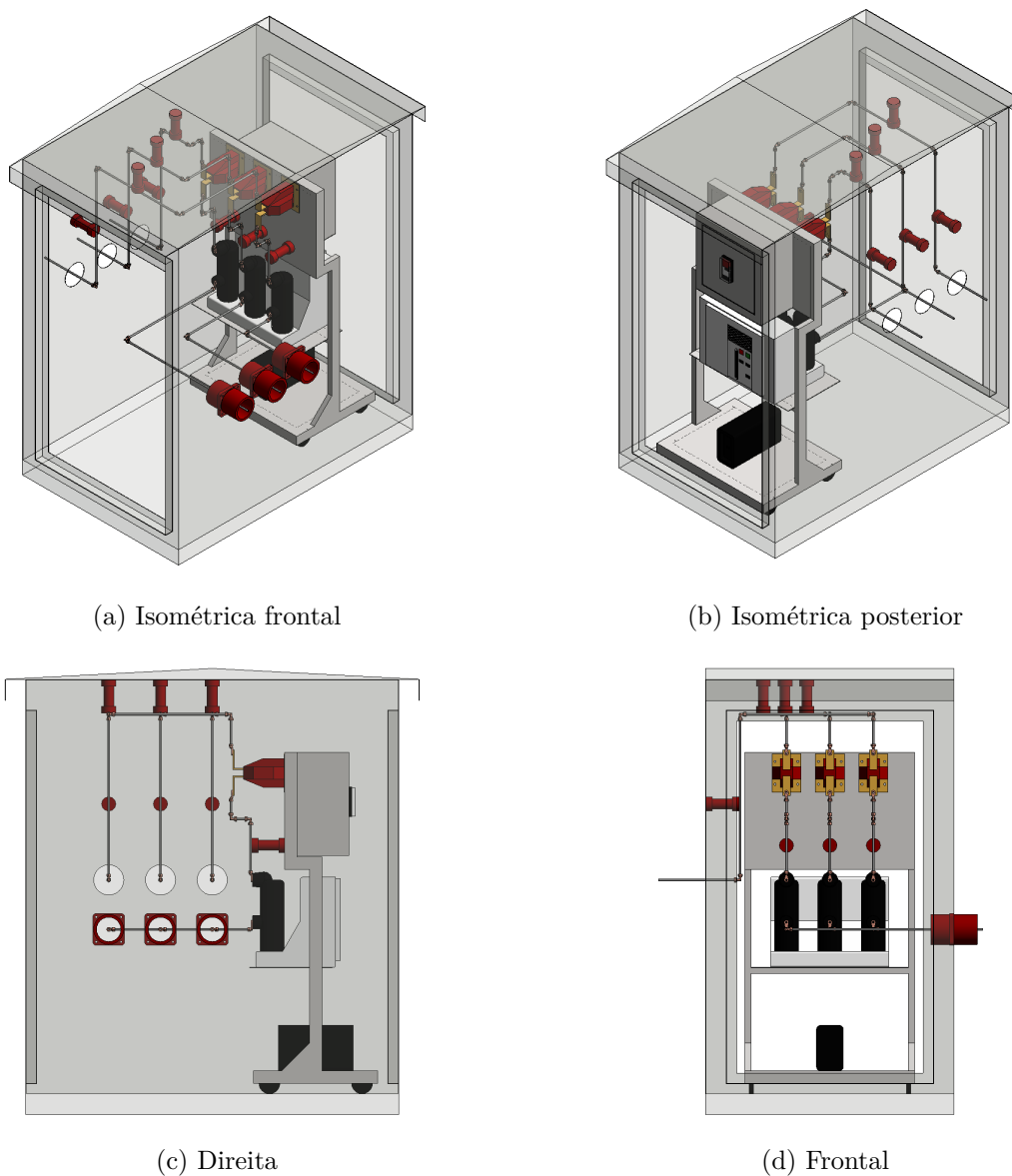
(d) Frontal

Fonte: Autoria própria

## 6.8 Cabine de proteção em média tensão

A cabine de proteção geral em média tensão, mostrada na figura 25, tem 1,20 m de largura e é constituída de três TCs de proteção, disjuntor geral de média tensão, relé de proteção e *nobreak*. O *nobreak* alimenta o relé de proteção e é alimentado pelo TP auxiliar da cabine de seccionamento. O disjuntor geral é do tipo fixo, o que obriga o uso da cabine de seccionamento. Caso o disjuntor fosse do tipo extraível, o uso da chave seccionadora seria facultativo. Não são utilizados TPs de proteção porque só há obrigatoriedade de proteção contra sobrecorrente com as funções 50 e 51 nos relés de proteção.

Figura 25 – Vistas da cabine de proteção geral em média tensão



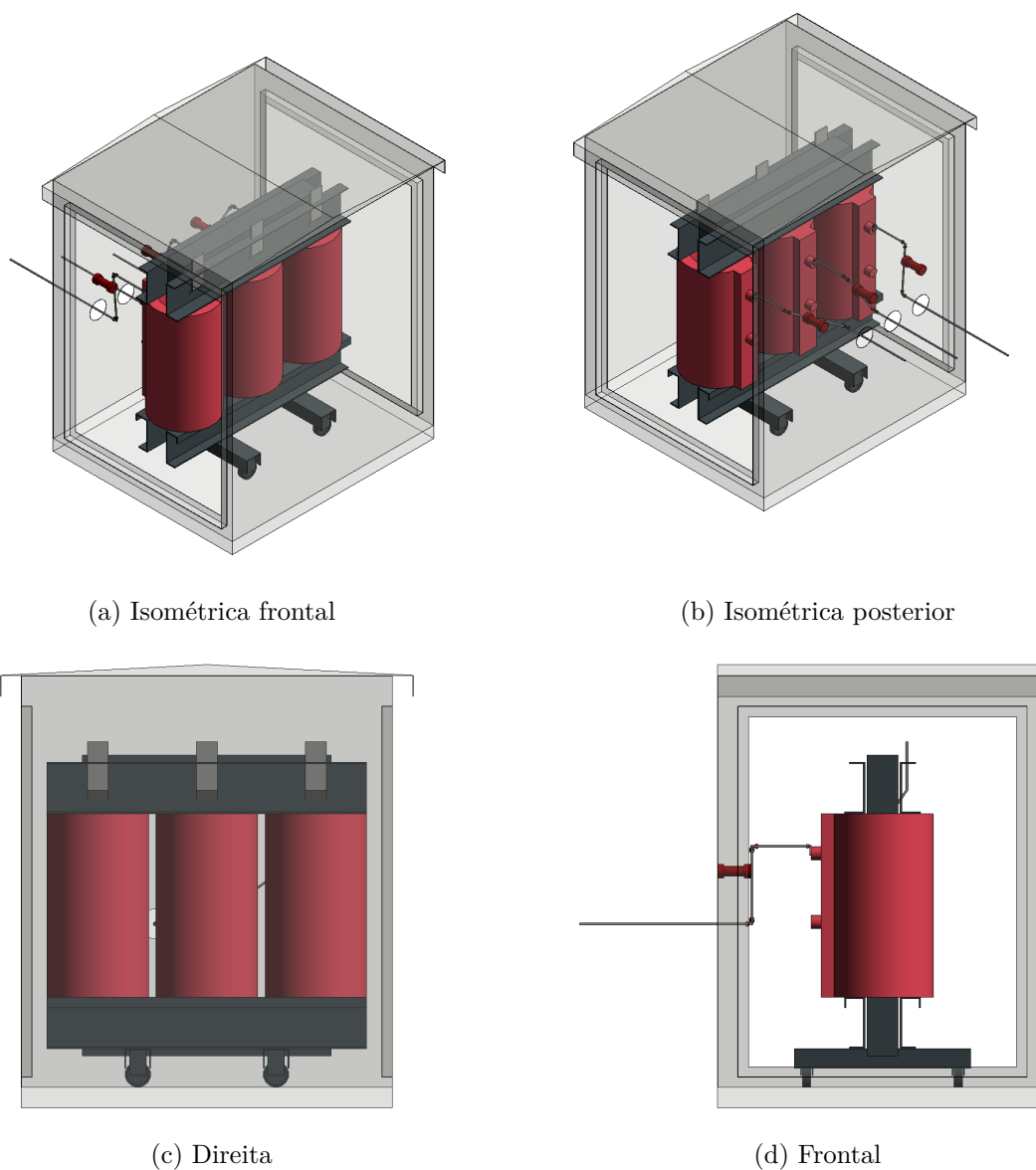
Fonte: Autoria própria



## 6.9 Cabine de transformação

A cabine de transformação, mostrada na figura 26, tem 1,60 m de largura e é constituída apenas pelo transformador de potência. O transformador é do tipo seco e possui potência de 800 kVA. Diferente das cabines anteriores, essa cabine não possui buchas de passagem para a cabine seguinte, então deve ser prevista uma abertura para a passagem dos cabos de baixa tensão.

Figura 26 – Vistas da cabine de transformação

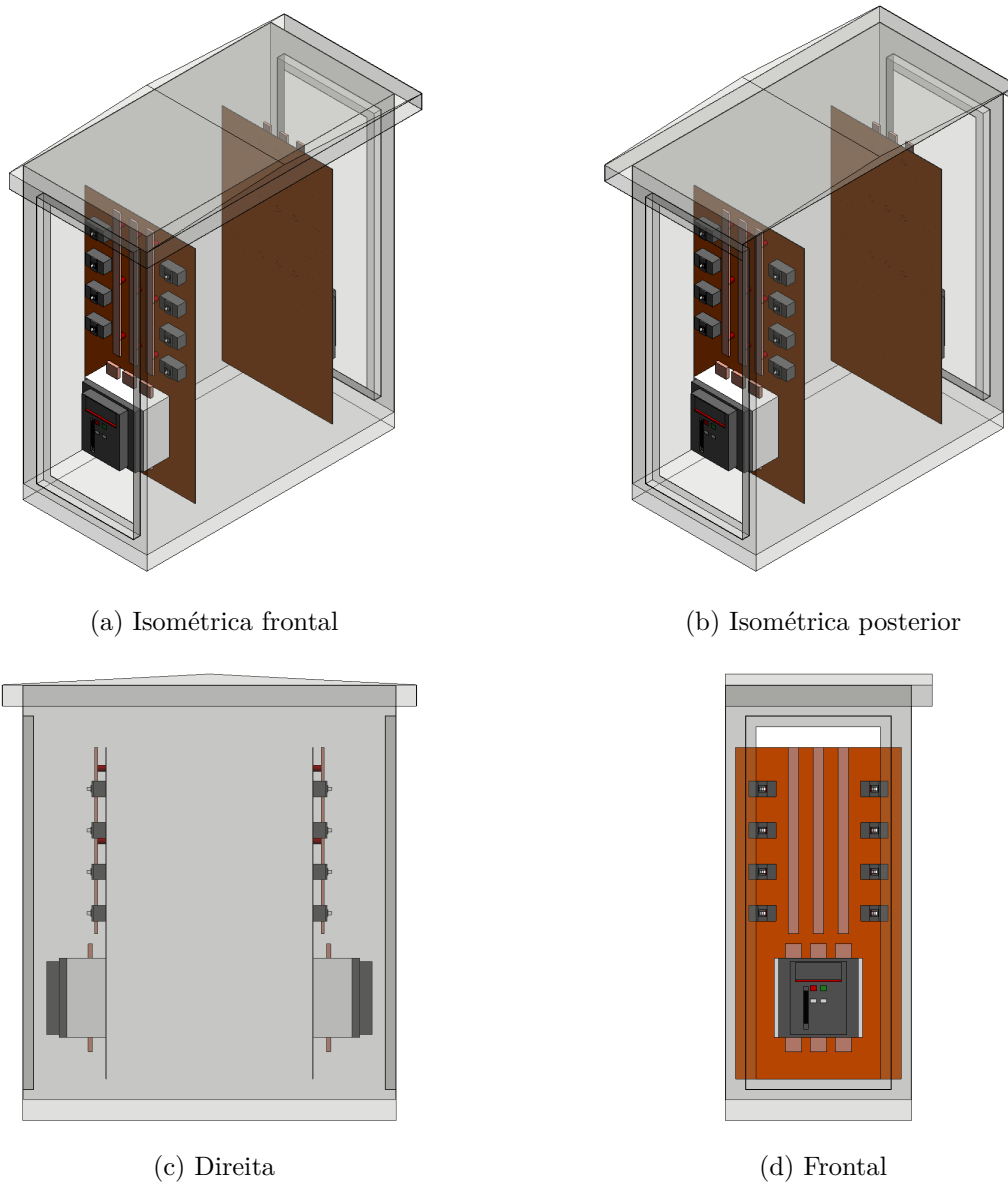


Fonte: Autoria própria

## 6.10 Cabine de proteção em baixa tensão

A cabine de proteção geral em baixa tensão, mostrada na figura 27, tem 0,90 m de largura e abriga dois PGBTs. Com previsão de integração da subestação com um grupo gerador de emergência, ao menos um par de cabos deve ser conectado a cada terminal secundário do transformador. Um grupo desses cabos deve alimentar um PGBT de cargas não prioritárias, enquanto o outro grupo alimenta um PGBT de cargas prioritárias. Em cada PGBT é instalado um multimetro de energia particular nas portas internas.

Figura 27 – Vistas da cabine de proteção geral em baixa tensão



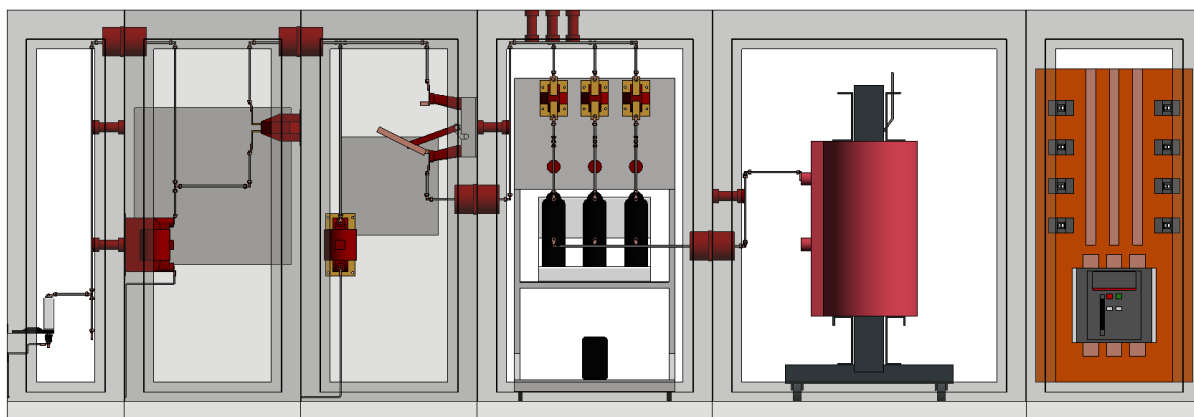
Fonte: Autoria própria

## 6.11 Considerações finais

Apesar das lacunas na modelagem, tais como falta do punho de manobra, falta do fusível de proteção do TP auxiliar e baixo detalhamento dos PGBTs devido à gestão do tempo, o resultado alcançado é considerado bastante satisfatório, haja vista que este trabalho foi partido do absoluto zero, desde os primeiros estudos teóricos até a entrega do modelo final. Vale destacar que o aprendizado da ferramenta BIM também partiu do zero e se deu de forma autodidata, o que reforça a satisfação da entrega.

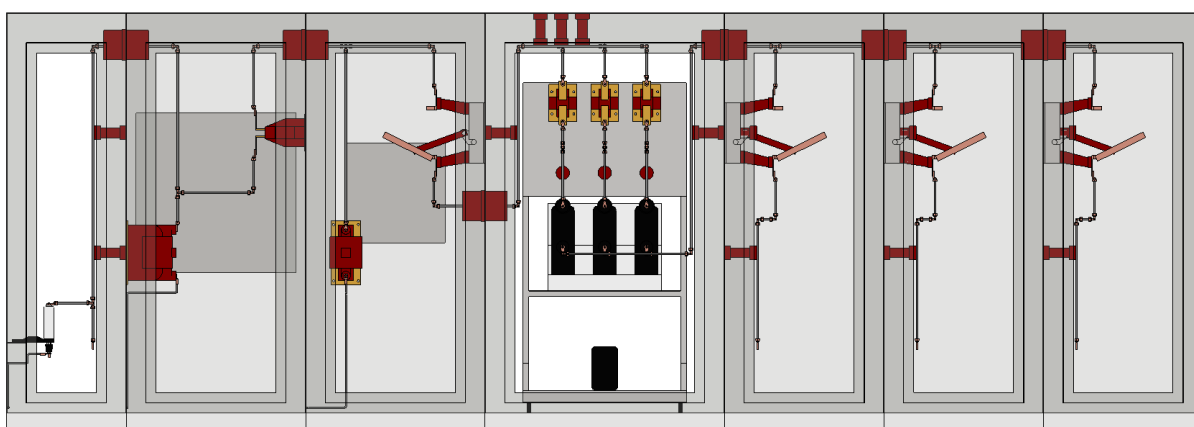
O projeto desenvolvido é totalmente modular e as famílias desenvolvidas formam uma biblioteca de componentes e equipamentos bastante versátil para atender diversos tipos de subestações similares à que foi apresentada. Para demonstrar isso, a figura 28 mostra a subestação de referência e as figuras 29 e 30 mostram variantes da subestação.

Figura 28 – Vista frontal da subestação referencial



Fonte: Autoria própria

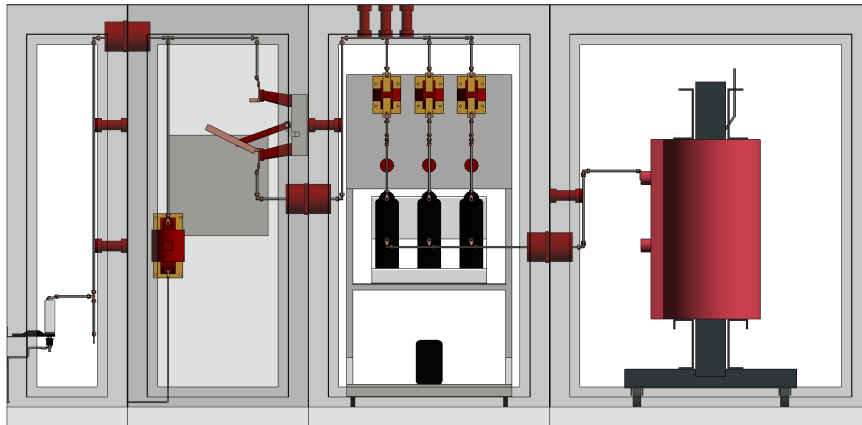
Figura 29 – Variante 1 da subestação referencial



Fonte: Autoria própria

As subestações das figuras 29 e 30 são complementares considerando um projeto de grande porte, como um campus universitário, onde a medição em média tensão é realizada

Figura 30 – Variante 2 da subestação referencial



Fonte: Autoria própria

em um único ponto e é necessário instalar subestações mais próximas dos centros de carga por diversos motivos, como economia, segurança e manutenção. Assim, a figura 29 apresenta o modelo de uma subestação principal que recebe a energia para o hipotético campus universitário. Essa subestação abriga a cabine de medição em média tensão e distribui o circuito para outras três subestações, que alimentam seus respectivos blocos. A figura 30 mostra o modelo dessas subestações secundárias, cuja função é reduzir a tensão para níveis adequados de uso. Nesse exemplo, a proteção geral em baixa tensão é implementada internamente em cada edificação.

Portanto, o trabalho realizado é relevante por apresentar um modelo inicial robusto e modular, que pode ser aprimorado e expandido no futuro. Esta base fornece um ponto de partida sólido para futuras melhorias e adaptações, permitindo a inclusão de detalhes adicionais e a adaptação a diferentes necessidades e especificações.

## 7 Conclusão

Este trabalho destacou de maneira significativa os benefícios do uso da Modelagem da Informação da Construção (BIM) na concepção de subestações elétricas em média tensão. A modelagem tridimensional proporcionada pelo BIM não apenas permitiu uma visualização detalhada da subestação, mas também facilitou a compreensão de conceitos complexos que são difíceis de entender apenas com base em estudos teóricos.

Um dos principais benefícios observados foi a utilização de dados paramétricos para desenvolver um modelo genérico e adaptável às diversas exigências de projetos futuros. Essa abordagem não só acelera o desenvolvimento de novos projetos, mas também aumenta a flexibilidade para ajustes conforme as necessidades específicas de cada empreendimento. A capacidade de reutilizar componentes e configurar diferentes cenários com facilidade demonstra a vantagem do BIM em promover eficiência e consistência no desenvolvimento de projeto de engenharia.

Por fim, a eficácia demonstrada do BIM na concepção de subestações elétricas reforça sua relevância como ferramenta útil para projetos futuros. A adoção contínua do BIM não só oferece vantagens imediatas, como a redução de custos e prazos, mas também posiciona as equipes de projeto para alcançar melhores resultados ao longo do tempo, através da otimização contínua dos processos, modelos e adaptação às novas tecnologias e exigências do mercado. É recomendada, portanto, a utilização do BIM como metodologia de trabalho para melhorar continuamente os processos e obter melhores resultados.



# Referências

- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. *Resolução 956*: Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional. Brasília, 2021. Citado na página 34.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 5471*: Condutores elétricos. Rio de Janeiro, 1986. Citado na página 39.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 5460*: Sistemas elétricos de potência. Rio de Janeiro, 1992. Citado 3 vezes nas páginas 29, 30 e 35.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 5458*: Transformador de potência - terminologia. Rio de Janeiro, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 42 e 43.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 16050*: Para-raios de resistor não linear de óxido metálico sem centelhadores para circuitos de potência de corrente alternada. Rio de Janeiro, 2012. Citado na página 42.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 5472*: Isoladores para eletrotécnica - terminologia. Rio de Janeiro, 2012. Citado na página 39.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 5034*: Buchas para tensões alternadas superiores a 1 kv. Rio de Janeiro, 2014. Citado na página 39.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 14039*: Instalações elétricas de média tensão de 1,0 kv a 36,2 kv. Rio de Janeiro, 2021. Citado 15 vezes nas páginas 34, 36, 37, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56 e 57.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6855*: Transformador de potencial indutivo com isolamento sólida para tensão máxima igual ou inferior a 52 kv - especificações e ensaios. Rio de Janeiro, 2021. Citado na página 43.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6856*: Transformador de corrente com isolamento sólida para tensão máxima igual ou inferior a 52 kv - especificações e ensaios. Rio de Janeiro, 2021. Citado 2 vezes nas páginas 42 e 43.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR IEC 62271-102*: Manobra e comando de alta tensão - parte 102: Seccionadoras e seccionadoras de aterramento em corrente alternada. Rio de Janeiro, 2022. Citado na página 40.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7282*: Dispositivos fusíveis de alta tensão - dispositivos tipo expulsão - requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2023. Citado na página 41.
- COMPANHINA ENERGÉTICA DE BRASÍLIA. *NTD 6.05*: Fornecimento de energia elétrica em tensão primária de distribuição. 2. ed. Brasília, 2013. Citado 7 vezes nas páginas 61, 62, 63, 64, 65, 66 e 67.
- COTRIM, A. *Instalações Elétricas*. 5. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2009. ISBN 978-85-7605-208-1. Citado na página 39.

- FILHO, J. M. *Subestações de Alta Tensão*. 1. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2021. ISBN 978-85-216-3754-7. Citado 2 vezes nas páginas 38 e 57.
- FILHO, J. M. *Manual de Equipamentos Elétricos*. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2022. ISBN 978-85-216-3642-7. Citado 5 vezes nas páginas 39, 40, 41, 42 e 43.
- FILHO, J. M. *Instalações Elétricas Industriais*. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2023. ISBN 978-85-216-3864-3. Citado 3 vezes nas páginas 36, 37 e 38.
- INTERNATIONAL COUNCIL ON LARGE ELECTRIC SYSTEMS. *Substations*. Paris: Springer, 2019. ISBN 978-3-319-49573-3. Citado 5 vezes nas páginas 30, 32, 33, 44 e 45.
- INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. *Electropedia*. [S.l.], 2023. Disponível em: <<https://www.electropedia.org>>. Acesso em: 10 jul. 2023. Citado 5 vezes nas páginas 32, 40, 41, 42 e 43.
- KOCH, H. J. *Gas Insulated Substations*. 2. ed. Hoboken, NJ: IEEE Press, 2022. ISBN 9781119623588. Citado na página 33.
- MCDONALD, J. D. *Electric Power Substations Engineering*. 3<sup>a</sup>. ed. EUA: CRC Press, 2012. ISBN 978-1-4398-5639-0. Citado na página 33.
- NETTO, C. C. *Autodesk Revit Architecture 2020: Conceitos e aplicações*. São Paulo: Érica, 2020. ISBN 978-85-365-3292-9. Citado na página 69.
- OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. *Requisitos mínimos para subestações e seus equipamentos*. [S.l.], 2022. Disponível em: <<https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-ons/procedimentos-de-rede/vigentes>>. Acesso em: 10 jul. 2023. Citado na página 34.
- OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. *Linhas de transmissão da rede de operação*. [S.l.], 2023. Disponível em: <<https://dados.ons.org.br/dataset/linha-transmissao>>. Acesso em: 10 jul. 2023. Citado na página 34.