

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

Luiza Rossatto Wagner

**Diretrizes de Projeto de Equipamentos de  
Subestações Elétricas**

Porto Alegre

2022

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

Luiza Rossatto Wagner

## **Diretrizes de Projeto de Equipamentos de Subestações Elétricas**

Projeto de Diplomação II, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial para a obtenção do grau de Engenheira Eletricista.

UFRGS

Orientador: Prof. Dr. Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro

Porto Alegre

2022

# Agradecimentos

Agradeço primeiramente à minha mãe Leila, ao meu pai Pierre, e à minha irmã Amanda por todo o apoio, pelos conselhos, companheirismo, motivações, incentivos e amor que me proporcionaram durante toda a minha vida. Por estarem sempre comigo para comemorar as conquistas e tornar mais leves os momentos difíceis. Sou o que sou graças a vocês.

Ao meu parceiro João Vítor, que além de namorado foi um grande amigo e colega durante os anos de graduação, por todo o apoio, amor e amizade, por sempre acreditar em mim e me motivar.

Aos meus amigos quase irmãos Ana Laura, Giovanni, Graziela e Julia, pelos bons momentos proporcionados, pelo companheirismo nos momentos bons e nos difíceis e por acreditarem em mim.

À toda a minha família e aos meus amigos por todos o carinho, incentivo e por estarem sempre do meu lado.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro, pela disponibilidade em tirar quaisquer dúvidas que eu tivesse, pelos conhecimentos compartilhados, por me incentivar e pelas boas conversas.

Aos professores e funcionários da Universidade Federal do Rio Grande do Sul pelo tempo e esforço dispendido na minha formação.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul por oferecer um ensino público, gratuito e de qualidade.

# Resumo

A energia elétrica é fundamental para a sociedade moderna, aumentando a expectativa de vida e o crescimento populacional, melhorando o desenvolvimento econômico, industrial e tecnológico e afetando o lazer e a saúde da população. O sistema de fornecimento de energia elétrica conta com diversas subestações elétricas, as quais adequam os níveis de energia durante as diferentes etapas da transmissão de energia, possuindo extrema importância para o processo de distribuição elétrica. O projeto de uma subestação de alta tensão possui diversas etapas de grande complexidade, sendo necessário que os projetistas tenham domínio dos processos e sejam capazes de realizar o projeto de maneira eficiente. Diante disso, esta monografia aborda o embasamento teórico e as diretrizes de projeto de subestações que auxiliam os profissionais a projetar subestações da forma mais eficiente, econômica e segura possível. Para tanto, são realizados estudos básicos das classificações e configurações de subestações e dos principais equipamentos de alta tensão utilizados. São apresentadas as diretrizes de projeto de subestações, desde o processo de decisão do tipo de isolamento da subestação até a definição das características dos equipamentos. Por fim, é realizado um estudo de caso sobre a Subestação Desterro, localizada em Florianópolis - SC, aplicando as diretrizes estudadas e atestando as suas funcionalidades.

**Palavras-chave:** Alta Tensão. Diretrizes. Equipamentos. Projeto. Subestações.

# Abstract

The electric energy is fundamental to the modern society, increasing life expectancy and population growth, improving economic, industrial and technological development and affecting the leisure and health of the population. The electricity supply system has several electrical substations, which adjust the energy levels during the different stages of energy transmission, having extreme importance for the electrical distribution process. The project of a high voltage substation has several stages of great complexity, requiring designers to master the processes and be able to carry out the project efficiently. Therefore, this monograph addresses the theoretical basis and substations design guidelines that help professionals to design substations in the most efficient, economical and safe possible way. To this end, basic studies are carried out on the classifications and configurations of substations and the main high voltage equipment used. Substation design guidelines are presented, from the substation type of insulation decision process to the definition of equipment characteristics. Finally, a case study is carried out on the Desterro Substation, located in Florianópolis - SC, applying the guidelines studied and attesting to its functionalities.

**Keywords:** Equipment. Guidelines. High Voltage. Project. Substations.

# Lista de Figuras

Figura 1 – Ilustração do processo de fornecimento energético. . . . .	12
Figura 2 – Barramento de arranjo simples. . . . .	16
Figura 3 – Barramento de arranjo duplo com disjuntor duplo. . . . .	17
Figura 4 – Barramento de arranjo principal e de transferência. . . . .	18
Figura 5 – Barramento de arranjo duplo com disjuntor simples. . . . .	19
Figura 6 – Barramento de arranjo em anel. . . . .	19
Figura 7 – Barramento de arranjo disjuntor e meio. . . . .	20
Figura 8 – Transformador de potência. . . . .	22
Figura 9 – Transformador de corrente de uma subestação. . . . .	23
Figura 10 – Transformador de potencial de uma subestação. . . . .	24
Figura 11 – Disjuntor de alta tensão. . . . .	25
Figura 12 – Chave seccionadora de uma subestação. . . . .	27
Figura 13 – Banco de capacitores em derivação. . . . .	28
Figura 14 – Banco de capacitores em série. . . . .	29
Figura 15 – Reator em derivação da fabricante <i>Siemens</i> . . . . .	30
Figura 16 – Para-raios da fabricante <i>Siemens</i> . . . . .	31
Figura 17 – Exemplo do modelo eletrogeométrico aplicado a um prédio. . . . .	55
Figura 18 – Linha de transmissão Biguaçu-Desterro. . . . .	57
Figura 19 – Subestação Desterro. . . . .	58
Figura 20 – Localização da Subestação Desterro. . . . .	59

# Lista de Tabelas

Tabela 1 – Níveis de isolamento para equipamentos da classe 1. . . . .	35
Tabela 2 – Níveis de isolamento para equipamentos da classe 2. . . . .	36
Tabela 3 – Níveis de poluição e ambientes característicos. . . . .	38
Tabela 4 – Distância mínima de escoamento por nível de poluição. . . . .	38
Tabela 5 – Tipos de refrigeração e seus símbolos. . . . .	40
Tabela 6 – Tipos construtivos de chaves seccionadoras. . . . .	47
Tabela 7 – Valores de tensão nominal de para-raios. . . . .	51
Tabela 8 – Exemplos de estruturas e seus níveis de proteção. . . . .	54
Tabela 9 – Raios da esfera rolante e corrente de pico de acordo com o nível de proteção. . . . .	56
Tabela 10 – Especificações do autotransformador utilizado na Subestação Desterro.	62
Tabela 11 – Especificações do transformador de corrente de 230 kV. . . . .	64
Tabela 12 – Especificações do transformador de corrente de 138 kV. . . . .	64
Tabela 13 – Especificações do transformador de potencial de 230 kV. . . . .	65
Tabela 14 – Especificações do transformador de potencial de 138 kV. . . . .	65
Tabela 15 – Especificações do disjuntor de 230 kV. . . . .	66
Tabela 16 – Especificações do disjuntor de 138 kV. . . . .	66
Tabela 17 – Especificações da chave seccionadora de abertura vertical de 230 kV. .	67
Tabela 18 – Especificações da chave seccionadora de abertura vertical de 138 kV. .	68
Tabela 19 – Especificações da chave seccionadora semipantográfica vertical de 230 kV.	68
Tabela 20 – Especificações da chave seccionadora semipantográfica vertical de 138 kV.	68
Tabela 21 – Especificações do para-raios na entrada de linha de 230 kV. . . . .	70
Tabela 22 – Especificações do para-raios na alta tensão do autotransformador. . . .	70
Tabela 23 – Especificações do para-raios na baixa tensão do autotransformador. . .	71
Tabela 24 – Especificações do para-raios na saída de linha de 138 kV. . . . .	72

# Lista de abreviaturas e siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AIS	<i>Air-Insulated Substation</i>
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
GIS	<i>Gas-Insulated Substation</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
NBR	Norma Brasileira
NLTC	<i>No Load Tap Change</i>
NP	Nível de Proteção Contra Descargas Atmosféricas
OLTC	<i>On Load Tap Change</i>
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
SE	Subestação
SPDA	Sistema de Proteção contra Descargas Elétricas
TC	Transformador de Corrente
TP	Transformador de Potencial



# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>11</b>
<b>2</b>	<b>SUBESTAÇÕES DE ENERGIA</b>	<b>13</b>
<b>2.1</b>	<b>Classificação de Subestações</b>	<b>13</b>
<b>2.2</b>	<b>Configurações de Subestações</b>	<b>15</b>
2.2.1	Arranjo Simples	16
2.2.2	Arranjo Duplo com Disjuntor Duplo	16
2.2.3	Arranjo Principal e de Transferência	17
2.2.4	Arranjo Duplo com Disjuntor Simples	18
2.2.5	Arranjo em Anel	19
2.2.6	Arranjo Disjuntor e Meio	20
<b>3</b>	<b>EQUIPAMENTOS DE SUBESTAÇÕES</b>	<b>21</b>
<b>3.1</b>	<b>Transformador de Potência</b>	<b>21</b>
<b>3.2</b>	<b>Transformadores de Instrumentos</b>	<b>22</b>
3.2.1	Transformadores de Corrente	22
3.2.2	Transformador de Potencial	23
<b>3.3</b>	<b>Disjuntores</b>	<b>24</b>
<b>3.4</b>	<b>Chaves Seccionadoras</b>	<b>26</b>
<b>3.5</b>	<b>Bancos de Capacitores</b>	<b>27</b>
<b>3.6</b>	<b>Reatores em Derivação</b>	<b>29</b>
<b>3.7</b>	<b>Para-raios</b>	<b>30</b>
<b>4</b>	<b>DIRETRIZES DE PROJETO DE EQUIPAMENTOS DE SUBESTA- ÇÕES</b>	<b>32</b>
<b>4.1</b>	<b>Isolamento</b>	<b>32</b>
4.1.1	Isolamento a Ar - AIS	32
4.1.2	Isolamento a $SF_6$ - GIS	32
<b>4.2</b>	<b>Alimentação</b>	<b>33</b>
4.2.1	Entrada Direta	33

4.2.2	Barramentos . . . . .	33
<b>4.3</b>	<b>Diretrizes Gerais de Equipamentos . . . . .</b>	<b>34</b>
4.3.0.1	Níveis de Isolamento . . . . .	34
4.3.0.2	Distância de Escoamento . . . . .	37
<b>4.4</b>	<b>Transformação . . . . .</b>	<b>39</b>
4.4.1	Transformador de Potência . . . . .	39
4.4.1.1	Tipo de Refrigeração . . . . .	39
4.4.1.2	Tipo de Ligação . . . . .	41
4.4.1.3	Tipo de Comutação . . . . .	42
4.4.2	Tranformador de Corrente . . . . .	42
4.4.2.1	Classes de Exatidão . . . . .	43
4.4.3	Transformador de Potencial . . . . .	43
4.4.3.1	Classes de Exatidão . . . . .	44
<b>4.5</b>	<b>Manobra . . . . .</b>	<b>44</b>
4.5.1	Disjuntores . . . . .	44
4.5.1.1	Tipo Construtivo . . . . .	45
4.5.1.2	Tipo de Acionamento . . . . .	45
4.5.2	Chaves Seccionadoras . . . . .	46
4.5.2.1	Tipo Construtivo . . . . .	47
4.5.2.2	Tipo de Acionamento . . . . .	48
<b>4.6</b>	<b>Compensação de Reativos . . . . .</b>	<b>48</b>
4.6.1	Banco de Capacitores em Derivação . . . . .	48
4.6.1.1	Esquema de Ligação . . . . .	49
4.6.2	Reatores em Derivação . . . . .	49
<b>4.7</b>	<b>Proteção . . . . .</b>	<b>50</b>
4.7.1	Para-raios . . . . .	50
4.7.1.1	Tensão Nominal do Para-raios . . . . .	50
4.7.1.2	Máxima Tensão de Operação Contínua . . . . .	51
4.7.1.3	Corrente de Descarga Nominal . . . . .	52
4.7.2	Blindagem . . . . .	52
4.7.2.1	Modelo Eletrogeométrico . . . . .	55
<b>5</b>	<b>ESTUDO DE CASO - SUBESTAÇÃO DESTERRO . . . . .</b>	<b>57</b>

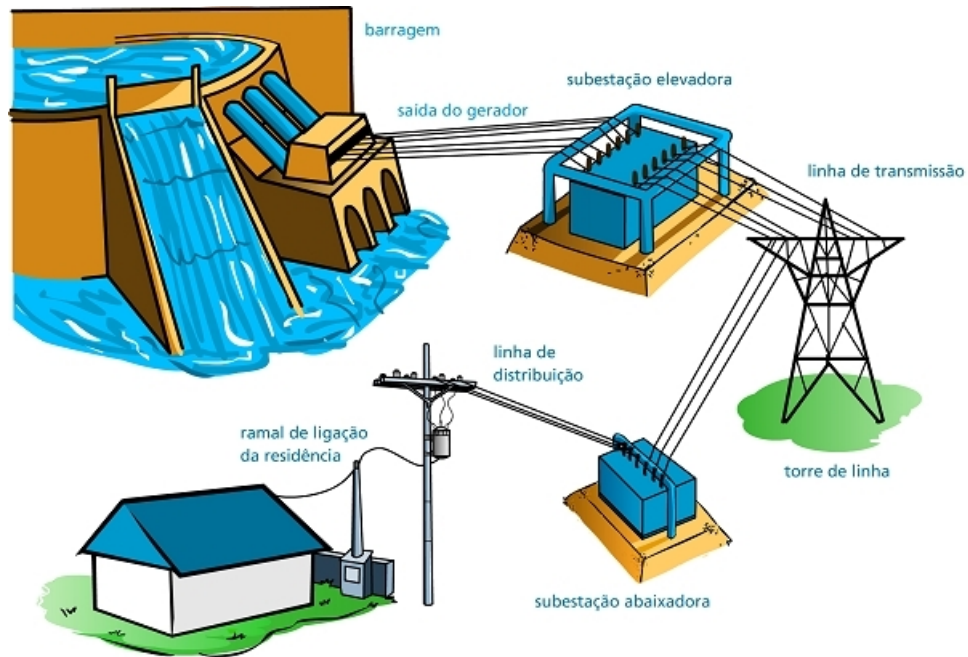
<b>5.1</b>	<b>Configuração da Subestação</b>	<b>58</b>
<b>5.2</b>	<b>Isolamento da Subestação</b>	<b>59</b>
<b>5.3</b>	<b>Alimentação da Subestação</b>	<b>60</b>
<b>5.4</b>	<b>Características Gerais dos Equipamentos</b>	<b>60</b>
5.4.1	Níveis de Isolamento	60
5.4.2	Distância de Escoamento	61
<b>5.5</b>	<b>Equipamentos de Transformação</b>	<b>61</b>
5.5.1	Transformador de Potência	61
5.5.1.1	Tipo de Refrigeração	62
5.5.1.2	Tipo de Ligação	62
5.5.1.3	Tipo de Comutação	63
5.5.1.4	Níveis de Isolamento	63
5.5.2	Transformador de Corrente	64
5.5.2.1	Classe de Exatidão	64
5.5.3	Transformador de Potencial	65
5.5.3.1	Classe de Exatidão	65
<b>5.6</b>	<b>Equipamentos de Manobra</b>	<b>66</b>
5.6.1	Disjuntores	66
5.6.1.1	Tipo Construtivo	67
5.6.1.2	Tipo de Acionamento	67
5.6.2	Chaves Seccionadoras	67
5.6.2.1	Tipo Construtivo	69
5.6.2.2	Tipo de Acionamento	69
<b>5.7</b>	<b>Equipamentos de Segurança</b>	<b>69</b>
5.7.1	Para-raios	70
5.7.2	Blindagem	72
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>73</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>74</b>

# 1 Introdução

A energia elétrica é amplamente utilizada na vida moderna, estando presente tanto nas grandes invenções tecnológicas quanto nas pequenas. A utilização de energia elétrica é de suma importância para o desenvolvimento da sociedade, tendo participação importante na melhora de índices como expectativa de vida e aumento populacional. Assim, a sociedade moderna possui uma grande dependência da energia elétrica, seja em situações de lazer, bem-estar, conforto ou de saúde.

O fornecimento de energia elétrica é realizado através de diferentes etapas, iniciando na produção através de diferentes tipos de usinas, como usinas hidrelétricas, termelétricas, nucleares, entre outras. Após a sua produção, a energia elétrica passa por uma subestação de transmissão, na qual, a partir de um transformador elevador, a tensão elétrica produzida é elevada até o nível adequado à transmissão, evitando perdas excessivas de energia ao longo do percurso. A tensão elétrica utilizada na transmissão é da ordem de dezenas a centenas de quiloVolts (kV). Em seguida, a energia é transmitida através de linhas de transmissão de alta tensão até uma subestação de energia próxima dos perímetros urbanos, na qual a tensão elétrica é reduzida para possibilitar a sua distribuição para os consumidores. Apesar de ter sido diminuída na subestação de energia, a tensão elétrica ainda não é adequada para o consumo residencial, portanto é necessária a utilização de transformadores menores nos postes de energia para reduzir a tensão elétrica ao nível adequado do consumidor; essa tensão elétrica a nível de consumo residencial geralmente é 127 V ou 220 V, em termos de valores eficazes. A Figura 1 apresenta uma ilustração do processo de fornecimento energético.

Figura 1 – Ilustração do processo de fornecimento energético.



Fonte: MUNDO DA ELÉTRICA

As subestações (SE) são instalações elétricas de alta potência responsáveis pelo controle do fluxo de potência, pela adequação dos níveis de tensão elétrica e pela proteção do sistema elétrico. Durante o processo de distribuição elétrica, entre a usina e o consumidor, a energia elétrica passa por diferentes subestações, nas quais são utilizados transformadores para aumentar ou diminuir o nível da tensão elétrica, conforme explicado anteriormente.

Este trabalho procura organizar os materiais sobre subestações encontrados em livros, notas de aulas e normas técnicas, reunindo essas informações em um guia de diretrizes de projetos de equipamentos de subestações elétricas. Esse guia elenca os passos, indica as características de cada equipamento que devem ser definidas de acordo com as normas vigentes para cada equipamento e especifica algumas características específicas de cada equipamento e como projetá-las.

## 2 Subestações de Energia

As subestações de energia podem ser classificadas de acordo com diversos critérios, como pela sua finalidade ou seu isolamento, e também podem ter diferentes configurações das suas conexões. As seções a seguir abordam as classificações e configurações de subestações de energia.

### 2.1 Classificação de Subestações

Segundo McDonald (2007), as subestações de energia elétrica podem ser classificadas de acordo com a finalidade da subestação. Essas classificações estão definidas a seguir.

- Subestações de usina: localizadas nas estações geradoras, são responsáveis pela conexão dos geradores à rede elétrica e pelo fornecimento de energia de fontes externas para a planta. Essas subestações são grandes instalações e estão sujeitas a planejamento, financiamento e construção diferentes daqueles dos projetos de subestações de rotina;
- Subestações particulares: localizadas próximas às instalações de clientes comerciais específicos, são responsáveis pelo fornecimento de energia elétrica às instalações do cliente em questão. Essas subestações são projetadas de acordo com as necessidades do cliente;
- Subestações de transmissão: localizadas nos pontos finais de linhas de transmissão originadas por subestações elevadoras, são responsáveis pela transferência de energia em massa através da rede. Essas subestações fornecem energia elétrica aos circuitos que alimentam as estações transformadoras, sendo essenciais para a confiabilidade e integridade de longo prazo do sistema elétrico e permitindo que grandes blocos de energia sejam movidos dos geradores para os centros de carga. Algumas dessas estações fornecem apenas recursos de manobra, sem transformar energia, enquanto outras realizam a conversão de tensão elétrica também. Geralmente são subestações estratégicas com alto custo para construir e manter;

- Subestações de distribuição: localizadas próximas aos centros de consumo ou de grandes consumidores, sendo responsáveis pelo fornecimento de energia elétrica dos circuitos de distribuição que abastecem diretamente diversos clientes. São as instalações elétricas mais comuns nos sistemas elétricos de potência.

Ainda de acordo com McDonald (2007) há o tipo de classificação de subestações de acordo com o tipo de isolamento utilizado. Os tipos de subestações de acordo com o seu isolamento estão definidas a seguir.

- Subestações com isolamento a ar (AIS): utilizam espaçamentos de ar atmosférico como isolamentos. Os equipamentos das subestações ficam expostos a fatores ambientais, como descargas atmosféricas, umidade, poeira, poluição, requerendo manutenções frequentes. As AIS ocupam grandes áreas e possuem alto custo de construção e manutenção;
- Subestações com isolamento a gás (GIS): utilizam um gás dielétrico a uma pressão moderada para isolamento fase-fase e fase-terra; o gás mais utilizado é o hexafluoreto de enxofre, o SF<sub>6</sub>. Os condutores de alta tensão, disjuntores, interruptores, transformadores de corrente e de tensão são encapsulados nesse gás dentro de invólucros de metal aterrados. Esse tipo de isolamento ocupa menos espaço do que o isolamento a ar, sendo usado principalmente onde o espaço é caro ou indisponível. As GIS são mais confiáveis, visto que as partes ativas são protegidas da deterioração, e requerem menos manutenção, garantindo uma vida útil longa do que as AIS.

Também é possível classificar as subestações de acordo com a funcionalidade de seus equipamentos, de acordo com ENERGIAS (2021). Essas classificações estão definidas a seguir.

- Subestações elevadoras: localizadas próximas às usinas geradoras, responsáveis pela elevação da tensão elétrica para os níveis de transmissão, viabilizando uma transmissão mais eficiente. Portanto, a tensão elétrica de saída da subestação é maior do que a tensão de entrada;
- Subestações abaixadoras: localizadas próximas às cidades, no final do sistema de transmissão, responsáveis pela diminuição da tensão elétrica para os níveis de con-

sumo. Portanto, a tensão elétrica de saída da subestação é menor do que a tensão de entrada;

- Subestações de manobra: responsável pela garantia de proteção e operação de alguns trechos da rede elétrica, permitindo o chaveamento das linhas de transmissão e o seccionamento de circuitos. Para ser possível esse controle e energização em trechos sucessivos de menor comprimento, essas subestações possuem a mesma tensão de elétrica de saída e de entrada.

Outra forma de classificar as subestações é de acordo com as suas instalações, as quais são escolhidas levando em consideração a potência necessária, o espaço necessário para os devidos equipamentos e o custo do projeto. Os tipos de instalações classificadas de acordo com a sua forma de instalação estão definidos a seguir, de acordo com OMS ENGENHARIA (2020).

- Subestações externas: instaladas ao ar livre, geralmente não possuem cabine, portanto demandam a utilização de equipamentos com proteção às diversas condições climáticas, como chuva, poluição, ventos, entre outros. Geralmente necessitam de manutenções mais recorrentes e geram custos maiores do que subestações internas;
- Subestações internas: instaladas dentro de abrigos, geralmente de metal ou de alvenaria. Como os equipamentos estão abrigados, essas subestações possuem baixo custo e necessitam de manutenções menos recorrentes, porém mais especializadas.

## 2.2 Configurações de Subestações

Os barramentos são pontos de convergência de circuitos com as linhas de transmissão, ou seja, são responsáveis pela conexão da energia pelas linhas de transmissão ao circuito das subestações. Segundo McDonald (2007), os arranjos de barramentos mais comuns são: simples, duplo com disjuntor duplo, principal e de transferência, duplo com disjuntor simples, em anel ou disjuntor e meio.



### 2.2.1 Arranjo Simples

Os barramentos simples é o tipo de arranjo mais básico, consistindo em um único barramento com todas as conexões diretamente para um barramento. A Figura 2 apresenta um diagrama esquemático do barramento simples.

Figura 2 – Barramento de arranjo simples.



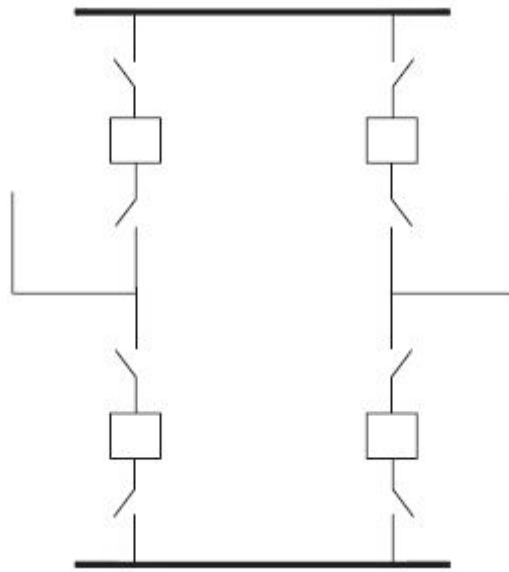
Fonte: McDonald (2007)

Esse arranjo apresenta baixo custo, porém a sua confiabilidade é baixa, visto que a ocorrência de uma falta causará uma interrupção de toda seção defeituosa e seus circuitos correspondentes. A sua manutenção exige o desligamento da subestação inteira. Portanto, na prática, esse arranjo é inconveniente, visto que o desligamento de uma subestação afeta a transmissão de energia para uma região.

### 2.2.2 Arranjo Duplo com Disjuntor Duplo

O arranjo duplo com disjuntor duplo consiste em dois barramentos e dois disjuntores para cada circuito. A Figura 3 apresenta um diagrama esquemático do barramento simples.

Figura 3 – Barramento de arranjo duplo com disjuntor duplo.



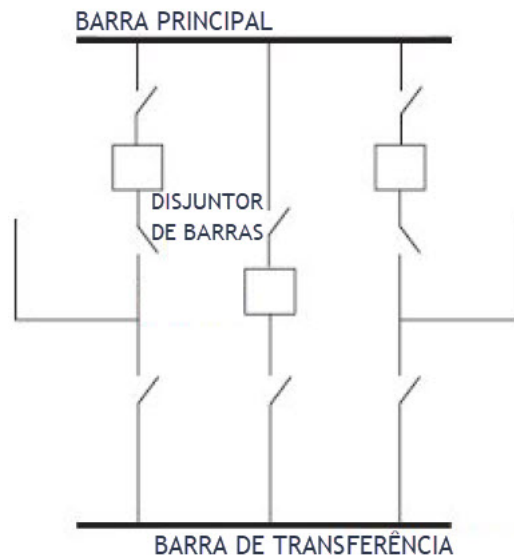
Fonte: McDonald (2007)

Esse arranjo possui alta confiabilidade e fácil manutenção, visto que é possível desligar um barramento na ocorrência de uma falha sem interromper os outros circuitos. Portanto, essa configuração de barramentos é aplicável para cargas que requerem alto grau de confiabilidade e tempo mínimo de interrupção.

### 2.2.3 Arranjo Principal e de Transferência

O arranjo principal e de transferência é uma modificação do barramento simples com o acréscimo de um disjuntor de transferência, um barramento de transferência e seccionadores. A Figura 4 apresenta um diagrama esquemático do barramento principal e de transferência.

Figura 4 – Barramento de arranjo principal e de transferência.



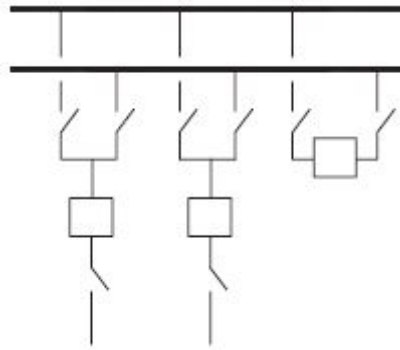
Fonte: Adaptado de McDonald (2007)

Essa configuração é semelhante ao arranjo simples, tendo os circuitos conectados ao barramento principal durante as operações normais; portanto, a confiabilidade operacional é baixa, visto que uma falha no barramento principal desenergizará todos os circuitos. No entanto, o processo de manutenção é otimizado com a utilização do barramento de transferência, movendo a linha do disjuntor a ser mantido para o barramento de transferência. Esse tipo de barramento geralmente é utilizado em circuitos que não necessitem de alta confiabilidade.

#### 2.2.4 Arranjo Duplo com Disjuntor Simples

O arranjo duplo com disjuntor simples consiste em dois barramentos com um disjuntor de ligação entre os barramentos. A Figura 5 apresenta um diagrama esquemático do barramento duplo com disjuntor simples.

Figura 5 – Barramento de arranjo duplo com disjuntor simples.



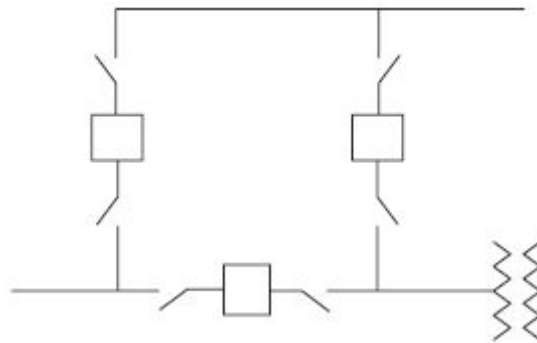
Fonte: McDonald (2007)

O disjuntor geralmente opera fechado, permitindo que cada circuito seja alimentado por qualquer barramento através de suas chaves. Assim, a flexibilidade e a confiabilidade operacionais são aprimoradas, visto que uma falha em um barramento não afeta o outro barramento. Esse arranjo proporciona fácil manutenção de cada barramento. Esse arranjo é utilizado em circuitos em que a transferência de carga e a confiabilidade operacional são importantes, como em subestações de energia.

### 2.2.5 Arranjo em Anel

O arranjo em anel consiste em disjuntores dispostos em anel com circuitos conectados entre dois disjuntores. A Figura 6 apresenta um diagrama esquemático do barramento com arranjo em anel.

Figura 6 – Barramento de arranjo em anel.



Fonte: McDonald (2007)

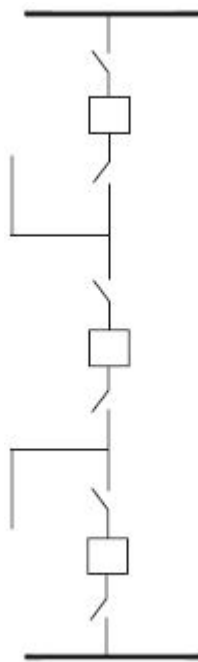
A disposição dessa configuração permite que uma falha em uma seção do barramento afete apenas o circuito nessa seção do barramento, não afetando nenhum outro

dispositivo ou circuito; portanto, esse arranjo apresenta alta confiabilidade e flexibilidade. Uma desvantagem desse arranjo é a limitação da expansão da configuração, devido ao número limitado de circuitos que são viáveis nesse arranjo. Esse arranjo é aplicável a cargas em que a confiabilidade e a disponibilidade do circuito são prioridades, mas que não exista possibilidade de expansão.

### 2.2.6 Arranjo Disjuntor e Meio

O arranjo disjuntor e meio consiste em um circuito entre dois disjuntores em um alinhamento de três disjuntores com dois barramentos, havendo um disjuntor e meio por circuito. A Figura 7 apresenta um diagrama esquemático do barramento com arranjo disjuntor e meio.

Figura 7 – Barramento de arranjo disjuntor e meio.



Fonte: McDonald (2007)

Essa configuração permite que uma falha em um circuito não interrompa outro circuito e que uma falha em uma seção do barramento não interrompa nenhuma carga do circuito, oferecendo boa confiabilidade. Um barramento e os disjuntores adjacentes podem ser mantidos sem transferir ou derrubar cargas, facilitando a manutenção. Esse tipo de arranjo de barramentos permite expansões e pode ser utilizado em subestações.

## 3 Equipamentos de Subestações

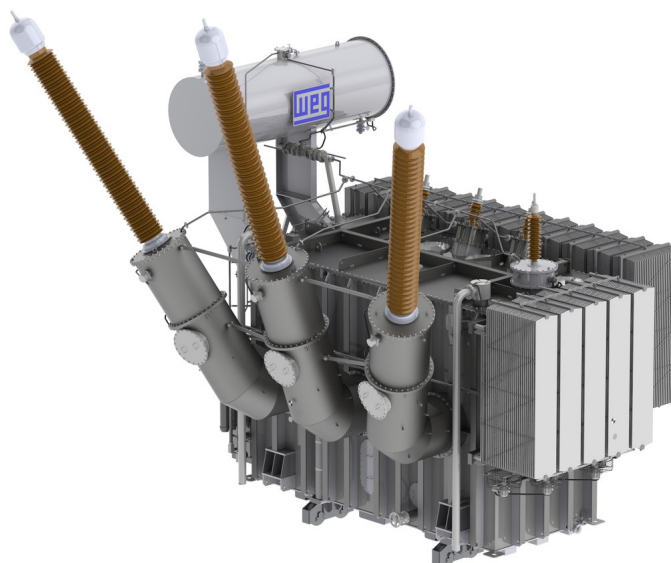
As subestações são compostas por diversos equipamentos, sendo os principais: transformador de potência, transformadores de instrumentos, disjuntores, chaves seccionadoras, bancos de capacitores, reatores em derivação e para-raios. As seções a seguir apresentarão as principais características e aplicações dos equipamentos mencionados.

### 3.1 Transformador de Potência

Os transformadores de potência são os principais equipamentos de uma subestação, visto que são responsáveis pela transformação da tensão do sistema para o nível de tensão mais conveniente para a subestação sem alterar a potência do circuito; também realizam o isolamento elétrico de circuitos entre si e ajustam as impedâncias do circuito. Esses transformadores são muito específicos, dependendo das necessidades e dos parâmetros das subestações.

Para realizar a encomenda de um transformador de potência deve-se especificar diversos parâmetros de dimensionamento para a fabricante; para esse dimensionamento é necessário o conhecimento de fatores como: potências nominais, tensão de operação, relação de transformação da tensão elétrica do transformador, entre outros. A Figura 8 apresenta um transformador de potência.

Figura 8 – Transformador de potência.



Fonte: WEG

## 3.2 Transformadores de Instrumentos

A norma ABNT NBR 61869-1:2020 define um transformador de instrumentos como “transformador destinado a transmitir um sinal de informação para instrumentos de medição, medidores e dispositivos de controle ou de proteção, ou aparelhos similares”. Ou seja, os transformadores de instrumentos são equipamentos utilizados para auxiliar a medição de sinais de alta tensão, adequando os sinais a serem medidos às faixas de medição em tensão alternada. Os transformadores de instrumentos são os transformadores de corrente (TC) e os transformadores de potencial (TP).

### 3.2.1 Transformadores de Corrente

Os transformadores de corrente são responsáveis por reproduzir em seu circuito secundário a corrente de seu primário, em uma proporção predefinida e conhecida, com sua relação de fase preservada, adequando a corrente para o uso em instrumentos de medição, controle e proteção.

Os transformadores de corrente possuem o seu enrolamento primário conectado em série com o circuito de alta tensão; o enrolamento primário é constituído de poucas espiras de material condutor de cobre de grande secção. Assim, a impedância do circuito primário é desprezível em comparação à impedância do sistema, de modo que a corrente

no primário seja ditada pelo circuito de potência. O enrolamento secundário possui maior número de espiras de cobre de menor secção, podendo suportar correntes nominais de 5 A, padronizadas pela ABNT. A Figura 9 apresenta um transformador de corrente utilizado em uma subestação.

Figura 9 – Transformador de corrente de uma subestação.



Fonte: TRENCH GROUP

### 3.2.2 Transformador de Potencial

Os transformadores de potencial são responsáveis pela adequação dos níveis de tensão para a medição de tensão em sistemas acima de 600 V, tendo como finalidade o isolamento do circuito de baixa tensão (circuito secundário) do circuito de alta tensão (circuito primário) e a reprodução dos efeitos transitórios e de regime permanente produzidos no circuito de alta tensão no circuito de baixa tensão.

Os transformadores de potencial possuem o seu enrolamento primário conectado em derivação ao sistema, enquanto o enrolamento secundário é destinado a alimentar bobinas de potencial de instrumentos elétricos de medição, proteção ou controle. A Figura



10 apresenta um transformador de potencial utilizado em uma subestação.

Figura 10 – Transformador de potencial de uma subestação.



Fonte: TRENCH GROUP

### 3.3 Disjuntores

De acordo com a norma IEEE Std C37.100.1:2018, um disjuntor pode ser definido como um dispositivo de comutação mecânico capaz de transportar e interromper correntes sob condições normais de circuito e também estabelecer, transportar e interromper por um tempo especificado, e interromper correntes sob condições anormais especificadas, como um curto-circuito.

Os disjuntores são os principais equipamentos de proteção de uma subestação, sendo responsáveis pela interrupção de correntes de falta no mínimo tempo possível, a fim de evitar e limitar danos aos equipamentos pelos curtos-circuitos. Também são responsáveis pela interrupção de correntes nominais de carga, correntes de magnetização de transformadores e reatores e correntes capacitivas de bancos de capacitores e de linhas a vazio. A Figura 11 apresenta um disjuntor de alta tensão.

Figura 11 – Disjuntor de alta tensão.



Fonte: SIEMENS

Segundo McDonald (2007), é possível classificar os disjuntores de acordo com a técnica de interrupção utilizada para resfriar e alongar o arco elétrico permitindo a interrupção. Essas classificações estão definidas a seguir.

- Disjuntores a ar comprimido: a extinção do arco é feita através da injeção de ar comprimido na região entre os contatos, resfriando o arco e causando a sua extinção;
- Disjuntores a sopro magnético: nesses disjuntores, um campo eletromagnético é formado a partir da inserção de uma bobina no caminho do arco, limitando a corrente elétrica; esse campo eletromagnético atua com um sopro de ar comprimido para direcionar o arco para dentro de uma câmara de amianto, onde o arco é fracionado e extinto;
- Disjuntores a vácuo: utilizam um interruptor formado por um pequeno cilindro que envolve os contatos móveis sob vácuo intenso. Quando os contatos se separam, um arco é formado a partir da erosão do contato. Os produtos do arco são imediatamente forçados e depositados em uma blindagem metálica ao redor dos contatos, extinguindo o arco pois não há algo para sustentá-lo;

- Disjuntores a óleo: nesses disjuntores, os dispositivos de interrupção são imersos em óleo isolante. A extinção do arco ocorre pela formação de gases em virtude da decomposição do óleo frente às temperaturas geradas pelo arco elétrico;
- Disjuntores a gás  $SF_6$ : esse tipo de disjuntor utiliza o gás hexafluoreto de enxofre ( $SF_6$ ) para realizar a extinção do arco elétrico em disjuntores, visto que este gás não é explosivo, tóxico e corrosivo, é estável e inerte e possui boas características de isolamento.

### 3.4 Chaves Seccionadoras

As chaves seccionadoras são dispositivos mecânicos que conduzem corrente elétrica e fornecem um ponto de interrupção em circuitos da subestação, visando o isolamento ou conexão dos circuitos. As suas principais funções são: abrir e fechar o circuito de forma confiável quando solicitado, transportar corrente continuamente sem superaquecimento e permanecer na posição fechada sob condições de corrente de falha.

As principais aplicações desses equipamentos em subestações são para realizar o *by-pass* ou isolar equipamentos para que seja possível realizar a manutenção destes equipamentos. Também são muito utilizados para a realização de manobras de transferência entre barramentos de uma subestação. A Figura 12 apresenta uma chave seccionadora de uma subestação.

Figura 12 – Chave seccionadora de uma subestação.



Fonte: RESCUE CURSOS

### 3.5 Bancos de Capacitores

Os bancos de capacitores podem possuir configuração em derivação ou em série. Os capacitores em derivação podem ser responsáveis pela compensação de reativos; para esta finalidade é possível utilizar tanto bancos de capacitores quanto reatores em derivação.

A compensação do fator de potência das cargas, tem como objetivo aumentar a tensão nos terminais da carga, melhorar a regulação de tensão, reduzir as perdas na transmissão, reduzir o número de linhas para o transporte de reativos, resultando, assim, na redução dos custos e na otimização do desempenho do sistema elétrico. A Figura 13 apresenta um banco de capacitores em derivação.

Figura 13 – Banco de capacitores em derivação.



Fonte: CRUSHTYMKS

Os capacitores em série são utilizados para diminuir a reatância série das linhas de transmissão e a distância elétrica entre as barras terminais. As principais vantagens da sua utilização são: aumento da capacidade de transmissão de potência da linha de transmissão, aumento da estabilidade do sistema, diminuição da queda de tensão ao longo da linha de transmissão, melhor equilíbrio de potência entre as linhas (reduzindo as perdas do sistema), entre outras. A Figura 14 apresenta um banco de capacitores em série.

Figura 14 – Banco de capacitores em série.



Fonte: Suzuki *et al.* (2010)

### 3.6 Reatores em Derivação

Os reatores em derivação podem ser equipamentos responsáveis pelo controle de tensão no barramento em regime permanente e pela redução da sobretensão nos surtos de manobra; também são responsáveis pela compensação de reativos, ou seja, pela correção do fator de potência do sistema elétrico. Esses equipamentos possuem relação tensão x corrente linear até um valor de tensão determinado, o qual é geralmente 150% do valor da tensão nominal. A Figura 15 apresenta um reator em derivação da fabricante *Siemens*.

Figura 15 – Reator em derivação da fabricante *Siemens*.



Fonte: Siemens

### 3.7 Para-raios

Os para-raios são equipamentos essenciais para a proteção do sistema contra sobretensões atmosféricas e de manobra, aumentando a sua confiabilidade, economia e continuidade da operação. Esta proteção é realizada limitando a tensão a um valor conhecido, evitando que tensões superiores a esse valor atinjam os equipamentos da subestação.

Os para-raios são compostos por um elemento resistivo não linear. Em operação normal, o pára-raios opera semelhantemente a um circuito aberto. Quando ocorre uma sobretensão, uma corrente circula pelo resistor não-linear, impedindo que a tensão em seus terminais ultrapasse um determinado valor. A Figura 16 apresenta um para-raios da fabricante *Siemens*.

Figura 16 – Para-raios da fabricante *Siemens*.



Fonte: Siemens



## 4 Diretrizes de Projeto de Equipamentos de Subestações

As diretrizes de projeto de subestações serão definidas nas seções a seguir, sendo divididas pelos tópicos: isolamento, alimentação, transformação, compensação de reativos e segurança.

### 4.1 Isolamento

As subestações podem utilizar o hexafluoreto de enxofre ( $SF_6$ ) ou o ar como o meio de isolamento. As seções a seguir apresentam as características e as condições de escolha de cada tipo de isolamento.

#### 4.1.1 Isolamento a Ar - AIS

Uma subestação isolada a ar utiliza o ar atmosférico como meio isolante da subestação. Esse tipo de subestação requer o emprego de equipamentos apropriados para funcionamento em condições atmosféricas adversas, gerando desgaste dos materiais e componentes; portanto, exige manutenção frequente. Uma AIS deve ser construída em um local amplo ao ar livre, não sendo apropriada para subestações localizadas em áreas compactas e urbanas. Portanto, o isolamento a ar é recomendado em subestações localizadas em áreas com espaço amplo ou em subestações externas.

#### 4.1.2 Isolamento a $SF_6$ - GIS

Segundo McDonald (2007), uma subestação isolada a gás utiliza o hexafluoreto de enxofre, o qual é um gás dielétrico superior, para isolamento fase a fase e fase a terra. Em uma GIS os condutores de alta tensão, os disjuntores, as chaves e os transformadores são encapsulados em gás  $SF_6$  dentro de invólucros metálicos aterrados.

O hexafluoreto de enxofre deve ser utilizado em pressões de 400 a 600 kPa absolutos para que o gás não condense em um líquido nas temperaturas mais baixas que o equipamento apresenta. Em comparação com o ar atmosférico, o  $SF_6$  possui capacidade

isolante duas a três vezes maior na mesma pressão. Esse gás também é cerca de 100 vezes melhor do que o ar para interromper arcos, se decompondo na alta temperatura de um arco elétrico, cujo gás decomposto se recombina em  $SF_6$ , não sendo necessário reabastecer o gás em uma GIS.

Segundo McDonald (2007), uma GIS é mais confiável, requer menos manutenção, ocupa menos espaço e possui vida útil mais longa do que uma AIS. Portanto, a utilização do isolamento a  $SF_6$  é recomendada em subestações localizadas em áreas urbanas, em áreas com restrição de espaço ou em subestações internas.

## 4.2 Alimentação

A alimentação de uma subestação é feita por meio da energia oriunda das linhas de transmissão, podendo ter sua entrada na subestação via ramal aéreo ou subterrâneo, dependendo de como a linha de transmissão é feita na cidade ou região. Essa energia pode ser transmitida dentro da subestação de duas maneiras: a partir da entrada direta e por meio de barramentos. As seções a seguir apresentam as diretrizes de projeto de ambos métodos de alimentação.

### 4.2.1 Entrada Direta

A alimentação por entrada direta consiste na conexão da linha de transmissão diretamente ao transformador de potência e é feita em subestações com apenas uma entrada e um transformador. Esse tipo de alimentação não é comum, visto que geralmente as subestações possuem mais de um transformador de potência e diversos outros equipamentos.

### 4.2.2 Barramentos

A escolha do arranjo dos barramentos deve ser feita considerando alguns fatores de mérito como confiabilidade, custo, simplicidade construtiva, flexibilidade operativa, facilidade de manutenção e facilidade de expansão, em maior ou menor grau. Geralmente o principal fator na escolha da configuração é o custo, mas a flexibilidade operativa e a confiabilidade podem muitas vezes ser predominantes, dependendo da finalidade e importância da subestação.

O Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) apresenta requisitos mínimos para as instalações de acesso à rede básica e para seus componentes integrantes. No caso dos barramentos, estabelece a configuração mínima de acordo com a classe de tensão, conforme visto abaixo.

- Barramento inferior a 230 kV – Barra simples, com possibilidade de evolução para arranjo barra dupla com disjuntor simples e quatro chaves;
- Barramento de 230 kV – Barra dupla com disjuntor simples e quatro chaves;
- Barramento com tensão igual ou superior a 345 kV – Barra dupla com disjuntor e meio.

## 4.3 Diretrizes Gerais de Equipamentos

Os equipamentos de alta tensão possuem características em comum, as quais são dependentes das classes de tensão da subestação e da localização da subestação; essas características gerais são os níveis de isolamento e a distância de escoamento. As seções a seguir apresentam as especificações das características gerais dos equipamentos.

### 4.3.0.1 Níveis de Isolamento

Os níveis de isolamento são determinados da mesma forma para todos equipamentos de alta tensão de subestações. Estes níveis delimitam as tensões suportáveis pelos equipamentos de alta tensão considerando a tensão máxima eficaz do equipamento. Segundo a norma ABNT NBR 6939:2018, os equipamentos são divididos em duas classes de tensão máxima eficaz para a determinação dos níveis de isolamento, sendo a classe 1 os equipamentos com todos os enrolamentos com tensões máximas iguais ou inferiores a 245 kV e a classe 2 os equipamentos com pelo menos um enrolamento com tensão máxima superior a 245 kV.

Para a classe 1 de equipamentos os níveis de isolamentos são delimitados pela tensão suportável nominal de impulso atmosférico e pela tensão suportável nominal à frequência industrial durante um minuto e com frequência reduzida. A escolha desses níveis é feita pela associação à tensão máxima do equipamento, como apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Níveis de isolamento para equipamentos da classe 1.

Tensão máxima do equipamento $U_m$ kV (eficaz)	Tensão suportável nominal normalizada de frequência fundamental de curta duração kV (eficaz)	Tensão suportável nominal normalizada de impulso atmosférico kV (crista)
0,6	4	-
1,2	10	30
3,6	10	20 40
7,2	20	40 60
12	28	60 75 95
15	34	95 110
17,5	38	75 95
24	50	95 125 145
36	70	145 170 200
52	95	250
72,5	140	325 350
92,4	150 185	380 450
123	185 230	450 550
145	185 230 275	450 550 650
170	230 275 325	550 650 750
245	275 325 360 395 460	650 750 850 950 1050

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 6939:2018

É possível notar que, para alguns valores de tensão máxima, há mais de uma possibilidade de tensão suportável nominal de impulso atmosférico. De acordo com a norma ABNT NBR 6939:2018, a escolha da tensão suportável ideal é feita considerando a proteção ou não por para-raios nas proximidades do equipamento. Para equipamentos protegidos por para-raios, deve-se escolher os valores de tensão suportável nominal de impulso atmosférico mais baixos. Já para equipamentos não protegidos por para-raios deve-se escolher os maiores valores. Um estudo de transitórios deve ser realizado para a escolha da tensão suportável de impulso atmosférico ideal em equipamentos que possuem para-raios, o qual considera parâmetros como a corrente suportável e o aterramento do neutro, podendo ser realizado a partir de ferramentas computacionais.

Para a classe 2 de equipamentos os níveis de isolamento são delimitados pela tensão suportável nominal de impulso de manobra, pela tensão suportável nominal de impulso atmosférico pleno normalizado e pela tensão suportável nominal de impulso atmosférico cortado. A escolha desses níveis é feita pela associação à tensão máxima do equipamento, como apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 – Níveis de isolamento para equipamentos da classe 2.

Tensão máxima do equipamento $U_m$ kV (eficaz)	Tensão suportável normalizada de impulso de manobra Fase-terra kV (eficaz)	Tensão suportável normalizada de impulso atmosférico kV (crista)
300	750	850
		950
362	850	950
		1050
	950	1050
420	850	1050
		1175
	950	1300
420/460	1050	1300
		1425
525	950	1175
		1300
525/550	1050	1300
		1425
	1175	1550
550	1300	1550
		1675
765	1300	1675
		1800
765/800	1425	1800
		1950
	1550	1950
1100		2100
	1425	2100
		2100
	1550	2250
	1675	2250
	1800	2400
1200		2400
	1675	2550
		2100
	1800	2250
	1950	2400
	2550	
		2700

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 6939:2018

De acordo com a norma ABNT NBR 6939:2018, a escolha da tensão suportável nominal de impulso de manobra é feita considerando a proteção ou não por para-raios

contra impulsos de manobra. Em transformadores que possuem essa proteção deve-se considerar os valores esperados para sobretensões temporárias, as características do para-raios e os fatores de segurança e de coordenação entre o nível de proteção dos para-raios e a tensão suportável de impulso de manobra do equipamento. Já em transformadores que não possuem essa proteção deve-se considerar o risco aceitável de descarga disruptiva e o grau de controle de sobretensão, considerando as características dos dispositivos de manobra.

A escolha das tensões suportáveis de impulsos atmosféricos é feita da mesma forma do que nos equipamentos da classe 1, considerando a existência ou não de para-raios e realizando o estudo de transitórios.

Em autotransformadores, a tensão suportável à frequência industrial deve ser definida considerando a tensão máxima como a tensão do terminal de menor tensão.

#### 4.3.0.2 Distância de Escoamento

A norma ABNT IEC/TS60815-1:2014 define a distância de escoamento como a menor distância, ou soma das menores distâncias, ao longo do contorno da superfície externa do corpo isolante do isolador, entre as partes que normalmente são submetidas à tensão de operação do sistema. Esse parâmetro é dado em mm/kV, estando relacionado ao isolamento dos equipamentos.

A distância de escoamento mínima é estabelecida de acordo com as condições ambientais do local em que a subestação será instalada, visto que os fatores climáticos, como vento, umidade e poluição, podem reduzir a capacidade de isolamento dos isoladores, levando a descargas elétricas indesejadas. A Tabela 3 apresenta os níveis de poluição e seus respectivos ambientes típicos e a Tabela 4 apresenta os valores das distâncias mínimas de escoamento para os níveis de poluição apresentados.

Tabela 3 – Níveis de poluição e ambientes característicos.

Nível de Poluição	Ambientes Típicos
I - Muito Leve	- Áreas situadas a mais de 50 km de distância do mar, deserto ou terra plana árida; - Áreas situadas a mais de 10 km de distância de fontes da poluição humana.
II - Leve	- Áreas situadas entre 10 e 50 km de distância do mar, deserto ou terra plana árida; - Áreas situadas entre 5 a 10 km de distância de fontes da poluição humana.
III - Médio	- Áreas situadas entre 3 e 10 km de distância do mar, deserto ou terra plana árida; - Áreas situadas entre 1 a 5 km de distância de fontes da poluição humana.
IV - Pesado	- Áreas situadas a menos de 3 km de distância do mar, deserto ou terra plana árida; - Áreas situadas a menos de 1 km de distância de fontes da poluição humana.
V - Muito Pesado	Dentro da distância das fontes de poluição mencionada para áreas de poluição "pesada", e: - diretamente submetida a borrifos de água do mar ou névoa salina densa; - ou submetida diretamente a contaminantes com elevada condutividade, ou poeira de cimento com elevada densidade e frequente umidificação por névoa ou chuva; - áreas desérticas com rápida acumulação de areia e sal e condensação regular.

Fonte: Adaptado de ABNT IEC/TS60815-1:2014

Tabela 4 – Distância mínima de escoamento por nível de poluição.

Nível de Poluição	Distância Mínima de Escoamento (mm/kV)
I - Muito Leve	12,7
II - Leve	16
III - Médio	20
IV - Pesado	25
V - Muito Pesado	31

Fonte: Adaptado de ABNT IEC/TS60815-1:2014

## 4.4 Transformação

A etapa de transformação da energia em subestações é realizada a partir da utilização de diversos equipamentos, sendo o principal o transformador de potência. As diretrizes de projeto desses equipamentos serão abordadas nas seções seguintes.

### 4.4.1 Transformador de Potência

A especificação de projeto de um transformador de potência deve ser baseada na norma ABNT NBR 5356-1:2007. Os principais requisitos a serem definidos em um projeto de um transformador de potência estão citados a seguir.

1. Número de fases;
2. Frequência nominal;
3. Tensões nominais nos enrolamentos;
4. Tensão nominal na bucha;
5. Potência nominal;
6. Impedância percentual;
7. Tipo de refrigeração;
8. Tipo de ligação;
9. Tipo de comutação;
10. Níveis de isolamento.

Nas seções a seguir serão definidas as diretrizes de especificação do tipo de refrigeração, do tipo de ligação, do tipo de comutação e dos níveis de isolamento.

#### 4.4.1.1 Tipo de Refrigeração

A refrigeração de um transformador é de extrema importância, visto que há uma perda de energia convertida em calor, o que pode danificar o equipamento. Segundo



Tabela 5 – Tipos de refrigeração e seus símbolos.

Natureza do meio de resfriamento	Símbolo
Óleo	O
Líquido isolante sintético não-inflamável	L
Gás	G
Água	W
Ar	A
Natureza da circulação	Símbolo
Natural	N
Forçada (no caso de óleo, fluxo não dirigido)	F
Forçada com fluxo de óleo dirigido	D

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 5356-1:2007

a norma ABNT NBR 5356-1:2007, existem cinco meios de refrigeração e três tipos de circulação, os quais estão apresentados na Tabela 5.

Os tipos de transformadores mais utilizados na indústria são os transformadores a seco (a ar natural ou forçado) e os transformadores a óleo. A escolha da refrigeração ideal para a sua aplicação deve considerar a potência elétrica do transformador.

A refrigeração a ar natural é a mais simples, visto que é feita a partir da circulação do ar do ambiente, sendo chamado de autorrefrigerado. Esse tipo de refrigeração é utilizada em transformadores de baixa potência, visto que é dependente da temperatura ambiente, não tendo capacidade de resfriar transformadores de alta potência que geram mais calor. Assim, esse tipo de refrigeração não é recomendado em transformadores de potência utilizados em subestações de alta tensão.

A refrigeração a ar forçado consiste na utilização de ventiladores e sopradores para aumentar o volume de ar que se move pelas superfícies de resfriamento, havendo maior dissipação de calor do que a refrigeração por ar natural. No entanto, esse tipo de refrigeração não é recomendado em subestações de alta tensão.

Os transformadores a óleo possuem o núcleo e os enrolamentos imersos em óleo mineral (derivado do petróleo) ou vegetal, o qual exerce as funções de resfriamento e isolamento do equipamento. O óleo mineral é um material inflamável, sendo necessária a utilização de componentes de segurança, como relés de proteção e um sistema de proteção contra incêndios. As subestações operam com altos valores de potência; portanto, o método a óleo é o mais utilizado.

#### 4.4.1.2 Tipo de Ligação

Um transformador de potência pode ter os seus enrolamentos conectados em estrela ou triângulo. A escolha do tipo de ligação de cada enrolamento é feita baseada no tipo da carga a ser suportada e na presença de harmônicos.

A ligação estrela-estrela ( $Yy$ ) possui as tensões em fase entre os enrolamentos e um neutro em ponto comum de conexão entre os enrolamentos. Essa ligação tem como vantagens a inexistência de deslocamento de fase, a necessidade de menos espiras para o enrolamento e a capacidade de suportar cargas pesadas. A existência do neutro gera a circulação de terceira harmônica, as quais estão em fase, podendo causar sobreaquecimento no transformador. Portanto, esse tipo de ligação não é recomendada para utilizações em transformadores de dois enrolamentos em subestações.

O problema da circulação da terceira harmônica pode ser solucionado aterrando o neutro do transformador, fazendo com que a corrente aditiva da terceira harmônica circulante escoe através do neutro ao invés de somar. Outra solução é conectar o terceiro enrolamento (terciário) em triângulo, resultando em um fluxo de corrente que circula dentro do enrolamento em triângulo, causado pela soma das terceiras harmônicas que circulam na ligação triângulo. A ligação estrela-estrela-triângulo ( $Yyd$ ) pode ser utilizadas em transformadores com três enrolamentos utilizados em subestações.

A ligação triângulo-triângulo ( $Dd$ ) também possui as tensões em fase entre os enrolamentos, no entanto não possui neutro. Pela inexistência do ponto neutro, esse tipo de ligação não gera correntes harmônicas. Esse tipo de ligação não é amplamente utilizado, visto que não possui neutro, não permitindo a proteção de ligar o neutro à terra.

As ligações triângulo-estrela ( $Dy$ ) e estrela-triângulo ( $Yd$ ), ou seja, com um enrolamento conectado em triângulo e o outro em estrela. Essas ligações apresentam defasagem entre os enrolamentos e permitem que as harmônicas geradas pela ligação estrela sejam filtradas pelo enrolamento em triângulo. A ligação triângulo-estrela é comumente utilizada em transformadores elevadores de tensão nas saídas de centrais e em transformadores redutores em postos de transformação. Já a ligação estrela-triângulo geralmente é utilizada em transformadores redutores de tensão no fim das linhas de distribuição de energia que não precisam de neutro secundário.

#### 4.4.1.3 Tipo de Comutação

O comutador de um transformador de força é responsável por realizar a mudança de ligação das derivações dos enrolamentos, variando a tensão dos seus terminais para manter a tensão aproximadamente constante na carga. Os transformadores de força podem apresentar comutador sem carga (*No Load Tap Change* - NLTC), com carga (*On Load Tap Change* - OLTC) ou não apresentar comutador. A escolha do tipo de comutação deve considerar as cargas a serem suportadas e a possibilidade de desligamento do transformador.

O comutador NLTC deve operar somente com o transformador desenergizado para a realização da mudança de tensão. No entanto, as subestações de energia elétrica operam continuamente, sendo desligadas apenas para a realização de manutenções. Portanto, comutadores NLTC não são indicados para operação em subestações, visto que não é possível desligar o sistema cada vez que for necessária a variação de tensão.

O comutador OLTC pode operar com o transformador energizado, não havendo necessidade do desligamento do sistema, podendo ser acionado eletricamente ou manualmente. Portanto, esse tipo de comutador é o ideal para ser utilizado em transformadores de força de subestações.

#### 4.4.2 Transformador de Corrente

A especificação de projeto de um transformador de corrente deve ser baseada na norma ABNT NBR IEC 61869-2:2021. Os principais requisitos a serem definidos em um projeto de um transformador de corrente estão citados a seguir.

1. Frequência nominal;
2. Tensão nominal;
3. Correntes nominais dos enrolamentos;
4. Número de enrolamentos para medição e proteção;
5. Cargas nominais;
6. Classes de exatidão;
7. Distância de escoamento;

## 8. Níveis de isolamento.

Nas seções a seguir serão definidas as diretrizes de especificação das classes de exatidão.

### 4.4.2.1 Classes de Exatidão

A classe de exatidão expressa o erro esperado do transformador de corrente considerando o erro de relação de transformação e o erro de defasagem entre as correntes primária e secundária. As classes de exatidão são diferentes para transformadores de corrente utilizados para medição e para proteção.

Os TCs utilizados em subestações são para serviços de medição. Segundo a norma ABNT NBR IEC 61869-2:2021, os TCs para serviços de medição devem ser enquadrados em uma das seguintes classes de exatidão: 0,1 - 0,2 - 0,2S - 0,5 - 0,5S - 1,0 - 3,0 - 5,0. As classes de exatidão 3 e 5 não devem ser utilizadas para serviço de medição de potência ou de energia, visto que não possuem limitação de ângulo de fase.

As classes de exatidão 0,1 - 0,2 - 0,2S são indicadas para utilização em TCs aplicados para medição de energia para fins de faturamento. Já as classes de exatidão 0,5 - 0,5S - 1,0 são indicadas para TCs aplicados para medição de energia sem fins de faturamento e medições de controle, ou seja, são as classes indicadas para utilizações em subestações.

### 4.4.3 Transformador de Potencial

A especificação de projeto de um transformador de potencial deve ser baseada na norma ABNT NBR 61869-3:2021. Os principais requisitos a serem definidos em um projeto de um transformador de potencial estão citados a seguir.

1. Frequência nominal;
2. Tensões nominais nos enrolamentos;
3. Número de enrolamentos para medição e proteção;
4. Classes de exatidão;

5. Cargas nominais;
6. Distância de escoamento;
7. Níveis de isolamento.

Nas seções a seguir serão definidas as diretrizes de especificação das classes de exatidão.

#### 4.4.3.1 Classes de Exatidão

As classes de exatidão de transformadores de potencial são análogas às classes de transformadores de corrente. De acordo com a norma ABNT NBR IEC 61869-5:2021, os TPs para serviços de medição devem ser enquadrados em uma das seguintes classes de exatidão: 0,2 - 0,5 - 1,0 - 3,0. A classe de exatidão 3 não deve ser utilizada para serviço de medição de potência ou de energia, visto que não possui limitação de ângulo de fase. Analogamente aos TCs, os requisitos para a determinação da exatidão são baseados na carga nominal do TP.

A classe de exatidão 0,2 é indicada para utilização em TPs aplicados para medição de energia para fins de faturamento. Já as classes de exatidão 0,5 - 1,0 são indicadas para TPs aplicados para medição de energia sem fins de faturamento e medições de controle, ou seja, são as classes indicadas para utilizações em subestações.

## 4.5 Manobra

As operações de manobra são responsáveis pelo chaveamento de conexões e equipamentos em uma subestação. Os principais equipamentos utilizados em manobras são os disjuntores e as chaves seccionadoras, cujas diretrizes de projeto estão apresentadas nas seções a seguir.

### 4.5.1 Disjuntores

A especificação de projeto de disjuntores deve ser feita baseada na norma IEEE Std C37.12:2018. Os seus principais requisitos estão citados a seguir.

1. Frequência nominal;

2. Tensão nominal;
3. Corrente nominal;
4. Corrente de curto-circuito;
5. Tipo construtivo;
6. Tipo de acionamento;
7. Distância de escoamento;
8. Níveis de isolamento.

As seções a seguir abordarão as diretrizes de projetos dos requisitos: tipo construtivo e tipo de acionamento.

#### 4.5.1.1 Tipo Construtivo

Conforme apresentado na Seção 3.3, os tipos construtivos de disjuntores são: disjuntores a ar comprimido, a vácuo, a óleo e a gás  $SF_6$ . Segundo a norma IEEE Std C37.12:2018 os disjuntores a ar comprimido, a sopro magnético e a óleo não são mais fabricados, portanto não são mais utilizados em projetos de novas subestações.

De acordo com McDonald (2007), os disjuntores utilizados em subestações GIS também devem ser isolados a gás  $SF_6$ , utilizando os mesmos tanques de gás para o isolamento da subestação e dos disjuntores.

De acordo com McDonald (2007), os disjuntores a vácuo geralmente são utilizados em circuitos de até 38 kV.

#### 4.5.1.2 Tipo de Acionamento

Os disjuntores podem ter os seguintes tipos de acionamento: por solenoide, à mola, a ar comprimido e hidráulico. O tipo de acionamento deve ser escolhido considerando a tensão do circuito e o tipo construtivo do disjuntor.

O acionamento por solenoide utiliza uma bobina solenoide para acionar os contatos na operação de fechamento e para carregar a mola e para carregar a mola de abertura.

O acionamento a mola armazena a energia necessária ao fechamento em uma mola, a qual é carregada através de motores de corrente contínua ou de corrente alternada. Esse tipo de acionamento é utilizado em circuitos de alta e extra-alta tensão, sendo recomendado para aplicações em subestações de alta tensão.

O acionamento a ar comprimido armazena a energia necessária para o fechamento do disjuntor em câmaras de ar comprimido e geralmente é utilizado em disjuntores que possuem o método de extinção do arco por ar comprimido. Como esse tipo de disjuntor não é mais fabricado, esse acionamento não é conveniente.

O acionamento hidráulico armazena a energia em um acumulador hidráulico, o qual é composto por um cilindro contendo um êmbolo estanque e óleo ligado aos circuitos de alta e baixa pressão através de bomba hidráulica de um lado, e do outro lado uma quantidade de gás Nitrogênio ( $N_2$ ). Esse tipo de acionamento é recomendado para utilização em disjuntores de extra-alta tensão que são isolados a  $SF_6$ , visto que possui grande capacidade de armazenamento de energia, dimensões reduzidas e capacidade de aumentar a capacidade do acionamento ao aumentar o volume de  $N_2$  sem mudar a configuração básica do acionamento.

#### 4.5.2 Chaves Seccionadoras

A especificação de projeto de disjuntores deve ser feita baseada na norma ABNT NBR IEC 62271-102:2006. Os seus principais requisitos estão citados a seguir.

1. Frequência nominal;
2. Tensão nominal;
3. Corrente nominal;
4. Corrente de curto-circuito;
5. Tipo construtivo;
6. Tipo de acionamento;
7. Distância de escoamento;
8. Níveis de isolamento.

As seções a seguir abordarão as diretrizes de projetos dos requisitos: tipo construtivo e tipo de acionamento.

#### 4.5.2.1 Tipo Construtivo

Existem diversos tipos construtivos de chaves seccionadoras, sendo as principais: abertura lateral, abertura vertical, abertura central, dupla abertura, vertical reverso e faca. A escolha do tipo construtivo ideal é feita considerando a tensão nominal do seccionador. A Tabela 6 apresenta os tipos construtivos de seccionadores, sendo H horizontal, V vertical e I invertida.

Tabela 6 – Tipos construtivos de chaves seccionadoras.

Tensão nominal kV (eficaz)	Tipos construtivos	Formas de montagem
15	Abertura lateral	H - V - I
	Abertura vertical	H - V
	Faca	V - I
24,2	Abertura lateral	H - V - I
	Abertura vertical	H - V
	Faca	V - I
36,2	Abertura lateral	H - V - I
	Abertura vertical	H - V
	Faca	V - I
72,5	Abertura central	H - I
	Abertura lateral	H - V - I
	Abertura vertical	H - V
145	Abertura central	H - I
	Abertura vertical	H - V
	Dupla abertura	H - I
	Vertical reverso	H
242	Abertura vertical	H
	Dupla abertura	H
	Vertical reverso	H
362	Abertura vertical	H
	Dupla abertura	H - I
460	Abertura vertical	H
550	Abertura vertical	H
800	Abertura vertical	H

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 7571:2011



#### 4.5.2.2 Tipo de Acionamento

O acionamento das lâminas das chaves seccionadoras pode ser feito manualmente ou de modo motorizado.

O acionamento manual direto é feito individualmente por meio de vara de manobra. Este tipo de acionamento é dependente da subjetividade do operador, portanto não é apropriado para operação em carga, visto que a velocidade de abertura é um fator importante nesta operação. O acionamento manual indireto é feito através de um dispositivo de acionamento. Também não são indicados para altas tensões pois os seccionadores são grandes e pesados, não sendo apropriados para operação manual. Portanto, esse tipo de acionamento não é indicado para usos em subestações.

Logo, o tipo de acionamento ideal para chaves seccionadoras utilizadas em subestações é o modo motorizado, o qual é realizado por meio de motores elétricos, acionadores hidráulicos ou por outros métodos de acionamento.

## 4.6 Compensação de Reativos

### 4.6.1 Banco de Capacitores em Derivação

A especificação de projeto de bancos de capacitores deve ser feita baseada na norma ABNT NBR 5282:1998. Os seus principais requisitos estão citados a seguir.

1. Frequência nominal;
2. Tensão nominal;
3. Potência reativa trifásica à frequência nominal do sistema;
4. Esquema de ligação;
5. Número de grupos de capacitores em série por fase;
6. Número de capacitores em paralelo para cada grupo série;
7. Uso interno ou externo;
8. Distância de escoamento;

## 9. Níveis de isolamento.

A especificação do esquema de ligação está explicada na seção a seguir.

### 4.6.1.1 Esquema de Ligação

Os bancos de capacitores em derivação podem ter as seguintes ligações: estrela aterrada ou dupla estrela aterrada, estrela isolada ou dupla estrela isolada e triângulo ou duplo triângulo. A escolha do esquema de ligação de um banco de capacitores em derivação deve ser feita de acordo com a ligação do transformador a ser corrigido.

A fim de evitar distúrbios de ressonância, a ligação dos bancos conectados em transformadores ligados em estrela aterrada ou não aterrada deve ser igual à ligação dos transformadores. Para corrigir transformadores ligados em triângulo, os bancos devem ser conectados em estrela aterrada ou em triângulo.

### 4.6.2 Reatores em Derivação

A especificação de projeto de reatores em derivação deve ser feita baseada na norma ABNT NBR 5356-6:2012. Os seus principais requisitos estão citados a seguir.

1. Número de fases;
2. Frequência nominal;
3. Tensão nominal;
4. Potência reativa;
5. Tipo de refrigeração;
6. Tipo de ligação;
7. Regime;
8. Impedância de sequência zero (para reatores trifásicos);
9. Níveis de isolamento.

O tipo de refrigeração é determinado da mesma forma do que o tipo de refrigeração de transformadores de potência, cujas diretrizes de especificação estão apresentadas na Seção 4.3.2.1.

## 4.7 Proteção

A proteção de uma subestação pode ser realizada a partir da utilização de para-raios e da blindagem da subestação. As diretrizes de projeto de ambos métodos de proteção estão apresentados nas seções a seguir.

### 4.7.1 Para-raios

A especificação de projeto de para-raios deve ser feita baseada nas norma ABNT NBR 16050:2012. Os seus principais requisitos estão citados a seguir.

1. Frequência nominal;
2. Tensão nominal do sistema;
3. Tensão nominal do para-raios;
4. Máxima tensão de operação contínua;
5. Corrente de descarga nominal;
6. Distância de escoamento.

As diretrizes de determinação da tensão nominal do para-raios, da máxima tensão de operação contínua e da corrente de descarga nominal de para-raios estão apresentadas nas seções a seguir.

#### 4.7.1.1 Tensão Nominal do Para-raios

Segundo a norma ABNT NBR 16050:2012, as tensões nominais dos para-raios são normalizadas e especificadas em degraus iguais de tensão dentro de determinadas faixas, conforme apresentado na Tabela 7. A tensão nominal deve ser normalizada a partir da tensão do circuito em que o para-raios será aplicado, visto que a tensão nominal deve estar dentro das faixas de tensão apresentadas e ser múltipla de seis.

Tabela 7 – Valores de tensão nominal de para-raios.

Faixa de Tensão Nominal kV (eficaz)		Degraus de Tensão Nominal
3	12	1
12	54	3
54	108	6
108	288	12
288	396	18
396	756	24

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 16050:2012

A tensão nominal do para-raios deve ser pelo menos 125% da máxima tensão de operação contínua, conforme apresentado na Equação 4.1.

$$U_n = 1,25 \cdot U_c \quad (4.1)$$

Onde:

$U_n$  - Tensão nominal do para-raios;

$U_c$  - Máxima tensão de operação contínua.

#### 4.7.1.2 Máxima Tensão de Operação Contínua

Segundo a norma ABNT NBR 16050:2012, a máxima tensão de operação contínua consiste na máxima tensão eficaz permissível à frequência industrial que pode ser aplicada continuamente aos terminais do para-raios. Essa tensão é determinada a partir da tensão nominal do para-raios e de acordo com as características do sistema.

Para para-raios de óxido metálico utilizados em sistemas que possuem o neutro isolado, ou seja, o neutro aterrado através de um equipamento (como um resistor, reator, entre outros), a máxima tensão de operação contínua deve ser 10% maior do que a tensão fase-fase do sistema, conforme apresentado na Equação 4.2. O resultado obtido no cálculo deve ser aproximado ao valor superior mais próximo do valor de tensão calculado.

$$U_c = 1,1 \cdot U_{ns} \quad (4.2)$$

Onde:

$U_c$  - Máxima tensão de operação contínua, expressa em Volts (V);

$U_{ns}$  - Tensão nominal do sistema, expressa em Volts (V).

Para sistemas que possuem o neutro aterrado, a máxima tensão de operação contínua deve ser 10% maior do que a tensão fase-terra do sistema, conforme apresentado na Equação 4.3. O resultado obtido no cálculo deve ser aproximado ao valor superior mais próximo do valor de tensão calculado.

$$U_c = 1,1 \cdot \frac{U_{ns}}{\sqrt{3}} \quad (4.3)$$

Onde:

$U_c$  - Máxima tensão de operação contínua, expressa em Volts (V);

$U_{ns}$  - Tensão nominal do sistema, expressa em Volts (V).

#### 4.7.1.3 Corrente de Descarga Nominal

De acordo com a norma ABNT NBR 16050:2012, os para-raios podem ter os seguintes valores de corrente de descarga nominal: 5 kA, 10 kA e 20 kA. Os para-raios de 5 kA são da utilizados em sistemas de distribuição, enquanto os de 10 kA e 20 kA são utilizados em subestações.

A escolha entre para-raios de 10 kA ou de 20 kA é feita considerando a tensão nominal do para-raios, conforme apresentado a seguir.

- Corrente de descarga nominal de 10 kA - Tensão nominal do para-raios de 3 a 360 kV eficaz;
- Corrente de descarga nominal de 20 kA - Tensão nominal do para-raios de 276 a 612 kV eficaz.

#### 4.7.2 Blindagem

A norma ABNT NBR 5419-1:2015 define a blindagem magnética como uma "tela metálica, em forma de malha ou contínua, que envolve a estrutura a ser protegida, ou parte dela, utilizada para reduzir falhas dos sistemas eletroeletrônicos". Para a proteção

ideal, a blindagem deve ser contínua, condutora, aterrada e de espessura adequada; caso contrário, ocorre a penetração da corrente da descarga atmosférica, podendo causar danos físicos, risco de vida e falha dos sistemas internos. A blindagem da subestação consiste no Sistema de Proteção contra Descargas Elétricas (SPDA) da subestação.

Para auxiliar no projeto de blindagem são definidos níveis de proteção (NP) na norma ABNT NBR 5419-1:2015, a qual define o nível de proteção contra descargas atmosféricas como um "número associado a um conjunto de parâmetros da corrente elétrica para garantir que os valores especificados em projeto não estão superdimensionados ou subdimensionados quando da ocorrência de uma descarga atmosférica". Os NPs são de I a IV, de acordo com as intensidades das corrente de raios que esperamos receber na edificação, sendo o nível I o mais rigoroso. A Tabela 8 apresenta exemplos de tipos de estruturas, os efeitos de descargas atmosféricas nessas estruturas e os seus níveis de proteção.

Tabela 8 – Exemplos de estruturas e seus níveis de proteção.

Tipo de Estrutura	Efeitos das Descargas Atmosféricas	Nível de Proteção
Casa de moradia	- Perfuração de isolamento das instalações elétricas, incêndio e danos materiais. - Danos normalmente limitados a objetos expostos ao ponto de impacto ou no caminho da corrente - Falhas de equipamentos e sistemas elétricos e eletrônicos instalados (exemplos: aparelhos de TV, computadores, <i>modems</i> , telefones etc.).	III
Edificação em zona rural	- Risco maior de incêndio e tensões de passo perigosas perigosas, assim como danos materiais. - Risco secundário devido à perda de energia elétrica e risco de vida dos animais de criação devido à falha de sistemas de controle eletrônicos de ventilação e suprimento de alimentos etc.	III
Teatro ou cinema Hotel Escola <i>Shopping centers</i> Áreas de esporte	- Danos em instalações elétricas que tendem a causar pânico (por exemplo, iluminação elétrica). - Falhas em sistemas de alarme de incêndio, resultando em atrasos nas ações de combate a incêndio.	II
Banco Empresa de seguros Estabelecimento comercial etc	- Conforme acima, adicionando-se problemas resultantes da perda de comunicação, falha de computadores e perda de dados.	II
Hospital Casa de tratamento médico Casa para idosos Creche Prisão	- Conforme acima, adicionando-se os problemas a pessoas em tratamento médico intensivo e a dificuldade de resgatar pessoas incapazes de se mover.	II
Indústria	- Efeitos adicionais dependendo do conteúdo das fábricas, que vão desde os menos graves até danos inaceitáveis e perda de produção.	III
Museu e sítio arqueológico Igreja	- Perda de patrimônio cultural insubstituível.	II
Estação de telecomunicações Estação de geração e transmissão de energia elétrica	- Interrupções inaceitáveis de serviços ao público.	I
Fábrica de fogos de artifício Trabalhos com munição	- Incêndio e explosão com consequências à planta e arredores.	I
Indústria química Refinaria Usina nuclear Indústria e laboratório de bioquímica	- Incêndio e mau funcionamento da planta com consequências prejudiciais ao meio ambiente local e global.	I

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 5419-1:2015

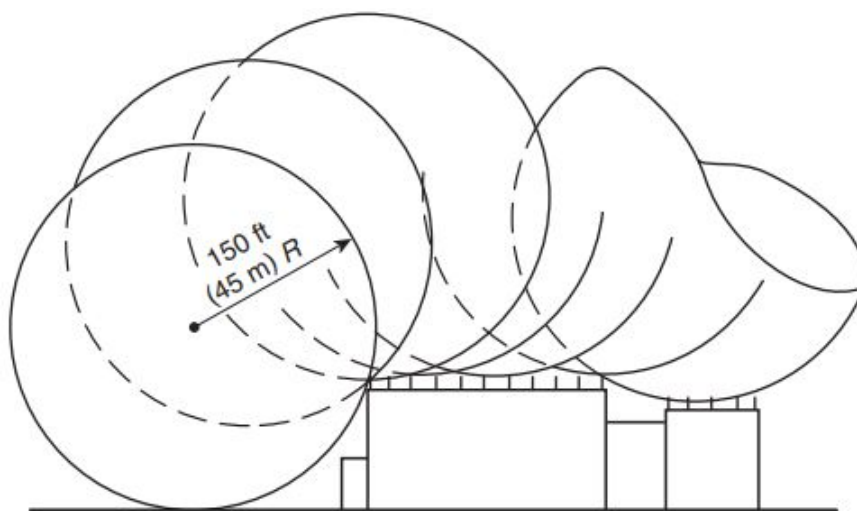
As subestações de energia fazem parte da categoria "Estação de geração e transmissão de energia elétrica", portanto, conforme observado na Tabela 8, é uma estrutura de nível de proteção I, ou seja, nível máximo de proteção.

A seção a seguir aborda o Modelo Eletrogeométrico, o qual é o método de cálculo de SPDA mencionado na norma ABNT NBR 5419-1:2015 e o mais utilizado em projetos de blindagem de subestações.

#### 4.7.2.1 Modelo Eletrogeométrico

O Modelo Eletrogeométrico (também chamado de Método da Esfera Rolante) consiste em rodar uma esfera fictícia, com raio predeterminado, em todos os sentidos e direções sobre o topo e fachadas da edificação, tendo como objetivo que os capttores lançados impeçam que a esfera toque a edificação. Os elementos sob a curva formada pela esfera rolante durante o trajeto estão protegidos, mas os locais em que a esfera toca a edificação não estão, sendo necessária proteção nesses locais, aplicando capttores nesses locais. A Figura 17 apresenta um exemplo do modelo eletrogeométrico aplicado a um prédio com raio da esfera de 45 m.

Figura 17 – Exemplo do modelo eletrogeométrico aplicado a um prédio.



Fonte: NFPA 780 (2020)

Segundo a norma ABNT NBR 5419-1:2015, o raio da esfera rolante está relacionado com o valor de pico do primeiro impulso de corrente. Essa relação é representada pela Equação 4.4.

$$r = 10 \cdot I^{0,65} \quad (4.4)$$

Onde:

$r$  - Raio da esfera rolante, expresso em metros (m);

$I$  - Corrente de pico, expressa em quiloampères (kA).

Os raios da esfera rolante podem ser determinados a partir do nível de proteção



da estrutura, de modo a definir a zona de proteção contra descargas elétricas. A Tabela 9 apresenta os valores mínimos da corrente de pico, os respectivos raios da esfera rolante e os NPs correspondentes.

Tabela 9 – Raios da esfera rolante e corrente de pico de acordo com o nível de proteção.

Nível de Proteção NP	Corrente de Pico Mínima kA	Raio da Esfera Rolante m
I	3	20
II	5	30
III	10	45
IV	16	60

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 5419-1:2015

## 5 Estudo de Caso - Subestação Desterro

Neste capítulo é proposto um estudo de caso a fim de aplicar as diretrizes de projetos de subestações abordadas neste trabalho. O estudo de caso é realizado analisando o projeto da Subestação Desterro 230/138 kV, localizada em Florianópolis, Santa Catarina.

Em outubro de 2003 ocorreu um blecaute na parte insular da cidade de Florianópolis, o qual deixou a cidade sem energia elétrica durante mais de 50 horas, devido a um acidente nos cabos de transmissão de energia que passavam pela ponte que conecta a ilha ao continente. Após esse ocorrido, a ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) identificou a necessidade de reforçar o sistema elétrico de transmissão de energia, determinando a ampliação da SE Palhoça, a construção de duas novas subestações, a SE Desterro e a SE Biguaçu, e a construção e ampliação de linhas de transmissão para conectar a SE Biguaçu à rede básica de transmissão. A linha de transmissão Biguaçu - Desterro está apresentado na Figura 18.

Figura 18 – Linha de transmissão Biguaçu-Desterro.



Fonte: Lee *et al.* (2009)

## 5.1 Configuração da Subestação

A Subestação Desterro é uma subestação abaixadora, responsável por diminuir a tensão de 230 kV para 138 kV, com 300 MVA de potência, para reforçar o sistema elétrico de transmissão de energia em Florianópolis, Santa Catarina. A configuração final dessa subestação está apresentada a seguir.

- 03 módulos de linhas de transmissão de 230 kV;
- 04 módulos de autotransformadores trifásicos de 230/138 kV e 150 MVA cada;
- 01 módulo de disjuntor de transferência de 230 kV;
- 08 módulos de linhas de transmissão de 138 kV;
- 01 módulo de disjuntor de transferência de 138 kV.

Na Figura 19 está apresentada a Subestação Desterro.

Figura 19 – Subestação Desterro.



Fonte: SCHREIBER ENGENHARIA

Como é possível observar na Figura 18, a linha de transmissão que alimenta a SE Desterro inicia na SE Biguaçu e passa pela SE Palhoça; assim, a linha de transmissão

Biguaçu - Desterro tem comprimento de aproximadamente 56,65 km. Por ter uma distância considerada curta entre as subestações, não há necessidade de compensação de reativos na SE Desterro, visto que não ocorre grandes perdas de tensão em linhas de transmissão curtas.

## 5.2 Isolamento da Subestação

O isolamento da SE Desterro é feito a ar, ou seja, a subestação é uma AIS.

A SE Desterro está localizada no Bairro Campeche, no município Florianópolis, no estado de Santa Catarina, ou seja, está localizada em área urbana, a aproximadamente 1 km de residências, estabelecimentos comerciais e da rodovia estadual SC-405, conforme apresentado na Figura 20. No entanto, no entorno da subestação há uma grande área verde, com árvores e plantas, tendo espaço suficiente para ser isolada a ar atmosférico, proporcionando alta acessibilidade, fácil manutenção, monitoramento e segurança.

Figura 20 – Localização da Subestação Desterro.



Fonte: Adaptado de GOOGLE MAPS (2022)

## 5.3 Alimentação da Subestação

A SE Desterro está localizada na ilha de Florianópolis, sendo interligada à Subestação Biguaçu. Conforme mencionado anteriormente, a linha de transmissão Biguaçu-Desterro que conecta as duas subestações e, portanto, alimenta a Subestação Desterro é composta por três trechos: trecho aéreo no continente, trecho submarino entre o continente e a ilha e trecho aéreo na ilha. Assim, a alimentação da subestação em questão é feita diretamente por ramal aéreo.

A energia é transmitida dentro da subestação por meio de barramentos, sendo eles do arranjo barra dupla a quatro chaves, o qual consiste em dois barramentos nos quais cada circuito é conectado através de seccionadoras seletoras de barras, uma chave de *bypass* em paralelo com um disjuntor para casos de emergência ou manutenção. Esse arranjo está de acordo com as normas do ONS, as quais definem que barramentos de 230 kV devem ser configurados no arranjo barra dupla com disjuntor simples e quatro chaves.

## 5.4 Características Gerais dos Equipamentos

A SE Desterro possui pátios de 230 kV e de 138 kV, os quais são das classes de tensão de 245 kV e de 145 kV, respectivamente. Ambos pátios possuem equipamentos de alta tensão com características gerais e específicas de cada um. As características de níveis de isolamento e de distância de escoamento estão apresentadas nas seções a seguir.

### 5.4.1 Níveis de Isolamento

Com exceção do transformador de potência, todos os equipamentos utilizados na Subestação Desterro possuem as mesmas tensões nominais de 138 e 230 kV e não possuem para-raios para suas proteções diretas. Portanto, os níveis de isolamento dos TCs, dos TPs, dos disjuntores e das chaves seccionadoras devem ser iguais.

Os níveis de isolamento dos equipamentos de 230 kV são: tensão suportável nominal à frequência industrial de 395 kV e tensão suportável nominal de impulso atmosférico de 950 kV. E dos equipamentos de 138 kV são: tensão suportável nominal à frequência industrial de 275 kV e tensão suportável nominal de impulso atmosférico de 650 kV. As tensões máximas dos equipamentos são padronizadas, portanto, deve-se considerar as

tensões máximas de 245 kV e 145 kV.

A subestação estudada não possui para-raios nos equipamentos mencionados; portanto, os níveis de isolamento devem ser os maiores das suas classe de tensão. Logo, analisando a Tabela 1, os níveis de isolamento dos equipamentos devem ser: tensão suportável nominal de frequência industrial de 460 kV para os equipamentos de 230 kV e de 275 kV para os de 138 kV e tensão suportável nominal de impulso atmosférico de 1050 kV para os equipamentos de 230 kV e de 650 kV para os de 138 kV.

#### 5.4.2 Distância de Escoamento

Conforme apresentado anteriormente, a SE Desterro está localizada no bairro Campeche, em Florianópolis, o qual é um bairro com praia. A SE está situada a pouco mais de 3 km do mar e a pouco mais de 1 km da área urbana, a qual é fonte de poluição humana. Portanto, o nível de poluição da SE é médio.

Para ambientes de nível de poluição médio, a distância mínima de escoamento deve ser de 25 mm/kV. Logo, a distância de escoamento dos equipamentos da SE Desterro deve ser de 25 mm/kV.

### 5.5 Equipamentos de Transformação

Nas seções seguintes serão apresentadas as especificações dos equipamentos da SE Desterro e as análises sobre estas especificações.

#### 5.5.1 Transformador de Potência

O elemento transformador de potência de 230/138 kV trata-se de um banco de autotransformadores trifásicos. As especificações do transformador de força 230/138 kV utilizado na Subestação Desterro estão apresentados na Tabela 10.

O transformador de potência utilizado foi especificado de acordo com a norma ABNT NBR 5356:1993, a qual foi substituída em 2007 por sua nova versão. A seguir serão realizadas as análises sobre o tipo de refrigeração, o tipo de ligação, o tipo de comutação e os níveis de isolamento.

Tabela 10 – Especificações do autotransformador utilizado na Subestação Desterro.

Característica	Especificação
Número de Fases	3
Frequência Nominal	60 Hz
Tensão Nominal - Primário	230 kV
Tensão Nominal - Secundário	138 kV
Tensão Nominal - Terciário	13,8 kV
Potência de Alta Tensão	100 / 125 / 150 MVA
Potência de Baixa Tensão	100 / 125 / 150 MVA
Potência do Terciário	30 / 40 / 50 MVA
Tipo de Refrigeração	ONAN / ONAF / ONAF
Tensão Suportável Nominal à Frequência Industrial	34 kV
Tensão Suportável Nominal ao Impulso Atmosférico	850 kV
Elevação de Temperatura: Enrolamentos	65 °C
Elevação de Temperatura: Óleo	65 °C
Tipo	HC / OP / OPTLAR-D
Identificação do Óleo	NAFTÊNICO - TIPO NYNAS 11GBX-US
Nível de Ruído	83 dB

Fonte: Adaptado de Silva (2018)

#### 5.5.1.1 Tipo de Refrigeração

Os tipos de refrigeração utilizados no transformador de potência são ONAN, ONAF e ONAF, ou seja, o sistema de resfriamento possui dois estágios compostos por bombas ou ventiladores e um estágio de resfriamento natural.

Conforme explicado na seção 4.3.2.1, o tipo de refrigeração interno ideal para um transformador de potência utilizado em uma subestação é óleo circulando por convecção natural. Já a refrigeração externa deve ser feita por ar, podendo ser de maneira natural ou forçada. Como o transformador de é de alta potência e possui enrolamento terciário, é recomendado utilizar três estágios de refrigeração, um estágio a resfriamento natural para o caso de potência reduzida e dois estágios de resfriamentos forçados. Logo, o tipo de refrigeração ONAN/ONAF/ONAF é adequado para o transformador de potência em questão.

#### 5.5.1.2 Tipo de Ligação

O tipo de ligação do transformador de potência não foi informado nas especificações da Eletrosul. Portanto, serão analisadas as especificações fornecidas para determinar o tipo de ligação ideal.

O autotransformador de potência possui enrolamento terciário, portanto o tipo de

ligação ideal é estrela-estrela-triângulo (Yyd). Desse modo, tem-se as vantagens da ligação estrela-estrela, como a inexistência de deslocamento de fase e a suportabilidade de cargas pesadas, com as terceiras harmônicas corrigidas pela ligação em triângulo do enrolamento terciário, o qual é o de menor tensão.

#### 5.5.1.3 Tipo de Comutação

O tipo de comutação do transformador de potência não foi informado nas especificações da Eletrosul. No entanto, conforme explicado na Seção 4.3.2.3, o tipo de comutação ideal para transformadores de potência utilizados em subestações e que deveria ser utilizado no transformador da SE Desterro é o OLTC.

#### 5.5.1.4 Níveis de Isolamento

Os níveis de isolamento do transformador utilizados são: tensão suportável nominal à frequência industrial de 34 kV, tensão suportável nominal de impulso atmosférico de 850 kV e tensão suportável nominal de impulso de manobra de 650 kV. A tensão do enrolamento primário do equipamento é de 230 kV, a do secundário é de 138 kV e a do terciário é de 13,8 kV. As tensões máximas do equipamento são padronizadas, portanto deve-se considerar as tensões máximas de 245 kV, 145 kV e 15 kV.

Por se tratar de um autotransformador, a tensão máxima considerada para a definição da tensão suportável à frequência industrial deve ser a tensão do terminal de menor tensão. Logo, deve-se considerar a tensão do enrolamento terciário, ou seja, 15 kV. Conforme apresentado na Tabela 1, a tensão suportável à frequência industrial para 15 kV é de 34 kV, valor que está de acordo com o valor apresentado no transformador de potência utilizado.

Como a classe de tensão do transformador é de 245 kV, deve-se definir a tensão suportável ao impulso atmosférico. Assim, de acordo com a Tabela 1, a tensão suportável ao impulso atmosférico deve ser de 650, 750, 850, 950 ou 1050 kV. O valor da tensão suportável ao impulso atmosférico do autotransformador utilizado na SE Desterro é de 850 kV. Os projetistas responsáveis pelo projeto da SE Desterro provavelmente realizaram um estudo de transitórios para a determinação do valor de 850 kV, considerando os valores de corrente de descarga nominal dos para-raios localizados nos enrolamentos dos autotransformadores.



### 5.5.2 Transformador de Corrente

A SE Desterro possui transformadores de corrente nos pátios de 230 kV e de 138 kV. As especificações dos transformadores de corrente de cada pátio estão apresentadas nas Tabelas 11 e 12.

Tabela 11 – Especificações do transformador de corrente de 230 kV.

Característica	Especificação
Frequência Nominal	60 Hz
Tensão Máxima	245 kV
Corrente Suportável Nominal de Curta Duração (Eficaz) / Tempo	40 kA/s
Valor de Crista de Corrente Suportável (Crista)	100 kA
Tensão Suportável Nominal de Impulso Atmosférico	950 kV
Tensão Suportável Nominal à Frequência Industrial	395 kV
Classe do Núcleo	TPY
Tipo	IMBE 245 A4
Uso	Exterior

Fonte: Adaptado de Silva (2018)

Tabela 12 – Especificações do transformador de corrente de 138 kV.

Característica	Especificação
Frequência Nominal	60 Hz
Tensão Máxima	145 kV
Corrente Suportável Nominal de Curta Duração (Eficaz) / Tempo	20 kA/s
Valor de Crista de Corrente Suportável (Crista)	50 kA
Tensão Suportável Nominal de Impulso Atmosférico	650 kV
Tensão Suportável Nominal à Frequência Industrial	275 kV
Classe do Núcleo	TPY
Tipo	IMBE 145 A4
Uso	Exterior

Fonte: Adaptado de Silva (2018)

#### 5.5.2.1 Classe de Exatidão

A classe de exatidão dos TCs utilizados na SE Desterro não foram informados pela Eletrosul. No entanto, considerando que os TCs utilizados na SE Desterro são para fins de medição e controle, é possível concluir que a classe de exatidão ideal é a de 0,5.

### 5.5.3 Transformador de Potencial

A SE Desterro possui dois transformadores de potencial capacitivo, sendo um de 230 kV e um de 138 kV. As especificações de cada transformador de potencial estão apresentadas nas Tabelas 13 e 14.

Tabela 13 – Especificações do transformador de potencial de 230 kV.

Característica	Especificação
Frequência Nominal	60 Hz
Tensão Nominal (Eficaz)	230 kV
Tensão Máxima	245 kV
Tensão Primária	$\frac{230}{\sqrt{3}}$ kV
Carga de Exatidão Simultânea	150 VA
Capacitância Total	7500 pF
Tensão Suportável Nominal de Impulso Atmosférico	950 kV
Tensão Suportável Nominal à Frequência Industrial	395 kV
Tipo	230H
Uso	Exterior

Fonte: Adaptado de Silva (2018)

Tabela 14 – Especificações do transformador de potencial de 138 kV.

Característica	Especificação
Frequência Nominal	60 Hz
Tensão Nominal (Eficaz)	138 kV
Tensão Máxima	145 kV
Tensão Primária	$\frac{138}{\sqrt{3}}$ kV
Carga de Exatidão Simultânea	150 VA
Capacitância Total	5030 pF
Tensão Suportável Nominal de Impulso Atmosférico	650 kV
Tensão Suportável Nominal à Frequência Industrial	275 kV
Tipo	138H
Uso	Exterior

Fonte: Adaptado de Silva (2018)

#### 5.5.3.1 Classe de Exatidão

A classe de exatidão dos TPs utilizados na SE Desterro não foram informados pela Eletrosul. No entanto, assim como os TCs, os TPs utilizados na SE Desterro são para fins de medição e controle. Portanto, a classe de exatidão ideal é a de 0,5.

## 5.6 Equipamentos de Manobra

Os equipamentos de manobra utilizados na SE Desterro são: disjuntores de 230 e 138 kV e chaves seccionadoras de 230 e 138 kV. As especificações dos equipamentos de manobra estão apresentados nas seções a seguir.

### 5.6.1 Disjuntores

A SE Desterro conta com disjuntores nos pátios de 230 e de 138 kV. As especificações de cada disjuntor estão apresentadas nas Tabelas 15 e 16.

Tabela 15 – Especificações do disjuntor de 230 kV.

Característica	Especificação
Frequência Nominal	60 Hz
Tensão Nominal (Eficaz)	245 kV
Corrente Nominal	3150 A
Corrente de Estabelecimento	100 kA
Corrente de Curta Duração (Eficaz) / Tempo	40 kA / 3 s
Capacidade de Interrupção Nominal em Curto-Circuito	40 kA
Tipo Construtivo	Isolado a $SF_6$
Tempo de Interrupção Nominal	50 ms
Tensão Suportável Nominal de Impulso Atmosférico	1050 kV
Tensão Suportável Nominal à Frequência Industrial	530 kV
Tipo	200-SFM-40S

Fonte: Adaptado de Silva (2018)

Tabela 16 – Especificações do disjuntor de 138 kV.

Característica	Especificação
Frequência Nominal	60 Hz
Tensão Nominal (Eficaz)	145 kV
Corrente Nominal	3150 A
Corrente de Estabelecimento	80 kA
Corrente de Curta Duração (Eficaz) / Tempo	31,5 kA / 3 s
Capacidade de Interrupção Nominal em Curto-Circuito	31,5 kA
Tipo Construtivo	Isolado a $SF_6$
Tempo de Interrupção Nominal	3 ciclos
Tensão Suportável Nominal de Impulso Atmosférico	650 kV
Tensão Suportável Nominal à Frequência Industrial	275 kV
Tipo	120-SFM-32B

Fonte: Adaptado de Silva (2018)

### 5.6.1.1 Tipo Construtivo

Tanto os disjuntores de 230 kV quanto os de 138 kV são disjuntores isolados a  $SF_6$ . Esse tipo construtivo está de acordo com a norma, visto que subestações com tensões nominais superiores a 38 kV devem obter disjuntores isolados a  $SF_6$ .

### 5.6.1.2 Tipo de Acionamento

O tipo de acionamento dos disjuntores utilizados na Subestação Desterro não foram informados pela Eletrosul. No entanto, considerando que os disjuntores são isolados a  $SF_6$ , o tipo de acionamento ideal dos disjuntores utilizados na Subestação Desterro é o acionamento hidráulico, o qual permite armazenar grande quantidade de energia.

## 5.6.2 Chaves Seccionadoras

A SE Desterro possui dois tipos de chaves seccionadoras, a seccionadora de abertura vertical e a seccionadora semipantográfica vertical, sendo que existe uma de cada para as tensões de 230 kV e de 138 kV. As especificações de cada tipo de chave seccionadora estão apresentadas nas Tabelas 17, 18, 19 e 20.

Tabela 17 – Especificações da chave seccionadora de abertura vertical de 230 kV.

Característica	Especificação
Frequência Nominal	60 Hz
Tensão Nominal (Eficaz)	242 kV
Corrente Nominal	2000 A
Corrente de Curta Duração (Eficaz) / Tempo	40 kA / 3 s
Tipo Construtivo	Abertura Vertical
Tensão Suportável Nominal de Impulso Atmosférico	950 kV
Tensão Suportável Nominal à Frequência Industrial	395 kV
Tipo	AV-400

Fonte: Adaptado de Silva (2018)

Tabela 18 – Especificações da chave seccionadora de abertura vertical de 138 kV.

Característica	Especificação
Frequência Nominal	60 Hz
Tensão Nominal (Eficaz)	145 kV
Corrente Nominal	1250 A
Corrente de Curta Duração (Eficaz) / Tempo	31,5 kA / 3 s
Tipo Construtivo	Abertura Vertical
Tensão Suportável Nominal de Impulso Atmosférico	650 kV
Tensão Suportável Nominal à Frequência Industrial	275 kV
Tipo	AV-300

Fonte: Adaptado de Silva (2018)

Tabela 19 – Especificações da chave seccionadora semipantográfica vertical de 230 kV.

Característica	Especificação
Frequência Nominal	60 Hz
Tensão Nominal (Eficaz)	242 kV
Corrente Nominal	2000 A
Corrente de Curta Duração (Eficaz) / Tempo	40 kA / 3 s
Tipo Construtivo	Semipantográfica Vertical
Tensão Suportável Nominal de Impulso Atmosférico	950 kV
Tensão Suportável Nominal à Frequência Industrial	395 kV
Tipo	SPV-3

Fonte: Adaptado de Silva (2018)

Tabela 20 – Especificações da chave seccionadora semipantográfica vertical de 138 kV.

Característica	Especificação
Frequência Nominal	60 Hz
Tensão Nominal (Eficaz)	145 kV
Corrente Nominal	1250 A
Corrente de Curta Duração (Eficaz) / Tempo	31,5 kA / 3 s
Tipo Construtivo	Semipantográfica Vertical
Tensão Suportável Nominal de Impulso Atmosférico	650 kV
Tensão Suportável Nominal à Frequência Industrial	275 kV
Tipo	SPV-3

Fonte: Adaptado de Silva (2018)

### 5.6.2.1 Tipo Construtivo

Conforme apresentado na Seção 4.4.2.1, o tipo construtivo das chaves seccionadoras deve ser determinado a partir da tensão nominal dos seccionadores. Na Subestação Desterro há o pátio de 230 kV e o de 138 kV, os quais correspondem, respectivamente, às classes de 242 kV e de 145 kV.

Para o pátio de 242 kV, as chaves seccionadoras podem ser dos tipos construtivos: abertura vertical, vertical reverso e dupla abertura. Já para o pátio de 145 kV, os tipos construtivos podem ser: abertura central, abertura vertical, dupla abertura e vertical reverso. A SE Desterro utiliza chaves seccionadoras de abertura vertical e semipantográficas verticais.

As chaves semipantográficas não estão especificadas na norma ABNT NBR 7571:2011. Portanto, para estar de acordo com a norma, o ideal seria que todas as chaves seccionadoras fossem de abertura vertical, a qual ocupa menor espaço horizontal na operação do que os outros tipos construtivos possíveis para as classes de tensão.

### 5.6.2.2 Tipo de Acionamento

O tipo de acionamento das chaves seccionadoras utilizadas não estão informadas nas especificações fornecidas pela Eletrosul. No entanto, conforme apresentado na Seção 4.4.2.2, o tipo de acionamento ideal para chaves utilizadas em subestações é o acionamento motorizado, visto com esse acionamento não é necessário desenergizar os circuitos a cada manobra realizada nas chaves.

## 5.7 Equipamentos de Segurança

A SE Desterro conta com para-raios em diferentes locais da subestação para realizar a proteção contra descargas atmosféricas. A blindagem da subestação não foi informada pela Eletrosul, no entanto é possível projetá-la de acordo com as diretrizes apresentadas neste documento. As seções a seguir apresentam as especificações dos para-raios e da blindagem da SE Desterro.

### 5.7.1 Para-raios

A segurança da SE Desterro é feita utilizando para-raios em quatro localizações, as quais são: a entrada de linha do setor de 230 kV, nos enrolamentos de alta tensão dos autotransformadores de potência, os enrolamentos de baixa tensão dos autotransformadores de potência e a saída de linha de 138 kV. Ambos pátios e níveis de tensão dos autotransformadores de potência possuem tensão nominal eficaz menor do que 276 kV, portanto, a corrente de descarga nominal de todos os para-raios utilizados deveria ser de 10 kA.

A Tabela 21 apresenta as características dos para-raios da entrada de linha.

Tabela 21 – Especificações do para-raios na entrada de linha de 230 kV.

Característica	Especificação
Frequência Nominal	60 Hz
Tensão Nominal	228 kV
Tensão de Operação Contínua	182 kV
Tensão de Referência	248 kV
Corrente de Descarga Nominal	20 kA (pico)

Fonte: Adaptado de Silva (2018)

O para-raios localizado na entrada de linha de 230 kV da subestação possui a tensão nominal de acordo com a tensão da linha, ou seja, 228 kV. Aplicando a Equação 4.1, tem-se a tensão de operação contínua na Equação 5.1

$$U_c = \frac{U_n}{1,25} = \frac{228}{1,25} = 182,4\text{kV} \longrightarrow U_c = 186\text{kV} \quad (5.1)$$

A Tabela 22 apresenta as características dos para-raios localizados nos enrolamentos de alta tensão dos autotransformadores de potência.

Tabela 22 – Especificações do para-raios na alta tensão do autotransformador.

Característica	Especificação
Frequência Nominal	60 Hz
Tensão Nominal	228 kV
Tensão de Operação Contínua	182 kV
Tensão de Referência	248 kV
Corrente de Descarga Nominal	20 kA (pico)

Fonte: Adaptado de Silva (2018)

Os enrolamentos de alta tensão dos autotransformadores de potência possuem tensão de 230 kV, a qual é a tensão nominal do sistema. Como o sistema é neutro-aterrado, a tensão de operação contínua é representada pela Equação 5.2.

$$U_c = 1,1 \cdot \frac{U_{ns}}{\sqrt{3}} = 1,1 \cdot \frac{230}{\sqrt{3}} = 146,07\text{kV} \longrightarrow U_c = 150\text{kV} \quad (5.2)$$

A tensão nominal é determinada a partir da tensão de operação contínua, estando apresentada na Equação 5.3.

$$U_n = 1,25 \cdot U_c = 1,25 \cdot 150 = 187,5\text{kV} \longrightarrow U_n = 192\text{kV} \quad (5.3)$$

A Tabela 23 apresenta as características dos para-raios situados nos enrolamentos de baixa tensão dos autotransformadores de potência.

Tabela 23 – Especificações do para-raios na baixa tensão do autotransformador.

Característica	Especificação
Frequência Nominal	60 Hz
Tensão Nominal	120 kV
Tensão de Operação Contínua	96 kV
Tensão de Referência	127,2 kV
Corrente de Descarga Nominal	10 kA (pico)

Fonte: Adaptado de Silva (2018)

Os enrolamentos de alta tensão dos autotransformadores de potência possuem tensão de 138 kV, a qual é a tensão nominal do sistema. Como o sistema é neutro-aterrado, a tensão de operação contínua é representada pela Equação 5.4.

$$U_c = 1,1 \cdot \frac{U_{ns}}{\sqrt{3}} = 1,1 \cdot \frac{138}{\sqrt{3}} = 87,64\text{kV} \longrightarrow U_c = 96\text{kV} \quad (5.4)$$

A tensão nominal é determinada a partir da tensão de operação contínua, estando apresentada na Equação 5.5.

$$U_n = 1,25 \cdot U_c = 1,25 \cdot 96 = 120\text{kV} \quad (5.5)$$

A Tabela 24 apresenta as características dos para-raios da entrada de linha.



Tabela 24 – Especificações do para-raios na saída de linha de 138 kV.

Característica	Especificação
Frequência Nominal	60 Hz
Tensão Nominal	123 kV
Tensão de Operação Contínua	98 kV
Tensão de Referência	-
Corrente de Descarga Nominal	10 kA (pico)

Fonte: Adaptado de Silva (2018)

O para-raios localizado na entrada de linha de 138 kV da subestação possui a tensão nominal de acordo com a tensão da linha, ou seja, 123 kV. A tensão de operação contínua é dada pela Equação 5.6

$$U_c = \frac{U_n}{1,25} = \frac{123}{1,25} = 98,4\text{kV} \longrightarrow U_c = 98\text{kV} \quad (5.6)$$

### 5.7.2 Blindagem

A blindagem da subestação não foi informada pela Eletrosul. No entanto, a SE Desterro é uma estação de geração e transmissão de energia elétrica, logo, possui NP I, necessitando da proteção mais rígida possível. Para o NP I, a corrente de pico mínima suportada pela blindagem deve ser de 3 kA e o raio da esfera rolante para a aplicação do Modelo Eletrogeométrico deve ser de 20 m.

Para a aplicação do modelo e identificação dos locais onde a esfera rolante tocaria a estrutura, ou seja, onde os captos devem estar localizados, são necessários os diagramas de arranjo geral da subestação, com as dimensões dos equipamentos e dos componentes da subestação, a disposição dos equipamentos nos pátios e a distância entre eles. Como esses diagramas e desenhos não são fornecidos pela Eletrosul, não é possível aplicar completamente o Modelo Eletrogeométrico.

## 6 Conclusão

O presente trabalho teve como objetivo geral apresentar as diretrizes de projetos de subestações elétricas e a realização de um estudo de caso a fim de aplicar as diretrizes apresentadas. Para tanto, foram realizados estudos de subestações de energia, sua importância diante o cenário de transmissão de energia, suas classificações, suas configurações e seus equipamentos principais.

Este guia prático foi aplicado em um estudo de caso, no qual foi analisada a Subestação Desterro, suas características e equipamentos. Realizando a comparação dos equipamentos instalados com as normas vigentes, foi possível concluir que as especificações dos equipamentos da Subestação Desterro foram realizadas corretamente, embora alguns ajustes tenham sido sugeridos. Os ajustes sugeridos se dão principalmente pois muitas das normas vigentes em 2008, ano em que a Subestação Desterro foi inaugurada, foram substituídas e canceladas. Essa diferença entre as normas vigentes em 2008 e em junho de 2022 causa as diferenças nos projetos.

É possível concluir que é imprescindível seguir rigorosamente as normas técnicas referentes a cada etapa e equipamento do projeto de uma subestação para realizar o projeto da maneira mais eficiente, econômica e segura possível. As principais normas a serem seguidas são as normas nacionais brasileiras NBR e as normas internacionais IEC e IEEE.

Para trabalhos futuros, sugere-se os estudos e as análises dos sistemas que compõem as subestações, como o Sistema de Proteção, Controle e Supervisório, o Sistema de Aterramento, o Sistema de Teleproteção, entre outros.

# Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *ABNT NBR 5282*: Capacitores de potência em derivação para sistema de tensão nominal acima de 1000 v. 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *ABNT NBR IEC 62271-102*: Equipamentos de alta tensão - parte 102: Seccionadores e chaves de aterramento. 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *ABNT NBR 5356-1*: Transformadores de potência - parte 1: Generalidades. 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *ABNT NBR 7571*: Seccionadores - características técnicas e dimensionais. 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *ABNT NBR 16050*: Para-raios de resistor não linear de Óxido metálico sem centelhadores, para circuitos de potência de corrente alternada. 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *ABNT NBR 5356-6*: Transformadores de potência - parte 6: Reatores. 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *ABNT IEC/TS60815-1*: Seleção e dimensionamento de isoladores para alta tensão - parte 1: Definições, informações e princípios gerais. 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *ABNT NBR 5419-1*: Proteção contra descargas atmosféricas - parte 1: Princípios gerais. 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *ABNT NBR 6939*: Coordenação do isolamento - procedimento. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *ABNT NBR IEC 61869-1*: Transformadores para instrumento - parte 1: Requisitos gerais. 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *ABNT NBR IEC 61869-2*: Transformadores para instrumento - parte 2: Requisitos adicionais para transformadores de corrente. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *ABNT NBR IEC 61869-3*: Transformadores para instrumento - parte 3: Requisitos adicionais para transformadores de potencial indutivos. 2021.

CRUSHTYMK. *Fornecimento de Compensação Reativa Capacitiva com Bancos de Capacitores em Derivação*. Disponível em: <<https://crushtymks.com/pt/energy-and-power/665-providing-capacitive-reactive-compensation-with-shunt-capacitor-banks.html>>.

ENERGÊS. *Saiba Tudo sobre Subestações em Média tensão*. 2021. Disponível em: <<https://energes.com.br/fale-energes/o-que-voce-precisa-saber-sobre-subestacoes-em-media-tensao/#:~:text=Subesta%C3%A7%C3%A3o%20de%20Manobra%20%E2%80%93%20A%20subesta%C3%A7%C3%A3o,tens%C3%A3o%20de%20opera%C3%A7%C3%A3o%20entre%20eles>>.

GOOGLE MAPS. *Subestação Desterro*. 2022. Disponível em: <<https://www.google.com.br/maps/place/Subesta%C3%A7%C3%A3o+Desterro/@-27.6704308,-48.5162164,660m/data=!3m2!1e3!4b1!4m5!3m4!1s0x95273babe0b513b9:0x86cb1d9f459a20b9!8m2!3d-27.6704356!4d-48.5140277>>.

IEEE Guide for Specifications of High-Voltage Circuit Breakers (over 1000 V). *IEEE Std C37.12-2018 (Revision of IEEE Std C37.12-2008)*, 2019.

IEEE Standard for Common Requirements for High-Voltage Power Switchgear Rated Above 1000 V. *IEEE Std C37.100.1-2018 (Revision of IEEE Std C37.100.1-2007)*, p. 1–99, 2019.

LEE, W. J. *et al.* Projeto de linha de transmissão submarina biguaçu - desterro em 230 kv. Maio 2009.

MCDONALD, J. D. *Electric Power Substations Engineering*. 2. ed. [S.l.]: CRC Press, 2007.

MUNDO DA ELÉTRICA. *Um Pouco Mais sobre o Sistema Elétrico de Potência (SEP)*. Disponível em: <<https://www.mundodaeletrica.com.br/um-pouco-mais-sobre-o-sistema-eletrico-de-potencia-sep/>>.

NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION. *NFPA 780: Standard for the installation of lightning protection systems*. 2020.

OMS ENGENHARIA. *Subestação de Energia: Tudo sobre Projeto, Instalação e Manutenção de Subestações para Indústrias e Grandes Consumidores*. 2020. Disponível em: <<https://omsengenharia.com.br/blog/subestacao-de-energia/>>.

RESCUE CURSOS. *Relatório Técnico Subestações de Baixa e Média Tensão*. Disponível em: <<https://www.rescuecursos.com/relatorio-tecnico-subestacoes-de-baixa-e-media-tensao/>>.

SCHREIBER ENGENHARIA. *Subestação Desterro 230/138 kV - ELETROSUL*. Disponível em: <<https://schreiber.eng.br/?id=subestacao-desterro-230-138-kv-eletrosul>>.

Siemens. *High-Voltage Station Arresters*. Disponível em: <<https://www.siemens-energy.com/global/en/offerings/power-transmission/portfolio/surge-arresters/hv-station-arresters.html>>.

SIEMENS. *Live Tank Circuit Breakers*. Disponível em: <<https://www.siemens-energy.com/global/en/offerings/power-transmission/portfolio/circuit-breakers/live-tank.html>>.

Siemens. *Shunt Reactors and Series Reactors*. Disponível em: <<https://www.siemens-energy.com/global/en/offerings/power-transmission/portfolio/transformers/reactors.html>>.

SILVA, G. H. da. *Equipamentos de Alta Tensão em Subestações: Um Estudo de Caso*. [S.l.]: Universidade Federal de Santa Catarina, 2018.

SUZUKI, M. *et al.* Compensador série modularizado para sistemas de distribuição até 23 kv. XIX Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica, Nov 2010.

TRENCH GROUP. *SF6 Insulated Current Transformers*. Disponível em: <<https://trench-group.com/products/sf6-insulated-current-transformers/>>.

TRENCH GROUP. *SF6 Insulated Voltage Transformers*. Disponível em: <<https://trench-group.com/products/sf6-insulated-voltage-transformers/>>.

WEG. *Transformador Óleo 75000/100000 kVA 230.0/13.8kV ONAF*. Disponível em: <<https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Gera%C3%A7%C3%A3o%2C-Transmiss%C3%A3o-e-Distribui%C3%A7%C3%A3o/Transformadores-e-Reatores-a-%C3%93leo/Transformadores-de-Pot%C3%Aancia-a-%C3%93leo/50-001-a-400-000-kVA/Transformador-%C3%93leo-75000-100000-kVA-230-0-13-8kV-ONAF/p/13122043>>.