

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
ENGENHARIA ELÉTRICA

Leandro David Andrade

**ESPECIFICAÇÃO DE EQUIPAMENTOS DE UM BAY DE ENTRADA DE UMA
SUBESTAÇÃO DE 10/12,5 MVA - 138/13,8 kV**

Orientador: Antônio Carlos Delaiba

Uberlândia
2018

Leandro David Andrade

**ESPECIFICAÇÃO DE EQUIPAMENTOS DE UM BAY DE ENTRADA DE UMA
SUBESTAÇÃO DE 10/12,5 MVA - 138/13,8 kV**

Trabalho apresentado como requisito parcial de avaliação na disciplina Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Elétrica, certificado de estudos em Sistemas de Energia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia.

Orientador: Antônio Carlos Delaiba

Assinatura do orientador

Uberlândia – MG

2018

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus pela oportunidade de concluir mais uma etapa de minha graduação.

Aos meus pais, Lúcio e Darlene, meus irmãos, por todo apoio e suporte na minha caminhada.

Aos meus amigos pelo companheirismo, pelos grandes momentos vivenciados.

Ao professor Antônio Carlos Delaiba pela orientação neste trabalho.

RESUMO

As subestações são fundamentais para o fornecimento da energia elétrica. Para isso, as subestações são compostas de um conjunto de equipamentos de transformação, manobra e proteção, sendo que os mesmos devem ser especificados de forma criteriosa para atender os consumidores de forma contínua, confiável e segura. Assim, o objetivo deste trabalho está relacionado ao desenvolvimento de um projeto de especificação de equipamentos de um bay de entrada de uma subestação de energia elétrica de 10/12,5MVA – 138/13,8kV.

Palavras chaves: subestações, energia, especificação e equipamentos.

ABSTRACT

Substations are essential for the supply of electricity. For this, the substations are composed of a set of equipment of transformation, maneuver and protection, and they must be specified in a judicious way to serve the consumers in a continuous, reliable and safe way. Thus, the objective of this work is related to the development of an equipment specification project of an input bay of an electric power substation of 10/12,5MVA - 138/13,8 kV.

Keywords: substations, energy, specification and equipment.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Chave de aterramento rápido [6]	17
Figura 2 - Chave seccionadora simples tripolar [9].....	22
Figura 3 - Chave seccionadora com buchas passantes [10].....	23
Figura 4 - Chave seccionadora fusível [6].....	23
Figura 5 - Interruptor seccionador [6]	24
Figura 6 - Chave seccionadora reversível [6].....	25
Figura 7 - Seccionadora de abertura lateral singela [8]	26
Figura 8 - Seccionadores de dupla abertura lateral.....	26
Figura 9 - Seccionadores de abertura vertical [8].....	27
Figura 10- Seccionadores pantográficos [8].....	27
Figura 11 - Disjuntor de alta tensão [13].....	31
Figura 12 - Disjuntor a grande volume de óleo [14]	32
Figura 13 - Disjuntor a pequeno volume de óleo [15].....	33
Figura 14 - Ilustração da operação de um disjuntor a sopro magnético [6]	34
Figura 15 - Disjuntor a vácuo [6]	34
Figura 16 - TC tipo enrolado [8]	38
Figura 17 - TC tipo barra [8]	38
Figura 18 - TC tipo bucha [8].....	39
Figura 19 - TC tipo janela [8].....	39
Figura 20 - Transformador de corrente [8].....	41
Figura 21 - Resistor de aterramento [6].....	44
Figura 22 - Detalhes da montagem do resistor de aterramento [6]	455

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características elétricas da chave de aterramento rápido	17
Tabela 2 - Dimensões de chaves seccionadoras	24
Tabela 3 – Especificação sumária da chave de aterramento rápido	51
Tabela 4 - Dados do catálogo de para-raios	53
Tabela 5 - Especificação sumária do para-raios	55
Tabela 6 - Dados do catálogo da chave de aterramento	58
Tabela 7 - Especificação sumária da chave seccionadora	59
Tabela 8 - Dados do catálogo do disjuntor	62
Tabela 9 - Especificação sumária do disjuntor	62
Tabela 10 - Cargas nominais padronizadas	64
Tabela 11 - Classe de exatidão dos TCs	65
Tabela 12 - Tensões secundárias dos TCs	65
Tabela 13 - Dados do catálogo do medidor digital	67
Tabela 14 - Dados do catálogo TC Artech CH-145	68
Tabela 15 - Especificação sumária do TC-1	68
Tabela 16 - Especificação sumária do TC-2	72
Tabela 17 - Características elétricas dos TPs	73
Tabela 18 - Classe de exatidão dos TPs	73
Tabela 19 - Potência térmica dos TPs	74
Tabela 20 - Dados do catálogo TPC Artech DDB-145	75
Tabela 21 - Especificação sumária TPC-1 e TPC-2	76
Tabela 22 - Características dos barramentos rígidos	80
Tabela 23 - Valores básicos de afastamento e alturas mínimas	81
Tabela 24 - Especificação sumária do barramento	82

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

a - afastamento entre as Barras

A1 – Área da Seção

A2 – Área da Seção

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

Fi – Fator de Impulso

Fmáx – Força Máxima sobre as Barras

Fmáx' – Força Máxima sobre os Isoladores

Ft – Fator Térmico

Gaps – Espaços Vazios

GVO – Grande Volume de Óleo

Hz – Hertz

MCOV – Máxima Tensão Contínua de Operação

NBI – Tensão de Impulso Suportável

NBR – Norma Brasileira

NIM – Nível de Impulso de Manobra do Sistema

NPRia – Máxima Tensão Residual Nominal de Impulso Atmosférico

ONS – Sistema Interligado Nacional

PVO – Pequeno Volume de Óleo

SE – Subestação

SIN – Sistema Interligado

TAFI – Tensão Aplicada a Frequência Industrial

TC – Transformador de Corrente

TP – Transformador de potencial

TPI – Transformador de Potencial Indutivo

Vmanobra – Tensão de Manobra

SiC – Carboneto de Silício

ZnO – Óxido de Zinco

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
2. EQUIPAMENTOS QUE COMPÕEM UM BAY DE 138kV	16
2.1. Chave de aterramento rápido	16
2.1.1. Introdução.....	16
2.1.2. Características construtivas	16
2.2. Para-raios	18
2.2.1. Introdução.....	18
2.2.2. Origens das sobretensões	18
2.2.2.1. Sobretensão temporária	18
2.2.2.2. Sobretensão de manobra	19
2.2.2.3. Sobretensão atmosférica.....	19
2.2.3. Componentes do para-raios	19
2.2.3.1. Para-raios de carboneto de sílcio.....	19
2.2.3.2. Para-raios de óxido de zinco	20
2.3. Chaves seccionadoras	20
2.3.1. Introdução.....	20
2.3.2. Características Construtivas	21
2.3.2.1. Seccionadores para uso interno	22
<input type="checkbox"/> Seccionadores simples.....	22
<input type="checkbox"/> Chaves seccionadoras com buchas passantes	23
<input type="checkbox"/> Seccionadores fusíveis.....	23
<input type="checkbox"/> Seccionadores interruptores.....	24
<input type="checkbox"/> Seccionadores reversíveis.....	24
2.3.2.2 Seccionadores para uso externo	26
<input type="checkbox"/> Seccionadores de abertura lateral singela	26
<input type="checkbox"/> Seccionadores de dupla abertura lateral	26
<input type="checkbox"/> Seccionadores de abertura vertical	27
<input type="checkbox"/> Seccionadores pantográficos	27
2.4. Relé	28
2.4.1. Introdução.....	28
2.4.2. Características dos relés	28
<input type="checkbox"/> Quanto à sua forma construtiva	28
<input type="checkbox"/> Quanto ao desempenho.....	29

□ Quanto às grandezas elétricas	29
□ Quanto a sua temporização	29
□ Quanto à forma de acionamento	30
2.5. Disjuntores de alta tensão	30
2.5.1. Introdução.....	30
2.5.2. Arco Elétrico	31
2.5.3. Características Construtivas dos Disjuntores	31
2.5.3.1. Quanto ao sistema de interrupção de arco.....	32
□ Disjuntores a óleo	32
□ Disjuntores a sopro magnético	33
□ Disjuntores a vácuo	34
□ Disjuntores a ar comprimido	36
2.5.3.2. Quanto ao sistema de acionamento	36
□ Sistema de mola.....	36
□ Sistema de solenoide	36
□ Sistema a ar comprimido	36
□ Sistema hidráulico	37
2.6. TRANSFORMADOR DE CORRENTE	37
2.6.1. Introdução.....	37
2.6.2. Características Construtivas	37
□ TC tipo enrolado.....	38
□ TC tipo barra.....	38
□ TC tipo bucha	39
□ TC tipo janela	39
□ TC tipo com vários enrolamentos primários	Erro! Indicador não definido.
2.6.3. Classificação.....	40
2.6.3.1. Transformadores de corrente para serviço de medição.....	40
2.6.3.2. Transformadores de corrente para serviço de proteção.....	40
2.6.4. Modos de ligação	40
2.7. TRANSFORMADOR DE POTENCIAL	41
2.7.1. Introdução.....	41
2.7.2. Características Construtivas	42
2.7.2.1. Transformadores de Potencial do Tipo Indutivo.....	42
2.7.2.2. Transformador de Potencial do Tipo Capacitivo	42
2.7.3. Modos de ligação	42

2.8. Resistores de aterramento	43
2.8.1. Introdução.....	43
2.8.2. Características construtivas	44
2.9. Barramentos	45
3. ESPECIFICAÇÃO DO BAY DE ENTRADA DE 138kV	47
3.1. APRESENTAÇÃO DA SUBESTAÇÃO A SER PROJETADA.....	47
3.2. ESPECIFICAÇÃO DOS COMPONENTES ELÉTRICOS DA SUBESTAÇÃO.....	50
3.2.1. Chave de aterramento rápido.....	50
3.2.1.1. Características Elétricas	50
3.2.1.2. Especificação Sumária	50
3.2.2. Para-raios.....	51
3.2.2.1. Características elétricas	51
3.2.2.2. Especificação sumária	52
3.2.2.3. Cálculos para a especificação dos para-raios.....	52
3.2.3. Chaves seccionadoras.....	55
3.2.3.1. Características elétricas	55
3.2.3.2. Especificação sumária	56
3.2.3.3. Cálculos para a especificação das chaves seccionadoras	56
3.2.4. Disjuntor.....	59
3.2.4.1. Características elétricas	59
3.2.4.2. Especificação sumária	61
3.2.4.3. Cálculos para especificação do disjuntor	61
3.2.5. Transformador de corrente	62
3.2.5.1. Características elétricas	62
3.2.5.2. Especificação sumária	66
3.2.5.3. Cálculos para a especificação do TC-1 de medição	66
3.2.5.4. Cálculos para a especificação do TC-2 de proteção.....	69
3.2.6. TRANSFORMADOR DE POTENCIAL	72
3.2.6.1. Características elétricas	72
3.2.6.2. Especificação sumária	74
3.2.6.3. Cálculos para a especificação do TPC-1	74
3.2.7. Resistor de Aterramento	76
3.2.7.1. Características elétricas	76
3.2.7.2. Especificação Sumária	77
3.2.7.3. Cálculo para a especificação do resistor de aterramento.....	77

3.2.8. BARRAMENTO	79
3.2.8.1. Especificação sumária	79
3.2.8.2. Cálculos para especificação do barramento principal	79
4. Conclusão	83
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	84

1. INTRODUÇÃO

O objetivo principal de um sistema elétrico de potência é transferir toda a energia elétrica para os consumidores, energia essa que é obtida pela transformação de uma fonte primária (tais como água, sol, lenha, vento, combustíveis, componentes químicos, etc.) em uma fonte secundária (no caso a energia elétrica) [1].

O transporte de energia elétrica no Brasil é feito por meio de um sistema grande e complexo, que envolve um conjunto de subestações e linhas de transmissão, que são interligadas a várias unidades geradoras. Portanto, uma cidade não é alimentada por apenas uma usina, e sim por diversas. Sejam elas hidrelétricas, termoeletricas ou nucleares, as quais fazem parte do Sistema Interligado Nacional [2].

Durante o percurso entre as unidades geradoras e os pontos de consumo, a eletricidade passa por algumas subestações, onde a tensão é rebaixada ou elevada por transformadores de potência. Visando reduzir as perdas excessivas durante a transmissão, a tensão é elevada no início da transmissão, e abaixada a níveis de distribuição nas proximidades de centros de cargas, como por exemplo, residências, comércios e indústrias. Importante fazer uma observação, que algumas indústrias são supridas com níveis de tensão de transmissão [2].

Implantação de uma subestação é um processo demorado e que se desenvolve por etapas. O processo de implantar uma subestação só é iniciado após ter feito um estudo detalhado da necessidade de expansão do sistema elétrico, para atender uma determinada região, cidade ou uma planta industrial [3].

Com o decorrer do processo é definido as características do conjunto de dispositivos de manobra, bem como as características do sistema de proteção e controle. Todas estas definições devem estar de acordo com os requisitos mínimos definidos pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) e pelos termos estipulados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) [3].

Um assunto que vem sendo bastante discutido nos últimos anos, é o dimensionamento adequada de equipamentos, sendo foco de vários artigos e estudos. A falta de especificação ou má especificação dos materiais, são responsáveis por compras erradas, atraso nas obras, retrabalho, maquinário parado e mão de obra ociosa, acarretando um aumento nos custos das instalações [4].

O foco deste trabalho é aprofundar os conhecimentos técnicos e científicos sobre os projetos de especificação de equipamentos de uma subestação de energia elétrica. É uma área bastante importante da engenharia elétrica, tema que é abordado, pela Universidade Federal de Uberlândia, no sétimo e oitavo período, com as disciplinas: Subestações e Proteção de Sistemas Elétricos.

2. EQUIPAMENTOS QUE COMPÕEM UM BAY DE 138KV

A subestação tem como principal função transformar os níveis de tensão, tendo a seguinte definição: agrupamento de equipamentos de manobra e transformação, tendo inclusive, dispositivos de proteção, que são capazes de identificar vários tipos de faltas que possam ocorrer no sistema e isolar os trechos onde elas ocorrem. Em alguns casos, nota-se subestações com capacidade de compensação de reativos, tendo como função direcionar o fluxo de potência [5].

Neste capítulo serão abordados de uma forma sucinta os principais aspectos elétricos, físicos e construtivos dos dispositivos que perfazem um bay de entrada de uma subestação de 138/13,8kV. Posteriormente, apresentar-se-á os principais indicadores ou seja: as grandezas elétricas necessárias para a correta especificação desses equipamentos.

2.1. CHAVE DE ATERRAMENTO RÁPIDO

2.1.1. Introdução

É um equipamento de proteção do sistema elétrico, que tem sua atuação após ser sensibilizado por um relé. Geralmente, promove o aterramento de apenas uma fase [6].

A chave de aterramento rápido tem sua aplicação em subestações que suprem cargas menores, como por exemplo, áreas rurais e pequenas vilas. Pois, no momento da atuação de tal dispositivo o disjuntor de retaguarda opera, causando o rompimento da continuidade do sistema, havendo o desligamento completo do mesmo [6].

2.1.2. Características construtivas

A chave de aterramento rápido é composta sobretudo por três componentes:

- Terminal;
- Coluna de isoladores;
- Caixa de comando [6].

Neste sentido, a título de ilustração a figura 1 identifica as partes construtivas da chave mencionada, enquanto que a tabela 1, algumas características elétricas do equipamento.

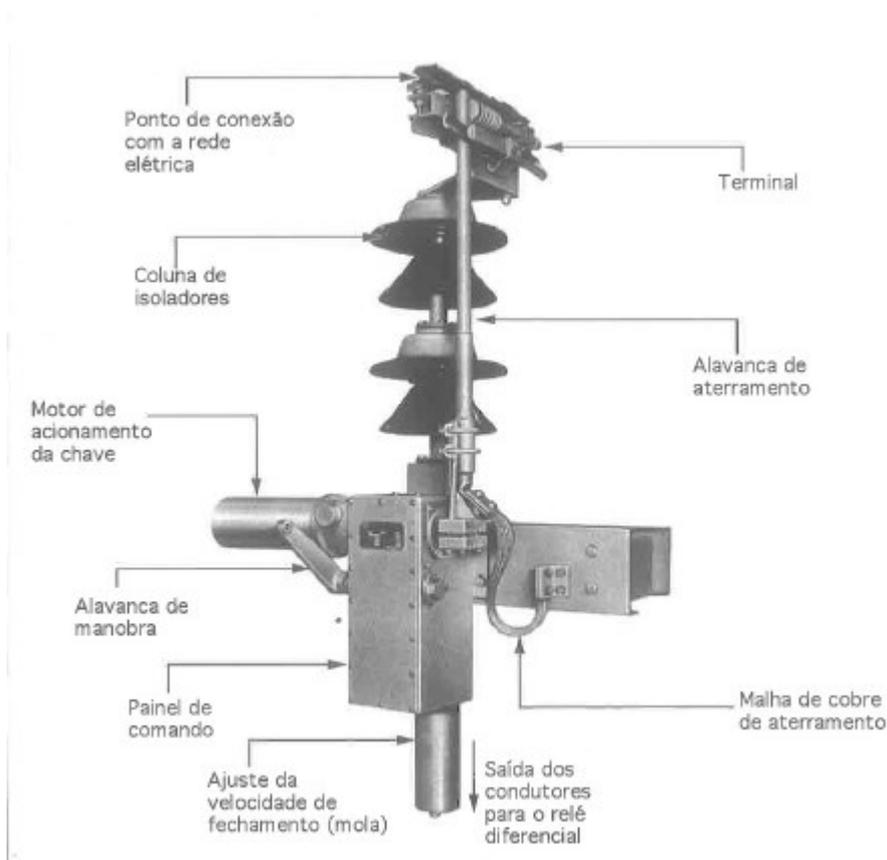


Figura 1 - Chave de aterramento rápido [6]

Tabela 1 - Características elétricas da chave de aterramento rápido

Tensão Nominal	NBI	Capacidade de corrente instantânea
KV	KV	KA
38	200	10
38	200	20
72,5	350	10
72,5	350	20
145	550	10
145	550	20
145	550	10
145	550	20

[6]

Deve-se salientar que os conceitos associados às descargas atmosféricas serão objeto de análise no item seguinte.

Sendo:

- NBI: Nível Básico de Impulso;
- TAFI: Tensão Aplicada a Frequência Industrial.

2.2. PARA-RAIOS

2.2.1. Introdução

Os para-raios são equipamentos essenciais para o sistema elétrico de potência, contribuindo para uma maior segurança, confiabilidade e continuidade de operação. Para-raios são equipamentos com função de proteção contra sobretensões de várias origens.

Níveis de tensões são preestabelecidos, na construção do equipamento, sendo assim, ele atua quando esse valor é ultrapassado, protegendo os outros dispositivos do circuito. Em sistemas rurais, uma opção usada são os descarregadores de chifre, por apresentar menores custos, porém tem um desempenho inferior.

2.2.2. Origens das sobretensões

Sobretensão é o resultado de uma variação de tensão acima do valor nominal, em relação ao tempo, que envolve as fases de um sistema ou uma fase e a terra. A condição para que se tenha uma sobretensão, é que o valor de crista tem que ser maior que o valor da tensão máxima do sistema [6].

As sobretensões são classificadas em três diferentes formas, tendo base o grau de amortecimento da onda de sobretensão e o seu tempo de duração, são elas:

- Sobretensão temporária;
- Sobretensão de manobra;
- Sobretensão atmosférica [6].

2.2.2.1. Sobretensão temporária

É característica de uma sobretensão temporária, uma onda de tensão elevada de natureza oscilatória por um longo tempo de duração, cujo o tempo de amortecimento

é bastante reduzido, ocorre em um ponto definido do sistema, que envolve as fases ou uma fase e a terra do circuito [6].

Ocorrências que resultam em sobretensões temporárias:

- Defeitos monopolares;
- Perda de carga por abertura do disjuntor;
- Fenômeno de ferro-ressonância;
- Efeito ferrante [6].

2.2.2.2. Sobretensão de manobra

É uma sobretensão originada pela ação de equipamentos de manobra devido a um problema em um determinado ponto do sistema, podendo envolver as três fases ou uma fase e a terra. As sobretensões de manobra são utilizadas como parâmetro na determinação do nível de isolamento do sistema, ressalta-se que a elevação de tensão cuja origem é resultado da operação de um dispositivo de manobra é mais severa do que a sobretensão temporária [6].

2.2.2.3. Sobretensão atmosférica

É uma sobretensão com origem devido uma descarga atmosférica que envolve as fases do sistema ou uma das fases e a terra [6].

2.2.3. Componentes do para-raios

Os para-raios são responsáveis pela proteção dos dispositivos elétricos do sistemas contra descargas atmosféricas. Para-raios são equipamentos constituídos de materiais que possuem propriedades não-lineares, como carboneto de silício e óxido de zinco, capazes de conduzir as correntes associadas as tensões induzidas nas redes, devido as descargas atmosféricas, e depois interromper as correntes posteriores [6].

2.2.3.1. Para-raios de carboneto de silício

São para-raios que fazem o uso do resistor não-linear de carboneto de silício

(SiC) e têm em série um centelhador, constituído por vários *gaps* (espaços vazios). Esses pára-raios são formados basicamente das seguintes partes:

- Resistores não-lineares;
- Corpo de porcelana;
- Centelhador;
- Desligador automático;
- Protetor contra sobretensão;
- Mola de compressão [6].

2.2.3.2. Para-raios de óxido de zinco

Para-Raios que são constituídos de resistores não-lineares de óxido de zinco (ZnO), uma diferença com os para-raios de carboneto de silício, não possuem centelhador em série. Equipamentos constituídos pelas seguintes partes:

- Resistor não-linear;
- Corpo de porcelana;
- Corpo polimérico [6].

2.3. CHAVES SECCIONADORAS

2.3.1. Introdução

Conforme a NBR 6935, “chave é um dispositivo mecânico de manobra que na posição aberta assegura uma distância de isolamento, e na posição fechada mantém a continuidade do circuito nas condições especificadas”. São dispositivos que tem a finalidade de realizar seccionamento do circuito para determinadas operações, ou para isolação de alguns pontos, para uma possível manutenção [6].

São equipamentos que no momento em que os seus contatos estão fechados estão conduzindo. São projetados para suportar a corrente de falta por algum tempo, até a abertura do disjuntor, sem que ocorra nenhum tipo de sobreaquecimento [7].

Os seccionadores são destinados para operação à vazio, sem carga. Operação das chaves seccionadoras com o circuito com carga, pode resultar na perda de

vida útil do equipamento, acarretando prejuízos para instalação [6].

2.3.2. Características Construtivas

Os aspectos que interferem nos vários tipos de construção das chaves são:

- Finalidade;
- Nível de tensão do circuito em que chaves devem ser instaladas [6].

As chaves seccionadoras podem ser de dois tipos: chaves seccionadoras monopolares, constituídas por apenas um polo, ou chaves seccionadoras tripolares, que são formadas por três polos [6].

2.3.2.1. Seccionadores para uso interno

São seccionadores que tem suas operações em subestações abrigadas, com objetivo de não sofrer nenhum tipo de danos causados por intempéries. São subestações de pequeno e médio porte, construídas em módulos metálicos ou em alvenaria [6].

Tendo como base, a construção, as chaves seccionadoras de uso interno podem ser classificadas conforme as ilustrações abaixo, de a até e:

➤ Seccionadores simples

Esse tipo de seccionador tripolar tem grande aplicação em subestações de alvenaria [6].

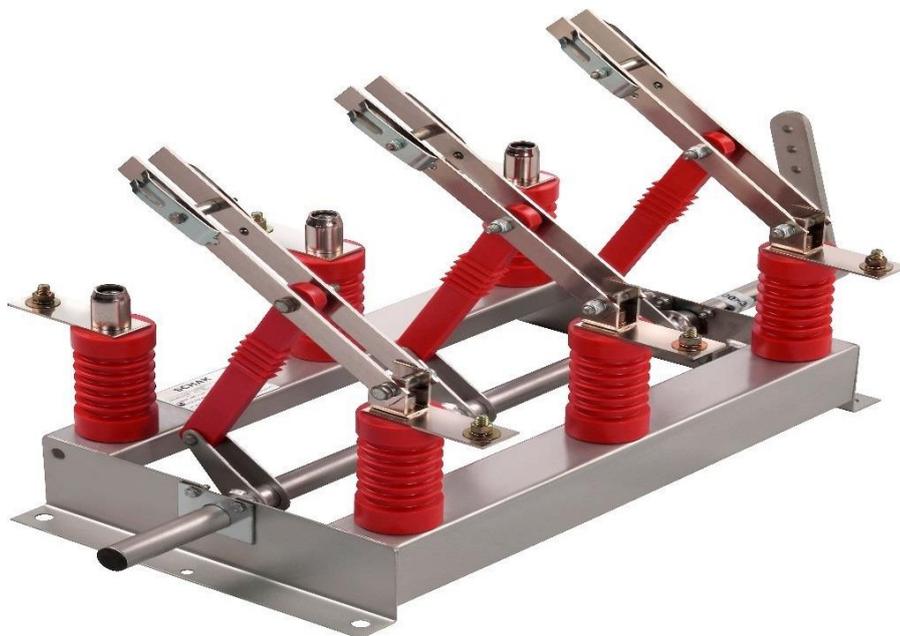


Figura 2 - Chave seccionadora simples tripolar [9]

➤ **Chaves seccionadoras com buchas passantes**

São utilizados com grande frequência em subestações abrigadas [6].



Figura 3 - Chave seccionadora com buchas passantes [10]

➤ **Seccionadores fusíveis**

Empregado para proteção de pequenas unidades de transformação [6].

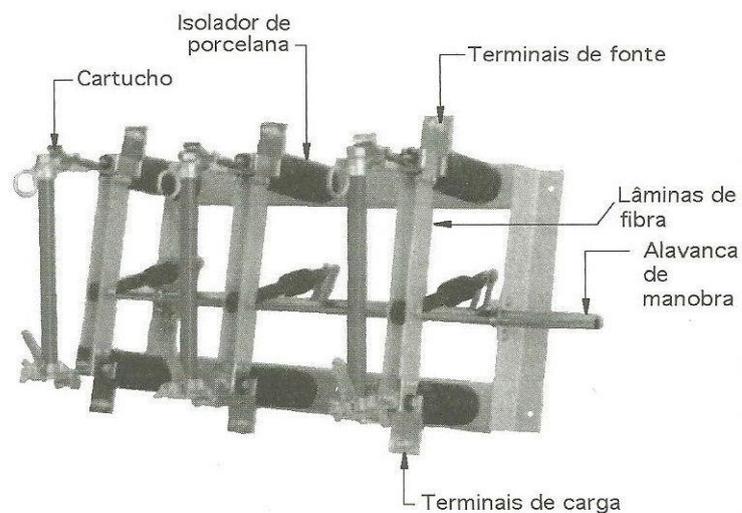


Figura 4 - Chave seccionadora fusível [6]

➤ **Seccionadores interruptores**

Aplicação em subestações industriais [6].

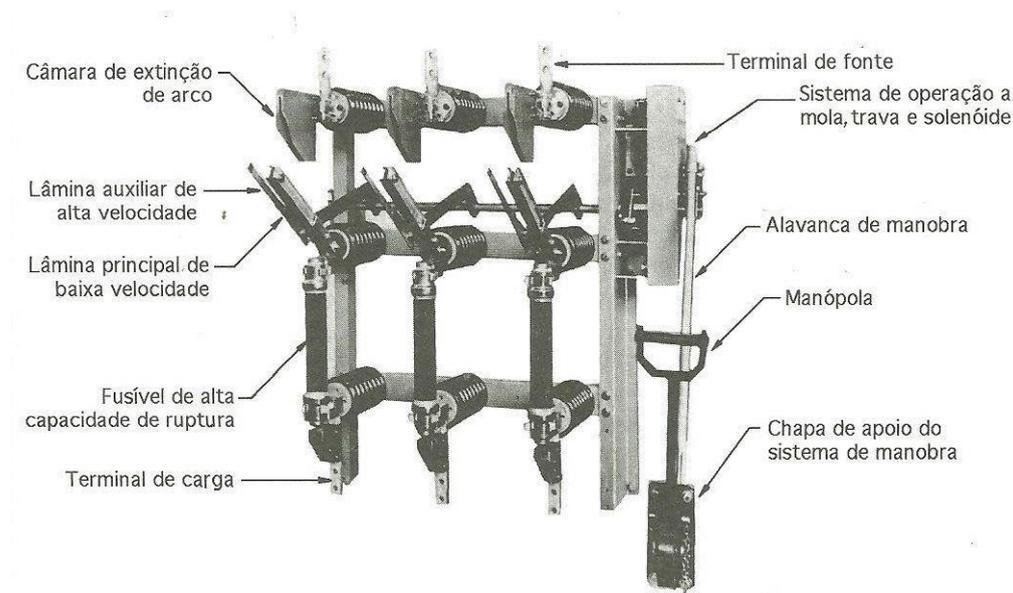


Figura 5 - Interruptor seccionador [6]

➤ **Seccionadores reversíveis**

Empregados em subestações de consumidor, onde há geração de energia elétrica de emergência [6].

As dimensões das chaves seccionadoras reversíveis são mostradas abaixo pela tabela 2.

Tabela 2 - Dimensões de chaves seccionadoras

Corrente nominal (A)	Tensão (KV)	Dimensões (mm)						
		A	B	C	D	E	F	G
400 e 600	15	726	900	275	300	235	217	217
	25	926	1100	335	350	315	280	280
	36	1115	1378	1378	415	430	361	361

[6]

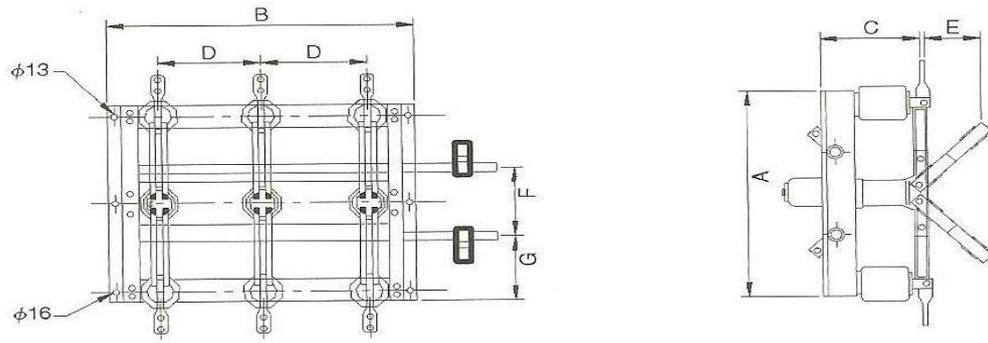


Figura 6 - Chave seccionadora reversível [6]

2.3.2.2 Seccionadores para uso externo

As chaves seccionadoras de uso externo são encontradas em subestações de grande porte e ao ar livre, sem nenhum tipo de abrigo. A classificação dos seccionadores de uso externo, quanto a sua construção, é dada da seguinte forma, ilustradas a seguir da figura a até d:

➤ Seccionadores de abertura lateral singela

Este tipo de equipamento se caracteriza por apresentar as hastes condutoras se abrindo lateralmente. Cada pólo é compost por duas colunas de isoladores, sendo uma fixa e outra rotativa, dispositivo este representado pela figura 7.

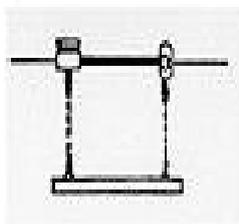


Figura 7 - Seccionadora de abertura lateral singela [8]

➤ Seccionadores de dupla abertura lateral

Estes seccionadores são constituídos de uma lâmina condutora fixada no ponto central da chave, que gira juntamente com o mecanismo de manobra, como pode ser visto na figura 8

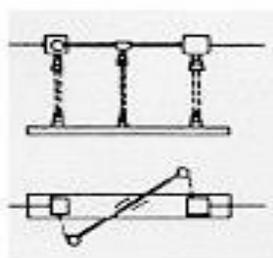


Figura 8 - Seccionadores de dupla abertura lateral [8]

➤ Seccionadores de abertura vertical

Operação semelhante à abertura lateral singela, porém na posição vertical, ilustrada na figura 9.

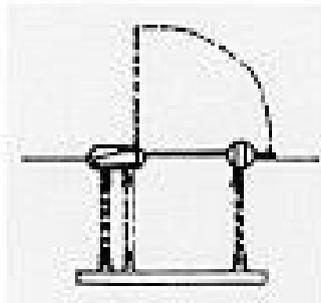


Figura 9 - Seccionadores de abertura vertical [8]

➤ Seccionadores pantográficos

São chaves seccionadoras cuja operação é feita verticalmente. São constituídas de um contato fixo, em geral montado no barramento da subestação, e de um contato móvel fixado na extremidade superior de um mecanismo articulado, formando uma série de paralelogramas, chamados pantógrafos, ilustrado pela figura 10.

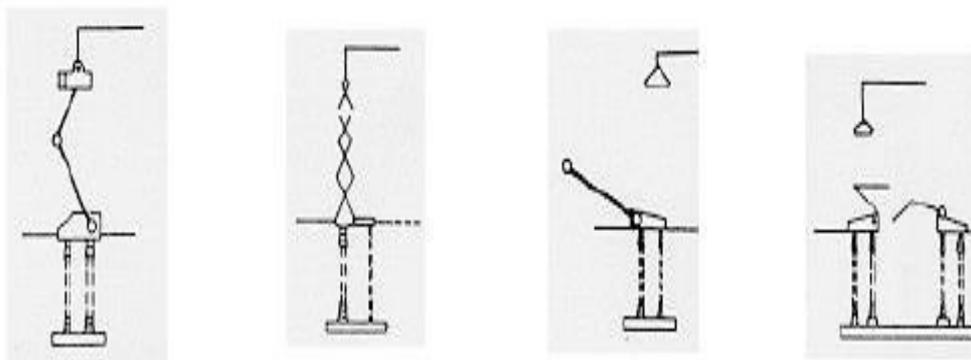


Figura 10- Seccionadores pantográficos [8]

2.4. RELÉ

2.4.1. Introdução

O relé é um dispositivo de proteção constituído por um eletroímã, armadura fixa, armadura móvel, conjunto de contatos, NA e NF, mola de rearme e terminais. Relé é um interruptor eletromecânico, no qual sua movimentação física acontece no momento em uma corrente elétrica percorre as espiras de sua bobina [11].

A corrente elétrica circulando na bobina do relé gera um campo eletromagnético que provoca atração de vários contatos. No momento que a corrente é interrompida o campo eletromagnético é suspenso, portanto, os contatos voltam para suas posições de origem [11].

De forma sintética, as perturbações que podem afetar o sistema elétrico, são:

- Curtos-circuitos;
- Sobrecargas;
- Variações do nível de tensão;
- Frequência [12].

2.4.2. Características dos relés

➤ Quanto à sua forma construtiva

Os relés são elaborados de várias configurações, cada forma utilizando um conceito específico. Quanto a característica construtiva, são agrupados como:

- Relés fluidodinâmicos;
- Relés eletromagnéticos;
- Relés eletrodinâmicos;
- Relés de indução;
- Relés térmicos;
- Relés eletrônicos [12].

➤ **Quanto ao desempenho**

Os dispositivos de proteção devem garantir o êxito de suas atividades. É essencial a apresentação das condições abaixo, por parte dos relés, quanto ao seu desempenho, são elas:

- Sensibilidade;
- Rapidez;
- Confiabilidade [12].

➤ **Quanto às grandezas elétricas**

Com base nessas grandezas de referência frequência, tensão e corrente, foram construídos relés que são ajustados para outros padrões elétricos da rede, como por exemplo: impedância, etc. Os relés de forma geral, são classificados:

- Relés de tensão;
- Relés de corrente;
- Relés de frequência;
- Relés de potência;
- Relés de impedância [12].

➤ **Quanto a sua temporização**

Quando surge uma perturbação no sistema elétrico é responsabilidade da proteção atuar o mais rápido, afim de eliminar a falta no circuito. Para o estabelecimento da seletividade entre os dispositivos de proteção é essencial a temporização entre estes equipamentos, antes da abertura do disjuntor. Os relés são classificados quanto ao tempo de atuação:

- Relés instantâneos;
- Relés temporizadores com retardo dependente;
- Relés temporizadores com retardo independente [12].

➤ **Quanto à forma de acionamento**

O acionamento do sistema de interrupção é feito pelo relé, de duas maneiras:

- Relé de ação direta;
- Relé de ação indireta [12].

Os relés de ação direta grande aplicação em pequenas e médias instalações industriais, já os relés de ação indireta são bastante utilizados em instalações de médio e grande porte [12].

2.5. DISJUNTORES DE ALTA TENSÃO

2.5.1. Introdução

Disjuntores são equipamentos de proteção destinados a interromper e restabelecer a continuidade, em sistemas de potência. Este dispositivo deve estar sempre acompanhado de seu respectivo relé [12].

A principal função de um disjuntor é interromper uma sobrecorrente, em um determinado circuito, em um curto espaço de tempo. Protegendo os circuitos das correntes, de curto-circuito e sobrecarga. No entanto, há casos, que este equipamento é utilizado para interromper correntes em sistemas operando a plena carga e a vazio, e também são usados na energização dos mesmos circuitos, tanto em operações normais ou em condições de falta. A título de ilustração, um disjuntor de alta tensão representado pela figura 11 [12].



Figura 11 - Disjuntor de alta tensão [13]

2.5.2. Arco Elétrico

É um fenômeno que ocorre em um meio fortemente ionizado, quando há a separação de dois terminais de um circuito. O arco elétrico também é definido como um caminho de condução, provocando um brilho intenso e uma elevação muito alta da temperatura no local, tem sua ocorrência devido a energia armazenada no circuito, deve ser retirado imediatamente, para não acarretar em consequências danosas ao sistema de potência [12].

2.5.3. Características Construtivas dos Disjuntores

Os tipos construtivos de disjuntores variam de acordo com o meio que é utilizado para romper com o arco elétrico. Logo após a interrupção, o objetivo do disjuntor

é isolar e resistir a tensão do circuito [12]. O disjuntor é analisado e classificado segundo o sistema de interrupção do arco elétrico e o sistema de acionamento [12]. O disjuntor é analisado e classificado segundo o sistema de interrupção do arco elétrico e o sistema de acionamento [12].

2.5.3.1. Quanto ao sistema de interrupção de arco

➤ Disjuntores a óleo

Tem aplicação em sistemas de média tensão e utilizados também em subestações consumidoras de médio e pequeno porte. Custos reduzidos, robustez construtiva, simplicidade operativa são características que levaram os disjuntores a óleo dominarem o mercado [12].

Baseando-se nas técnicas de interrupção, os disjuntores a óleo são fabricados de duas formas: disjuntores a grande volume de óleo (GVO) e os disjuntores a pequeno volume de óleo (PVO). As figuras 12 e 13 representa os respectivos disjuntores.



Figura 12 - Disjuntor a grande volume de óleo [14]



Figura 13 - Disjuntor a pequeno volume de óleo [15]

➤ **Disjuntores a sopro magnético**

Tem-se como princípio de funcionamento utilizar-se da força eletromagnética para conduzir o arco elétrico a uma câmara de extinção. Grande aplicação em sistemas de corrente contínua como também em circuitos de corrente alternada [6].

Câmara de extinção de arco, mecanismo de operação, sopradores, invólucros metálicos são as principais partes que constituem um disjuntor a sopro magnético. A figura 14 mostra como é o esquema de operação de um disjuntor a sopro magnético [6].

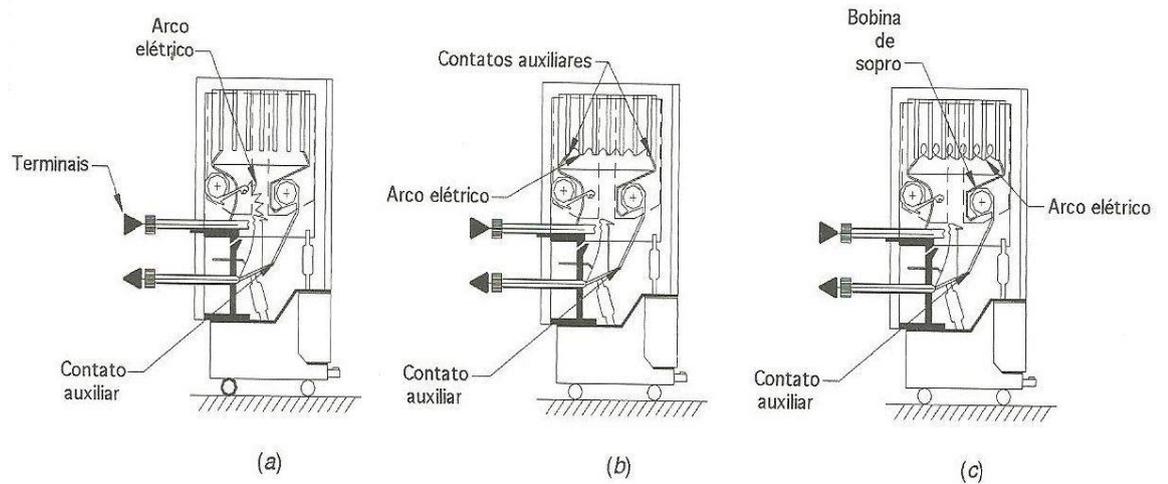


Figura 14 - Ilustração da operação de um disjuntor a sopro magnético [6]

➤ Disjuntores a vácuo

São equipamentos que são constituídos de uma câmara de vácuo para extinção do arco elétrico. Tem grande aplicação em instalações elétricas onde a frequência de manobras é intensa. São construídos de três pólos individualmente instalados através de isoladores suporte em epóxi na caixa de manobra. A figura 15 retrata um disjuntor a vácuo.

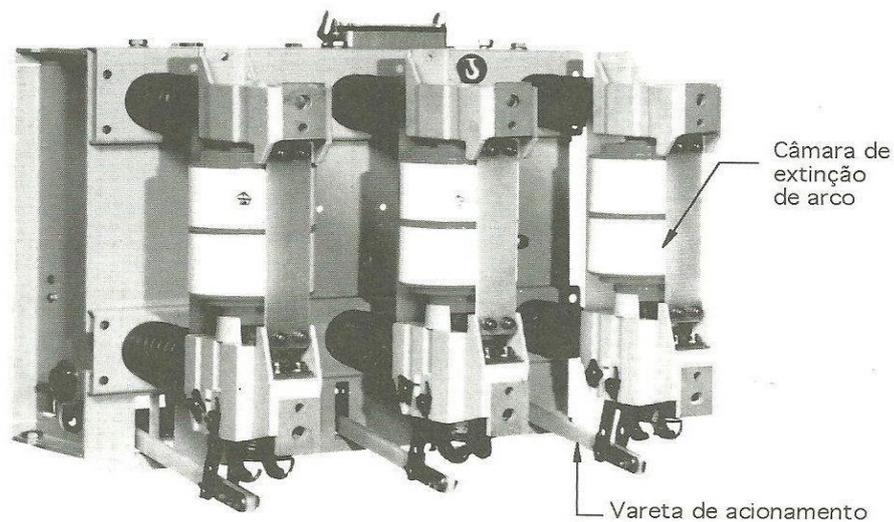


Figura 15 - Disjuntor a vácuo [6]

➤ **Disjuntores a SF₆**

Disjuntores que utilizam do gás hexafluoreto de enxofre, o SF₆, como forma de interromper a continuidade do sistema. São três técnicas distintas desenvolvidas, utilizando o SF₆, para interrupção da corrente elétrica, são elas:

- a) Dupla pressão;
- b) Autocompressão;
- c) Arco girante [6]

➤ **Disjuntores a ar comprimido**

Disjuntores que faz uso de ar comprimido para extinção do arco elétrico. Utilizados em subestações de níveis de tensão igual ou superior a 230KV. Na operação dos disjuntores a ar comprimido é emitido grandes ruídos, portanto, aplicação deste dispositivo de proteção, com estas características, próximas a áreas urbanas, são empregados silenciadores [6].

Com o aperfeiçoamento das técnicas utilizando o gás SF₆, os disjuntores, a ar comprimido, vêm perdendo espaço no mercado, nos últimos anos [6].

2.5.3.2. Quanto ao sistema de acionamento

➤ **Sistema de mola**

Os disjuntores a óleo, de grande ou pequeno volume, nos disjuntores a SF₆, a sopro magnético e a vácuo, utilizam do sistema de acionamento através de mola. Um sistema que consiste em uma mola ou um conjunto de molas, para deslocamento do contato móvel do disjuntor [6].

O sistema de acionamento através de molas é o mais usado em disjuntores de média tensão e predomina em disjuntores até 230KV. O sistema de mola tem sua grande aplicação por apresentar, custos baixos e grande simplicidade de operação [6].

➤ **Sistema de solenoide**

Consiste no carregamento da mola de abertura do dispositivo de proteção/manobra, ao mesmo tempo que propicia a operação do sistema de fechamento do disjuntor. Formado principalmente de um solenoide, geralmente, aplicado apenas na abertura. Esse tipo de acionamento de disjuntores tem pouca aplicação, por causa da pouca quantidade de energia que consegue transferir para o carregamento da mola de abertura [6].

➤ **Sistema a ar comprimido**

Utilizado em disjuntores que fazem o uso do ar comprimido para extinção do arco elétrico. O ar comprimido, neste caso, além de extinguir o arco tem outra função que é acionar o mecanismo de disparo do disjuntor [6].

➤ **Sistema hidráulico**

Sistema que se utiliza do óleo para acionamento do disjuntor [6].

2.6. TRANSFORMADOR DE CORRENTE

2.6.1. Introdução

Os Transformadores de corrente são equipamentos que transformam uma determinada corrente de um circuito primário, de alta ou média tensão, para um sistema secundário, de corrente inferior. Os TCs são utilizados para fornecer corrente de menor valor aos equipamentos de medição e proteção, que possuem baixa resistência elétrica, tendo alguns exemplos, relés, amperímetros, etc. A vantagem de se utilizar os transformadores de correntes no circuito é que os equipamentos que são conectados nos condutores do secundário são de dimensões menores, implicando em custos menores na instalação [12].

A corrente que circula no primário de um TC é proporcional a que circula no secundário, estes equipamentos possuem uma relação de transformação, que em alguns casos é igual a 20. A relação de transformação das correntes é inversamente proporcional a relação entre o número de espiras do enrolamento primário e secundário [12].

Os TCs transformam correntes elevadas em correntes de menor valor, por meio de uma conversão eletromagnética, segundo a relação de transformação. Os transformadores também são chamados de transformadores de instrumentos, pois fornecem correntes reduzidas e isoladas do primário, para sistemas de proteção, medição e controle [12].

2.6.2. Características Construtivas

As formas com que os transformadores de corrente são construídos dependem do tipo de uso. Baseando nisso, tem-se os exemplos mais comuns, ilustrados pelas figuras a até f:

➤ **TC tipo enrolado**

Esse tipo de transformador de corrente é aplicado em casos que utilizam relações de transformações inferiores a 200/5.

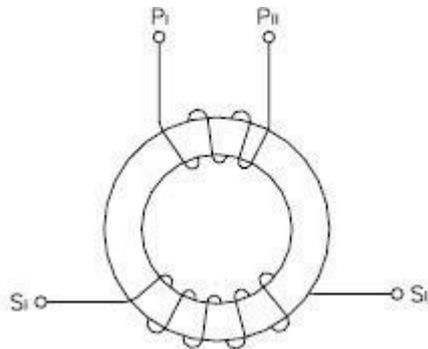


Figura 16 - TC tipo enrolado [8]

➤ **TC tipo barra**

Cujo o enrolamento primário de um transformador de corrente é no formato de uma barra.

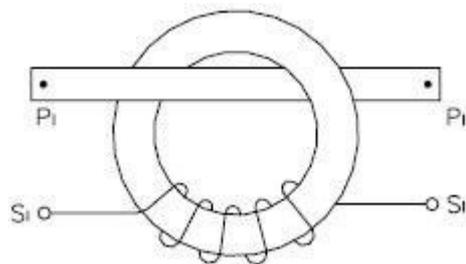


Figura 17 - TC tipo barra [8]

➤ **TC tipo bucha**

Tem-se o núcleo no formato de um anel, com enrolamentos secundários.

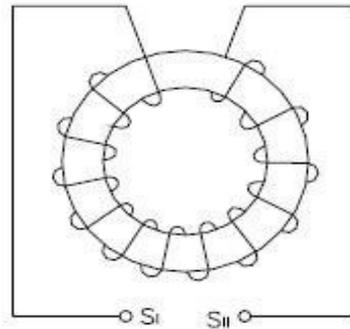


Figura 18 - TC tipo bucha [8]

➤ **TC tipo janela**

Sua construção é similar ao tipo bucha, porém o material isolante entre o primário e o secundário é o ar.

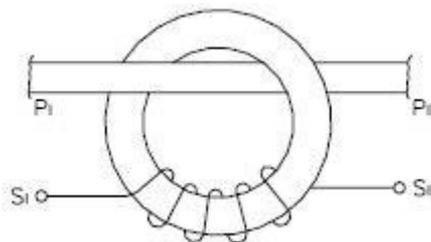


Figura 19 - TC tipo janela [8]

2.6.3. Classificação

Os transformadores de corrente são classificados da seguinte forma:

2.6.3.1. Transformadores de corrente para serviço de medição

São instrumentos que transformam correntes tendo como base a relação de transformação, para suprir equipamentos que tem a função de medição e que estes medidores não estejam ligados diretamente no circuito. Este tipo de equipamento tem como características, boa precisão e baixa corrente de saturação [12].

2.6.3.2. Transformadores de corrente para serviço de proteção

Este tipo de transformador de corrente tem como função, transformar elevadas correntes de sobrecarga ou de curto-circuito em correntes menores. Um exemplo de equipamento de proteção é o relé, este instrumento sendo alimentado por um TC, ao invés de estar instalado no primário do circuito, significa maior segurança aos operadores, facilidade de manutenção e equipamentos de valor extremamente menor [12].

Características dos TCs para serviço de proteção é baixa precisão e corrente de saturação elevada (igual a 20 vezes a corrente nominal) [12].

2.6.4. Modos de ligação

Não apenas no sistema elétrico, mas também em outras áreas, a ligação certa dos equipamentos é de extrema importância. A ligação dos transformadores de correntes deve ser feita da seguinte maneira:

- Primário: a bobina deve ser ligada em uma fase;
- Secundário: os terminais devem ser curto-circuitados

[16].

2.7. TRANSFORMADOR DE POTENCIAL

2.7.1. Introdução

Os transformadores de potencial são equipamentos utilizados em sistemas de medição e proteção, transforma os altos níveis de tensão para valores compatíveis com o máximo suportado pelos equipamentos conectados em seu secundário. Dentre esses equipamentos de proteção e medição se encontra, voltímetros, relés de tensão, bobinas de tensão de medidores de energia, etc [8].

A tensão no secundário do TP é proporcional a tensão no primário. As vantagens de se usar o transformador de potencial é a diminuição nos custos, e maior segurança, nos equipamentos que são empregados no secundário. Tem-se que a razão entre a tensão no primário sobre a tensão no secundário, resulta na constante, relação de transformação (RT), que é determinada na fabricação do equipamento. Que uma observação importante de se fazer, é a seguinte, os TPs apresentam uma RT de ótima precisão, permitindo, em equipamentos de medição, uma leitura de tensão com margem de erro bem pequena no secundário do transformador [17].

A figura a seguir ilustra um transformador de corrente e a relação entre tensão e número de espira.

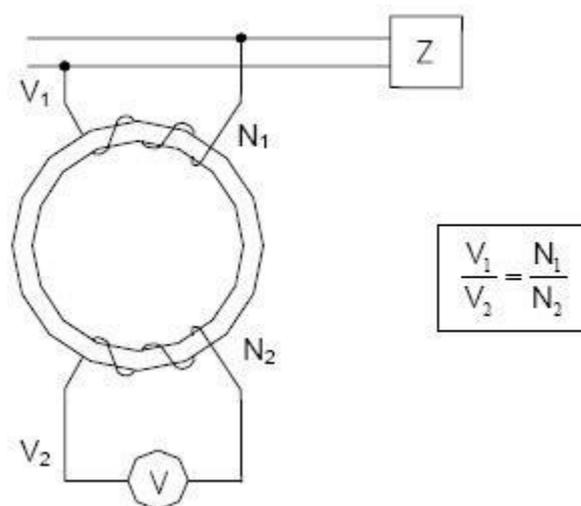


Figura 20 - Transformador de corrente [8]

2.7.2. Características Construtivas

Os TPs são fabricados de acordo, com as tensões primárias e secundárias e com o tipo da instalação que será feita. Nos transformadores de potencial, o enrolamento primário é constituído de uma bobina, que comumente, é submetida a uma dupla esmaltação, enrolada em um núcleo ferro magnético. O enrolamento secundário também é enrolado no núcleo, sendo este, separado do restante, por processos e fitas de papéis especiais [12].

Se o transformador for construído em epóxi, o núcleo e as respectivas bobinas passam por um processo de encapsulamento, afim de evitar a formação de bolhas, o que, em tensões elevadas, se constitui um fator de defeito grave [12].

Se o transformador de potencial for construído de óleo, o núcleo e as bobinas são secos e submetidos, ao calor e ao vácuo. No momento em que o TP acaba de ser montado é preenchido com óleo isolante [12].

Os dois tipos básicos, de transformadores de potencial:

2.7.2.1. Transformadores de Potencial do Tipo Indutivo

Tendo como base, os custos de produção, os transformadores de tensão são quase todos construídos desta forma, para uma tensão de até 138kV. Os TPs do tipo indutivo possuem o enrolamento primário envolvendo um núcleo de ferro-silício que é comum ao enrolamento secundário [12].

2.7.2.2. Transformador de Potencial do Tipo Capacitivo

Formam um grupo de TPs utilizados em circuitos cuja a tensão é igual ou superior a 138KV. São constituídos por dois conjuntos de capacitores que serve para fornecer um divisor de tensão e permitir a comunicação através do sistema *carrier* [12].

2.7.3. Modos de ligação

O tipo de ligação que deve ser feita nos transformadores de potencial, é a seguinte:

- Primário: Cada terminal em uma única fase;
- Secundário: Terminais devem estar em aberto, significando carga infinita [17].

2.8. RESISTORES DE ATERRAMENTO

2.8.1. Introdução

As subestações de potência e grandes unidades geradoras oferecem condições para surgimento de correntes de curto-circuito assimétricas de valor muito elevado, o que pode ocasionar danos. Resistores de aterramento são utilizados em sistemas elétricos com a finalidade de limitar a corrente de falta, fase-terra, a um valor que não danifique os equipamentos, e que não venha a causar acidentes com as pessoas que operam no local [6].

2.8.2. Características construtivas

Os resistores de aterramento são formados por grupo de resistores no interior de um armário, são fabricados em liga de níquel-cromo, aço inoxidável ou em ferro fundido, coberto por uma camada de liga de alumínio, com a finalidade de protegê-lo contra a corrosão [6].

De forma ilustrativa, a figura 21 mostra as partes que compõem o resistor de aterramento e figura 22 ilustra a forma que os resistores são colocados na instalação.

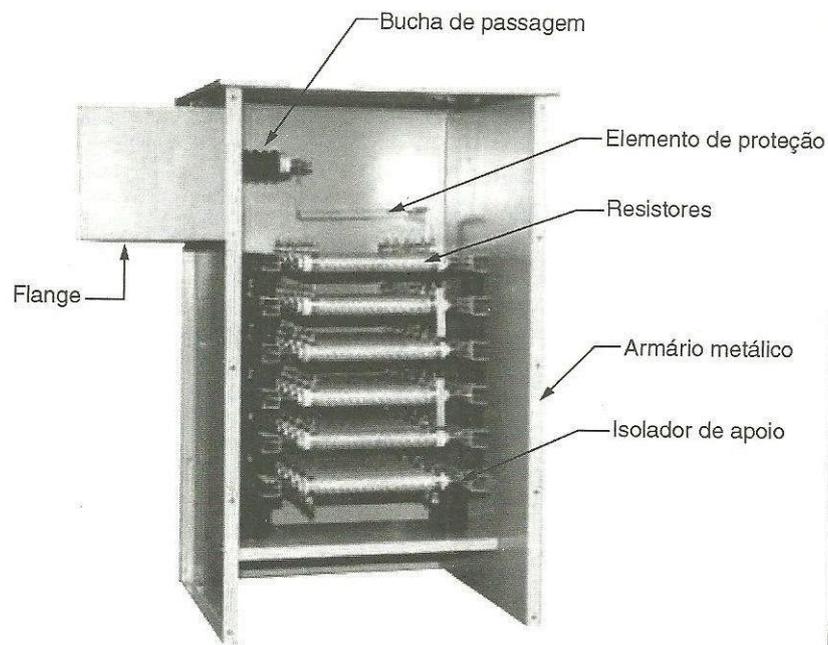


Figura 21 - Resistor de aterramento [6]

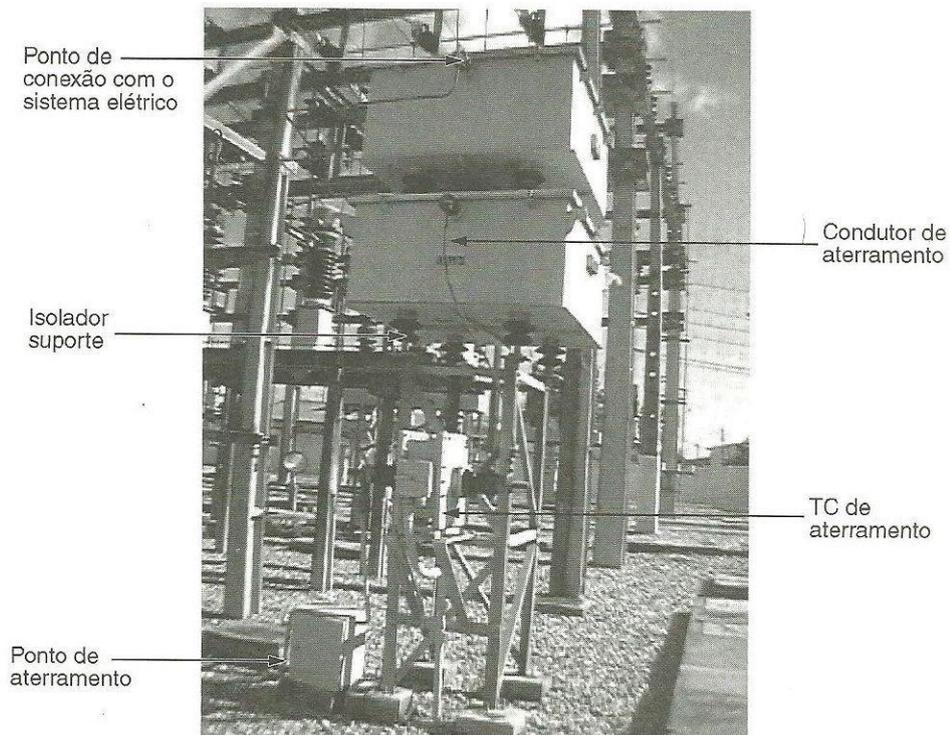


Figura 22 - Detalhes da montagem do resistor de aterramento [6]

2.9. BARRAMENTOS

A configuração dos barramentos de uma SE influi de forma decisiva na flexibilidade, tanto da sua operação quanto da sua manutenção. A possibilidade de se atender a todos os consumidores, mesmo durante um defeito, é uma característica bastante desejável em uma subestação [18].

Quanto a continuidade:

- Barramentos contínuos: não existem chaves ou disjuntores participando ou interrompendo o barramento;
- Barramentos seccionados: o barramento é constituído por duas ou mais seções interligadas por chaves ou disjuntores, onde cada seção atende a um ou mais consumidores;

Quanto ao arranjo:

- Barramento singelo (simples): Este é o arranjo mais simples de um SE, onde todos circuitos se conectam a mesma barra e na ocorrência de alguma falta, todos serão desligados;

➤ Barramento principal e de transferência: Este é o tipo de arranjo utilizado na maioria das SE's, pois oferece um bom plano de manutenção, principalmente devido à existência do disjuntor de interligação de barras, que pode substituir qualquer outro. Por ter dois barramentos, existe a possibilidade de manutenção de um deles, mantendo-se as cargas em outro, ainda que limitações;

➤ Barramento duplo: Utiliza-se da possibilidade de separação das LT's em dois barramentos distintos. Normalmente, o disjuntor de interligação de barras também é utilizado. Este esquema impede, assim, a retirada das duas LT's devido a algum defeito em um dos barramentos, a confiabilidade do sistema aumenta e o risco de perda de estabilidade diminui;

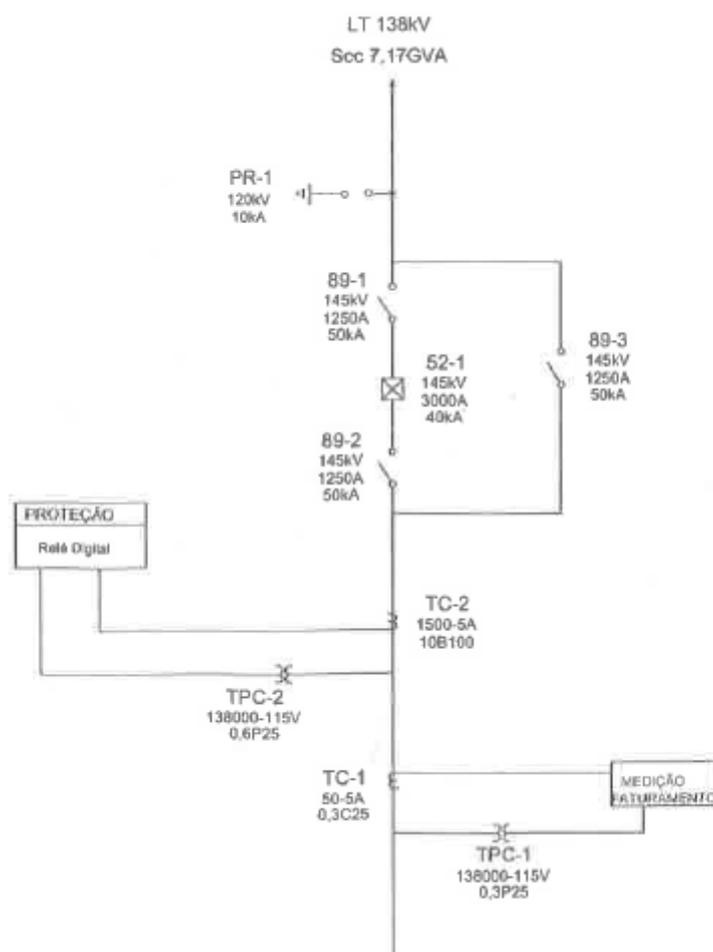
➤ Barramento em Anel: Nesta configuração há uma boa flexibilidade para manutenção dos disjuntores, sem interrupção do fornecimento de energia. Um disjuntor pode sair de serviço sem prejudicar o funcionamento normal da instalação [18].

3. ESPECIFICAÇÃO DO BAY DE ENTRADA DE 138KV

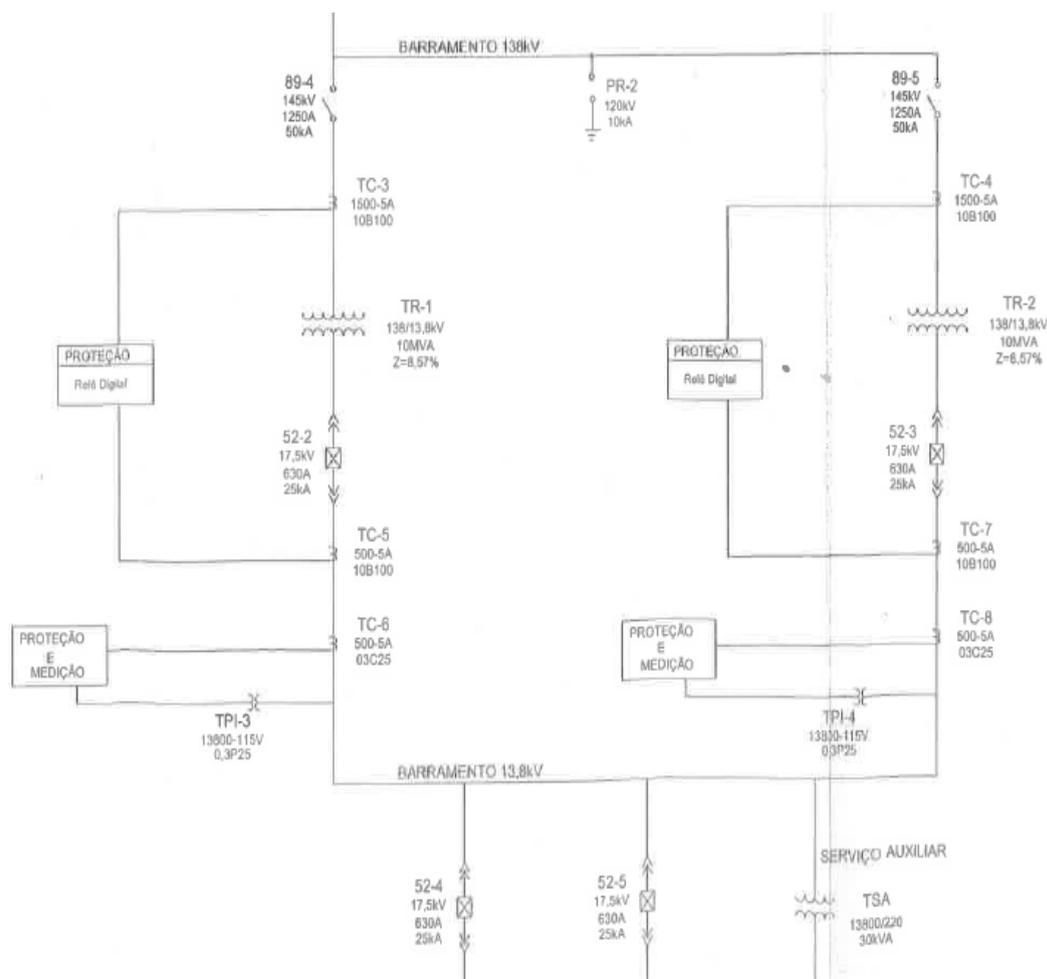
3.1. APRESENTAÇÃO DA SUBESTAÇÃO A SER PROJETADA

A subestação a ser projetada será alimentada por uma linha de transmissão de 138kV, nível de curto-circuito na entrada da SE de 7,17GVA e uma tensão de saída de 13,8kV, consistindo dessa forma na subestação principal da instalação industrial que alimentará as subestações unitárias.

A instalação consiste em dois transformadores de 12,5MVA cada, sendo um deles funciona como equipamento de reserva, ou seja, só entra em operação caso ocorra falha ou manutenção no transformador principal. O diagrama unifilar pode ser visualizado por meio de dois anexos a seguir, 1 e 2, representando a parte de entrada e o restante da subestação, respectivamente:



Anexo 1



Anexo 2

Pode ser classificada como consumidora destinada exclusivamente a alimentação da instalação industrial e construída em terreno particular. Será do tipo externa convencional, isto é, os seus equipamentos são construtivamente independentes um dos outros.

O arranjo do lado de alta é composto por um barramento singular. Poderia ser adotado outro esquema. No entanto, dois fatores foram relevantes para a escolha do barramento singular, primeiro o fato da flexibilidade operativa e a confiabilidade do sistema em estudo ser garantida com o uso do transformador de reserva, segundo, o custo maior da instalação de dois barramentos.

No caso deste estudo, em uma instalação elétrica abaixadora de tensão de 10/12,5 MVA - 138/13,8kV. Tem-se as seguintes características a serem analisadas:

O TAFI (Tensão Aplicada a Frequência Industrial): valor eficaz da tensão senoidal de frequência industrial que o equipamento de proteção deve suportar, por determinado tempo é de 450kV.

O NBI (Nível Básico de Impulso): tensão suportável a impulso, valor de impulso normalizado, atmosférico ou de manobra é de 550kV.

Para este estudo considerou-se uma corrente de descarga (I_d) de 10kA, corrente de descarga nominal que vem sendo bastante empregada pelas concessionárias de energia elétrica em subestações com níveis de tensão superior ou igual a 138kV.

Para se calcular a corrente nominal no primário do transformador é utilizado a seguinte equação:

$$I_{np} = \frac{S_{trafo}}{\sqrt{3} \times V_{np}}$$

Sendo : V_{np} – tensão nominal no primário do transformador, neste caso 138kV;

S_{trafo} – a potência do transformador em VA.

Para se calcular a corrente simétrica de curto circuito, utiliza-se o nível de curto-circuito fornecido pela concessionária de energia elétrica.

$$I_{cc} = \frac{S_{cc}}{\sqrt{3} \times V_{np}}$$

Sendo: S_{cc} – nível de curto-circuito, dado em VA.

A corrente de curto-circuito (I_s) é obtida pela seguinte expressão:

$$I_s = fi \times \sqrt{2} \times I_{cc}$$
$$fi = f\left(\frac{R}{X}\right) = 1,02 + 0,98 \times e^{-3,03 \times R/X}$$

Sendo fi chamado de fator de impulso

- $\frac{R}{X} = 0,17 \rightarrow fi = 1,6 \rightarrow I_s = 1,6 \times \sqrt{2} \times I_{cc} = 2,26 \times I_{cc}$
- $\frac{R}{X} = 0,2 \rightarrow fi = 1,5 \rightarrow I_s = 1,55 \times \sqrt{2} \times I_{cc} = 2,2 \times I_{cc}$
- $\frac{R}{X} = 0,3 \rightarrow fi = 1,41 \rightarrow I_s = 1,41 \times \sqrt{2} \times I_{cc} = 1,99 \times I_{cc}$

3.2. ESPECIFICAÇÃO DOS COMPONENTES ELÉTRICOS DA SUBESTAÇÃO

3.2.1. Chave de aterramento rápido

3.2.1.1. Características Elétricas

A chave de aterramento rápido é composta por uma bobina de operação, que tem a finalidade, operar o fechamento do equipamento. É um dispositivo de proteção que tem sua ação determinada por um relé. Se a função da chave de aterramento rápido for a proteção de um transformador é colocada com um relé diferencial, mas se a instalação da chave for para by-pass da bobina de Peterson, ligada ao neutro do transformador, usa-se o relé de sobrecorrente [6].

3.2.1.2. Especificação Sumária

- Tensão nominal;
- Corrente nominal de descarga;
- Tensão suportável de impulso;
- Número de pólos [6].

Desta forma, conforme mencionado nos capítulos anteriores e na tabela 1, mostra-se na tabela 3 a especificação para a chave.

Tabela 3 – Especificação sumária da chave de aterramento rápido

Especificação Sumária	
Tensão nominal	145kV
Corrente nominal de descarga	10kA
Tensão suportável de impulso	550kV
Número de pólos	3 pólos

3.2.2. Para-raios

3.2.2.1. Características elétricas

a) Tensão nominal

É a máxima tensão, valor eficaz, a que pode ficar permanentemente submetido o para-raios, na frequência nominal. Tensão para a qual foi projetado e tem condições de operar satisfatoriamente [6].

b) Frequência nominal

É a frequência para a qual foi projetado o equipamento [6].

c) Máxima tensão contínua de operação (MCOV)

Consiste no maior valor eficaz de tensão de frequência fundamental que aplicada aos terminais de um para-raios, permite que esse opere continuamente sem alteração das suas propriedades térmicas e elétricas [6].

d) Corrente de descarga nominal

Valor de crista da corrente de impulso que flui através do para-raios, utilizadas para classifica-los, com forma de 8/20[μ s] [6].

e) Tensão residual

Consiste no valor de crista da tensão que aparece entre os terminais de um para-raios durante a passagem da corrente de descarga, sendo sua amplitude função dos seguintes fatores a saber: da forma de onda e da taxa de crescimento da corrente, e da amplitude de descarga [6].

Esta tensão ficará submetido qualquer equipamento que estiver sob proteção do para-raios, contando que o mesmo esteja instalado praticamente nos seus bornes de alimentação [6].

f) Capacidade de absorção de energia

Está relacionada com a máxima quantidade de energia que equipamento é capaz de absorver, para uma dada forma de onda, durante uma sobretensão temporária ou transitória e dissipa-la, mantendo a sua estabilidade térmica e sem alterações significativas em suas propriedades térmicas e elétricas [6].

g) Classes de um para-raios

Normalmente, três classes: estação, intermediária e distribuição [6].

3.2.2.2. Especificação sumária

- Tensão nominal;
- Tipo de resistor não-linear;
- Classe;
- Corrente de descarga nominal;
- Tensão disruptiva máxima de impulso atmosférico;
- Tensão disruptiva máxima por surto de manobra [6].

3.2.2.3. Cálculos para a especificação dos para-raios.

Informações básicas preliminares para um nível de tensão de 138 kV:

Tensão nominal no primário: $V_{np} = 138\text{kV}$;

Tensão máxima no sistema: $V_s = 145\text{kV}$

Nível de impulso de manobra do sistema: $NIM = 450\text{kV}$

Nível atmosférico do sistema: $NIA = 550\text{kV}$

Deve-se salientar que, MCOV do para-raios deve ser igual ou superior a máxima tensão operativa do sistema no ponto de aplicação. Considerando uma margem de segurança de 5%, temos então:

$$MCOV_{PR} \geq 1,05x \left(\frac{V_s}{\sqrt{3}} \right) [\text{kV}]$$

$$MCOV_{PR} \geq 87,9 [\text{kV}]$$

De acordo com o catálogo escolhemos um para raio com MCOV de valor superior a 87,9kV, no caso, 98kV, desta forma o escolhido será o para-raios da Cooper Power System I235-98.

Conforme a tabela abaixo, o para-raios escolhido apresenta uma tensão nominal de 120kV.

Especificando o para-raios para uma corrente de descarga de 10kA, corrente de descarga nominal que vem sendo bastante empregada pelas concessionárias de energia em sistemas com tensão operativa de 362kV. A tabela 4, representa o catálogo necessário para especificação de uma para-raios.

Tabela 4 - Dados do catálogo de para-raios

Vn (kV, rms)	MCOV (kV)	TOV (kV, rms)	Tensão Residual nominal para impulso atmosferico (kV, rms)						Tensão residual nominal para impulso de manobra (kV, rms)				Sobretensão temporária (kV)	
			1,5 KA	3 KA	5 KA	10KA	20KA	40KA	125A	250A	500A	1KA	1 Second	10 seconds
3	2,55	8,2	6,5	6,9	7,2	7,8	8,4	9,4	5,7	5,9	6,1	6,3	3,5	3,3
6	5,1	16,3	13	13,7	14,3	15,6	16,8	18,8	11,4	11,7	12,1	12,6	6,9	6,6
9	7,65	24,5	19,5	20,6	21,5	23,3	25,2	28,2	17,1	17,6	18,1	18,8	10,4	9,9
10	8,4	26,9	21,4	22,6	23,6	25,6	27,7	30,9	18,8	19,3	19,9	20,7	11,4	10,8
12	10,2	32,6	26	27,4	28,6	31,1	33,6	37,5	22,8	23,4	24,1	25,1	13,9	13,1
15	12,7	40,6	32,4	34,1	35,6	38,7	41,9	46,7	28,4	29,1	30	31,2	17,2	16,4
18	15,3	48,9	39	41,1	42,9	46,6	50,4	56,3	34,2	35,1	36,2	37,6	20,8	19,7
21	17	54,4	43,3	45,6	47,7	51,7	56	62,5	38	39	40,2	41,8	23,1	21,9
24	19,5	62,4	49,7	52,3	54,7	59,3	64,2	71,7	43,6	44,7	46,1	47,9	26,5	25,1
27	22	70,3	56	59	61,7	66,9	72,5	80,9	49,1	50,4	52	54	29,9	28,4
30	24,4	78	62,1	65,5	68,4	74,2	80,4	89,7	54,5	55,9	57,7	59,9	33,1	31,5
33	27,5	87,9	70	73,8	77,1	83,6	90,6	102	61,4	63	65	67,5	37,3	35,4
36	29	92,7	73,8	77,8	81,3	88,2	95,5	107	64,8	66,4	68,6	71,2	39,4	37,4
39	31,5	101	80,2	84,5	88,3	95,8	104	116	70,3	72,2	74,5	77,3	42,8	40,6
42	34	109	86,6	91,2	95,3	104	112	125	75,9	77,9	80,4	83,5	46,2	43,8
45	36,5	117	92,9	97,9	103	111	121	135	81,5	83,6	86,3	89,6	49,6	47
48	39	125	99,3	105	110	119	129	144	87,1	89,3	92,2	95,7	53	50,3
54	42	135	107	113	118	128	139	155	93,8	96,2	99,3	104	65,2	64,1
60	48	154	123	129	135	146	159	177	108	110	114	118	72	61,9
66	53	170	135	143	149	162	175	195	119	122	126	131	77,4	68,3
72	57	183	146	153	160	174	188	210	128	131	135	140	84,2	73,5
78	62	199	158	167	174	189	205	228	139	142	147	153	92,3	79,9
84	68	218	174	183	191	207	224	250	152	156	161	167	97,8	87,7
90	72	231	184	194	202	219	238	265	161	165	171	177	103,2	92,8
96	76	243	194	204	214	232	251	280	170	174	180	187	104,6	98
96	77	247	198	207	216	235	254	284	172	177	182	189	114,1	99,3
108	84	269	214	226	236	256	277	309	180	183	189	207	133,1	108,3
120	98	314	250	263	275	298	323	361	219	225	232	241	143,9	126,3
132	106	339	270	285	298	323	350	390	237	243	251	261	154,8	136,6

[19]

Deve ser feita a verificação da tensão suportável nominal de impulsos atmosféricos, pela seguinte relação:

$$\frac{NIA}{NPARia} \geq 1,2$$

NPRia: Máxima tensão residual nominal para impulso atmosférico, para uma forma de onda de 8/20[μ s] e corrente de descarga de 10KA, vale 298KV, desta forma, tem-se [19]:

:

$$\frac{550}{298} \geq 1,2$$

$$1,84 \geq 1,2$$

Posteriormente, é feita a verificação da tensão suportável nominal de impulso atmosféricos:

$$\frac{NIM}{NPRim} \geq 1,15$$

De acordo com a tabela 4, NPRim (máxima tensão residual nominal para impulso de manobra) para uma forma de onda de 30/60 μ s e corrente de impulso de 1000A vale 241KV, sendo assim [19]:

$$\frac{450}{241} \geq 1,15$$

$$1,86 \geq 1,15$$

Portanto as condições foram verificadas!

Assim, temos a seguinte especificação:

Tabela 5 - Especificação sumária do para-raios

Especificação Sumária	
Marca/Modelo	COOPER POWER SYSTEM I235-98
Tensão nominal	120KV
Tipo de resistor não-linear	Óxido de zinco
Classe	Estação
Corrente de descarga nominal	10KA
Tensão disruptiva máxima de impulso atmosférico	298KV
Tensão disruptiva máxima por surto de manobra	241KV

3.2.3. Chaves seccionadoras

3.2.3.1. Características elétricas

a) Tensão nominal

Tensão para qual a chave é projetada para serviço contínuo, devendo ser igual à máxima tensão operativa do sistema no qual será instalada [6].

b) Corrente nominal

Corrente que o equipamento deve conduzir continuamente sem exceder os valores de temperatura especificados por norma [6].

c) Nível de isolamento

As chaves são constituídas por isoladores auto-regenerativos, ou seja, rompido o dielétrico pela aplicação de determinado impulso de tensão, suas condições retornam os valores iniciais logo que cesse o fenômeno que provocou a disrupção. Os níveis de isolamento caracterizam as suportabilidades do equipamento às solicitações dielétricas [6].

➤ A tensão aplicada a frequência industrial (TAFI): tensão aplicada de frequência industrial que o equipamento deve suportar, durante um intervalo de tempo especificado, sem apresentar nenhuma descarga;

➤ A Tensão suportável a impulso: tensão de impulso atmosférico para a qual o equipamento tem uma determinada probabilidade de suportar. Normalmente probabilidade mínima de 90% [6].

d) Frequência nominal

Frequência do sistema no qual o equipamento irá operar, no caso 60Hz [6].

e) Corrente suportável nominal de curta duração

Valor eficaz da corrente que a chave pode conduzir por um determinado tempo [6].

f) Valor de crista nominal de corrente suportável

É o valor de crista que a crista que a chave pode conduzir sem a danificar seus materiais e componentes. Seus valores padronizados são 2,5 vezes o valor da corrente nominal de curta duração [6].

3.2.3.2. Especificação sumária

- Marca/Modelo;
- Tensão nominal;
- TAFI;
- NBI;
- Corrente nominal;
- Corrente suportável nominal de curta duração;
- Duração da corrente suportável de curto-circuito;
- Valor de crista nominal da corrente suportável [6].

3.2.3.3. Cálculos para a especificação das chaves seccionadoras

Todas as chaves apresentam as mesmas características, a respeito de tensão nominal, frequência, correntes de curto circuito simétricas e assimétricas.

Dados da instalação onde se encontra a chave seccionadora:

Tensão nominal do primário: $V_{np} = 138\text{kV}$

Corrente nominal, sendo um transformador de 12,5MVA, tem-se:

$$I_{np} = \frac{12,5\text{MVA}}{\sqrt{3} \times 138\text{KV}} = 52,29\text{A}$$

Corrente de curto-circuito simétrica, sendo o nível de curto-circuito da instalação de 7,17GMVA, calcula-se:

$$I_{cc} = \frac{7,17GMVA}{\sqrt{3} \times 138KV} = 30KA$$

Cálculo da corrente de curto-circuito assimétrica:

$$I_s = fi \times \sqrt{2} \times I_{cc}$$

$$fi = f\left(\frac{R}{X}\right) = 1,02 + 0,98xe^{-3,03xR/X}$$

Sendo fi chamado de fator de impulso

$$\text{➤ } \frac{R}{X} = 0,17 \rightarrow fi = 1,6 \rightarrow I_s = 1,6x\sqrt{2}xI_{cc} = 2,26xI_{cc}$$

$$\text{➤ } \frac{R}{X} = 0,2 \rightarrow fi = 1,5 \rightarrow I_s = 1,55x\sqrt{2}I_{cc} = 2,2xI_{cc}$$

$$\text{➤ } \frac{R}{X} = 0,3 \rightarrow fi = 1,41 \rightarrow I_s = 1,41x\sqrt{2}xI_{cc} =$$

$$1,99xI_{cc}$$

$$I_s = 2,50I_{cc}$$

$$I_s = 2,50 \times 30KA = 76,5kA$$

Assim sendo a chave seccionadora escolhida será: WEG LB-145-12-50. Tendo logo abaixo o catálogo representado pela tabela 6 e em seguida a especificação sumária, mostrada pela tabela 7.

Tabela 6 - Dados do catálogo da chave de aterramento

Tipo	Descrição	Aplicação Característica	Suportabilidade Curto-Circuito									
			In (A)	Tensão (KV)								
GB	Secionador Monopolar Tipo Faca , operação por vara de manobra, montagem vertical ou horizontal, trava e dispositivo de extração.	Utilizada em subestações de distribuição	15	25,8	38	72,5	100	145	245	362	550	
			620	25	25	25	25					
			1250	25	25	25	25					
			1500	31,5	31,5	31,5						
			2000	31,5	31,5	31,5						
			2500	40								
TD	Secionador Monopolar Tipo Faca em Tandem (GB + 2TD) , operação por vara de manobra, montagem vertical ou horizontal, trava e dispositivo de extração.	Utilizada em subestações de distribuição	15	25,8	38	72,5	100	145	245	362	550	
			630	25	25	25						
			1250	25	25	25						
			1500	31,5	31,5	31,5						
			2000	31,5	31,5	31,5						
			2500	40								
HB	Secionador de Abertura Lateral , operação tripolar com um isolador rotativo, montagem vertical, horizontal ou transversal, faca rígida com contatos de alta tensão.	Não recomendada para nível de curto-circuito acima de 25KA	15	25,8	28	72,5	100	145	245	362	550	
			630	25	25	25						
			1250	25	25	25						
			1500	25	25							
			2000									
			2500									
LB	Secionador de Dupla Abertura Lateral , operação tripolar com isolador central rotativo, faca giratória com engate automático.	Excelente Suportabili. de para curto-circuito	15	25,8	38	72,5	100	145	245	362	550	
			630									
			1250				40	40	50			
			1500				40	40	50	50	50	
			2000						50	50	50	
			2500						50	50	50	
3000						50	50	50				

[19]

Tabela 7 - Especificação sumária da chave seccionadora

Especificação Sumária	
Marca/Modelo	WEG-LB-145-12-50
Tensão nominal	145KV
TAFI	300KV
NBI	550KV
Corrente nominal	1250A
Frequência nominal	50/60Hz
Corrente suportável nominal de curta duração	50KA
Duração da corrente suportável de curto-circuito	1s
Valor de crista nominal da corrente suportável	125KA

3.2.4. Disjuntor

3.2.4.1. Características elétricas

a) Tensão nominal

É o valor eficaz da tensão pela qual o disjuntor foi projetado [6].

b) Nível de isolamento

Conjunto de valores de tensões suportáveis nominais que caracterizam o isolamento de um disjuntor em relação à sua capacidade de suportar os esforços dielétricos [6].

➤ Tensão aplicada a frequência industrial (TAFI): valor eficaz da tensão senoidal de frequência industrial que um disjuntor deve suportar, em condições de ensaio especificadas. O tempo de aplicação desta tensão, geralmente, é de 1 minuto, a tensão é aproximadamente de 2,5 vezes a tensão nominal e a forma de onda é senoidal com frequência de 60Hz;

➤ Tensão suportável a impulso: valor de impulso normalizado, atmosférico pleno ou de manobra, que um disjuntor suporta em condições previstas de ensaios. Em ensaio de impulso atmosférico, é utilizado um gerador de impulsos com forma de onda ajustado em $1,2 \times 50 \mu s$, indicando que em $1,2 \mu s$ a onda atinge o valor de pico e em $50 \mu s$ atinge metade do valor de pico. Esta tensão define o nível básico de impulso (NBI) do disjuntor [6].

c) Tensão de restabelecimento

Tensão verificada entre os terminais de um pólo do disjuntor após a interrupção da corrente [6].

d) Corrente nominal

Valor de corrente em regime contínuo que o disjuntor deve conduzir, sem que haja elevada temperatura que exceda os limites térmicos estabelecidos [6].

e) Capacidade de interrupção

É a capacidade de interromper o valor eficaz da corrente de curto-circuito, sem danificar os contatos [6].

f) Capacidade de fechamento

É a capacidade de fechar o circuito. Geralmente, esta capacidade é de 2,5 vezes a capacidade de interrupção [6].

g) Sequência nominal de operação

Em geral o ciclo de operação é designado por duas sequências:

Sequência O – t – CO

Onde: O – operação de abertura (OPEN);

C – Operação de fechamento (CLOSE);

Sequência O – t – CO – t – CO

Neste caso, a capacidade de interrupção do disjuntor é reduzida cerca de 20% da capacidade registrada na operação anterior.

Muito das vezes a sequência de operação vem acompanhada de seu tempo, por exemplo:

O – 0,35s – CO ou O – 0,35s – CO – 3min – CO [6].

h) Tempo de interrupção

Intervalo de tempo que o disjuntor leva para interromper uma corrente de valor especificado [6].

i) Frequência nominal

A frequência nominal é de 60% [6].

j) Corrente suportável de curta duração

É o valor eficaz da corrente que um disjuntor pode suportar, na posição fechada, durante um curto intervalo de tempo especificado nas condições prescritas de emprego e de funcionamento [6].

3.2.4.2. Especificação sumária

- Marca/Modelo;
- Tensão nominal;
- TAFI;
- NBI;
- Corrente nominal;
- Capacidade de interrupção;
- Capacidade de fechamento;
- Tempo de interrupção;
- Frequência nominal [6].

3.2.4.3. Cálculos para especificação do disjuntor

Dados para especificação do equipamento:

Nível de curto-circuito – 7,17GMVA

Tensão nominal no primário do transformador – 138kV

Potência do transformador – 12,5MVA

Calculando a corrente nominal no primário do transformador:

$$I_{np} = \frac{12,5MVA}{\sqrt{3} \times 138KV} = 52,29A$$

Cálculo da corrente de curto-circuito simétrica:

$$I_{cc} = \frac{7,17GMVA}{\sqrt{3} \times 138KV} = 30kA$$

Cálculo da corrente de curto-circuito assimétrica:

$$I_s = 2,5 \times I_{cc} = 2,5 \times 30KA = 76,5kA$$

Desta forma, o disjuntor escolhido será o disjuntor da ABB: LTB 145D1/B que possui as seguintes características, conforme a tabela 8.

Tabela 8 - Dados do catálogo do disjuntor

		LTB 725D1/B	LTB 123D1/B	LTB 145D1/B	LTB 170D1/B	LTB 725E1	LTB 170E1	LTB 245E1	LTB 245E1	LTB 550E2
Número de quebras por pólo		1	1	1	1	1	1	1	1	2
Tensão nominal	KV	72,5	123	145	170	72,5	170	245	362	550
Frequência nominal	Hz	60	60	60	60	60	60	60	60	60
Tensão suportável										
Para terra	KV	160/140	260/230	310/275	365/315	160/140	365/315	425/350	555/	860/
Pólo aberto	Hz	160/140	260/230	310/275	365/315	160/140	365/315	425/350	555/	860/
Tensão suportável p/ impulso										
Para terra	KV	350	550	650	750	350	750	900	1300	1800
Pólo aberto	Hz	350	550	650	750	350	750	900	1300	1800
Tensão suportável de onda										
Para terra	KV	452	710	838	968	452	968	1160	1680	2320
Pólo aberto	Hz	452	710	838	968	452	968	1160	1680	2320
Impulso de comutação e tensão										
Para terra	KV								625	1175
Pólo aberto	Hz								900	1300
Corrente nominal	A	3000	3000	3000	3000	4000	4000	4000	4000	4000
Corrente de interrupção	KA	40	40	40	40	40	40	40	40	40
Primeiro pólo		1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,3	1,3
Capacidade de interrupção	KA	104	104	104	104	104	104	104	104	104
Duração de curto prazo	s	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Tempo de fechamento	ms	<40	<40	<40	<40	<55	<55	<55	<70	<70
Tempo de abertura	ms	22	22	22	22	17	17	17	18	18
Tempo de interrupção	ms	40	40	40	40	40	40	40	40	40
Tempo morto	ms	300	300	300	300	300	300	300	300	300
Padrão avaliado	-	O-0,3s-CO-3min-CO or CO-15s-CO								

[20]

A seguir tem-se a especificação do disjuntor, de acordo com a tabela 8.

Tabela 9 - Especificação sumária do disjuntor

Especificação Sumária	
Marca/Modelo	ABB - LTB 145D1/B
Tensão nominal	145KV
TAFI	310KV
NBI	650KV
Corrente nominal	3000A
Capacidade de interrupção	40KA
Capacidade de fechamento	104KA
Tempo de interrupção	40ms
Frequência nominal	50/60Hz

3.2.5. Transformador de corrente

3.2.5.1. Características elétricas

a) Corrente nominal

As correntes nominais primárias caracterizam os valores nominais suportados em regime normal de operação pelo TC. Sua especificação deve considerar a corrente máxima no local de inserção do equipamento assim como os valores de curto-circuito. As correntes nominais secundárias são geralmente iguais a 5A, em alguns casos especiais, pode-se adotar essa corrente igual a 1A [6].

b) Nível de isolamento

Defina a especificação do equipamento quanto às condições que deve satisfazer a sua isolação em termos de tensão suportável. Temos nesse âmbito:

- TAFI, valor eficaz correspondente ao tempo de 1 minuto;
- Tensão suportável de impulso atmosférico, caracterizando o NBI, valor de crista com uma onda de $1,2/50\mu s$ [6].

c) Carga nominal

Os transformadores de corrente devem ser especificados de acordo com a carga que será ligada no seu secundário. Para um transformador de corrente, a carga secundária representa o valor ôhmico das impedâncias formadas pelos diferentes aparelhos ligados a seu secundário, incluindo-se os condutores de interligação.

Segundo a ABNT, as cargas nominais são designadas pela letra “C” seguida pelo número de volt-amperes em 60Hz, com a corrente nominal de 5A e fator de potência normalizado conforme a tabela abaixo. Nestas condições, adota-se a carga padronizada de valor imediatamente superior ao valor calculado [6].

A tabela 10 apresenta os valores de cargas nominais, conectadas no secundário do equipamento.

Tabela 10 - Cargas nominais padronizadas

Cargas Nominais			Características a 60Hz e 5A		
Designação ABNT	Potência (VA)	Fator de Potência	Resistência (Ω)	Indutância (mH)	Impedância (Ω)
C 2,5	2,5	0,9	0,09	0,116	0,1
C 5,0	5	0,9	0,18	0,232	0,2
C 12,5	12,5	0,9	0,45	0,58	0,5
C 25	25	0,5	0,5	2,3	1
C 50	50	0,5	1	4,6	2
C 100	100	0,5	2	9,2	4
C 200	200	0,5	4	18,4	8

[20]

É importante que a carga conectada no secundário seja menor que a carga nominal, podendo sair de sua classe de exatidão, além de não limitar adequadamente a corrente de curto-circuito.

e) Classe de exatidão Nominal

Refere-se ao maior erro de transformação, já previsto. Segundo a ABNT, os TCs devem manter a sua classe de exatidão quando a corrente estiver na faixa de 10 a 100% da corrente nominal. [6]

Os TCs diferem-se em dois tipos: os de medição e os de proteção.

É feita a seguinte observação: TCs para proteção, para serviço de relés são classificados quanto a sua impedância, em duas classes: Classe B (é um TC cujo enrolamento secundário apresenta reatância desprezível, como por exemplo, os de núcleo toroidal) e a Classe A (é um TC cujo enrolamento secundário apresenta reatância que não pode ser desprezada). [6]

A tabela 11 a seguir mostra os valores de classe de exatidão dos transformadores de corrente.

Tabela 11 - Classe de exatidão dos TCs

	TC para medição	TC para proteção
ABNT	0,3; 0,6; 1,2; 3,0	5; 10
ANSI	0,3; 0,6; 1,2	10

[22]

A tabela 12 apresenta tensões secundárias dos TCs em função da carga padronizada do mesmo.

Tabela 12 - Tensões secundárias dos TCs

CURVA (VA)	TENSÃO SECUNDÁRIA (V)	TC NORMALIZADO PARA PROTEÇÃO	
		CLASSE A	CLASSE B
C 2,5	10	A 10	B 10
C 5	20	A 20	B 20
C 12,5	50	A 50	B 50
C 25	100	A 100	B 100
C 50	200	A 200	B 200
C 100	400	A 400	B 400
C 200	800	A 800	B 800

[20]

f) Fator de sobrecorrente

Trata-se da relação entre a máxima corrente com a qual o TC mantém sua classe de exatidão e a corrente nominal. Este fator pode ser 5, 10, 15 ou 20. É especificado que o fator de sobrecorrente para serviço de proteção é 20 [6].

g) Fator térmico

Fator que deve multiplicar a corrente primária nominal para se obter a corrente primária máxima que o TC é capaz de conduzir em regime permanente, sob frequência nominal, sem exceder os limites de elevação de temperatura especificados e sem sair de sua classe de exatidão. Este fator pode ser 1,0; 2,0; 1,30; 1,50 e 2,0 [6].

h) Corrente térmica nominal

Valor eficaz da corrente simétrica que o equipamento pode suportar, por 1 segundo, com o secundário curto-circuitado, sem ultrapassar os limites de temperatura especificados para sua classe de isolamento [6].

i) Corrente dinâmica nominal

Valor de pico do curto-circuito assimétrico, que equivale normalmente a 2,5 vezes a corrente térmica nominal. O TC deve suportar essa corrente por um tempo de meio ciclo, com o enrolamento secundário curto-circuitado, sem se danificar mecanicamente [6].

3.2.5.2. Especificação sumária

Para uma correta especificação, primeiramente, tem que saber qual função o mesmo desempenhará. Para serviço de medição, torna-se necessário determinar a carga acoplada no secundário e sua classe de exatidão, sendo designação dada pela tabela 10, já apresentada. No caso do TC para serviço de proteção, além da carga ligada ao secundário, devemos nos atentar também para as condições transitórias das correntes de defeito, para a designação fazemos a tabela 11, utilizando a classe de tensão secundária para 20 vezes a corrente nominal [6].

- Destinação;
- Corrente nominal e relação nominal;
- Nível de isolamento;
- Frequência nominal;
- Classe de exatidão;
- Fator de sobrecorrente nominal;
- Fator térmico nominal;
- Corrente nominal;
- Corrente dinâmica nominal [6].

3.2.5.3. Cálculos para a especificação do TC-1 de medição

Os dados da instalação onde se encontra o TC-1 são:

Corrente nominal primário:

$$I_{np} = \frac{12,5MVA}{\sqrt{3} \times 138KV} = 52,29A$$

Tensão nominal do primário – 138kV

Corrente de curto-circuito primário:

$$I_{cc} = \frac{7,17GMVA}{\sqrt{3} \times 138kV} = 30kA$$

Corrente dinâmica de curto-circuito:

$$I_s = 2,5 \times I_{cc} = 2,55 \times 30kA = 76,5kA$$

Considera-se que o secundário está conectado um medidor digital para faturamento, que apresenta os seguintes dados, conforme a tabela 13:

Tabela 13 - Dados do catálogo do medidor digital

DADOS DE CATÁLOGO MEDIDOR DIGITAL KRON	
ENTRADA DE TENSÃO	ENTRADA DE CORRENTE (MEDIÇÃO)
Faixa de trabalho: 20 a 500Vc.a. (F-F)	Nominal (In): 1Ac.a. ou 5Ac.a.
Sobrecarga: 1,5xVmáx(1s)	Indicação mínima: 20mA
Faixa recomendada de utilização: 5 a 120%	Sobrecarga:
Consumo interno: menor que 0,5VA	Contínua: 1,5 x In (padrão) 2 x In (opcional)
	Curta duração(1s): 20 x In
	Consumo interno: menor que 0,5VA

[26]

Os condutores utilizados na interligação do TC ao medidor têm seção de 2,5mm² e comprimento de 100m.

Especificando a classe de exatidão:

O TC-1 será usado para o serviço de medição, e conforme foi mostrado anteriormente, sua classe de exatidão escolhida será 0,3.

Especificando a corrente primária nominal e relação nominal:

Pela corrente nominal do circuito:

$$I_{npTC-1} = 75A$$

$$I_{nsTC-1} = 5A$$

$$RTC_1 = 15:1$$

Cálculo da carga nominal do TC:

Tem-se, os condutores utilizados possuem as seguintes características

$$R_{c1} = 8,8882\Omega/\text{km}.$$

A impedância equivalente aos 100m de cabos será:

$$Z_{c1} = (8,8882 + j0,1345) \times 100/1000$$

O módulo de $Z_{c1} = 0,8889\Omega$.

Cálculo de perda aproximada nos cabos:

$$S_{c1} = Z_{c1} \times I_{nsc1}^2 = 0,8889 \times 5^2 = 22,22VA$$

Logo, a carga total nominal ligada ao TC será de:

$$S_{t1} = S_{c1} + S_m = 22,22 + 0,5 = 22,72VA$$

Sendo: S_m a carga (VA) do medidor conectada ao secundário do TC.

De acordo com a tabela com a tabela 9, a menor carga normalizada acima desse valor é de 25MVA.

Desta forma, a nomenclatura ficará: 0,3C25.

O TC escolhido será: ARTECHE CH-145.

O mesmo possui as características abaixo:

Tabela 14 - Dados do catálogo TC Artech CH-145

Transformadores de corrente Modelo CH								
Modelo	Tensão máxima de serviço (KV)	Tensões de ensaio		Linha de fuga padrão (mm)	Dimensões			Peso (kg)
		Frequência Industrial (KV)	Impulso (KVp)		A (mm)	T (mm)	H (mm)	
CH - 36	36	70	170	900	330	1450	1.765	330
CH - 52	52	90	245	1.300	330	1450	1.765	330
CH - 72	72,5	140	325	1.825	330	1620	2.005	370
CH - 100	100	185	450	2.500	330	1690	2.005	380
CH - 123	123	230	550	3.075	330	2090	2.405	410
CH - 145	145	275	650	3.525	330	2250	2565	430

[26]

A especificação sumária do TC-1 é representada pela tabela 15.

Tabela 15 - Especificação sumária do TC-1

Especificação do TC-1	
Marca/Modelo	Arteche/ CH-145
Destinação	Medição p/ faturamento
Nomenclatura	0,3C25
Correntes nominais e relação nominal	75A/5A-15:1
Nível de isolamento	145kV
Frequência nominal	50/60Hz
Carga nominal	25VA
Classe de exatidão	0,3
Fator térmico nominal	-
Corrente térmica nominal	≤48kV
Corrente dinâmica	≤120kA

3.2.5.4. Cálculos para a especificação do TC-2 de proteção

Dados da instalação onde se encontra o TC-2 são:

Corrente primária:

$$I_{np} = \frac{12,5MVA}{\sqrt{3} \times 138KV} = 52,29A$$

Tensão nominal primário: $V_{np} = 138KV$

Corrente de curto-circuito primário:

$$I_{cc} = \frac{7,17GMVA}{\sqrt{3} \times 138KV} = 30KA$$

Corrente dinâmica de curto-circuito primário:

$$I_s = 2,5 \times I_{cc} = 2,5 \times 30KA = 76,5KA$$

Ao seu secundário está conectado um relé digital de carga estima em

$S_R = 0,5VA$.

Os condutores utilizados na interligação do TC ao relé têm seção de $4,0mm^2$ e comprimento de 100m.

Especificando a classe de exatidão:

O TC será usado para proteção, sua classe de exatidão será 10,00.

Especificando a corrente primária nominal e relação nominal:

Pela corrente nominal do circuito:

$$In_{ptc2} = 75A$$

$$In_{stc2} = 5A$$

$$RTC = 15:1$$

Pelo fator de sobrecorrente:

$$F_{sc} = 20A$$

Logo, sabemos que o TC atua corretamente para uma corrente de curto-circuito no primário de até:

$$I'_{cc} = F_{sc} \times In_{ptc2}$$

$$I'_{cc} = 20 \times 75 = 1500A$$

Porém temos que:

$$I'_{kp} = 30kA$$

Precisamos então escolher uma nova corrente primária nominal para o

TC-2:

$$In_{ptc2} \geq \frac{I_{cc}}{F_{sc}} = \frac{30000}{20} = 1500A$$

$$In_{stc2} = 5A$$

$$RTC = 300:1$$

Cálculo da carga ligada ao secundário do TC:

Tem-se que, os condutores utilizados possuem as seguintes características $R_{c2} = 5,5518\Omega/km$; $X_2 = 0,1279\Omega/km$.

A impedância equivalente aos 100m de cabos será:

$$Z_{c2} = (5,5518 + j0,1279) \times 100/1000$$

O módulo de Z_{c2} será de $0,5553\Omega$.

Cálculo da perda aproximada nos cabos:

$$S_{c2} = Z_{c2} \times I_{ntc2}^2 = 0,5553 \times 5^2 = 13,88VA$$

Logo, a carga total ligada ao TC será aproximadamente:

$$S_{t2} = S_{c2} + S_R = 13,88 + 0,5 = 14,38VA$$

De acordo com a tabela 9, a menor carga normalizada acima desse valor é 25VA.

$$z_2 = \frac{25VA}{5A^2} = 1\Omega$$

Sendo z_2 – impedância no secundário.

Sendo a tensão no secundário (V_s) calculada pela equação a seguir:

$$V_s = f_{sc} \times I_{nc} \times z_2$$

$$V_s = 20 \times 5 \times 1 = 100V$$

Assim de acordo com a tabela 11, a tensão secundária será: 100V.

Escolhendo o TC de baixa impedância, tem-se a seguinte nomenclatura para o mesmo: 10B100.

O TC escolhido será: ARTECHE CH-145, o mesmo escolhido anteriormente, sendo suas características já apresentadas, tendo sua especificação de acordo com a tabela 16.

Tabela 16 - Especificação sumária do TC-2

Especificação Sumária do TC-2	
Marca/Modelo	Arteche/ CH-145
Destinação	Proteção
Nomenclatura	10B100
Correntes nominais e relação nominal	1500A/5A - 300:1
Nível de isolamento	145KV
Frequência nominal	50/60Hz
Carga nominal	25VA
Classe de exatidão	10
Fator térmico nominal	20
Corrente térmica nominal	≤ 48KA
Corrente dinâmica	≤ 120KA

3.2.6. TRANSFORMADOR DE POTENCIAL

3.2.6.1. Características elétricas

a) Tensão primária nominal e relação nominal

Estabelecida de acordo com a tensão do circuito no qual será instalado. A tensão secundária é padronizada em 115V, para TPs do grupo 1 e $115/\sqrt{3}$ V para TPs dos grupos 2 e 3 [6].

b) Nível de isolamento

Define a especificação do equipamento quanto à sua isolação em termos de tensão suportável, dependendo da máxima tensão de linha do circuito. Deve-se ainda levar em conta os valores de TAFI e NBI [6].

c) Frequência nominal

As frequências nominais são 50/60Hz [6].

d) Carga nominal

Carga na qual se baseiam os requisitos de exatidão, sendo determinada a partir da soma das potências absorvidas por cada um dos instrumentos conectados ao seu secundário. As cargas nominais estão apresentadas na tabela 17, abaixo [6].

Tabela 17 - Características elétricas dos TPs

Cargas Nominais			Características a 60Hz e 120V		
Designação ABNT	Potência (VA)	Fator de Potência	Resistência (Ω)	Indutância (mH)	Impedância (Ω)
P 12,5	12,5	0,1	115,2	3402	1152
P 25	25	0,7	403,2	1092	576
P 75	75	0,85	163,2	268	192
P 200	200	0,85	61,2	101	72
P 400	400	0,85	30,6	50	36

[23]

e) Classe de exatidão

Valor máximo do erro que poderá ser usado pelo TP aos instrumentos a ele conectados. São enquadrados em uma das seguintes classes de exatidão: 0,1; 0,3; 0,6 e 1,2% [6].

A tabela 18 apresenta as classes de exatidão em função de sua aplicação.

Tabela 18 - Classe de exatidão dos TPs

Classe de Exatidão	Aplicação
0,1	Medidores de laboratório ou outros que requeiram uma elevada precisão de resultado
0,3	Medidores de energia elétrica para fins de faturamento
0,6	Aparelhos de proteção e medidores de energia elétrica sem fins de faturamento.
1,2	Voltímetros indicadores e registradores gráficos.

[23]

f) Potência térmica nominal

Maior potência aparente que um TP pode fornecer em regime permanente sob tensão e frequência nominais, exceder os limites de temperatura permitidos pela sua

classe de isolamento. A potência térmica dos transformadores de potencial padronizados pela ABNT é apresentada na 19 [6].

Tabela 19 - Potência térmica dos TPs

Designação	Potência Térmica Nominal	
	Grupos 1 e 2 (VA)	Grupo 3 (VA)
P 12,5	18	50
P 25	36	100
P 75	110	300
P 200	295	800
P 400	590	1600

[23]

g) Grupos de ligação

Os TPs do grupo 1 são projetados para ligação entre fases. Os TPs do grupo 2 são projetados para ligação entre fase e neutro de sistemas diretamente aterrados. Já os TPs do grupo 3 são projetados para ligação entre fase e neutro de sistemas onde não se garanta a eficácia do aterramento [6].

3.2.6.2. Especificação sumária

- Tensão primária nominal e relação nominal;
- Nível de isolamento;
- Frequência nominal;
- Carga nominal;
- Classe de exatidão;
- Potência térmica nominal;
- Grupo de ligação [6].

3.2.6.3. Cálculos para a especificação do TPC-1

Os dados da instalação onde se encontra o TPC-1 são:

Tensão nominal: 138kV.

Ao seu secundário está conectado o medidor para faturamento, e como foi mencionado no dimensionamento de TC, sua carga equivale a $S_m = 0,5VA$.

Temos ainda de considerar o efeito de cabos de ligação, logo, utilizando a tabela 14 e um fator de segurança, especificamos para uma carga nominal de 25VA.

De acordo com a tabela 19 sua potência térmica nominal será 36VA.

Ele será do grupo 1 com tensão primária de 138KV e tensão secundária de 115V.

Para medição de faturamento deverá ter classe de 0,3.

O TPC escolhido será: Artech DDB 145, de acordo com a tabela 20 abaixo.

Tabela 20 - Dados do catálogo TPC Artech DDB-145

Transformadores de potencial capacitivo										
Modelo	Tensão máxima de serviço (KV)	Tensões de ensaio			Capacitância padrão (pF)	Máxima Capacitância (pF)	Linha de fuga padrão (mm)	Dimensões		Pesc (kg)
		Frequência Industrial (KV)	Impulso (KVp)	Manobra (KVp)				A (mm)	H (mm)	
DDB - 72	72,5	140	325	-	10.300	25.500	1.825	450	1.510	245
DDB - 100	100	185	450	-	5.700	14.300	2.500	450	1.600	255
DDB - 123	123	230	550	-	5.600	14.000	3.075	450	1.830	300
DDDB - 145	145	275	650	-	3.900	19.500	3.625	450	1.920	310
DDDB - 170	170	325	750	-	7.500	16.500	4.250	450	2.065	330

[26]

Os transformadores TPC-2 terá especificação idêntica ao TPC-1, exceto pela classe de exatidão que será 0,6, conforme a tabela 21.

Tabela 21 - Especificação sumária TPC-1 e TPC-2

Especificação Sumária do TPC-1 e TPC-2	
Marca/Modelo	Arteche/ DDB-145
Nomenclatura	0,3P25 para TPC-1 0,6P25 para TPC-2
Tensões nominais	138000/115
Nível de isolamento	145KV
Frequência nominal	50/60Hz
Carga nominal	25VA
Classe de exatidão	0,3 para TPC-1 0,6 para TPC-2
Potência Térmica nominal	36VA
Grupo	1

3.2.7. Resistor de Aterramento

3.2.7.1. Características elétricas

a) Tensão nominal

É a tensão de neutro da instalação a qual está aplicado o resistor de aterramento [6].

b) Tempo de operação

Os tempos de operação depende do material que feito as resistências ôhmicas e do valor da falta monofásica. Pela norma, os tempos são padronizados, são eles: 10s, 30s, 60s, 10min e regime contínuo. Levando em conta a natureza do material resistor, tem-se:

- Ferro fundido: 5000amperes em 10s;
- Aço inoxidável: 2000amperes em 10s;
- Níquel-cromo: 2000amperes em 10s [6].

OBS: O mais comum de ocorrer é o tempo de 10s.

c) Temperatura

O valor limite de temperatura depende do tipo de material que o resistor de aterramento é constituído.

c.1) Ferro fundido

- regime contínuo: 385°C;
- até 10min: 460°C.

c.2) Aço inoxidável

- regime contínuo: 610°C;
- até 10min: 610°C.

3.2.7.2. Especificação Sumária

- Tensão nominal (fase-neutro);
- Tempo de duração;
- Material resistor;
- Limite de temperatura admitido [6].

3.2.7.3. Cálculo para a especificação do resistor de aterramento

Dados referentes ao local, onde se encontra o resistor de aterramento rápido:

Tensão nominal (fase-neutro)

$$V_{fn} = \frac{13,8kV}{\sqrt{3}} = 7967,4337V$$

Dados da subestação de energia:

- Tensão nominal primária 138kV;
- Tensão nominal secundária 13,8kV.

Cálculo da impedância de entrada referida ao secundário

$$Z_{s'}(\%) = \frac{S_n}{S_{cc}} \times 100$$

$$\frac{12,5MVA}{7,17GVA} \times 100 = 0,174\%$$

Cálculo da corrente nominal no secundário do transformador de 12,5MVA

$$I_{n2} = \frac{S_n}{\sqrt{3} \times V_{l2}}$$

$$In2 = \frac{12,5MVA}{\sqrt{3} \times 13,8kV}$$

$$In2 = 522,96A$$

Calculando a corrente de curto-circuito no secundário do transformador

$$Icc2 = \frac{In2}{Zt(\%) + Zs'(\%)} \times 100$$

$$Icc = \frac{522,96}{8,57 + 0,74} \times 100 = 5,61kA$$

Considerando a corrente de curto-circuito monofásica 20% da corrente de falta trifásica (5,61kA), tem-se:

$$Icc\emptyset = 0,2 \times 5,61kA$$

$$Icc\emptyset = 1,122kA$$

Valor em Ohm do resistor de aterramento

$$R = \frac{Vfn}{Icc\emptyset}$$

$$R = \frac{7967,4337V}{1122} = 7,101\Omega$$

c) Tempo de operação

Tendo o valor da corrente de falta monopolar de 1,122kA. O tempo de operação do equipamento depende do material que o mesmo é constituído.

Resistor de aço inoxidável: 2000A em 10s, ou seja, para uma corrente de 2000A o tempo de operação é de 10s.

d) Temperatura

A temperatura limite suportável pelo resistor também depende do material em que ele fabricado.

d.1) Aço inoxidável

➤ Regime contínuo: 610 graus Celsius;

- Até 10min: 610 graus Celsius.

3.2.8. BARRAMENTO

3.2.8.1. Especificação sumária

De forma geral, na especificação de um barramento deve-se explicitar os seguintes parâmetros:

- Material;
- Tipo;
- Seção;
- Comprimento máximo [6].

3.2.8.2. Cálculos para especificação do barramento principal

Deve ser especificado para suportar a seguinte solicitação:

Corrente nominal no primário:

$$I_{np} = \frac{12,5MVA}{\sqrt{3} \times 138kV} = 52,29A$$

Corrente de curto-circuito primário:

$$I_{cc} = \frac{7,17GMVA}{\sqrt{3} \times 138kV} = 30kA$$

Corrente dinâmica de curto-circuito primário:

$$I_s = 2,5 \times I_{cc} = 2,5 \times 30kA = 76,5kA$$

Aplicando o critério de condução de corrente, será utilizado a tabela 22, que apresenta as características dos barramentos rígidos:

Tabela 22 - Características dos barramentos rígidos

CARGAS ADMISSÍVEIS PARA BARRAS RETANGULARES DE COBRE														
ALTUR A X ESPES	SEÇÃO	PESO	CARGA CONTÍNUA (A)								VALORES ESTÁTICOS PARA BARRA			
			CORRENTE ALTERNADA 40 A 60HZ											
			PINTADAS				NÚ							
			NÚMEROS DE BARRAS				NÚMEROS DE BARRAS							
			1	2	3	4	1	2	3	4	X-----X		Y-----Y	
mm	mm ²	kg/m	I	II	III	IIII	I	II	III	IIII	Wx	Jx	Wy	Jy
12x2	24	0,21	125	225	-	-	110	200	-	-	cm ³	cm ⁴	cm ³	cm ⁴
15x2	30	0,27	155	270	-	-	140	240	-	-	0,048	0,0288	0,008	0,0008
15x3	45	0,4	185	330	-	-	170	300	-	-	0,075	0,0562	0,01	0,001
20x2	40	0,36	205	350	-	-	185	315	-	-	0,112	0,084	0,022	0,003
20x3	60	0,53	245	425	-	-	220	380	-	-	0,133	0,133	0,0133	0,0013
20x5	100	0,89	325	550	-	-	290	495	-	-	0,2	0,2	0,03	0,0045
25x3	75	0,67	300	510	-	-	270	460	-	-	0,333	0,333	0,083	0,0208
25x5	125	1,11	385	670	-	-	350	600	-	-	0,312	0,39	0,037	0,005
30x3	90	0,8	350	600	-	-	315	540	-	-	0,521	0,651	0,104	0,026
30x5	150	1,34	450	780	-	-	400	700	-	-	0,45	0,675	0,045	0,007
40x3	120	1,07	460	780	-	-	420	710	-	-	0,75	1,125	0,125	0,031
40x5	200	1,78	600	1000	-	-	520	900	-	-	0,8	1,6	0,06	0,009
40x10	400	3,56	835	1500	2060	2800	750	1350	1850	2500	1,333	2,66	0,166	0,042
50x5	250	2,23	700	1200	1750	2310	630	1100	1550	2100	2,666	5,333	0,665	0,333
50x10	500	4,45	1025	1800	2450	3330	920	1620	2200	3000	2,08	5,2	0,208	0,052
60x5	300	2,67	825	1400	1980	2650	750	1300	1800	2400	4,16	10,4	0,833	0,416
60x10	600	5,34	1200	2100	2800	3800	1100	1860	2500	3400	3	9	0,25	0,063
80x5	400	3,56	1060	1800	2450	3300	950	1650	2200	2900	6	18	1	0,5
80x10	800	7,12	1540	2600	3450	4600	1400	2300	3100	4200	5,33	21,33	0,33	0,083
100x5	500	4,45	1310	2200	2950	3800	1200	2000	2600	3400	10,66	42,6	1,333	0,666

[24]

Será escolhido um barramento retangular de cobre, sem pintura, composto de uma barra. Assim para a corrente nominal de 52,29A deverá ser adotado um barramento de $S_1 = 24\text{mm}^2$, com relação de largura x espessura de 12 x 2 mm.

Para a aplicação do segundo critério, da suportabilidade aos efeitos térmicos de uma corrente de curto-circuito, calculamos a mínima seção admissível para a barra que suporte a corrente de curto da instalação até que a proteção do sistema atue. Para condutores rígidos de cobre a relação é a seguinte:

$$S_1 = \frac{7xI_{cc}x\sqrt{t}}{1000}$$

Considerando um tempo de 0,04s, tempo da atuação da proteção.

$$S_1 = \frac{7x30000x\sqrt{t}}{1000} = 42\text{mm}^2$$

Portanto o barramento adotado através do primeiro critério não suporta os efeitos térmicos da corrente de curto-circuito da instalação. O barramento deverá ser redimensionado e será adotada uma seção de 60mm² com relação de largura x comprimento de 20 x 3 mm².

O terceiro critério é a verificação do efeito dinâmico da corrente de curto-circuito. Através desse critério, é calculado o comprimento máximo da barra, através da seguinte equação:

$$l_{m\acute{a}x} = \sqrt{\frac{1,17 \times \delta l_{i m x a x} W}{I_s^2 \times 0,001}}$$

Onde:

$\delta l_{i m}$: Tensão mínima de ruptura, sendo adotado o valor de 1500kgf/cm².

W: Conjugado resistente de 0,125cm³ retirado da tabela 24.

I_s: Corrente dinâmica de curto-circuito de 76,5kA.

OBS: onde a é o afastamento das barras de 200cm para o nível de 138kV.

Tabela 23 - Valores básicos de afastamento e alturas mínimas

ITEM	DISTÂNCIA (m)	
	69KV	138KV
Afastamento mínimo entre fases no barramento:		
Barramento rígido	1,4	2
Barramento fléxivel	1,5	2,5
Afastamento mínimo entre fase e terra, no barramento:		
Barramento rígido	0,75	1,5
Barramento fléxivel	0,85	1,8
Altura mínima em relação ao solo das partes energizadas, desprotegidas e sob tensão	3	4,2
Altura mínima em relação ao solo das partes em tensão reduzida e zero, tais como bases de isoladores, porcelanas, buchas, etc.	2,5	2,5

[24]

Aplicando esses dados teremos:

$$l_{m\acute{a}x} = \sqrt{\frac{1,17 \times 1500 \times 200 \times 0,0133}{76,5^2 \times 0,001}} = 28,2435 \text{ cm}$$

Tem-se a seguinte especificação:

Tabela 24 - Especificação sumária do barramento

Especificação Sumária Barramento Principal	
Material	Cobre
Tipo	Retangular/sem pintura/1barra por fase
Seção	60(milímetros quadrados)
Comprimento máximo	28,2435cm

4. CONCLUSÃO

O estudo do assunto permitiu entender que para se ter a construção de uma subestação, como no caso da pesquisa, que é de 138kV para 13,8kV, para alimentação de uma indústria é preciso ter uma grande carga instalada. As concessionárias têm um valor de carga dotado como referência, ou seja, a partir deste valor é necessário a construção de uma subestação, tal prática normativa adotada pelas distribuidoras de energia é supervisionada pela ANEEL.

A pesquisa possibilitou uma análise de como um conjunto de equipamentos de proteção, transformação, medição e controle, devem ser dimensionados. O trabalho realizado foi uma forma de aprofundar em um tema mais prático, que faz parte da Engenharia Elétrica.

A especificação correta dos equipamentos contribui para maior confiabilidade do projeto, levando ao cliente uma maior segurança. Portanto, o objetivo de um bom dimensionamento é garantir menores custos, segurança, continuidade e confiabilidade do sistema.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] REIS, Lineu Bilibio dos. Geração de Energia Elétrica. 2ed. São Paulo: Manole, 2003.

[2] SUBESTAÇÕES. Disponível em: <pt.wikipedia.org/wiki/subestação>. Acesso em 10 out. 2018.

[3] FRONTIN, Sérgio. et. al. Prospecção e Hierarquização de Inovações Tecnológicas. 1ºed. Brasília: Goya Editora LTDA, 2013.

[4]] CAMPOS, Vinícius Alves Araújo, A Importância e os Impactos da Especificação Correta de Materiais. Techoje, Belo Horizonte.

[5] TRABALHO DE SUBESTAÇÕES. Disponível em: <wwwl.coe.ufrj.br/~fabriciomtb/Trabalho_subestações_fim.docx>. Acesso em 10 out. 2018.

[6] FILHO, João Mamêde. Manual de Equipamentos Elétricos. 3ºed. Fortaleza: LTC, 2005.

[7] CHAVES SECCIONADORAS – O QUE SÃO? QUAIS TIPOS? Disponível em: <www.linkedin.com/pulse/chave-seccionadoras>. Acesso em 10 out. 2018.

[8] SUBESTAÇÃO. Disponível em: <www.ebah.com.br/content/subestação>. Acesso em 20 out. 2018.

[9] SCHAK. Disponível em: <schak.com.br>. Acesso em 20 out. 2018.

[10] SENNER. Disponível em: <www.senner.com.br>. Acesso em 20 de out. 2018.

[11] COMO FUNCIONA UM RELÉ? O QUE É UM RELÉ?. Disponível em: <www.mundoelétrica.com.br>. Acesso em 20 de out. 2018.

[12] FILHO, J. M. Manual de Equipamentos Elétricos. 2ºed. Fortaleza: LTC, 1994.

[13] ENGPONTAL. Disponível em: <www.engpontal.com.br>. Acesso em 22 out. 2018.

- [14] DISJUNTOR A ÓLEO. Disponível em: <www.universoeletric.wordpress.com>. Acesso em 1 nov. 2018.
- [15] TRANSFORMADOR DE CORRENTE. Disponível em: <pt.wikipedia.org/wiki/transformador_de_corrente>. Acesso de 1 nov. 2018.
- [16] TRANSFORMADOR DE POTENCIAL. Disponível em: <pt.wikipedia.org/wiki/transformador_de_corrente>. Acesso em 1 nov. 2018.
- [17] SOUZA, Fabiano. Estudo e Projeto Elétrico Básico de uma Subestação, 2007. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória.
- [18] Cooper Power System – Surge Arrester I235-98, disponível em: <http://www.cooperindustries.com/content/dam/public/powersystems/resources/library/235_SurgeArresterspdf>. Acesso em 14 out. 2018.
- [19] WEG – Seccionadores, disponível em: <<http://www.weg.net>>. Acesso em 20 out. 2018.
- [20] ABB – Buyers Guide Live Tank Circuit Breakers, disponível em: <<http://www.abb.com.br/product/db0003db002618/c12573e7003302adc1256e46005d8bcb.aspx?productLanguage=us&country=BR>>. Acesso em 10 out. 2018.
- [21] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6856: Transformadores de corrente. Rio de Janeiro, 1992.
- [22] SOUZA, JOSÉ NÉMESIO, Transformadores de Corrente
- [23] RESENDE, José Wilson, Apostila Introdução à Proteção de Sistemas Elétricos de Potência. Uberlândia. Universidade Federal de Uberlândia, 2009.
- [24] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6855: Transformadores de potencial indutivo. Rio de Janeiro, 1992.
- [25] CELPE – Fornecimento de Energia Elétrica em Tensão Primária de Distribuição Classes 69KV e 138KV. 6ed. Pernambuco, 2009.
- [26] Artech – Transformadores de Instrumentos Alta Tensão, disponível em:

<http://www.artech.com/artech/html/pdfs/47/2_ARTECHE_CT_trafAT_PT.pdf>.

Acesso em 18 de nov. 2018.

[27] Artech – Transformadores de Potencial Capacitivo, disponível em:

<http://www.artech.com/artech/html/pdfs/47/ARTECHE_CT_trftenMTE_PT.pdf>.

Acesso em 18 de nov. 2018.

[28] KRON Medidores – Multimetro MKM C, disponível em:

<<http://www.kronweb.com.br/br/produtos.php?id=9>>. Acesso em 18 de out. 2018.

