

UNESP
Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá

**PROJETO ELÉTRICO BÁSICO DE UMA SUBESTAÇÃO
INDUSTRIAL TÍPICA NA CLASSE 15kV**

Guaratinguetá
2013

MATHEUS JOUAN RAYMUNDO DA SILVA

PROJETO BÁSICO DE UMA SUBESTAÇÃO INDUSTRIAL TÍPICA NA
CLASSE 15kV

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Rubens Alves Dias

Guaratinguetá
2013

S586p Silva, Matheus Jouan Raymundo da
Projeto elétrico básico de uma subestação industrial típica na classe
15 kV / Matheus Jouan Raymundo da Silva – Guaratinguetá : [s.n], 2013.
102 f : il.
Bibliografia: f. 98-102
Trabalho de Graduação em Engenharia Elétrica – Universidade
Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2013.
Orientador: Prof. Dr. Rubens Alves Dias
1. Subestações elétricas I. Título
CDU 621.311.4

**PROJETO BÁSICO DE UMA SUBESTAÇÃO INDUSTRIAL TÍPICA NA
CLASSE 15kV**


MATHEUS JOUAN RAYMUNDO DA SILVA

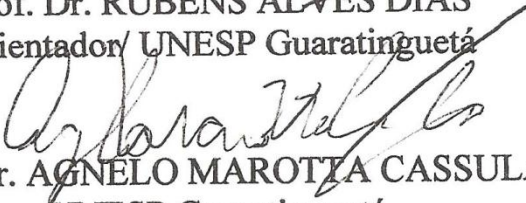
**ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO
COMO PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
GRADUADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO
DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

Prof. Dr. Leonardo Mesquita
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. RUBENS ALVES DIAS
Orientador/ UNESP Guaratinguetá


Prof. Dr. AGNELO MAROTTA CASSULA
UNESP Guaratinguetá


Prof. Dr. José Feliciano Adami
UNESP Guaratinguetá

Dezembro 2013

DADOS CURRICULARES

MATHEUS JOUAN RAYMUNDO DA SILVA

NASCIMENTO	25.04.1986 – LORENA / SP
FILIAÇÃO	Sueli Guimarães Jouan da Silva Carlos Roberto Beto Raymundo da Silva
2008/2013	Curso de Graduação em Engenharia Elétrica na <i>Universidade Estadual Paulista – Campus de Guaratinguetá</i>

de modo especial, dedico este trabalho de conclusão da graduação aos meus pais Carlos e Sueli e meu irmão Raphael, que sempre incentivaram e ajudaram na minha vida acadêmica, meus amigos e colegas de faculdade que sempre me deram força durante a graduação para que fosse possível a concretização deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a minha família, meus pais Carlos e Sueli e meu irmão Raphael, pelo apoio e incentivo que eles me deram nesse percurso acadêmico e por toda vida.

Agradeço ao meu professor orientador, *Prof. Dr. Rubens Alves Dias* por me incentivar e de me dar à oportunidade de fazer esse trabalho.

Agradeço aos meus colegas da UNESP do Campus de Sorocaba com quem estudei, compartilhei e convivi momentos durante um ano e meio em que cursei Engenharia Ambiental.

Agradeço aos meus colegas da UNESP do Campus de Guaratinguetá em que passei cinco anos estudando e fazendo grandes amizades que espero levar para vida toda.

Agradeço a todos os professores e funcionários da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, em especial ao departamento de Engenharia Elétrica.

Agradeço a empresa que trabalhei MVA ENGENHARIA, que me deu oportunidade de aprender e por em prática os conhecimentos absorvidos da vida acadêmica.

Finalmente agradeço a Deus, por ter me guiado e me dado força por todo esse tempo, para enfrentar e superar os problemas que aconteceram durante este percurso da minha vida.

“O sucesso nasce do querer, da determinação e persistência em se chegar a um objetivo. Mesmo não atingindo o alvo, quem busca e vence obstáculos, no mínimo fará coisas admiráveis”.

Jose de Alencar

SILVA, M. J. **Projeto elétrico básico de uma subestação industrial típica na classe 15 kV.** 2013. 102p. Trabalho de graduação. (Graduação em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2013.

RESUMO

As subestações de energia elétrica tem a finalidade de transmitir, distribuir e alterar as características da energia elétrica das redes de transmissão das concessionárias até os consumidores com um alto grau de confiabilidade e continuidade. Para isso é necessário realizar uma coleta de dados proveniente da concessionária local onde será instalada a subestação para elaborar um bom projeto elétrico. Este trabalho tem como objetivo reunir todos os conteúdos referentes a projetos elétricos de subestação que se encontram dispersos na literatura, de forma a organizar e elaborar um roteiro básico que apresente uma metodologia de dimensionar os equipamentos elétricos pertencentes de uma subestação industrial abrigada na classe 15 kV. Além de elaborar um roteiro básico, este trabalho ajuda a especificar equipamentos elétricos instalados na subestação, trazendo informações e comparações para saber e determinar o tipo de equipamento a ser utilizado, de uma maneira correta e coerente com as normas nacionais e internacionais. Por fim, após determinado, obtidos e especificados todos os equipamentos pertencentes a uma subestação industrial abrigada, o trabalho cita de uma forma global como calcular o dimensionamento do arranjo físico da subestação, determinando todas as dimensões mínimas e exigidas de cada cubículo.

PALAVRAS-CHAVE: subestação, equipamentos elétricos, projeto básico.

SILVA, M. J. **Basic electrical project of a typical substation industrial 15 kV**. 2013. 102p. Graduate Work (Graduation in Electrical Engineering) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2013.

ABSTRACT

The electrical substations have the goal to transmit, distribute and change the characteristics of electrical energy transmission networks of dealers to the end user with a high rate of reliability and continuously. For this it's necessary to accomplish a gathering of datas from the local dealers where will be installed the substation to make a good electric project. This work has the objective to gather all the contents relatives to electric project of substation that are scattered in the literature, in order to organize and develop a basic guide that presents a methodology to dimension electrical equipments that belong to an industrial substation at 15 kV. In addition to elaborate a basic guide, this work aids to specify electrical equipments installed in the substation, bringing information and comparisons to know and determinate the kind of equipments that will be used, in a correct and coherent way with the national and international rules. Ultimately, after determined, got and specified all the equipments that belongs to an industrial substation, the work mention in global manner how to calculate the dimension of substation physical arrangement, determining all the least and required dimensions of each cubicle.

KEYWORDS: substation, electrics equipments, basic project.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Relatório estatístico de acidentes do setor elétrico brasileiro.	25
Figura 2.2 – Área de Trabalho do Ecodial Advance Calculation.....	27
Figura 2.3 – Área de Trabalho do DocWin.	28
Figura 2.4 – Área de Trabalho do Simaris	28
Figura 2.5 – Área de Trabalho do Id-Spec Large.....	29
Figura 3.1 – Pára-Raio do tipo óxido de zinco.....	36
Figura 3.2 – Mufla.....	37
Figura 3.3 – Componentes de um cabo unipolar de média tensão.....	37
Figura 3.4 – Bucha de passagem do tipo interior/exterior classe 15 kV.....	38
Figura 3.5 – Isolador do tipo pedestal 15 kV.....	39
Figura 3.6 – Tipos de transformadores de correntes.....	41
Figura 3.7 – Transformador de potencial, classe 15 kV.....	42
Figura 3.8 – Chave seccionadora simples tripolar.....	44
Figura 3.9 – Curva típica de fusível, catálogo WEG.....	46
Figura 3.10 – Chave seccionadora acoplado com fusível tripolar.....	46
Figura 3.11 – Disjuntor tripolar á vácuo classe 15 kV.....	49
Figura 3.12 – Relé de proteção multifunção digital.....	50
Figura 3.13 – Transformador a seco, classe 15 kV.....	51
Figura 3.14 – Busway.....	55
Figura 3.15 – Disjuntores de baixa tensão, da esquerda para direita: disjuntores modulares, disjuntor do tipo caixa moldada e disjuntor do tipo aberto.	56
Figura 3.16 – Triângulo de potência.....	59
Figura 3.17 – Diagrama unifilar do cubículo de entrada da subestação.....	63
Figura 3.18 – Diagrama unifilar do cubículo de medição da subestação.....	64
Figura 3.19 – Diagrama unifilar do cubículo de proteção da subestação.....	65
Figura 3.20 – Diagrama unifilar do cubículo de transformação da subestação.....	66
Figura 4.1 – Seção mínima dos condutores.....	80
Figura 4.2 – Fator de temperatura.....	81
Figura 4.3 – Fator de agrupamento.....	82
Figura 4.4 – Temperatura característica dos condutores.....	83

Figura 4.5 – Diagrama unifilar geral da subestação	87
Figura 4.6– Arranjo físico do cubículo de transformação	90
Figura 4.7 – Arranjo físico do cubículo de proteção	91
Figura 4.8 – Arranjo físico do cubículo de medição	93
Figura 4.9 – Arranjo físico do cubículo de entrada	94
Figura 4.10 – Arranjo físico da subestação	95
Figura 4.11 – Arranjo físico da subestação vista lateral.....	96

LISTA DE QUADROS

Quadro 3.1 – Comparativo entre fusíveis limitadores e disjuntores de potência	48
Quadro 3.2 – Comparativo entre os tipos dos disjuntores.....	49
Quadro 3.3 – Classificação construtiva dos quadros de baixa tensão	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Valores das características elétricas dos pára-raios	35
Tabela 3.2 – Dimensão de barramento	40
Tabela 3.3 – Distância mínima entre os barramentos.....	40
Tabela 3.4 – Valores das características elétricas da chave seccionadora trioplar classe 15 kV	45
Tabela 3.5 – Características elétricas de barramentos blindados de cobre.....	55
Tabela 4.1 – Lista de cargas instaladas no QGBT.....	69
Tabela 4.2 – Folha de dados das muflas	70
Tabela 4.3 – Folha de dados dos pára-raios	71
Tabela 4.4 – Folha de dados dos isoladores	71
Tabela 4.5 – Folha de dados dos condutores de média tensão	72
Tabela 4.6 – Folha de dados do transformador de potência	73
Tabela 4.7 – Folha de dados do disjuntor geral de média tensão	75
Tabela 4.8 – Folha de dados dos transformadores de corrente.....	76
Tabela 4.9 – Folha de dados dos transformadores de potencial	76
Tabela 4.10 – Folha de dados da chave seccionadora	78
Tabela 4.11 – Folha de dados do disjuntor geral de baixa tensão	79
Tabela 4.12 – Dimensionamento dos condutores de baixa tensão	84
Tabela 4.13 – Folha de dados dos condutores de baixa tensão	84
Tabela 4.14 – Folha de dados do QGBT	85
Tabela 4.15 – Folha de dados do banco de capacitores.....	86

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AIS	- <i>Air Insulated Switchgear</i>
ABB	- <i>Asea Brown Boveri</i>
ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	- Agência Reguladora de Energia Elétrica
ANSI	- <i>American National Standards Institute</i>
BCP	- Banco de Capacitores
BT	- Baixa Tensão
CCM	- Centro de Controle de Motores
CH	- Chave Seccionadora
DJ	- Disjuntor de baixa tensão
DJG	- Disjuntor geral de média tensão
EPR	- Etileno-Propileno
GIS	- <i>Gas Insulated Switchgear</i>
IEC	- <i>International Electro-technical Commission</i>
MT	- Média Tensão
MTE	- Ministério do Trabalho e Emprego
NB	- Antigas Normas Brasileiras
NBR	- Normas Brasileiras
NR	- Norma Regulamentadora
PPTA	- Conjunto de manobra de controle de baixa tensão com ensaios de tipo parcialmente testados
PVC	- Cloreto de Polivinila
QDL	- Quadro de Distribuição de Luz
QGBT	- Quadro Geral de Baixa Tensão
QGF	- Quadro Geral de Força
SSCP	- Sistema de Supervisão e Controle Predial
SE	- Subestação
SF6	- Hexafluoreto de Enxofre
SiC	- Carbonato de Silício
SPDA	- Sistema de Proteção Contra Descarga Atmosférica
TC	- Transformador de Corrente
TF	- Transformador
TP	- Transformador de Potencial
TTA	- Conjunto de manobra de controle de baixa tensão com ensaios de tipo totalmente testados
XLPE	- Polietileno Reticulado
ZnO	- Óxido de Zinco

LISTA DE SÍMBOLOS

D_d	Dimensão do disjuntor de potência	<i>m</i>
$D_{m\acute{a}x}$	Demanda máxima da instalação	<i>kVA</i>
$D_{m\acute{e}d}$	Demanda média da instalação do período	<i>kVA</i>
D_{pp}	Dimensão do posto de proteção, comprimento ou largura	<i>m</i>
D_{pt}	Dimensão do posto de transformação, comprimento ou largura	<i>m</i>
D_t	Dimensão do transformador	<i>m</i>
F_c	Fator de carga	
F_d	Fator de demanda	
F_p	Fator de potência	
H_{ab}	Afastamento do barramento	<i>mm</i>
H_{ac}	Distância entre chave seccionadora e o dispositivo de proteção	<i>mm</i>
H_c	Altura da chave seccionadora	<i>mm</i>
H_i	Altura do isolador	<i>mm</i>
H_{se}	Altura da subestação	<i>mm</i>
H_t	Altura do transformador	<i>mm</i>
I_c	Corrente da carga	<i>A</i>
I_{cc-sec}	Corrente de curto-circuito no lado secundário do transformador	<i>kA</i>
I_{cs}	Corrente simétrica de curto-circuito	<i>kA</i>
I_{nf}	Corrente nominal do fusível limitador	<i>A</i>
I_{np}	Corrente nominal no primário	<i>A</i>
I_{ns}	Corrente nominal no secundário do transformador	<i>A</i>
L_c	Comprimento do circuito	<i>m</i>
L_p	Largura da porta de acesso	<i>m</i>
P	Potência ativa da carga	<i>kW</i>
P_{inst}	Potência total instalada	<i>kW</i>
Q	Potência reativa da carga	<i>kVAr</i>
Q'	Potência reativa da carga para um fator de potência de 0,92	<i>kVAr</i>
$Q_{corre\c{c}ao}$	Potência reativa da carga do banco de capacitores	<i>kVAr</i>
S	Potência aparente da carga	<i>kVA</i>
S_c	Seção do condutor	<i>mm²</i>
S_n	Potência nominal aparente do transformador	<i>kVA</i>
T_c	Tempo de eliminação de defeito	<i>s</i>
T_i	Temperatura máxima em regime contínuo	<i>°C</i>
T_f	Temperatura máxima de curto-circuito na isolação	<i>°C</i>
V_{ff}	Tensão fase-fase	<i>V</i>
V_{np}	Tensão nominal do sistema	<i>kV</i>
$Z_{\%}$	Impedância percentual do transformador	<i>%</i>
α'	Ângulo entre a potência aparente e a potência ativa para um fator de potência de 0,92	<i>°</i>
ρ	Resistividade do condutor	<i>$\Omega \cdot mm^2/m$</i>
$\Delta V\%$	Queda de tensão máxima admitida	<i>%</i>

SUMÁRIO

1	PROJETO BÁSICO DE UMA SUBESTAÇÃO ABRIGADA DE CLASSE 15 kV	19
1.1	Introdução	19
1.2	Justificativa	19
1.3	Assuntos abordados	20
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1	Evolução da subestação na parte elétrica.....	21
2.2	Evolução da subestação na parte de automação	22
2.3	Aspectos Conceituais Básicos de um Projeto de uma Subestação Industrial Abrigada	22
2.4	Normas Brasileiras e Internacionais para um Projeto de uma Subestação Abrigada	23
2.4.1	ABNT NBR 5410	23
2.4.2	ABNT NBR 14039	24
2.4.3	NR 10	25
2.4.4	IEC 60364	26
2.5	Principais Softwares usados.....	26
3	ASPECTOS CONCEITUAIS DE UMA SUBESTAÇÃO INDUSTRIAL ABRIGADA	30
3.1	Localização da Subestação	30
3.2	Estudo de Carga Alimentada pela Subestação.....	31
3.2.1	Fator de Demanda	31
3.2.2	Fator de Carga	32
3.2.3	Fator de potência.....	32
3.3	Sistemas Integrantes no Projeto de Subestação	33
3.3.1	Sistema de Proteção Contra Descarga Atmosférica e de Aterramento.....	33
3.3.2	Sistema de Supervisão e Controle Predial (SSCP)	34
3.4	Equipamentos e Acessórios de uma Subestação.....	34
3.4.1	Pára-Raios	35
3.4.2	Terminal primário ou Mufla	36
3.4.3	Cabos Elétricos de Média Tensão.....	37

3.4.4	Bucha de Passagem.....	38
3.4.5	Isoladores	39
3.4.6	Barramento primário	40
3.4.7	Transformador de Corrente.....	40
3.4.8	Transformador de Potencial.....	42
3.4.9	Chaves Seccionadoras.....	43
3.4.10	Fusíveis Limitadores de Corrente	45
3.4.11	Disjuntor de Potência de Média Tensão	47
3.4.12	Relés de Proteção	50
3.4.13	Transformador de Potência	51
3.4.14	Cabos Elétricos de Baixa Tensão.....	53
3.4.15	Barramento Blindado	54
3.4.16	Disjuntores de Baixa Tensão	56
3.4.17	Quadro Geral de Baixa Tensão	57
3.4.18	Banco de Capacitores.....	58
3.5	Arranjo Físico Típico de uma Subestação Abrigada	60
3.5.1	Altura da Subestação.....	61
3.5.2	Porta de Entrada da Subestação	61
3.5.3	Área de Circulação.....	62
3.5.4	Cubículo de Entrada.....	62
3.5.5	Cubículo de Medição	63
3.5.6	Cubículo de Proteção	64
3.5.7	Cubículo de Transformação	66
4	PROJETO BÁSICO DE UMA SUBESTAÇÃO ABRIGADA DE MÉDIA TENSÃO.....	68
4.1	Dimensionamento dos equipamentos e acessórios	69
4.1.1	Mufla.....	70
4.1.2	Pára-Raios	70
4.1.3	Isoladores de média tensão	71
4.1.4	Dimensionamento dos condutores de média tensão	71
4.1.5	Barramentos primários.....	72
4.1.6	Dimensionamento do transformador	72

4.1.7	Dimensionamento do disjuntor de potência.....	74
4.1.8	Dimensionamento dos transformadores de corrente.....	75
4.1.9	Dimensionamento dos transformadores de potencial	76
4.1.10	Dimensionamento da chave seccionadora de média tensão	77
4.1.11	Dimensionamento do disjuntor de baixa tensão	78
4.1.12	Dimensionamento do alimentador do QGBT	79
4.1.13	Dimensionamento do QGBT	84
4.1.14	Dimensionamento do banco de capacitores.....	85
4.1.15	Diagrama Unifilar	86
4.2	Dimensionamento físico da subestação	88
4.2.1	Altura da subestação	88
4.2.2	Porta de entrada da subestação	88
4.2.3	Área de circulação.....	89
4.2.4	Cubículo de transformação	89
4.2.5	Cubículo de proteção	90
4.2.6	Cubículo de medição.....	92
4.2.7	Cubículo de entrada	94
4.2.8	Arranjo Final da Subestação	95
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	97

1 PROJETO BÁSICO DE UMA SUBESTAÇÃO ABRIGADA DE CLASSE 15 kV

1.1 Introdução

Um projeto elétrico se divide em duas etapas: projeto básico e projeto executivo.

O projeto elétrico tem a finalidade de apresentar conjuntos de informações e documentos técnicos necessários para definir as características básicas e conceituas de um sistema elétrico para elaboração do projeto executivo. Também serve de base para elaborar uma estimativa de preço da obra.

Já o projeto executivo, nada mais é que a continuação do projeto básico, mas apresentada de uma forma detalhada, em que envolve as fases de suprimento, construção e montagem do sistema elétrico.

As subestações consumidoras são de grande importância para o sistema elétrico. São elas que têm a função de transferir a energia elétrica e adequar suas características para níveis de tensão e corrente ideais para sua utilização. Por isso é importante que o dimensionamento dos equipamentos que compõem um projeto de subestação seja feita de forma correta e coerente conforme as normas nacionais e internacionais, garantindo a qualidade do fornecimento de energia para os consumidores e a segurança dos equipamentos instalados e dos seres vivos, em particular os seres humanos.

1.2 Justificativa

As subestações tem a finalidade de garantir a continuidade de energia elétrica, apresentando um alto grau de confiabilidade no sistema de proteção e garantindo a segurança de operação.

Para elaboração de um bom projeto básico de uma subestação, apresentando uma grande confiabilidade é necessária atenção, pois um projeto inadequado ou mal dimensionado pode acarretar uma falha no fornecimento de energia elétrica, podendo ocasionar significativos prejuízos para uma indústria, por exemplo. Portanto, nota-se a importância de dimensionar e especificar de forma criteriosa os equipamentos pertencentes de uma subestação.

Neste contexto, as informações necessárias para o desenvolvimento de um projeto de uma subestação encontram-se de forma dispersa na literatura, quando não, as mesmas fazem parte do *know-how* de quem executa o projeto. Por isso é de grande interesse um roteiro

básico que apresente passo a passo de uma metodologia de dimensionar e especificar os equipamentos elétricos.

1.3 Assuntos abordados

No segundo capítulo tem-se o panorama geral da evolução da subestação, tanto na parte elétrica como da automação, que ocorreu devido ao avanço tecnológico no século XIX, em que acarretou em vários benefícios para projetos elétricos de subestação. Também são citadas algumas normas nacionais e internacionais que regem um projeto de uma subestação e ainda são abordados alguns softwares comerciais que auxiliam no dimensionamento de equipamentos.

No terceiro capítulo são abordados aspectos conceituais sobre os equipamentos elétricos pertencentes a uma subestação, tais como sua definição, tipo, utilização e seu dimensionamento, apresentando cálculos para determinar e especificar corretamente os equipamentos de acordo com as normas nacionais e internacionais. Igualmente é apresentado como determinar um arranjo físico de uma subestação.

No quarto capítulo é apresentada a aplicação dos conceitos introduzidos no terceiro capítulo, em que demonstra passo a passo o dimensionamento e a especificação dos equipamentos elétricos e a determinação do arranjo físico da subestação.

No quinto capítulo é apresentada uma visão geral do que é necessário conhecer para realizar e elaborar um projeto básico de uma subestação abrigada de classe 15 kV.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Com a evolução da tecnologia no decorrer dos anos, os projetos de subestações sofreram um grande impacto trazendo vários benefícios como segurança, confiabilidade, entre outros, tanto na parte elétrica como na automação.

2.1 Evolução da subestação na parte elétrica

Desde o final do século XIX as construções de subestações vêm evoluindo cada vez mais com o desenvolvimento de novas tecnologias que ampliaram a disponibilidade, a capacidade da energia elétrica e reduziram a manutenção dos equipamentos elétricos.

Nos meados dos anos 60 do século XX com ajuda do avanço da tecnologia foi lançado o primeiro painel isolado a gás (*Gas Insulated Switchgear*). Esta tecnologia teve uma grande importância, pois estes painéis blindados apresentavam uma maior confiabilidade, segurança e estabilidade além de serem menores e mais compactos, ocasionando uma redução de até 70% na área necessária para construção da subestação em relação as subestações convencionais com isolamento a ar (*Air Insulated Switchgear*). Esta redução de área traz grandes vantagens, como a redução de custo na aquisição do terreno implicando diretamente na redução do impacto ambiental (ABB, 2013a).

A inovação dos disjuntores trouxe um grande impacto e avanço tecnológico na subestação. Antigamente os disjuntores instalados eram volumosos e complicados, requerendo um maior controle de supervisão e necessitando de frequentes manutenções. Com a evolução dos disjuntores SF6 obteve-se uma grande confiabilidade no sistema de proteção, juntamente com a redução de manutenções.

Outra evolução importante foi sobre os transformadores de medições de correntes e tensões para os equipamentos secundários, que ocupavam grandes espaços. Atualmente com o avanço da tecnologia da fibra ótica, estes transformadores podem ser substituídos por sensores óticos fornecendo informações sobre tensões e correntes primárias (O SETOR ELÉTRICO, 2013a).

Com o avanço tecnológico em meados do século XX, surgiu à primeira geração dos relés que eram chamados de relés eletromecânicos. Com a crescente evolução da eletrônica e a utilização de microprocessadores, a partir da década de 1980 surgiram os relés digitais, sofrendo uma grande evolução tanto na parte construtiva quanto ao seu funcionamento,

trazendo vários benefícios comparados às gerações anteriores, permitindo uma maior confiabilidade e coordenação do sistema de proteção, um aumento na velocidade de resposta e uma maior precisão devido a maior sensibilidade do equipamento. De acordo com uma importante empresa do setor elétrico:

Os relés digitais de hoje produzidos oferecem grande vantagens se comparado aos relés eletromecânicos, possibilitam coordenação do sistema de proteção e melhor sensibilidade devido os ajustes melhores e mais precisos que essa tecnologia proporciona (O SETOR ELÉTRICO, 2013b).

2.2 Evolução da subestação na parte de automação

O sistema de automação é de grande importância para um projeto de subestação, pois é com a automação que se pode obter, controlar e monitorar os dados das grandezas elétricas existente nos processos envolvendo energia, tais como correntes, tensões, frequências, entre outras grandezas.

Com o avanço da eletrônica foram desenvolvidos vários dispositivos, em que cada fabricante tinha sua própria filosofia de criar sua própria forma de comunicação entre os equipamentos, ou seja, seu próprio protocolo. Com isto a comunicação dos dispositivos ficava cada vez mais complicada.

Para solucionar e padronizar a comunicação entre os equipamentos, independentemente dos fabricantes, em 2004 foi publicada a norma IEC 61850 *Communication Networks and Systems in Substations* que propõe uma arquitetura de comunicação única entre todos os equipamentos, independente da função que o dispositivo exerce na subestação ou de seu fabricante (O SETOR ELÉTRICO, 2013c).

2.3 Aspectos Conceituais Básicos de um Projeto de uma Subestação Industrial Abrigada

Mamede Filho (2011) faz uma breve introdução sobre classificação e tipos de subestação limitada à tensão de 15 kV, citando as normas exigidas para um projeto. Em seguida apresenta os equipamentos instalados em todos os postos ou cubículos e a partir das especificações dos componentes instalados e de acordo com a NBR 14039 se pode ter um dimensionamento físico mínimo de cada cubículo.

Creder (2007) introduz noções básicas de como calcular a provável demanda para consumidores industriais e não indústrias para o dimensionamento do transformador.

Também são citados os dados mínimos indispensáveis para o projeto de uma subestação. Em seguida são apresentadas as informações necessárias para especificação de um equipamento elétrico.

Mamede Filho (2005) apresenta informações relevantes sobre os equipamentos mais utilizados em subestações de média e alta tensão. Primeiramente faz uma breve descrição de cada equipamento, citando suas aplicações e em seguida apresenta suas características técnicas necessárias para dimensionar e especificar os parâmetros elétricos de todos os equipamentos.

Shoaib Khan (2007) introduz considerações relevantes em relação à localização da subestação, levando em conta como exemplo, impactos ambientais, condições do solo, centro de cargas entre outros. Também cita sobre proteções e normas norte americanas e internacionais exigidas em um projeto de subestação.

Lima Filho (2004) apresenta alguns exemplos para construção de diagramas, tais como, diagrama unifilar e diagrama trifilar que é de grande importância para compreensão do projeto em que indica, por exemplo, as potências das cargas instaladas, valores nominais dos disjuntores, valores das correntes de curto-circuito do barramento, seção dos cabos alimentadores, entre outras informações fundamentais para o entendimento do projeto.

2.4 Normas Brasileiras e Internacionais para um Projeto de uma Subestação Abrigada

As principais normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) que abrange um projeto de subestação são as Normas Brasileiras – NBR 5410 (ABNT, 2004) e NBR 14039 (ABNT, 2005) juntamente com a Norma Regulamentadora NR 10 instituída pelo Ministério do Trabalho e Emprego (MTE, 2004). A norma internacional IEC 60364 (IEC, 2006) também é utilizada para um projeto de instalações elétricas.

2.4.1 ABNT NBR 5410

A NBR 5410 exige as condições mínimas que as instalações elétricas de baixa tensão devem satisfazer garantindo o funcionamento adequado da instalação e a segurança de pessoas e animais. A norma aplica-se principalmente às instalações elétricas de edificações, independentemente do seu uso, residencial, comercial, público, de serviços e industriais (CPNSP, 2013).

Esta norma possui a última revisão em 30/09/2004, elaborada no Comitê Brasileiro de Eletricidade (ABNT/CB-03), pela Comissão de Estudo de Instalações Elétricas de Baixa Tensão (CE-03:64.01), com título de ABNT NBR 5410 – *Instalações Elétricas de Baixa Tensão* (ABNT, 2004).

A NBR 5410 foi baseada na norma internacional IEC 60364 – *Electrical Installations of Buildings*. A sua primeira edição surgiu em 1941 e posteriormente veio suas revisões em 1960, 1980, 1990, 1997 e a de 2004 que está em vigor (corrigida em 2008) (ABNT, 2013).

A norma estabelece que para um projeto de instalação elétrica de baixa tensão, a documentação necessária do projeto deve ser constituída no mínimo de plantas, diagramas elétricos, detalhes de montagem, memorial descritivo do sistema juntamente com a especificação dos equipamentos instalados (ABNT, 2004).

Para o projeto de instalações elétricas, o projeto deve considerar o dimensionamento dos circuitos de distribuição e terminais, proteção contra choques elétricos, proteção contra efeitos térmicos, escolha, regulagem e localização dos dispositivos de proteção e dos dispositivos de seccionamento e comando (ABNT, 2004).

2.4.2 ABNT NBR 14039

A NBR 14039 (ABNT, 2005), determina os mínimos requisitos de qualidade e segurança para o projeto e execução de instalações de média tensão, com tensão nominal de 1,0 kV a 36,2 kV.

Esta norma possui a última revisão em 31/05/2005, elaborada no Comitê Brasileiro de Eletricidade (ABNT/CB-03), pela Comissão de Estudo de Instalações Elétricas de Alta e Média Tensão (CE-03:064.11), com título de ABNT NBR 14039 – *Instalações Elétricas de Média Tensão 1 kV a 36,2 kV* (ABNT, 2005.)

A história da NBR 14039 se deu a partir da antiga norma NB 79 – *Execução de Instalações Elétricas de Alta Tensão de 0,6 a 15 kV*, publicada em 1967. Com o avanço tecnológico dos equipamentos e sem nenhuma revisão que permitissem adequar o aparecimento destes equipamentos e a inclusão da atividade de projeto em seu escopo, a NB 79, deixando de ser utilizada e cancelada em 1996. Com a necessidade de se ter uma norma que substituísse a NB 79 em 1998 foi publicada sob o número NBR 14039 intitulada *Instalações Elétricas de Alta Tensão 1 kV a 36,2 kV* (TARGET, 2013).

Posteriormente a publicação de 2003 substituiu a de 1998 e conseqüentemente a publicação que está em vigor é de 2005 que substituiu a publicação de 2003 (ABNT, 2013).

Especificamente no item 9.2 - *Subestação Abrigada*, do capítulo 9 da norma NBR 14039 (ABNT, 2005), tem-se os cuidados e os procedimentos para um projeto elétrico de subestação do tipo abrigada que se deve seguir. Nos itens 9.4 e 9.5 da norma, menciona a classificação por função, sendo subestações de distribuição, subestações de transmissão e subestação de chaveamento.

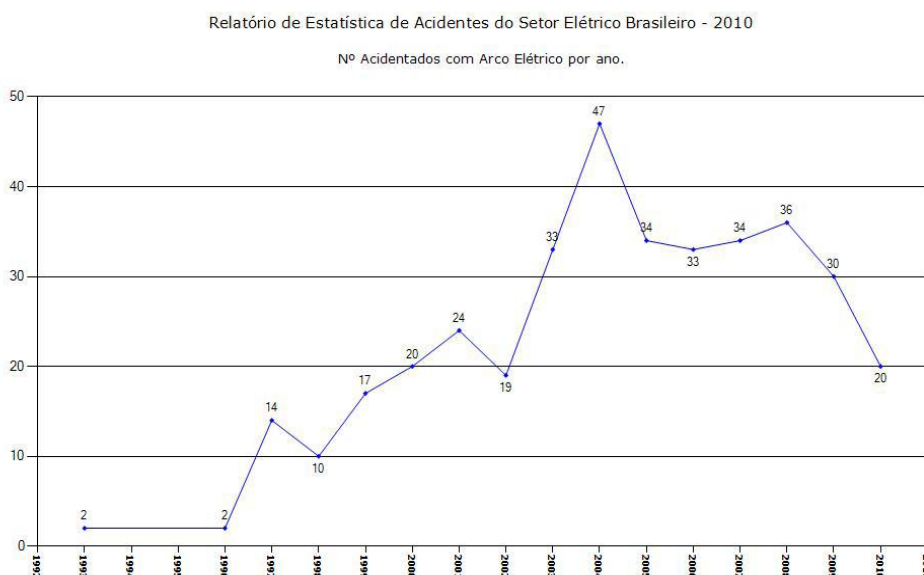
2.4.3 NR 10

No ano de 1983, foi publicada a 1ª edição da NR 10 do Ministério do Trabalho e Emprego, com intuito de passar uma imagem de um país desenvolvido não somente na parte econômica e tecnológica, mas também visando o capital humano. Devido aos índices de acidentes no setor elétrico, como geração e distribuição de energia juntamente com a construção cívica, em 07/12/2004 foi publicada no Diário Oficial o novo texto da Norma Regulamentadora Nº 10, que está em vigor atualmente (DIAGNERG, 2013).

A NR 10 tem como objetivo estabelecer condições e requisitos mínimos que objetivam a implantação de medidas de controle e sistema preventivos, a fim de garantir a segurança e a saúde dos trabalhadores que, direta ou indiretamente, tenham contato com instalações elétricas e serviço com eletricidade (MTE, 2004).

Na Figura 2.1 apresenta um gráfico, em que um ano antes da publicação do novo texto da NR 10 indica um grande número de acidentados com arco elétrico, totalizando 47 acidentes por ano e no ano posterior 2004 houve um declínio de acidentes com arco elétrico (FUNDAÇÃO COGE, 2013).

Figura 2.1 Relatório estatístico de acidentes do setor elétrico brasileiro.



2.4.4 IEC 60364

Na IEC 60364 *Low-Voltage Electrical Installations – Part 6: Verification* estabelece requisitos mínimos para a verificação inicial e periódica de uma instalação elétrica. Na cláusula 61 estabelece os requisitos para verificação da instalação, através de inspeção e testes. Na cláusula 62 prevê os requisitos para a verificação periódica de uma instalação elétrica, verificando se todos os equipamentos constituintes estão em condições satisfatórias (IEC, 2006).

2.5 Principais Softwares usados

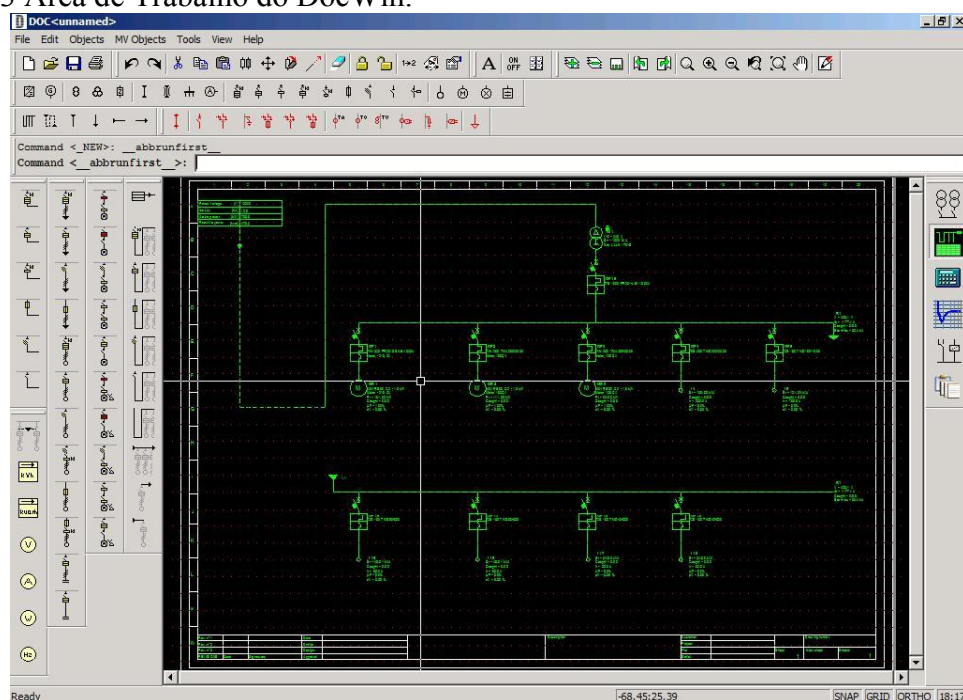
O “Ecodial Advance Calculation” da Schneider Electric (Figura 2.2), software gratuito, foi criado para ajudar nos cálculos e dimensionamento das instalações de distribuição elétrica em baixa tensão em conformidade com as normas e padrões em vigor, com base na norma internacional de instalações elétricas IEC60364 (*Low-Voltage Electrical Installations*) e a norma brasileira NBR5410 (Instalações Elétricas de Baixa Tensão). Esta ferramenta auxilia no dimensionamento: das seções dos cabos alimentadores levando em consideração a queda de tensão e os limites térmicos; o valor do banco de capacitor caso for necessário. Também é possível calcular as correntes de curto-circuito como fazer o estudo de seletividade do sistema em estudo (SCHNEIDER ELECTRIC, 2013).

Figura 2.2 Área de Trabalho do Ecodial Advance Calculation.



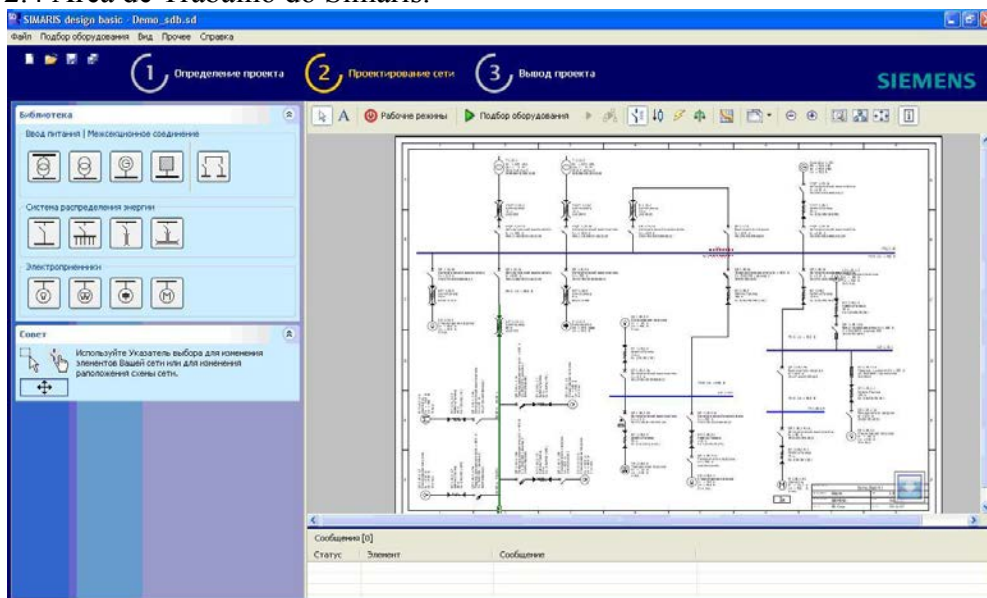
O DocWin (Figura 2.3), fabricado pela ABB, é um software gratuito que segue a mesma filosofia do Ecodial, ou seja, foi criado para auxiliar nos projetos elétricos, como no dimensionamento de transformadores, cabos, disjuntores e entre outros equipamentos de forma fácil e rápida de acordo com as normas internacionais e nacionais em vigor (ABB, 2013b).

Figura 2.3 Área de Trabalho do DocWin.



Outra ferramenta gratuita e de grande importância para o auxílio no dimensionamento de equipamentos elétricos em um projeto é o Simaris (Figura 2.4), do fabricante Siemens, que também segue a mesma filosofia dos outros softwares já citados, tais como Ecodial e DocWin (SIEMENS, 2013).

Figura 2.4 Área de Trabalho do Simaris.

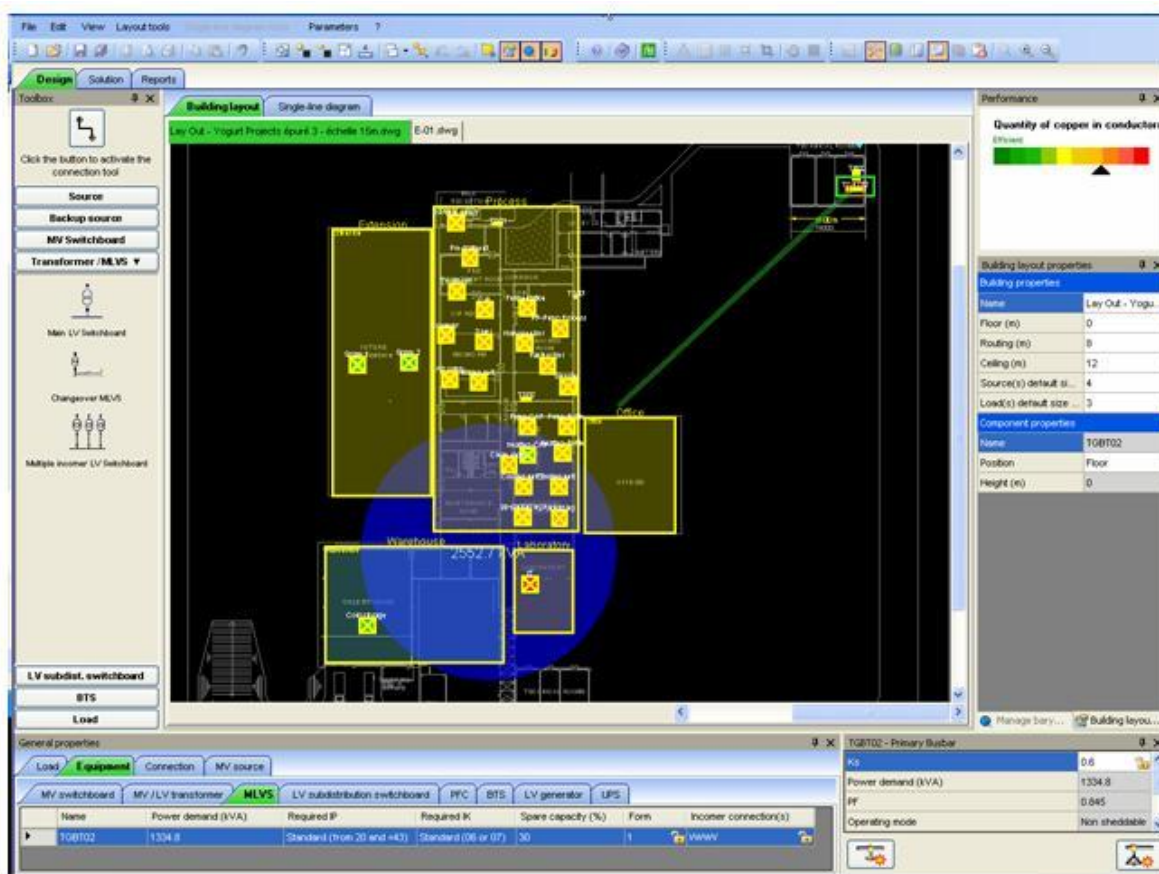


Outra ferramenta gratuita que auxilia em projetos de instalação elétrica é o “ID-Spec Large” da Schneider Electric, baseado nas normas internacionais de instalações elétricas e nas

normas brasileira de baixa e média tensão. O software tem o objetivo de criar um balanço de potências mostrando em sua área de trabalho a planta do recinto em estudo com todas as cargas instaladas indicando o centro de carga total do projeto que é de grande importância para um melhor dimensionamento de uma subestação. Outra ferramenta de destaque é o dimensionamento e especificação dos equipamentos (SCHNEIDER ELECTRIC, 2013).

A Figura 2.5 apresenta um exemplo da área do trabalho do software, em indica o centro das cargas total situado dentro de uma área.

Figura 2.5 Área de Trabalho do Id-Spec Large.



3 ASPECTOS CONCEITUAIS DE UMA SUBESTAÇÃO INDUSTRIAL ABRIGADA

Por definição, subestação (SE) é uma parte de um sistema elétrico de potência, concentrada em um determinado local, constituída de um conjunto de condutores e equipamentos com a função de alterar as características da energia elétrica como a tensão e a corrente, possibilitando a sua distribuição às unidades consumidoras. As subestações (SE's) têm obrigação de garantir a máxima segurança de serviço e operação a toda parte integrante do sistema elétrico.

Antes de iniciar um projeto de subestação é necessário determinar um conjunto de informações que vão incidir sobre o sistema ao qual a subestação estará ligada, tais como os níveis de potência ativa e reativa, a regulação da tensão, o nível do curto-circuito do sistema, índices de incidência de raios, entre outros.

3.1 Localização da Subestação

Um dos fatores importantes no projeto de uma subestação é sua localização. Atenção especial deve ser dada ao local.

Os principais fatores que devem ser considerados a fim de se determinar a localização para construção da subestação são os seguintes:

- Espaço necessário para o uso presente e futuras expansões;
- Impactos ambientais causados pela construção;
- Estudo do solo, verificando as condições do solo para um aterramento adequado da área;
- Considerações gerais topográficas;
- Localização do centro de carga das cargas instaladas, acarretando na dimensão dos cabos alimentadores;
- Disponibilidade de acesso para a entrada da linha do ponto de entrega da concessionária para a propriedade onde será construída a subestação;
- Custo total, considerando a locação do terreno, o fornecimento de energia elétrica para cargas, juntamente com a infraestrutura.

3.2 Estudo de Carga Alimentada pela Subestação

Para iniciar o projeto de uma subestação é necessário obter informações sobre as cargas instaladas no sistema. O estudo das cargas é essencial para um planejamento do projeto, pois conhecendo o comportamento das cargas em relação ao tempo é possível determinar o dimensionamento dos condutores, transformadores e os equipamentos pertencentes à subestação.

Para determinação da demanda deve ser feito um estudo prévio sobre as cargas instaladas, do fator de potência, do regime de funcionamento e do ramo de atividade, sendo de transformação ou de prestação de serviço.

Em geral, as concessionárias de energia elétrica apresentam em suas normas o estudo de demanda média para cada tipo de instalação. Porém, quando não se tem essas informações da concessionária, o cálculo da demanda é de inteira responsabilidade do projetista.

3.2.1 Fator de Demanda

O cálculo do fator de demanda é obtido a partir da razão entre a demanda máxima do sistema e a soma total das cargas instaladas, durante um intervalo de tempo considerado.

O cálculo do fator da demanda é calculado através da equação (3.1).

$$F_d = \frac{D_{\text{máx}}}{P_{\text{inst}}} \quad (3.1)$$

Sendo:

- F_d = Fator de demanda;
- $D_{\text{máx}}$ = Demanda máxima da instalação (kW);
- P_{inst} = Potência total instalada (kW).

O fator de demanda possibilita mostrar como a carga está se comportando durante certo intervalo de tempo, ou seja, esse fator possibilita projetar de uma forma mais econômica os equipamentos pertencentes a uma subestação.

Em algumas normas de concessionárias ou bibliografias de referência, é estimado o valor do fator de demanda para cada ramo de atividade, e com este valor juntamente com a potência total instalada é possível estimar a demanda máxima da instalação para o dimensionamento dos equipamentos pertencentes à subestação.

3.2.2 Fator de Carga

É a relação entre a demanda média obtida pelo consumo de energia e a demanda máxima durante um determinado intervalo de tempo considerado.

O fator de carga é obtido com a equação (3.2).

$$F_c = \frac{D_{\text{méd}}}{D_{\text{máx}}} \quad (3.2)$$

Sendo:

- F_c = Fator de demanda;
- $D_{\text{méd}}$ = Demanda média da instalação do período (kW ou kVA);
- $D_{\text{máx}}$ = Demanda máxima da instalação do mesmo período (kW ou kVA).

O fator de carga possibilita mostrar como a energia elétrica está sendo utilizada, ou seja, indica como a demanda máxima se comportou num certo intervalo de tempo. Quanto maior for o valor deste fator, maior será o aproveitamento da energia.

3.2.3 Fator de potência

Por definição, o fator de potência é a relação entre a potência ativa e a potência aparente, conforme a equação (3.3). Este fator indica a eficiência energética do sistema, ou seja, quanto menor for o valor do fator de potência, menor será o aproveitamento da energia fornecida pela concessionária.

$$F_p = \frac{P}{S} \quad (3.3)$$

Sendo:

- F_p = Fator de potência;
- P = Potência ativa da carga (kW);
- S = Potência aparente da carga (kVA).

Conforme a Resolução Normativa nº 414/10 da Agência Reguladora de Energia Elétrica (ANEEL), estabelece que o fator de potência nas unidades consumidoras até o nível de tensão de 230 kV deve estar compreendido entre 0,92 e 1,00 indutivo ou capacitivo, e o descumprimento desta resolução está sujeito a multa (ANEEL, 2010).

3.3 Sistemas Integrantes no Projeto de Subestação

3.3.1 Sistema de Proteção Contra Descarga Atmosférica e de Aterramento

O Sistema de Proteção Contra Descarga Atmosférica e de Aterramento são componentes de vital importância em um projeto elétrico, principalmente nas edificações onde se concentram muitos equipamentos eletrônicos e pessoas.

a) Sistema de Proteção Contra Descarga Atmosférica

O Sistema de Proteção Contra Descargas Atmosféricas (SPDA) tem o objetivo de garantir a preservação e a continuidade de funcionamento dos equipamentos e a proteção de vidas humanas. De acordo com o Anexo B – Método de seleção do nível de proteção da NBR 5419 – Proteção de estruturas contra descarga atmosférica verifica-se primeiramente qual o nível de proteção aplicável, em seguida avalia-se o risco de exposição, ou seja, o risco da estrutura ser atingida pelo raio, levando em consideração os aspectos inerentes à mesma e referentes ao local geográfico onde está localizada a edificação (ABNT, 2005).

Com base nesta avaliação, será determinada a necessidade ou não de um sistema de SPDA. No caso da necessidade, será calculada a quantidade de captores e a sua distribuição ao redor da edificação, de acordo com o método ou modelo definido pelo projetista. Por último, são determinadas as quantidades e posicionamento das descidas para interligação à malha de terra.

b) Sistema de Aterramento

Para que um sistema de aterramento seja eficaz é preciso saber a localização onde será construída a subestação e fazer uma medição da resistividade do solo.

Basicamente, o sistema de aterramento tem três funções principais:

- Garantir uma baixa resistência de aterramento, com finalidade de limitar as sobretensões no sistema assegurando o funcionamento adequado do sistema de proteção e reduzir os potenciais de passos e toque na instalação;
- Garantir a segurança das pessoas em relação a quaisquer tensões que possam trazer perigos à vida, sendo de passo ou toque que possam aparecer nas instalações;

- Garantir um caminho de escoamento para o fluxo de corrente devido às descargas atmosféricas para a terra, através da utilização de captosres e cabos conectados no sistema de aterramento.

3.3.2 Sistema de Supervisão e Controle Predial (SSCP)

O sistema de automação ou supervisão de controle predial (SSCP) tem o objetivo de supervisionar, controlar e comandar os equipamentos e cargas elétricas instalados na subestação, apresentando as seguintes funções:

- Supervisão geral do sistema elétrico;
- Supervisão remota de disjuntores dos painéis do sistema elétrico da subestação;
- Supervisão remota dos demais equipamentos do sistema elétrico, tais como: chaves seccionadoras, no-breaks, transformadores.
- Registro de eventos;
- Comando remoto de disjuntores de alimentadores e motores;
- Comando e supervisão remota dos equipamentos do sistema elétrico.

3.4 Equipamentos e Acessórios de uma Subestação

São divididos em dois grupos os equipamentos e acessórios pertencentes em uma subestação: equipamentos de baixa tensão e equipamentos de alta/média tensão.

Os equipamentos de média tensão são os transformadores e disjuntores de potência, chave seccionadora, fusíveis quando aplicável, para-raios, buchas, muflas, isoladores e condutores de média tensão, que para serem dimensionados é necessário conhecer a características da rede primária de distribuição, tais como, corrente de curto-circuito, potência simétrica de curto-circuito, tensão nominal primária, nível básico de impulso e a frequência.

Os equipamentos de baixa tensão são os quadros gerais de baixa tensão (QGBT), banco de capacitores, disjuntores e condutores de baixa tensão, que para serem dimensionados é preciso determinar a potência total do sistema, no caso, a determinação da potência do transformador.

3.4.1 Pára-Raios

Os pára-raios são equipamentos monofásicos que tem a função de proteger os equipamentos elétricos no caso de ocorrência de surtos de tensão, devido à descarga atmosférica ou por manobras na rede, provocados pela operação de chaves seccionadoras e disjuntores.

O funcionamento dos pára-raios é bem simples, a partir de um dado valor de sobretensão no sistema elétrico, este dispositivo passa a se comportar como um condutor, descarregando parte da corrente para a terra e conseqüentemente minimizando os prováveis danos na instalação.

De forma geral, em uma subestação abrigada com entrada aérea, normalmente os pára-raios são instalados na parte externa da edificação, logo na entrada da linha, junto às buchas de passagem de média tensão. Em caso de entrada subterrânea, em geral são instalados os pára-raios junto às muflas de entrada da subestação.

Existem dois tipos de características construtivas de pára-raios atualmente que garantem o funcionamento e a proteção do sistema elétrico, sendo eles constituídos de elementos não resistivos de carbonato de silício (SiC) e óxido de zinco (ZnO). Na tabela 3.1 são apresentando algumas características principais desse equipamento.

Tabela 3.1 - Valores das características elétricas dos pára-raios (MAMEDE, 2005).

Tensão nominal (kV eficaz)	Tensão disruptiva à frequência industrial (kV eficaz)	Máxima tensão disruptiva de impulso sob onda normalizada (kV de crista)	Máxima tensão disruptiva sob onda normalizada (kV crista)		Máxima tensão disruptiva por manobra (kV crista)
			5.000 A Distribuição	10.000 A Estação	
3	4,4	21	18,0	13,0	8,25
6	9,0	40	31,0	22,6	15,50
9	13,5	58	46,0	32,5	23,50
12	18,0	70	54,0	43,0	31,00
15	22,5	80	64,0	54,0	39,00
27	40,5	126	99,0	97,0	70,00
39	58,5	-	141,0	141,0	101,00

Para o dimensionamento e especificação de um conjunto de pára-raios são necessárias conhecer as seguintes informações como: tensão nominal, corrente de descarga, tipo construtivo, frequência nominal, tensão máxima disruptiva sob impulso atmosférico e de manobra, máxima tensão residual de descarga e o método de instalação (MAMEDE, 2005).

a) Pára-Raios de Carboneto de Silício

Estes pára-raios são formados de elementos resistivos não-lineares constituídos de carboneto de silício (SiO) em série com centelhadores (*gaps*). O carboneto de silício (SiO) tem a função de conduzir a corrente elétrica proveniente da descarga atmosférica em baixas tensões residuais.

b) Pára-Raios de Óxido de Zinco

Por definição estes pára-raios apresentam como material dos elementos resistivos não-lineares o óxido de zinco (ZiO). Atualmente, esse tipo de pára-raios são os mais usados, por apresentarem uma excelente característica de não linearidade devido ao ZiO, não havendo a necessidade de *gaps* em série neste tipo de pára-raios, como ilustrado na Figura 3.1.

Figura 3.1 - Pára-Raio do tipo óxido de zinco.



3.4.2 Terminal primário ou Mufla

É uma terminação utilizada nos cabos de média que tem a função de garantir a deflexão do campo elétrico, limitando os valores dos gradientes de tensão e conseqüentemente reduzindo o risco de ruptura do dielétrico que possam causar danos na isolação dos cabos.

Estes terminais primários são utilizados nos cabos elétricos subterrâneos na entrada e/ou na saída das subestações, ou seja, sempre que ocorrer uma transição do tipo de isolamento é aplicada a utilização da mufla, como ilustrado na Figura 3.2.

Figura 3.2 - Mufla.



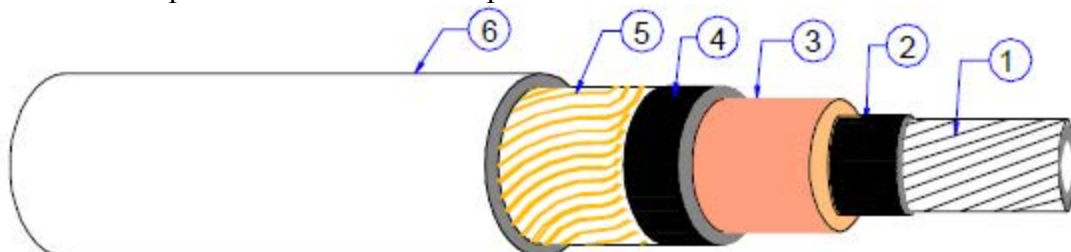
Atualmente são encontrados muflas do tipo com corpo de porcelana e as terminações termocontráteis com contrações a quente ou a frio.

Para o dimensionamento e especificação do terminal primário devem ser levadas em consideração as seguintes informações: a seção transversal e o tipo dos cabos a serem utilizados, a tensão nominal, nível básico de impulso e o método de instalação, podendo ser de uso interno ou externo (MAMEDE, 2005).

3.4.3 Cabos Elétricos de Média Tensão

De acordo com a NBR 14039 – Instalações elétricas de média tensão de 1,0 kV a 36,2 kV e a NBR 6251 - Cabos de potência com isolamento extrudada para tensões de 1 kV a 35 kV os cabos isolados da classe de tensão 15 kV são dividido em 6 partes de acordo conforme a Figura 3.3.

Figura 3.3 - Componentes de um cabo unipolar de média tensão.



De acordo com a Figura 3.3:

- O item 1 mostra o condutor elétrico que pode ser de fabricação de alumínio ou cobre, que tem a função de transportar potência para uma determinada carga;
- Os itens 2 e 4 indicam uma fita não metálica semicondutora que tem a função de confinar o campo elétrico, ou seja, manter a uniformização do campo elétrico;
- O item 3 é a isolamento, que tem a finalidade de isolar o condutor, podendo ser de cloreto de polivinila (PVC), polietileno reticulado (XLPE) ou borracha etileno-propileno (EPR);

- O item 5 indica a blindagem metálica que tem o objetivo de garantir um caminho para as correntes de falta para a terra;
- O item 6 mostra a cobertura que tem a função de oferecer uma proteção externa para o condutor.

Conforme o item 6.2.5.1 da NBR 14039 a instalação de cabos de média tensão pode ser feita de várias maneiras, sendo fundamental para o dimensionamento da seção do cabo.

Devem também ser considerados os seguintes itens para um dimensionamento correto do cabo elétrico:

- Fator de correção por temperatura ambiente;
- Fator de correção por agrupamento;
- Fator de correção devido ao método escolhido para instalação.

Porém em algumas normas de concessionárias tem-se estabelecidos as seções dos cabos alimentadores a partir da demanda máxima da instalação

Para a especificação de um cabo de média tensão, são necessárias as seguintes informações: seção transversal do condutor, tipo do condutor, tipo e tensão nominal da isolamento e o nível básico de impulso (MAMEDE, 2005).

3.4.4 Bucha de Passagem

São componentes elétricos constituídos de material isolante que tem a função de interligar equipamentos elétricos e cabos de um determinado ambiente para outro, tais como cubículos de SF₆ ou de alvenaria, como ilustrado na Figura 3.4.

Figura 3.4 - Bucha de passagem do tipo interior/exterior classe 15 kV.



De acordo com a NBR 5034 – Buchas para tensões alternadas superiores a 1 kV, para a especificação de uma bucha de passagem, são necessárias as seguintes informações: tensão

nominal, tensão suportável a seco e sob chuva, nível básico de impulso e o método de instalação (ABNT, 1989).

Quanto ao método de instalação das buchas de passagens num projeto de uma subestação abrigada, podemos ter:

a) **Bucha de passagem para uso interior**

São buchas em que os terminais são instalados em ambientes abrigados, ou seja, não sujeito às intempéries. Tem o objetivo de permitir a passagem de um circuito em cubículos vizinhos de uma subestação.

b) **Bucha de passagem para uso interior-exterior**

São buchas em que um dos terminais está fixado ao tempo no exterior da subestação e o outro está instalado dentro da subestação. Este tipo de bucha tem a finalidade de interligar um circuito proveniente de um ramal de ligação aéreo para o cubículo de entrada de uma subestação.

3.4.5 Isoladores

São componentes elétricos constituídos de material isolante que tem a função de suportar e interligar os condutores elétricos de um cubículo para o outro, conforme ilustrado na Figura 3.5.

Figura 3.5 - Isolador do tipo pedestal 15 kV.



Para a especificação de um isolador, são necessárias as seguintes informações: tensão nominal, tipo construtivo, nível básico de impulso, material isolante e o método de instalação.

3.4.6 Barramento primário

Os barramentos primários são equipamentos que fazem conexão entre os cubículos pertencentes da subestação, com a função de transportar potência.

Para o dimensionamento das seções dos barramentos é considerado a capacidade de transformação da subestação, conforme ilustrado na Tabela 3.2, porém sempre se deve verificar se há alguma exigência sobre o cálculo das seções do barramento nas normas da concessionária local.

Tabela 3.2 - Dimensão de barramento (MAMEDE, 2011).

Potência dos Transformadores kVA	Barramento retangular de cobre		Vergalhão de cobre	
	Polegadas	mm	Seção mm ²	Diâmetro mm
Até 70	1/2 x 1/8	12,70 x 3,175	25	5,6
De 71 a 2500	3/4 x 3/16	19,05 x 4,760	35	6,6

Conforme a NBR-14039, sobre o espaçamento dos barramentos entre fase/fase e fase/terra é de obrigação respeitar as distâncias mínimas exigíveis, sendo considerado o afastamento entre as extremidades mais próximas, como apresentado na Tabela 3.3 (ABNT, 2005).

Tabela 3.3 - Distância mínima entre os barramentos (ABNT, 2005).

Tensão nominal da instalação (kV)	Tensão de ensaio à frequência industrial (valor eficaz kV)	Tensão suportável nominal de impulso atmosférico (valor de pico kV)	Distância mínima fase/fase e fase/terra (mm)
3	10	20	60
		40	60
4,16	19	60	90
		40	60
6	20	60	90
		95	160
		110	180
13,8	34	110	180
		125	220

3.4.7 Transformador de Corrente

Por definição, os transformadores de corrente, mais conhecidos como TCs, são equipamentos que tem a finalidade de medição e proteção do sistema elétrico. Os TCs são constituídos de um enrolamento primário ligado em série a um circuito, geralmente de poucas

espiras de cobre e de um enrolamento secundário, na qual a corrente nominal é transformada normalmente em 5A.

Conforme a Figura 3.6, os transformadores de corrente, podem ser de vários tipos e modelos, sendo que a escolha do tipo do TC tem seu uso específico para cada caso, tais como: barra, primário enrolado, janela, bucha, núcleo dividido, entre outros.

Figura 3.6 - Tipos de transformadores de correntes.



De acordo com a NBR 6856 – Transformador de Corrente, a designação de um transformador de corrente é feita indicando a classe de exatidão do TC utilizado e sua carga nominal separada por um hífen (ABNT, 1993). Exemplo: 0,3-C12,5.

Para o dimensionamento e especificação de um TC, conforme a NBR 6856, é preciso conhecer os valores de corrente nominal do lado primário e secundário, nível básico de impulso, classe de tensão, classe de exatidão, tipo construtivo e o fator de sobrecorrente (ABNT, 1993).

a) **Transformadores de Corrente para Serviço de Medição**

São equipamentos utilizados na medição de corrente ou energia, que tem a função de transformar as correntes de carga primária, numa corrente secundária de menor valor, geralmente 5A. Também tem o objetivo de isolar e proteger os instrumentos medidores sem que haja um contato direto destes instrumentos com o circuito primário.

Segundo a NBR 6856 – Transformadores de Corrente, os TCs designados para serviço de medição, devem ser escolhidos de forma que a corrente de serviço esteja entre 10% e 100% (ABNT, 1993).

Outras características muito importantes sobre os TCs de medição são os fatos de estes possuírem uma maior precisão, ou seja, esses transformadores disponibilizam fielmente a corrente a ser medida e também apresentam um núcleo magnético dimensionado de forma que ocorra a saturação com a finalidade de limitar os valores da corrente secundária, normalmente entre 4 a 10 vezes a corrente nominal, para que não danifiquem os instrumentos de medição, caso ocorra um curto-circuito no circuito primário.

b) Transformadores de Corrente para Serviço de Proteção

São equipamentos que tem função de transformar elevadas correntes no circuito primário, proveniente de sobrecarga ou curto-circuito, em pequenas correntes no secundário conectado aos relés, sendo estes responsáveis pela proteção do circuito.

Diferentemente dos transformadores de corrente designado para medição, os TCs de proteção possuem uma menor precisão e não devem saturar para correntes elevadas. De acordo com a NBR 6856, os TCs não devem saturar com uma corrente de até 20 vezes a corrente nominal primária, caso contrário, os sinais recebidos pelos relés estariam disfarçados, podendo ocorrer uma operação indevida no sistema elétrico (ABNT, 1993).

3.4.8 Transformador de Potencial

Os transformadores de potencial (TPs) são equipamentos que tem a função de isolar o circuito de baixa tensão (secundário) do circuito de alta tensão (primário) e reduzir a tensão do circuito primário para uma tensão secundária compatível com os instrumentos de medição e proteção, padronizada em 115 V ou $115\sqrt{3}$, como ilustrado na Figura 3.7.

Figura 3.7 - Transformador de potencial, classe 15 kV.



Os TPs são usados para alimentarem instrumentos de medidas, como voltímetros, bobinas de potencial de energia e equipamentos de proteção como relés.

De acordo com a NBR 10020 - Transformadores de potencial de tensão máxima de 15 kV, 24,2 kV e 36,2 kV, são classificados em 3 grupos (ABNT, 2010):

- Grupo 1: TPs projetados para ligação entre fases, sendo muito usados em medição industrial;
- Grupos 2: TPs projetados para ligação entre fase e neutro de sistemas diretamente aterrados;
- Grupo 3: TPs projetados para ligação entre fase e neutro de sistemas onde não se garanta a eficácia de aterramento.

Sobre a exatidão dos transformadores de potencial se tem as seguintes classes: 0,3 – 0,6 - 1,2, sendo cada usada de acordo com sua finalidade:

- Classe de exatidão 0,3: são utilizados em medições de energia elétrica com fins de faturamentos;
- Classe exatidão 0,6: são aplicados na alimentação de instrumentos de medições de energia elétrica sem o objetivo de faturamento e em equipamentos de proteção;
- Classe exatidão 1,2: são destinados na medição indicativa de tensão.

De acordo com a NBR 6855 – Transformadores de Potencial Indutivos, a designação de um transformador de potencial é feita indicando a classe de exatidão do TP utilizado e sua carga nominal separada por um hífen (ABNT, 2008).

Para o dimensionamento e especificação de um TP, conforme a NBR 6855, é preciso conhecer os valores de tensão nominal primária e secundária, nível básico de impulso, classe de exatidão e a carga nominal (ABNT, 2008).

3.4.9 Chaves Seccionadoras

Os seccionadores por definição são dispositivos mecânicos que tem a capacidade de interromper ou estabelecer dois circuitos de um sistema elétrico, abrindo ou fechando seus contatos, através dos seus terminais e garantir a continuidade elétrica sob condições normais e anormais por um determinado tempo, tais como corrente de sobrecarga ou de curto-circuito, sem se danificar.

As chaves seccionadoras são muito utilizadas em subestações, geralmente instaladas a montante do disjuntor, que tem as finalidades de permitir manobras de circuitos elétricos com

carga ou sem cargas, de forma manual ou motorizada e de isolar os demais equipamentos instalados na subestação para uma eventual manutenção, tais como transformadores, disjuntores, entre outros.

Podem ser constituídos de um pólo (unipolar) ou de três pólos (tripolares), sendo que o mecanismo de abertura dos seccionadores tripolares deve ser de abertura simultânea dos três pólos.

Quanto à aplicação no circuito, as chaves seccionadoras podem ser classificadas como:

- Chave Seccionadora Simples: é designada a abrir e fechar circuitos sem carga, ou seja, somente à vazio, muito utilizada em subestação em alvenaria de classe 15 kV, como ilustrado na Figura 3.8;
- Chave Seccionadora sob Carga: é designada a abrir e fechar seus contatos em carga, pois apresenta em sua construção câmaras de extinção de arco que tem a capacidade de interromper circuitos com correntes em geral não superiores a sua corrente nominal;
- Chaves de Aterramento: é designada a aterrar um equipamento ou circuito, proporcionando uma maior segurança na manutenção de algum componente.

Figura 3.8 - Chave seccionadora simples tripolar.



Existem vários tipos de abertura das seccionadoras, como lateral simples, lateral dupla, vertical, entre outros. Porém para a escolha do tipo de abertura, deve-se considerar a distância onde será instalada a seccionadora, o nível de tensão e a função que exerce.

Para escolha adequada de uma chave seccionadora, além de considerar a corrente nominal da carga que passa por ela, devem-se levar em conta todos os efeitos térmicos e dinâmicos da corrente suportável de curta duração, valor eficaz e do valor de crista da corrente suportável pelo dispositivo, como mostrado na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Valores das características elétricas da chave seccionadora tripolar classe 15 kV (MAMEDE, 2005).

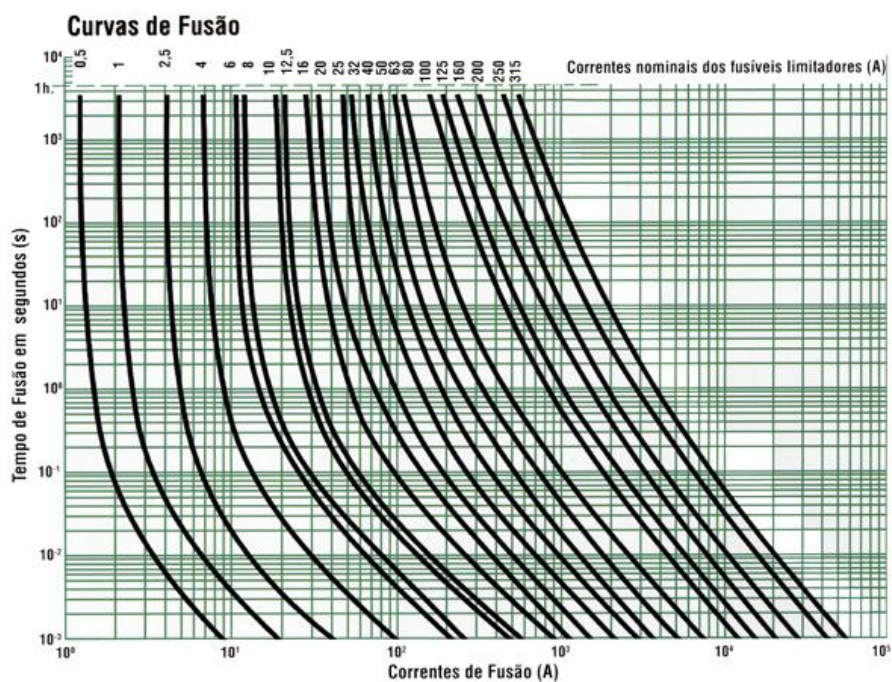
Tensão máxima de operação (kV)	Corrente nominal (A)	Tensão suportável nominal máxima (kV)				Corrente Suportável de Curta Duração (Mínima)	
		frequência industrial		impulso atmosférico		1 Segundo (kA-Eficaz)	Instantânea (kV-crista)
		á terra entre pólos	entre contatos abertos	á terra entre pólos	entre contatos abertos		
15	200					12,5	31,25
	400	34	38	95	110		
	600					16	40

De acordo com a NBR IEC 62271-102 – Seccionadora e Chaves de aterramento, para o dimensionamento e especificação de uma chave seccionadora, é preciso conhecer os valores de tensão e corrente nominal, frequência nominal, tipo de operação, valores suportáveis de correntes de curta duração tanto para efeito térmico como dinâmico, nível básico de impulso e o tipo de acionamento (ABNT, 2001).

3.4.10 Fusíveis Limitadores de Corrente

São equipamentos de interrupção extremamente eficientes na proteção de circuitos de média tensão, devido às suas características de tempo e corrente ilustradas, que podem ser determinadas pela curva típica do fusível utilizado, como ilustrado na Figura 3.9. As principais características desse dispositivo são de apresentar uma rápida resposta de atuação na presença de corrente de curto-circuito e uma alta capacidade de ruptura, sendo usados em sistemas que apresenta altos valores na corrente de curto-circuito.

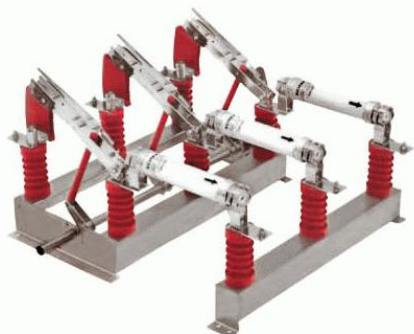
Figura 3.9 - Curva típica de fusível, catálogo WEG.



Porém, para baixas correntes, com característica de sobrecarga, os fusíveis limitadores não apresentam resultados satisfatórios, podendo não resultar numa proteção devidamente correta.

Os fusíveis limitadores de corrente são muito usados como proteção de transformadores de força e até na substituição do disjuntor geral de uma subestação de pequeno porte, em torno de 300 kVA. Em geral, os fusíveis limitadores são acoplados com um seccionador interruptor ilustrado na Figura 3.10. Também são utilizados nas proteções de motores de média tensão, banco de capacitores e transformadores de potencial.

Figura 3.10 - Chave seccionadora acoplado com fusível tripolar.



Para o dimensionamento dos fusíveis limitadores na proteção primária de um transformador de força, normalmente adota-se 150% da corrente nominal do transformador, conforme as equações (3.4) e (3.5).

$$I_{np} = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot V_{np}} \quad (3.4)$$

Sendo:

I_{np} = Corrente nominal no primário (A);
 S = Potência nominal aparente do transformador (kVA);
 V_{np} = Tensão nominal do sistema (kV).

$$I_{nf} = 1,5 \cdot I_{np} \quad (3.5)$$

Sendo:

I_{nf} = Corrente nominal do fusível limitador (A);
 I_{np} = Corrente nominal no primário (A).

Uma diferença entre os disjuntores e fusíveis limitadores é que os disjuntores requerem instrumentos adicionais, tais como transformadores de corrente e relés, para detectar e atuar no dispositivo de proteção, ao passo que os fusíveis limitadores, já apresentam características próprias de detecção e interrupção, porém devem ser coordenados com outros equipamentos de proteção.

Para a especificação e dimensionamento de um fusível limitador de corrente, conforme a NBR 8669 – Dispositivo Fusíveis Limitadores de Corrente, é preciso conhecer os valores de tensão e corrente nominal, corrente mínima de interrupção, curva características de tempo x corrente e a capacidade de ruptura (ABNT, 1984).

3.4.11 Disjuntor de Potência de Média Tensão

São equipamentos que tem a finalidade de manobra e proteção de circuitos primários, com capacidade de conduzir e interromper correntes sob condições normais de maneira contínua e anormais durante o menor tempo possível, tais como de sobrecarga ou de curto-circuito.

Os disjuntores devem estar sempre associados a relés, cuja função é detectar o fluxo de corrente elétrica e de atuar sobre o disjuntor para abertura ou fechamento dos seus

contatos. Também são capazes de interromper correntes de circuitos operando sob carga e a vazio.

No Quadro 3.1 estão citadas algumas comparações entre o uso do fusível limitador de corrente e do disjuntor de potência de média tensão em uma subestação.

Quadro 3.1 - Comparativo entre fusíveis limitadores e disjuntores de potência.

	Fusível Limitador	Disjuntor de Potência
Limitação de potência	até 300 kVA.	Sem limitação.
Capacidade de ruptura	Alta.	Alta.
Tempo de atuação	Extremamente Rápido.	Rápido.
Sensibilidade	Para altas correntes eficaz. Para baixas correntes baixo.	Para altas e baixas correntes eficaz.
Manutenção	Após atuação o dispositivo é descartável, necessitando ser substituído.	Pode atuar várias vezes no circuito sem sofrer danos.
Instrumentos adicionais	Não.	Requerem TCs e relés.

Quanto aos mecanismos de acionamento de um disjuntor, podem ser manuais ou por sistemas à distância, tais como: mola, solenóide, ar comprimido ou hidráulico.

Quanto ao sistema de interrupção do arco, os disjuntores podem ser classificados como: disjuntores a óleo, podendo ser de grande ou pequeno volume, disjuntores a ar, disjuntores a vácuo e disjuntores a SF₆.

Atualmente, em aplicações de subestações de média tensão, vem sendo usados os disjuntores tripolares a vácuo e a SF₆, por apresentarem uma alta confiabilidade e segurança no sistema de proteção e uma menor manutenção, conforme ilustrado na Figura 3.11 (a) e (b). No Quadro 3.2 estão citadas algumas comparações entre os tipos de disjuntores.

Figura 3.11 - Disjuntor tripolar á vácuo classe 15 kV.

(a) Vista lateral



(b) Vista frontal



Quadro 3.2 - Comparativo entre os tipos dos disjuntores.

	Disjuntor a Óleo	Disjuntor a Ar	Disjuntor a Vácuo/SF6
Dimensão	Grande.	Grande.	Pequeno.
Confiabilidade	Média.	Média.	Alta.
Segurança	Risco de explosão.	Emissão de gás quente e ionizado durante a atuação do dispositivo.	Sem riscos.
Manutenção	Regular devido a troca de óleo.	Regular, devido ao mecanismo de controle.	Mínima.

Em algumas concessionárias de energia elétrica, existem dentro de suas normas, exigências sobre as características do disjuntor de entrada da subestação, tais como, capacidade de interrupção, nível de curto-circuito, tempo de interrupção entre outros.

Para a especificação e dimensionamento de um disjuntor de potência é preciso conhecer os valores de tensão e corrente nominal, frequência nominal, tipo construtivo e de montagem, tempo de interrupção, tipo de comando de abertura e fechamento e a capacidade de interrupção nominal (MAMEDE, 2005).

3.4.12 Relés de Proteção

São equipamentos que tem como objetivo coordenar e atuar nos outros dispositivos de proteção, tais como, disjuntores e chaves seccionadoras. Estes equipamentos possuem características que diferenciam uma situação de operação normal ou anormal. Caso seja detectada alguma anomalia no circuito, podendo ser uma sobrecarga, curto-circuito, subtensão ou outros fatores que possam danificar os equipamentos dentro de uma subestação, os relés tem a função de interromper esse circuito de uma forma segura e rápida.

Quanto à forma construtiva dos relés, podem ser classificados como: eletromagnéticos, eletrodinâmicos, indução, térmicos, eletrônicos e digitais. A escolha do tipo do relé depende muito do sistema onde este será instalado.

Atualmente, como ilustrado na Figura 3.12, os relés digitais vêm sendo muito usados em projetos de sistemas de potências, por apresentarem uma maior confiabilidade e coordenação no sistema de proteção comparado com seus antecessores. Também apresentam uma alta precisão devido às amplas faixas de ajustes, uma alta velocidade de resposta e a possibilidade de permitir a comunicação com um sistema supervisor.

Figura 3.12 - Relé de proteção multifunção digital.



De acordo com a NBR 14039, a proteção mínima deve ser garantida em qualquer sistema elétrico, esta proteção é a de sobrecorrente instantânea e temporizada, função 50 e 51, fase e neutro. Outra função muito importante que deve ser utilizada em projetos industriais é a função 86, relé auxiliar de bloqueio, que tem a função de bloquear o religamento do dispositivo de proteção caso ele atue, necessitando de uma equipe de manutenção para averiguar a causa e efetuar os reparos necessários para restabelecer o circuito.

Para proteções de grandes máquinas, tais como, transformadores de potência, geradores e motores de indução é utilizada a função 49, proteção contra sobrecarga térmica, da tabela ANSI, que tem a função de proteger esses equipamentos contra o aquecimento excessivo.

Existem outras funções de proteção a serem utilizadas, tais como: diferencial, direcional, distância, sincronismo, sobretensão, subtensão entre outros, porém depende de conhecer o sistema como um todo para uma aplicação adequada e segura.

3.4.13 Transformador de Potência

Os transformadores de potência são máquinas elétricas estáticas, que têm a finalidade de transmitir a energia de um circuito primário para um ou mais circuitos, podendo ser de dois ou três enrolamentos. Em uma subestação industrial abaixadora, o transformador tem a função de transformar a tensão primária de média tensão em tensões menores compatíveis para alimentar os equipamentos instalados, sem que haja alteração na frequência.

Quanto ao meio isolante, os transformadores são classificados em transformadores imersos em óleo mineral e transformadores a seco.

De acordo com a NBR 14039, o presente trabalho dará foco aos transformadores a seco, conforme a Figura 3.13, por se tratar de um projeto de subestação abrigada, não podendo ser utilizados transformadores a óleo por fazer parte integrante da edificação industrial.

Figura 3.13 - Transformador a seco, classe 15 kV.



Conforme o item 3.3, para o dimensionamento da potência do transformador deve-se fazer um estudo de carga, levando em consideração todas as cargas instaladas com seus respectivos fatores de demanda.

Após a determinação da potência, pode-se obter a corrente nominal secundária do transformador, conforme a equação (3.6), que irá alimentar o quadro geral de baixa tensão (QGBT).

$$I_{ns} = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot V_{ns}} \quad (3.6)$$

Sendo:

- I_{ns} = Corrente nominal no secundário do transformador (A);
- S = Potência nominal aparente do transformador (kVA);
- V_{ns} = Tensão nominal secundária do transformador (kV).

Deve ser dada uma atenção especial ao dimensionar um transformador de potência, pois é necessário verificar o nível de curto-circuito no secundário, pois quanto maior for o valor da intensidade do curto-circuito, mais elevado serão os custos para os demais equipamentos para suportar tais níveis, como disjuntores, cabos alimentadores e painéis elétricos. A equação (3.7) mostra como obter o nível da corrente de curto circuito no secundário do transformador.

$$I_{cc-sec} = \frac{I_{ns}}{Z_{\%}} \cdot 100 \quad (3.7)$$

Sendo:

- I_{cc-sec} = Corrente de curto-circuito no lado secundário do transformador;
- I_{ns} = Corrente nominal no secundário do transformador (A);
- $Z_{\%}$ = Impedância percentual do transformador.

Uma forma de limitar a corrente de curto-circuito entre fase-terra em um transformador de potência é o uso de resistores de aterramento, que nada mais são que um conjunto de resistências ligadas em série e acomodadas no interior de um armário metálico por meio de isoladores de cerâmica tendo estes a mesma classe de tensão do sistema ao qual será interligado, que tem como função reduzir esses níveis de corrente de falta para um menor valor para que não danifiquem os equipamentos ou que possam trazer riscos para a vida humana.

Para a especificação e dimensionamento de um transformador de potência, conforme a NBR 10295 – Transformadores de Potência Secos, é preciso conhecer os valores de potência nominal, as tensões primárias e secundárias, a impedância percentual, o tipo de ligação dos enrolamentos, o deslocamento angular e a tensão suportável de impulso (ABNT, 2011).

3.4.14 Cabos Elétricos de Baixa Tensão

Os cabos elétricos de baixa tensão tem a mesma função que os cabos de média tensão, ou seja, tem o objetivo de distribuir energia elétrica para todo o sistema elétrico, alimentando todas as cargas instaladas, tais como, motores, transformadores e painéis elétricos.

Os cabos de baixa tensão (BT) podem ser classificados como:

- Cabos termoplásticos: são cabos que utilizam como material isolante o cloreto de polivinila, mais conhecido como PVC, que suportam uma temperatura máxima de operação de 70°C;
- Cabos termofixos: são cabos que tem como material isolante o polietileno reticulado (XLPE) ou a borracha etilenopropileno (EPR), que suportam uma temperatura máxima de operação de 90°C.

Atualmente, os cabos com isolamento em EPR são muitos utilizados para pontos de forças, como alimentadores de motores e painéis elétricos, por possuírem uma maior capacidade de corrente e por suportarem uma maior temperatura quando comparados aos cabos de isolamento de PVC.

Os cabos de baixa tensão também podem ser classificados como unipolar ou multipolar. Para uma seção menor que 16 mm², podem ser usados os cabos multipolares devido à facilidade de instalação, porém para uma seção superior a 16 mm² é aconselhável utilizar cabos unipolares devido à flexibilidade durante a instalação.

De acordo com a NBR 5410, o dimensionamento dos cabos de baixa tensão deve-se atender aos seguintes critérios:

- Seção mínima: regulamenta que as seções mínimas admitidas em qualquer instalação de baixa tensão estão definidas na Tabela 47, item 6.2.6., da referida norma;
- Capacidade de corrente: determina a maior corrente que a seção do condutor suporta devido à escolha do método de instalação, levando em conta o fator térmico, a resistividade térmica do solo (quando cabível) e o fator de agrupamento dos cabos;
- Queda de tensão: determina a maior distância que o cabo alimentador possa fornecer a tensão exigida pela carga em condições adequadas. A equação (3.8) mostra como obter uma seção ideal do condutor para uma carga trifásica que atenda uma determinada queda de tensão exigida.

$$S_c = \frac{173,2 \cdot \rho \cdot L_c \cdot I_c}{\Delta V\% \cdot V_{ff}} \quad (3.8)$$

Sendo:

- S_c = Seção do condutor (mm²);
- ρ = Resistividade do condutor ($\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$);
- L_c = Comprimento do circuito (m);
- I_c = Corrente da carga (A);
- $\Delta V\%$ = Queda de tensão máxima admitida (%);
- V_{ff} = Tensão fase-fase (V).

- Capacidade de condução de corrente de curto-circuito por tempo determinado: determina a seção mínima do condutor que seja capaz de suportar uma particular condição de curto-circuito, conforme a equação (3.9).

$$S_c = \frac{\sqrt{T_c} \cdot I_{cs}}{0,34 \cdot \sqrt{\log\left(\frac{234 + T_f}{234 + T_i}\right)}} \quad (3.9)$$

Sendo:

- S_c = Seção do condutor (mm²);
- T_c = Tempo de eliminação de defeito (s);
- I_{cs} = Corrente simétrica de curto-circuito (kA);
- T_f = Temperatura máxima de curto-circuito na isolação (°C);
- T_i = Temperatura máxima em regime contínuo (°C).

Para a especificação e dimensionamento de um cabo de baixa tensão é preciso conhecer os valores das seções nominais dos condutores, classe de tensão, material da isolação, material da capa de proteção e a maneira da disposição dos condutores, sendo unipolar ou multipolar (MAMEDE, 2005).

3.4.15 Barramento Blindado

O barramento blindado, conforme ilustrado na Figura 3.14, mais conhecido como “*busway*”, é um conjunto de barras de cobre ou de alumínio, sustentadas dentro de um material isolante em peça metálica, que tem a função de transportar e distribuir a energia elétrica através de seus elementos condutores, com a capacidade de suportar a corrente nominal passante sem apresentar queda de tensão excessiva, aquecimento e ruídos.

Figura 3.14 - Barramento blindado - Busway.



Os barramentos blindados são muito utilizados para transportar altas correntes em distâncias razoavelmente grandes, tais como, interligações entre os transformadores e quadros de cargas, grupos geradores à rede de distribuição de cargas, entre outros, acarretando uma maior flexibilidade e confiabilidade na instalação, substituindo as altas seções e quantidades de cabos alimentadores.

São apresentadas na Tabela 3.5 algumas características elétricas de barramentos blindados de cobre de uso interno para seu dimensionamento.

Tabela 3.5 - Características elétricas de barramentos blindados de cobre (MAMEDE, 2011).

Número de barras por fase	Seção da barra (mm ²)		Capacidade de corrente a 35°C (A)	Resistência (mΩ/m)	Reatância (mΩ/m)
	Fase	Neutro			
1	10 X 40	10 X 40	750	0,0446	0,19300
	10 X 60	10 X 40	1000	0,0297	0,17000
	10 X 80	10 X 40	1250	0,0223	0,16800
	10 X 100	10 X 60	1550	0,0178	0,15300
	10 X 120	10 X 60	1800	0,0148	0,14100
2	10 X 60	10 X 60	1650	0,0148	0,15800
	10 X 80	10 X 80	2000	0,0111	0,14600
	10 X 100	10 X 100	2400	0,0089	0,13500
	10 X 120	10 X 120	2800	0,0074	0,12300

Para a especificação e dimensionamento de um barramento blindado é preciso conhecer os valores da tensão e da corrente nominal, a seção nominal da barra, a classe de tensão e o grau de proteção do invólucro (MAMEDE, 2005).

3.4.16 Disjuntores de Baixa Tensão

Os disjuntores de baixa tensão tem a mesma função e seguem os mesmo princípios que os disjuntores de potência, ou seja, são equipamentos que tem a finalidade de manobra e proteção de circuitos primários, com capacidade de conduzir e interromper correntes sob condições normais de maneira contínua e anormais durante o menor tempo possível, tais como de sobrecarga ou de curto-circuito.

Quanto ao tipo construtivo, pode-se classificar os disjuntores de baixa tensão como: disjuntores abertos (*Air Circuit Breaker*), disjuntores de caixa moldada e disjuntores modulares (mini-disjuntores).

A escolha do tipo do disjuntor se dá pelo nível do curto-circuito do sistema, no caso de um disjuntor instalado entre um transformador de potência e um quadro geral de baixa tensão (QGBT), pode-se calcular esta corrente de curto-circuito pela equação (3.8).

Os disjuntores do tipo aberto e caixa moldada são geralmente usados na proteção dos quadros elétricos, por suportarem um nível maior de corrente nominal e corrente de curto-circuito, já os disjuntores modulares são usados para cargas pontuais. Na Figura 3.15 são ilustrados os tipos dos disjuntores de baixa tensão.

Figura 3.15 - Disjuntores de baixa tensão, da esquerda para direita: disjuntores modulares, disjuntor do tipo caixa moldada e disjuntor do tipo aberto.



Para a especificação e dimensionamento de um disjuntor de baixa tensão, conforme a NBR IEC 60947-2 – Disjuntores, é preciso conhecer os valores da tensão e da corrente nominal, a frequência nominal, a capacidade de interrupção, o acionamento (manual ou motorizado) e o tipo construtivo e de montagem (ABNT, 1998).

3.4.17 Quadro Geral de Baixa Tensão

O quadro geral de baixa tensão (QGBT) são caixas metálicas, formados de uma ou mais seções verticais denominadas "colunas", auto sustentáveis, montadas justapostas, formando um conjunto contínuo de mesma altura, que tem o objetivo de abrigar os equipamentos de seccionamento, proteção, instrumentação e comando da instalação.

O QGBT é a entrada principal de energia localizado na subestação, sendo o primeiro quadro depois do transformador que tem a função de distribuir a energia elétrica nos equipamentos a serem utilizados na instalação.

Conforme os requisitos da NR-10, os QGBTs deverão ser providos de dispositivos de proteção, isolamento de terminais energizados e sinalização padronizada.

O quadro geral de baixa tensão deverá ter uma porta documentos afixado externamente à porta frontal, traseira, lateral ou em parede próxima, com a finalidade de guardar os respectivos desenhos pertinentes ao sistema elétrico.

O quadro de baixa tensão deve ser projetado para atender completamente a norma NBR IEC 60439-1 - Conjunto de Manobra e Controle de Baixa Tensão, garantindo uma maior segurança pessoal e da edificação onde estão instalados. Os quadros são classificados em TTA (conjunto de manobra de controle de baixa tensão com ensaios de tipo totalmente testados) e PPTA (conjunto de manobra de controle de baixa tensão com ensaios de tipo parcialmente testados) (ABNT, 2003).

O QGBT deve possuir um barramento principal, constituído de cobre eletrolítico, isolados, horizontal, com a capacidade de condução de corrente em regime permanente e de suportar os esforços resultantes da corrente de curto-circuito. Todos os barramentos devem ser trifásicos, fixados rigidamente à estrutura por meio de suportes isolantes e possuírem uma identificação por cores, ou seja, uma cor para cada fase.

Quanto à forma construtiva, no Quadro 3.3, apresentam diversas formas típicas.

Quadro 3.3 - Classificação construtiva dos quadros de baixa tensão (ABNT, 2003).

Critério principal	Subcritério	Forma
Nenhuma separação		Forma 1
Separação de barramentos das unidades funcionais	Terminais para condutores externos não separados do barramento	Forma 2a
	Terminais para condutores externos, separados do barramento	Forma 2b
Separação de barramentos das unidades funcionais e separação de todas as unidades funcionais entre si. Separação dos terminais para condutores externos das unidades funcionais, mas não entre elas.	Terminais para condutores externos não separados do barramento	Forma 3a
	Terminais para condutores externos separados do barramento	Forma 3b
Separação de barramentos das unidades funcionais e separação de todas as unidades funcionais entre si, inclusive os terminais para condutores externos que são partes integrantes da unidade funcional.	Terminais para condutores externos no mesmo compartimento, bem como a unidade funcional associada.	Forma 4a
	Terminais para condutores externos não no mesmo compartimento que a unidade funcional associada, mas em espaços protegidos ou compartimentos individuais, separados e fechados.	Forma 4b

Para a especificação e dimensionamento de quadro geral de baixa tensão é preciso conhecer os valores de tensão e de corrente nominal, nível básico de impulso, classificação quanto aos ensaios, tipo construtivo e a corrente de curto-circuito.

3.4.18 Banco de Capacitores

O banco de capacitores é um dispositivo muito utilizado em sistemas elétricos, que tem a função de corrigir o fator de potência, devido à utilização de equipamentos dotados de bobinas instalados no sistema, tais como motores de indução, reatores e transformadores, que causam a diminuição desse fator.

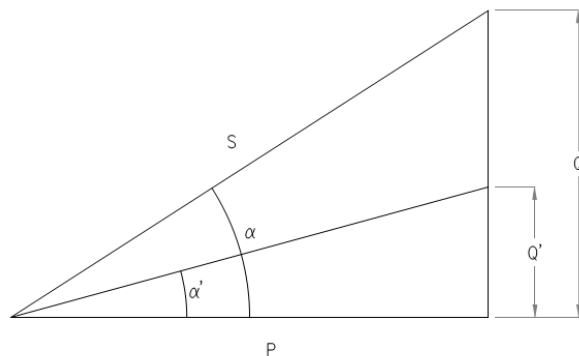
Os bancos de capacitores podem ser classificados como:

- Fixo: os bancos de capacitores não possuem nenhum tipo de controle, ou seja, os capacitores permanecem ligados independentemente das condições das cargas;
- Automático: os bancos de capacitores possuem um controlador eletrônico, que tem a função de verificar a necessidade de inserir ou retirar as cargas capacitivas do sistema de acordo com a necessidade;

- Programáveis: os bancos de capacitores podem ser ligados em períodos pré-definidos de acordo com a variação do fator de potência.

A Figura 3.16 e as equações (3.3), (3.10), (3.11), (3.12) e (3.13) demonstram como obter uma correção do fator de potência para 0,92, conforme a Resolução Normativa nº 414/10 da ANEEL (ANEEL, 2010).

Figura 3.16 - Triângulo de potência.



Primeiramente, calcula-se o fator de potência da carga utilizando a equação (3.3), citada no item 3.3.3 deste presente trabalho.

$$F_p = \frac{P}{S} \quad (3.3)$$

Sendo:

- F_p = Fator de potência;
 P = Potência ativa da carga (kW);
 S = Potência aparente da carga (kVA).

Em seguida calcula-se a potência reativa correspondente, conforme as equações (3.10) e (3.11).

$$\alpha = \arccos F_p \quad (3.10)$$

$$Q = \operatorname{tg} \alpha \cdot P \quad (3.11)$$

Sendo:

- Q = Potência reativa da carga (kVAR);
 α = Ângulo entre a potência aparente e a potência ativa (°);
 F_p = Fator de potência;
 P = Potência ativa da carga (kW).

Após o cálculo da potência reativa, calcula-se qual o valor da potência reativa para um fator de potência de 0,92, conforme as equações (3.12) e (3.13).

$$\cos \alpha' = 0,92 = 23,07 \quad (3.12)$$

$$Q' = \operatorname{tg} 23,07 \cdot P \quad (3.13)$$

Sendo:

- Q' = Potência reativa da carga para um fator de potência de 0,92 (kVAR);
- α' = Ângulo entre a potência aparente e a potência ativa para um fator de potência de 0,92 (°);
- P = Potência ativa da carga (kW).

Portanto o valor do banco de capacitores a ser utilizado para tal correção é dada na equação (3.14).

$$Q_{\text{correção}} = Q - Q' \quad (3.14)$$

Sendo:

- $Q_{\text{correção}}$ = Potência reativa da carga do banco de capacitores (kVAR);
- Q = Potência reativa da carga (kVAR);
- Q' = Potência reativa da carga para um fator de potência de 0,92 (kVAR).

Porém a correção do fator de potência, com o uso de banco de capacitores, podem criar condições de ressonâncias provocadas por correntes harmônicas, geradas por cargas não lineares, tais como motores, que podem acarretar danos para os equipamentos instalados. Por isso, dependendo da instalação e dos níveis de distorções, normalmente utiliza-se filtros de dessintonia, que tem a finalidade de evitar que essas distorções afetem o funcionamento dos equipamentos e dos capacitores.

3.5 Arranjo Físico Típico de uma Subestação Abrigada

Para um projeto de arranjo físico de uma subestação, precisam-se conhecer os padrões da concessionária local, pois cada concessionária de energia elétrica possui suas próprias normas sobre a construção e o arranjo de subestações de consumidor. Além de conhecer os padrões da concessionária, é necessário conhecer o digrama unifilar do projeto e as dimensões dos equipamentos que serão instalados nos cubículos.

As dimensões dos cubículos primários devem ser suficientes para a instalação dos equipamentos e sua eventual manutenção ou remoção, bem como permitir livre circulação dos trabalhadores e execução de manobras de forma segura.

Cada cubículo deve apresentar uma grade de tela metálica de proteção, com abertura para fora, apresentando uma altura mínima de 1,7 m e com uma distância mínima de 0,3 m entre a parte inferior da tela e o piso, com a finalidade de evitar e impedir uma aproximação física não intencional com algum equipamento energizado ou partes vivas. Os cubículos também devem ser providos de janelas e vidraças, com a finalidade de prover a iluminação natural, sempre que possível.

3.5.1 Altura da Subestação

Para determinação da altura mínima da subestação utiliza-se a equação (3.15) (MAMEDE, 2011).

$$H_{se} = H_t + H_{ac} + H_c + H_i + H_{ab} \quad (3.15)$$

Sendo:

- H_{se} = Altura da subestação (mm);
- H_t = Altura do transformador (mm);
- H_{ac} = Distância entre chave seccionadora e o dispositivo de proteção (mm);
- H_c = Altura da chave seccionadora (mm);
- H_i = Altura do isolador (mm);
- H_{ab} = Afastamento do barramento (mm).

3.5.2 Porta de Entrada da Subestação

A porta de acesso principal da subestação deve ser provida de portas metálicas, com abertura para fora, com dimensões mínimas de 0,80 x 2,10 m, conforme a NBR-14039, e ter fixada uma placa contendo a seguinte frase: “PERIGO DE MORTE – ALTA TENSÃO”, e os símbolos indicativos desse perigo.

Para determinação da largura da porta de acesso da subestação, deve-se considerar a dimensão do maior equipamento instalado, no caso o transformador de potência, conforme indicado na equação (3.16).

$$L_p = D_t + 0,6 \quad (3.16)$$

Sendo:

L_p = Largura da porta de acesso (m);
 D_t = Dimensão do transformador (m).

3.5.3 Área de Circulação

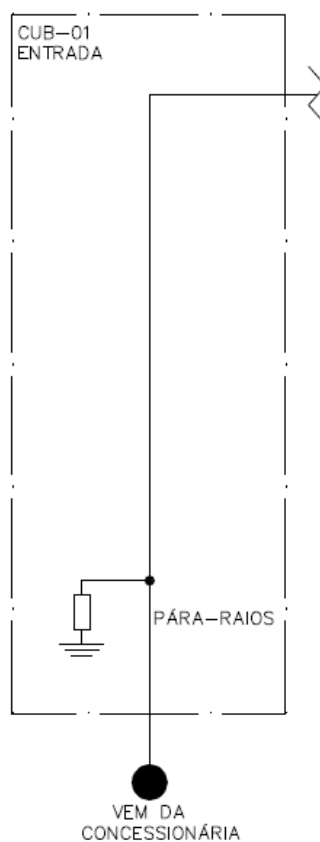
De acordo com a NBR-14039, a área de circulação dos corredores deve apresentar dimensão mínima de 0,70 m de espaço livre, considerando o pior caso, ou seja, com todas as portas e telas abertas, equipamentos extraídos em manutenção, assegurando uma circulação segura dos operadores dentro de uma subestação.

3.5.4 Cubículo de Entrada

O cubículo de entrada é destinado à entrada dos condutores elétrico na subestação. A entrada desses condutores pode ser por meio aéreo ou subterrâneo, conforme ilustrado na Figura 3.17.

Se a entrada dos condutores elétricos para este cubículo for de forma aérea, deveram ser instalados pára-raios na parte externa do cubículo, juto às buchas de passagem de média tensão. Caso a entrada seja de forma subterrânea, no interior do cubículo deveram ser instalados pára-raios junto às muflas de entrada.

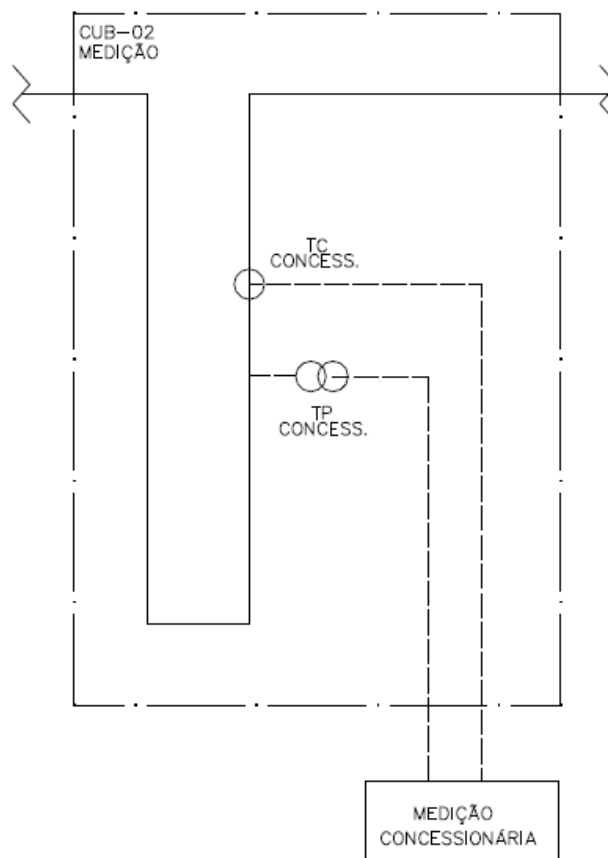
Figura 3.17 - Diagrama unifilar do cubículo de entrada da subestação.



3.5.5 Cubículo de Medição

O cubículo de medição é destinado à medição de energia elétrica, sendo de uso exclusivo da concessionária, sendo proibido qualquer acesso de pessoas não autorizadas. Nesse cubículo se localizam os equipamentos de medição, tais como o medidor de energia e os transformadores de corrente e potencial, conforme ilustrado na Figura 3.18, que são fornecidos e instalados pela própria concessionária.

Figura 3.18 - Diagrama unifilar do cubículo de medição da subestação.



A medição pode ser realizada em média ou baixa tensão, dependendo da potência instalada da subestação. De acordo com cada concessionária, em geral, para uma subestação com capacidade instalada de até 300 kVA, a medição é feita na baixa tensão, não necessitando a construção do cubículo de medição. Para capacidade de transformação acima de 300 kVA, a medição é feita na média tensão e instalada antes do cubículo de proteção.

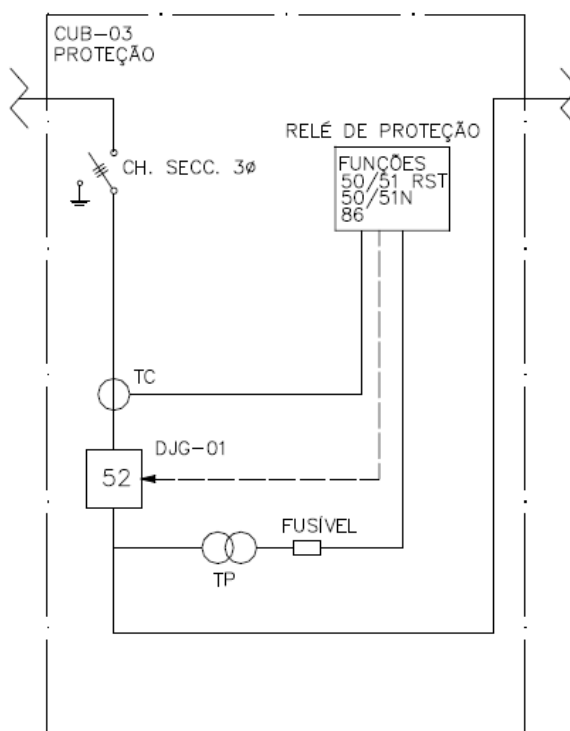
Sobre a maneira de instalação dos equipamentos auxiliares de medição, TCs e TPs, variam de cada concessionária. Em média, o espaço físico mínimo que ocupa esse cubículo é em torno de 1,60m x 2,00m (MAMEDE, 2011).

3.5.6 Cubículo de Proteção

É destinado à instalação dos dispositivos de proteção da rede primária, tais como chaves seccionadoras, relés, disjuntores de potência e fusíveis limitadores de corrente, quando for cabível o uso.

De acordo com a NBR-14039, para potência instalada acima de 300 kVA, é obrigatório o uso do disjuntor para proteção da rede primária, conforme ilustrado na Figura 3.19. Caso contrário, para potência instalada de até 300 kVA podem ser utilizados fusíveis limitadores de corrente acoplados com as chaves seccionadoras, com abertura em carga, ou o disjuntor de potência, com capacidade de ruptura compatível com o nível de curto-circuito.

Figura 3.19 - Diagrama unifilar do cubículo de proteção da subestação.



No caso da utilização do disjuntor de potência, é normalmente instalada a montante uma chave seccionadora, com abertura à vazio, para o caso de alguma manutenção no dispositivo de proteção. As chaves seccionadoras que não possuírem características para operação em carga devem ser sinalizadas com placas de advertência, instaladas de maneira bem visível junto aos pontos de manobra, contendo a inscrição: “ESTA CHAVE NÃO DEVE SER MANOBRADA EM CARGA”, dando uma maior segurança para os operadores e equipamentos.

Para determinação das dimensões do cubículo de proteção, deve-se utilizar a equação (3.17) e sempre consultar as dimensões mínimas das normas da concessionária local para verificar se estão compatíveis com as dimensões calculadas.

$$D_{pp} = D_d + 1,0 \quad (3.17)$$

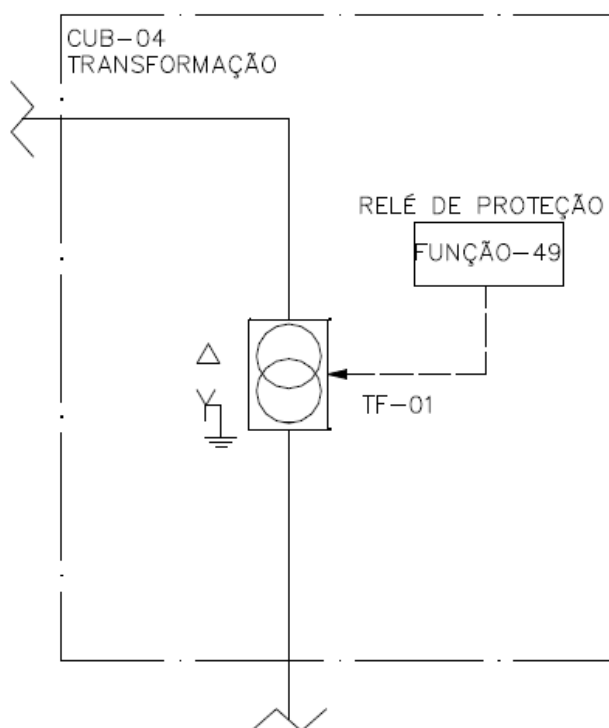
Sendo:

- D_{pp} = Dimensão do posto de proteção, comprimento ou largura (m);
 D_d = Dimensão do disjuntor de potência (m).

3.5.7 Cubículo de Transformação

É destinado à instalação dos dispositivos de transformação, no caso do transformador de potência, conforme ilustrado na Figura 3.20, que tem a função de transformar as grandezas elétricas, tais como tensão e corrente, para níveis compatíveis de utilização.

Figura 3.20 - Diagrama unifilar do cubículo de transformação da subestação.



Como o projeto se trata de uma subestação abrigada e conforme a NBR-14039, somente será permitido a utilização de transformador do tipo a seco.

Para determinação das dimensões do cubículo de transformação, deve-se utilizar a equação (3.18) e sempre consultar as dimensões mínimas das normas da concessionária local para verificar se estão compatíveis com as dimensões calculadas.

$$D_{pt} = D_t + 1,0 \quad (3.18)$$

Sendo:

- D_{pt} = Dimensão do posto de transformação, comprimento ou largura (m);
 D_t = Dimensão do transformador (m).

4 PROJETO BÁSICO DE UMA SUBESTAÇÃO ABRIGADA DE MÉDIA TENSÃO

O presente trabalho tem o escopo de elaborar um projeto básico de uma subestação abrigada consumidora de média tensão para suprimento de um Complexo de um Restaurante Industrial, com capacidade para 400 lugares, situado no município de Campinas - SP. Este complexo é alimentado pela concessionária de energia elétrica, no caso em questão a Companhia Paulista de Força e Luz (CPFL). A futura subestação apresentará um ponto de entrada do tipo subterrânea de 13,8 kV e um ponto de saída com nível de tensão de 380 V com a finalidade de alimentar o quadro geral de baixa tensão do complexo. A subestação possuirá cubículos de entrada, medição, proteção e de transformação, conforme os padrões estabelecidos pela concessionária local.

Sobre as características elétricas da concessionária, têm-se as seguintes informações:

- Tensão máxima de operação: 15 kV;
- Tensão nominal de fornecimento: 13,8 kV;
- Frequência nominal: 60 Hz;
- Nível básico de impulso 1,2 x 50 μ s: 95 kV crista;
- Tensão ensaio à frequência industrial por 1 minuto: 34 kV;
- Potência simétrica de curto-circuito no ponto de entrega da concessionária: 250 MVA.

Sobre as características elétricas do Complexo do Restaurante Industrial, têm-se os seguintes dados apresentados na Tabela 4.1, tais como: potência ativa e aparente instalada, fator de potência, fator de demanda e potência ativa e aparente demandada, obtidos do cliente.

Tabela 4.1 - Lista de cargas instaladas no QGBT.

QUADROS	Pi (kW)	Si (kVA)	Fp	Fd	Pd (kW)	Sd (kVA)
QGF -01 (EQUIPAMENTOS)	127,50	150,00	0,85	0,70	89,25	105,00
QGF -02 (EQUIPAMENTOS)	178,50	210,00	0,85	0,70	124,95	147,00
CCM-1 (MOTORES)	131,20	160,00	0,82	0,65	85,28	104,00
CCM-2 (MOTORES)	82,00	100,00	0,82	0,65	53,30	65,00
CCM-3 (MOTORES)	57,40	70,00	0,82	0,65	37,31	45,50
CCM-4 (HVAC)	156,60	180,00	0,87	0,70	109,62	126,00
QDL-01 (ILUMINAÇÃO E TOMADAS)	36,00	40,00	0,90	0,75	27,00	30,00
QDL-02 (ILUMINAÇÃO E TOMADAS)	27,00	30,00	0,90	0,75	20,25	22,50
QDL-03 (ILUMINAÇÃO E TOMADAS)	18,00	20,00	0,90	0,75	13,50	15,00
TOTAL	814,20	960,00	0,85	0,69	560,46	660,00

O projeto baseou-se nas normas ABNT e da concessionária de energia elétrica, destacando-se entre outras a NBR 5410 – Instalações Elétricas de Baixa Tensão (ABNT, 2004) e a NBR 14039 – Instalações Elétricas de Média Tensão de 1,0 kV a 36,2 Kv (ABNT, 2005).

4.1 Dimensionamento dos equipamentos e acessórios

Neste projeto serão dimensionados e especificados os seguintes equipamentos pertencentes a esta subestação, tais como:

- Muflas;
- Para-Raios;
- Isoladores;
- Cabos de MT;
- Barramentos primários;
- Transformador de potência;

- Disjuntor de potência;
- Transformador de corrente;
- Transformador de potencial;
- Chave seccionadora;
- Disjuntor de baixa tensão;
- Condutores de baixa tensão;
- Quadro geral de baixa tensão
- Banco de capacitores

4.1.1 Mufla

Como a entrada dos cabos de energia elétrica de média tensão é de forma subterrânea no cubículo de entrada da subestação, devem possuir muflas terminais, com as seguintes características apresentadas na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Folha de dados das muflas (PRYSMIAN, 2013).

Mufla	
Método de instalação	Interna
Classe de tensão (kV)	15
Nível básico de impulso (kV)	95
Seção do cabo unipolar (mm ²)	25
Altura (mm)	270

4.1.2 Pára-Raios

Devem ser instalados um conjunto de 3 (três) pára-raios, sendo utilizado 1 (um) em cada fase, de invólucro polimérico, a óxidos metálicos, sem centelhador, providos de desligador automático, instalados junto as muflas de entrada do cubículo de entrada da subestação, com a finalidade de proteger os equipamentos elétricos contra descargas atmosféricas e sobretensões, com as seguintes características apresentadas na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Folha de dados dos pára-raios (RAYCHEN, 2013).

Pára-raios	
Método de instalação	Interna
Tipo construtivo	ZiO
Classe de tensão (kV)	15,00
Tensão nominal (kV)	12,00
Frequência nominal (Hz)	60,00
Corrente de descarga (kA)	10,00
Máxima tensão disruptiva de impulso sob onda normalizada (kV)	80,00
Máxima tensão disruptiva por manobra (kV)	40,00

4.1.3 Isoladores de média tensão

Para passagem e suporte dos barramentos primários através dos cubículos devem ser empregados isoladores do tipo pedestal de porcelana, com as seguintes características apresentadas na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Folha de dados dos isoladores (SCHAK, 2013).

Isoladores	
Tipo construtivo	Pedestal
Método de instalação	Interna
Material de isolação	Porcelana
Classe de tensão (kV)	15,00
Nível básico de impulso (kV)	95,00
Altura (mm)	200,00

4.1.4 Dimensionamento dos condutores de média tensão

Os condutores elétricos de energia devem ser constituídos de cobre, com isolação classe 15 kV do tipo EPR 90°C, unipolar, com neutro aterrado e com seção de 25 mm², conforme a norma da concessionária (GED-2856), apresentando as seguintes características na Tabela 4.5 (CPFL, 2013).

Tabela 4.5 - Folha de dados dos condutores de média tensão (PRYSMIAN, 2013).

Condutores de média tensão (F-SE01)	
Material de isolamento	EPR
Tipo	Unipolar
Maneira de instalação	Bancos de dutos
Classe de tensão (kV)	12/20
Seção nominal do condutor por fase (mm ²)	3x25
Seção nominal do neutro (mm ²)	1x25
Capacidade de condução de corrente (A)	80,00

4.1.5 Barramentos primários

Os barramentos de média tensão dos cubículos devem ser constituídos de cobre, sendo em vergalhão com diâmetro de 5,16 mm ou em barra retangular com seção de 25 mm², fixados sobre isoladores e respeitando os afastamentos mínimos e as cores representados abaixo, conforme as exigências da concessionária (CPFL, 2013).

Devem ser respeitados os seguintes afastamentos mínimos:

- 200 mm – entre fases;
- 160 mm – entre fases e terra.

Para identificação, deve ser usada a seguinte convenção de cores:

- Fase V – Vermelho;
- Fase B – Azul Escura;
- Fase A – Branco.

4.1.6 Dimensionamento do transformador

Para o dimensionamento do transformador de potência, foi considerado o somatório das potências demandadas de cada quadro instalado e alimentado pelo QGBT, situado no complexo.

Através do somatório das demandas dos quadros instalados, mostrado na equação (4.1) obteve uma potência demandada de 660 kVA.

Sd_t = Potência total demandada do sistema (kVA);
 Sd_i = Potência demanda de cada quadro instalado (kVA);

$$\begin{aligned}
 Sd_t \sum_{i=0}^n Sd_i &= 105,00 + 147,00 + 104,00 + 65,00 + 45,50 + 126,00 \\
 &+ 30,00 + 22,50 + 15,00 = 660,00 \text{ kVA}
 \end{aligned}
 \tag{4.1}$$

Portando a escolha adequada da potência do transformador é de 750 kVA, sendo este o valor comercial mais próximo da potencial total demandada calculada, tendo 90,00 kVA de reserva para uma futura ampliação do sistema.

De acordo com a NBR-14039, a especificação do transformador deve ser do tipo seco, conforme citado anteriormente, pois o transformador de potência faz parte integrante da edificação, sendo de uso proibido transformadores do tipo óleo (ABNT, 2005).

Portanto para o transformador de potência dimensionado, pode-se especificar o equipamento conforme os dados obtidos de um fabricante, apresentado na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 - Folha de dados do transformador de potência (COMTRAFO, 2013).

Transformador de potência (TF-01)	
Potência nominal (kVA)	750
Tipo	a seco
Tensão primária (kV)	13,80
Tensão secundária (kV)	0,38/0,22
Ligação primária	Triângulo
Ligação secundária	Estrela com neutro
Impedância percentual (%)	6
Grau de proteção	IP-21
Frequência (Hz)	60
Nível básico de impulso (kV)	95
Altura (mm)	2200
Largura (mm)	1100
Profundidade (mm)	2000

4.1.7 Dimensionamento do disjuntor de potência

Para o dimensionamento e especificação do disjuntor de proteção de média tensão instalado a montante do transformador de potência (TF-01), é necessário conhecer dois parâmetros: a corrente nominal primária do TF-01 e a potência simétrica de curto-circuito no ponto de alimentação da subestação.

Para calcular a corrente nominal primária do transformador, utiliza-se a equação (3.4), com os dados abaixo obtidos da Tabela 4.6.

$$\begin{aligned} S &= 750,00 \text{ kVA} \\ V_{np} &= 13,80 \text{ kV} \end{aligned}$$

$$I_{np} = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot V_{np}} = \frac{750,00}{\sqrt{3} \cdot 13,8} = 31,38 \text{ A}$$

O disjuntor de potência (DJG-01) deve ser acionado através de relés de proteção que possuem as seguintes funções da tabela ANSI:

- 49: proteção térmica do enrolamento do transformador (TF-01);
- 50/51: proteção contra sobrecorrente instantâneo e temporizado;
- 50/51N: proteção contra sobrecorrente no neutro instantâneo e temporizado;
- 86: bloqueio.

Por se tratar de um equipamento de média tensão, não se encontram valores comerciais de baixa corrente nominal, sendo necessário escolher um disjuntor de valor comercial mais próximo da corrente nominal calculada e que satisfaça todas as condições necessárias do projeto. Com isto será utilizado relés de proteção com a corrente de ajuste compatível com a corrente nominal calculada para o acionamento do disjuntor caso ocorra alguma anomalia no sistema.

Devido ao custo benefício do disjuntor, será utilizado um disjuntor do tipo vácuo, por ser mais barato e apresentar a mesma confiabilidade que o disjuntor do tipo SF6.

Portanto, para o disjuntor potência dimensionado, pode-se especificar o equipamento conforme os dados obtidos de um fabricante, apresentado na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 - Folha de dados do disjuntor geral de média tensão (SCHNEIDER-ELECTRIC, 2013).

Disjuntor geral de média tensão (DJG-01)	
Tipo construtivo	Vácuo
Tipo de montagem	Fixo
Comando	Motorizado
Mecanismo	Mola
Classe de tensão (kV)	15,00
Tensão de operação (kV)	13,80
Frequência nominal (Hz)	60,00
Corrente nominal (A)	630,00
Capacidade de interrupção simétrica (MVA)	250,00
Tempo de abertura (ms)	45,00
Tempo de interrupção (ms)	60,00
Tempo de fechamento (ms)	62,00
Altura (mm)	1100,00
Largura (mm)	592,00
Profundidade (mm)	577,00

4.1.8 Dimensionamento dos transformadores de corrente

Para este projeto serão instalados três transformadores de corrente, com uma corrente primária nominal compatível com a corrente primária do transformador, cuja finalidade é gerar informações e acionar o sistema de relés secundários de proteção caso ocorra uma anomalia, citado no item anterior (4.2.7).

Por se tratar de um transformador de corrente cuja finalidade é de proteção, deve ser utilizado à classe de exatidão de 10% apresentando uma potência nominal de 25VA.

Portanto para os transformadores de corrente dimensionados, podem-se especificar os equipamentos conforme os dados obtidos de um fabricante, apresentado na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 - Folha de dados dos transformadores de corrente (SIEMENS, 2013).

Transformadores de corrente (TC-01,02,03)	
Aplicação	Proteção
Tipo construtivo	Barra
Classe de tensão (kV)	15,00
Nível básico de impulso (kV)	95,00
Frequência nominal (Hz)	60,00
Corrente primária nominal (A)	40,00
Corrente secundária nominal (A)	5,00
Fator térmico nominal	1,2 In
Classe de exatidão	10B100

4.1.9 Dimensionamento dos transformadores de potencial

Para este projeto será instalado dois transformadores de potencial, cuja finalidade é de alimentar os relés secundários de proteção, apresentando uma classe de exatidão de 0,6% e uma potência 200VA.

Portanto para os transformadores de potencial dimensionados, podem-se especificar os equipamentos conforme os dados obtidos de um fabricante, apresentado na Tabela 4.9.

Tabela 4.9 - Folha de dados dos transformadores de potencial (SIEMENS, 2013).

Transformadores de potencial (TP-01,02)	
Classe de tensão (kV)	15,00
Nível básico de impulso (kV)	95,00
Frequência nominal (Hz)	60,00
Tensão primária nominal (kV)	13,80
Tensão secundária nominal (V)	115,00
Classe de exatidão	6P200
Fusíveis na média tensão	2x0,5A

4.1.10 Dimensionamento da chave seccionadora de média tensão

Para este projeto será instalado uma chave seccionadora tripolar a montante do disjuntor de potência (DJG-01), com operação a vazio, ou seja, em carga. Deve ser previsto aterramento, através da chave seccionadora para eventual manutenção no dispositivo de proteção ou da própria subestação.

Para o dimensionamento da chave seccionadora, a corrente nominal tem que ser a mais próxima dos valores comerciais encontrados da corrente nominal do circuito obtida, que nada mais é que a corrente primária do transformador calculada no item 4.2.7 deste trabalho. Outro fator importante é a capacidade de suportar a corrente de curta duração simétrica sem se danificar, que pode ser calculada na equação (4.2).

$$\begin{aligned} S_{cc} &= 250,00 \text{ MVA} \\ V_{np} &= 13,8 \text{ kV} \end{aligned}$$

$$I_{cc\text{-prim}} = \frac{S_{cc}}{\sqrt{3} \cdot V_{np}} = \frac{250 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 13,8} = 10,47 \text{ kA} \quad (4.2)$$

Por se tratar de um equipamento de média tensão, não se encontram valores comerciais de baixa corrente nominal, sendo necessário escolher uma chave seccionadora de valor comercial mais próximo da corrente nominal calculada e que satisfaça todas as condições necessárias do projeto, neste caso, de suportar uma corrente de curta duração cujo valor é de 10,47 kA.

Portanto para a chave seccionadora dimensionada, pode-se especificar o equipamento conforme os dados obtidos de um fabricante, apresentado na Tabela 4.10.

Tabela 4.10 - Folha de dados da chave seccionadora (SCHAK, 2013).

Chave seccionadora (CH-01)	
Operação	Sem carga
Acionamento	Manual
Número de fases	3,00
Classe de tensão (kV)	15,00
Tensão nominal (kV)	13,80
Nível básico de impulso (kV)	95,00
Frequência nominal (Hz)	60,00
Corrente nominal (A)	400,00
Corrente suportável de curta duração (kA)	22,00
Valor de crista da corrente suportável (kA)	50,00
Altura (mm)	600,00
Largura (mm)	895,00
Distância entre pólos (mm)	230,00

4.1.11 Dimensionamento do disjuntor de baixa tensão

Para o dimensionamento e especificação do disjuntor de proteção instalado a montante do QGBT, é necessário obter dois parâmetros: a corrente nominal que alimenta o QGBT, ou seja, a corrente secundária do transformador e a corrente curto-circuito do transformador no lado secundário.

Para calcular a corrente secundária nominal do transformador, utiliza-se a equação (3.6), com os dados obtidos da tabela 4.6.

$$\begin{aligned} S &= 750,00 \text{ kVA} \\ V_{ns} &= 0,38 \text{ kV} \end{aligned}$$

$$I_{ns} = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot V_{ns}} = \frac{750,00}{\sqrt{3} \cdot 0,38} = 1140,85 \text{ A}$$

Com o resultado obtido da corrente nominal que alimenta o QGBT, aplica-se a equação (3.7), para determinar o nível da corrente de curto-circuito referido ao lado secundário do transformador, com o seguinte dado obtido da Tabela 4.6.

$$Z_{\%} = 6,00 \%$$

$$I_{cc-sec} = \frac{I_{ns}}{Z_{\%}} \cdot 100 = \frac{1140,85}{6,00} \cdot 100 = 19,01 \text{ kA}$$

Logo, é necessário especificar um disjuntor de proteção que tenha a capacidade de interromper o circuito com uma corrente nominal superior a 1140,85 A e de suportar uma corrente de curto-circuito de até 19,01 kA.

Portanto para o disjuntor de proteção de baixa tensão dimensionado, pode-se especificar o equipamento conforme os dados obtidos de um fabricante, apresentado na Tabela 4.11.

Tabela 4.11 - Folha de dados do disjuntor geral de baixa tensão (SCHNEIDER-ELECTRIC, 2013).

Disjuntor de baixa tensão (DJ-01)	
Tipo constitutivo	Caixa moldada
Tipo de montagem	Fixo
Mecanismo de abertura/fechamento	Motorizado
Número de polos	3
Tensão nominal (V)	380,00
Corrente nominal (A)	1250,00
Frequência nominal (Hz)	60,00
Capacidade de interrupção de curto-circuito (kA)	20,00
Tensão máxima de serviço (V)	690,00
Tempo de resposta (ms)	30,00

4.1.12 Dimensionamento do alimentador do QGBT

Para o cálculo do dimensionamento dos condutores elétricos, devem-se conhecer as características do local em que os condutores serão instalados, tais como o método de instalação e a temperatura ambiente do local. Conforme a exigências e a informações obtidas do cliente, têm-se as seguintes informações:

- Temperatura ambiente: 40°C;
- Cabos utilizados: Isolação EPR 90°C - 0,6/1 kV, unipolar;
- Método de instalação: Leito.

De acordo com as prescrições da NBR 5410 (ABNT, 2004), segue abaixo os cálculos para o dimensionamento dos cabos alimentadores do QGBT.

a) Seção mínima

A NBR 5410 (ABNT, 2004) regulamenta que as seções mínimas admitidas em instalações de baixa tensão estão apresentadas na tabela 47, item 6.2.6., da referida norma, ilustrada na Figura 4,1, portanto a seção mínima do cabo alimentador do QGBT é de 2,5 mm².

Figura 4.1 – Seção mínima dos condutores (ABNT, 2004).

Tabela 47 — Seção mínima dos condutores¹⁾

Tipo de linha		Utilização do circuito	Seção mínima do condutor mm ² - material
Instalações fixas em geral	Condutores e cabos isolados	Circuitos de iluminação	1,5 Cu 16 Al
		Circuitos de força ²⁾	2,5 Cu 16 Al
		Circuitos de sinalização e circuitos de controle	0,5 Cu ³⁾
	Condutores nus	Circuitos de força	10Cu 16 Al
		Circuitos de sinalização e circuitos de controle	4 Cu
Linhas flexíveis com cabos isolados	Para um equipamento específico	Como especificado na norma do equipamento	
	Para qualquer outra aplicação	0,75 Cu ⁴⁾	
	Circuitos a extra baixa tensão para aplicações especiais	0,75 Cu	

¹⁾ Seções mínimas ditadas por razões mecânicas
²⁾ Os circuitos de tomadas de corrente são considerados circuitos de força.
³⁾ Em circuitos de sinalização e controle destinados a equipamentos eletrônicos é admitida uma seção mínima de 0,1 mm².
⁴⁾ Em cabos multipolares flexíveis contendo sete ou mais veias é admitida uma seção mínima de 0,1 mm².

b) Capacidade de corrente

De acordo com a NBR 5410 (ABNT, 2004), para determinar a corrente fictícia que circula pelos condutores elétricos é necessário conhecer o método de instalação, o tipo dos cabos utilizados, o fator de temperatura e de agrupamento.

- Tipo de isolamento dos cabos: EPR;
- Método de instalação: de acordo com a tabela 33 do item 6.2.3., da NBR 5410 (ABNT, 2004), o método de instalação condizente com leito é o “F”;

- Fator de temperatura: o valor da temperatura ambiente é de 40 °C, portanto conforme a tabela 40 da NBR 5410 (ABNT, 2004), ilustrada na Figura 4, o fator de correção de temperatura é:

Figura 4.2 – Fator de temperatura (ABNT, 2004).

Tabela 40 — Fatores de correção para temperaturas ambientes diferentes de 30°C para linhas não-subterrâneas e de 20°C (temperatura do solo) para linhas subterrâneas

Temperatura °C	Isolação	
	PVC	EPR ou XLPE
Ambiente		
10	1,22	1,15
15	1,17	1,12
20	1,12	1,08
25	1,06	1,04
35	0,94	0,96
40	0,87	0,91
45	0,79	0,87
50	0,71	0,82
55	0,61	0,76
60	0,50	0,71
65	—	0,65
70	—	0,58
75	—	0,50
80	—	0,41

$$F_t = 0,91$$

- Fator de agrupamento: o método de instalação dos condutores será em uma única camada de leito, apresentando 3 (três) circuitos. Portanto conforme a tabela 42 apresentada na NBR 5410 (ABNT, 2004), ilustrada na Figura 4.3, o fator de correção de agrupamento para este caso é:

Figura 4.3 – Fator de agrupamento (ABNT, 2004).

Tabela 42 — Fatores de correção aplicáveis a condutores agrupados em feixe (em linhas abertas ou fechadas) e a condutores agrupados num mesmo plano, em camada única

Ref.	Forma de agrupamento dos condutores	Número de circuitos ou de cabos multipolares												Tabelas dos métodos de referência
		1	2	3	4	5	6	7	8	9 a 11	12 a 15	16 a 19	≥20	
1	Em feixe: ao ar livre ou sobre superfície; embutidos; em conduto fechado	1,00	0,80	0,70	0,65	0,60	0,57	0,54	0,52	0,50	0,45	0,41	0,38	36 a 39 (métodos A a F)
2	Camada única sobre parede, piso, ou em bandeja não perfurada ou prateleira	1,00	0,85	0,79	0,75	0,73	0,72	0,72	0,71	0,70				36 e 37 (método C)
3	Camada única no teto	0,95	0,81	0,72	0,68	0,66	0,64	0,63	0,62	0,61				
4	Camada única em bandeja perfurada	1,00	0,88	0,82	0,77	0,75	0,73	0,73	0,72	0,72				38 e 39 (métodos E e F)
5	Camada única sobre leito, suporte etc.	1,00	0,87	0,82	0,80	0,80	0,79	0,79	0,78	0,78				

$$F_a = 0,82$$

Conforme a NBR 5410 (ABNT, 2004) e os dados obtidos acima, aplica-se a equação (4.2) para obter o valor da corrente fictícia que circula nos cabos alimentadores.

$$I_{b'} = \frac{I_b}{F_t \cdot F_a} = \frac{1140,85}{0,91 \cdot 0,82} = 1528,88 \text{ A} \quad (4.3)$$

Portanto, a corrente fictícia de circulação no condutor é de 1528,88 A, sendo o método de instalação “F”, com três condutores carregados, com disposição dos cabos em trifólio apresentando uma seção de $3 \times 3 \times 240 \text{ mm}^2$, ou seja, 3 (três) cabos por fase de seção de 240 mm^2 , conforme a tabela 39 da NBR 5410 (ABNT, 2004).

c) Queda de tensão

Para o dimensionamento dos condutores elétricos pelo método da queda de tensão, aplica-se a equação (3.8), com os seguintes dados admitidos:

$$\begin{aligned} \rho &= 1/56 \quad \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m} \\ L_c &= 15,00 \quad \text{m} \\ I_c &= 1140,85 \quad \text{A} \\ \Delta V &= 3,00 \quad \% \\ V_{ff} &= 380,00 \quad \text{V} \end{aligned}$$

$$S_c = \frac{173,2 \cdot \rho \cdot L_c \cdot I_c}{\Delta V\% \cdot V_{ff}} = \frac{173,2 \cdot 1/56 \cdot 15 \cdot 1140,85}{3 \cdot 380} = 46,4 \text{ mm}^2$$

Portanto, para o condutor elétrico deste circuito apresentará uma seção mínima de #50 mm².

d) Capacidade de Condução de Corrente de Curto-Circuito por Tempo Limitado

Para determinar a seção mínima dos condutores que sejam capazes de suportarem uma particular condição de curto-circuito é necessário conhecer quatros parâmetros, como o tempo de acionamento do disjuntor de baixa tensão, conforme especificado anteriormente na Tabela 4.11, o curto-circuito simétrico e as temperatura máxima para serviço contínuo e a temperatura limite de curto-circuito que pode ser obtidas na Tabela 35 da NBR 5410 (ABNT,2004), conforme ilustrado na Figura 4.4.

Figura 4.4 – Temperaturas características dos condutores (ABNT, 2004).

Tabela 35 — Temperaturas características dos condutores

Tipo de isolamento	Temperatura máxima para serviço contínuo (condutor) °C	Temperatura limite de sobrecarga (condutor) °C	Temperatura limite de curto-circuito (condutor) °C
Policloreto de vinila (PVC) até 300 mm ²	70	100	160
Policloreto de vinila (PVC) maior que 300 mm ²	70	100	140
Borracha etileno-propileno (EPR)	90	130	250
Polietileno reticulado (XLPE)	90	130	250

Após determinados todos os parâmetros, aplica-se a equação (3.9), com os seguintes dados do projeto:

$$\begin{aligned} T_c &= 0,30 \text{ s} \\ I_{cs} &= 19,01 \text{ kA} \\ T_f &= 250,00 \text{ °C} \\ T_i &= 90,00 \text{ °C} \end{aligned}$$

$$S_c = \frac{\sqrt{T_c} \cdot I_{cs}}{0,34 \cdot \sqrt{\log\left(\frac{234 + T_f}{234 + T_i}\right)}} = \frac{\sqrt{0,3} \cdot 19,01}{0,34 \cdot \sqrt{\log\left(\frac{234 + 250}{234 + 90}\right)}} = 75,33 \text{ mm}$$

Portanto para os condutores elétricos suportarem uma condição de curto-circuito por 0,3 segundos sem se danificarem, a seção mínima deve ser de #95 mm².

e) Escolha do Alimentador

De acordo com a Tabela 4.12, o método que apresentou a maior seção transversal para o condutor foi o método da capacidade de corrente.

Tabela 4.12 – Dimensionamento dos condutores.

Método	Seção transversal (mm²)
Seção mínima	3x1#2,5
Capacidade de corrente	3x3#240
Queda de tensão	3x1#50
Capacidade de Condução de Corrente de Curto-Circuito	3x1#95

Portanto após a análise dos métodos de dimensionamento dos condutores que alimentam o QGBT, podem especificar os cabos elétricos, conforme os dados obtidos de um fabricante, apresentado na Tabela 4.13.

Tabela 4.13 - Folha de dados dos condutores de baixa tensão (PRYSMIAN, 2013).

Condutores de baixa tensão (F-QGBT01)	
Material de isolamento	EPR
Tipo	Unipolar
Classe de tensão (kV)	0,6/1,0
Seção nominal do condutor por fase (mm ²)	3x240
Seção nominal do neutro (mm ²)	3x120
Seção nominal do terra (mm ²)	3x120
Capacidade de condução de corrente (A)	3x607

4.1.13 Dimensionamento do QGBT

Por exigência do cliente, em questão de segurança, o quadro geral de baixa tensão deve ser do tipo TTA, ou seja, painel totalmente testado, trazendo uma maior segurança e confiabilidade para o sistema e apresentar separações dos barramentos das unidades funcionais e separação de todas as unidades funcionais, compartimentação do tipo “4b”. Este quadro apresentará 1 (uma) seção de entrada, que é a entrada da alimentação do quadro vindo do transformador de potência e 12 (doze) seções de saídas, que são as saídas para alimentarem

os 9 (nove) quadros instalados no complexo, 1 (uma) saída para o banco de capacitores e 2 (duas) saídas reservas para uma futura ampliação. Portanto com base nos dados determinados e calculados nos itens anteriores, o quadro geral de baixa tensão deve ter todas as características elétricas mínimas, conforme a Tabela 4.14.

Tabela 4.14 - Folha de dados do QGBT (PRESMAT, 2013).

Quadro geral de baixa tensão (QGBT)	
Instalação	Abrigada
Classificação quanto ao ensaios	TTA
Grau de proteção do quadro	IP-31
Compartimentação	4b
Classe de tensão (kV)	1,00
Tensão de nominal (kV)	0,38
Frequência nominal (Hz)	60,00
Corrente nominal no barramento principal (A)	1250,00
Corrente de curto-circuito simétrica (kA)	20,00
Seção de entrada	1
Seção de saída	12

4.1.14 Dimensionamento do banco de capacitores

Conforme a Resolução Normativa nº 414/10 da ANEEL, é estabelecido um fator de potência mínimo de 0,92 nas unidades consumidores, para que não haja multa. Para verificar se é necessário o uso de banco de capacitores, aplica-se a equação (3.3), com os seguintes dados:

$$\begin{aligned} P &= 814,20 \text{ kW} \\ S &= 960,00 \text{ kVA} \end{aligned}$$

$$F_p = \frac{P}{S} = \frac{814,20}{960,00} = 0,848$$

Como o fator de potência calculado é inferior a 0,92, é necessário o uso de banco de capacitores, para que esse fator seja corrigido. Portanto aplicam-se as equações (3.10), (3.11),

(3.12), (3.13) e (3.14) para se determinar o valor da potência reativa para um fator de potência de 0,92.

$$\begin{aligned}\alpha &= \text{arc cos } F_p = \text{arc cos } 0,848 = 32,00 \\ Q &= \text{tg } \alpha \cdot P = \text{tg } 32,11 \cdot 814,20 = 508,77 \text{ kVAr} \\ \cos \alpha' &= 0,92 = 23,07 \\ Q' &= \text{tg } \alpha' \cdot P = \text{tg } 23,07 \cdot 814,20 = 346,78 \text{ kVAr} \\ Q_{\text{correção}} &= Q - Q' = 508,77 - 346,78 = 161,99 \text{ kVAr}\end{aligned}$$

Portanto, para a correção do fator de potência, será instalado banco de capacitores interligado ao QGBT, com a finalidade de manter este fator maior ou igual a 0,92 indutivo ou capacitivo. O valor da potência nominal do banco de capacitores a ser instalado é de 200 kVAr, com filtro de dissintonia, possuindo 4 (quatro) estágio de 50 kVAr e um controlador automático capaz de acionar os estágios quando for necessário, a fim de corrigir de forma adequada o excesso reativo do sistema, conforme apresentado na Tabela 4.15.

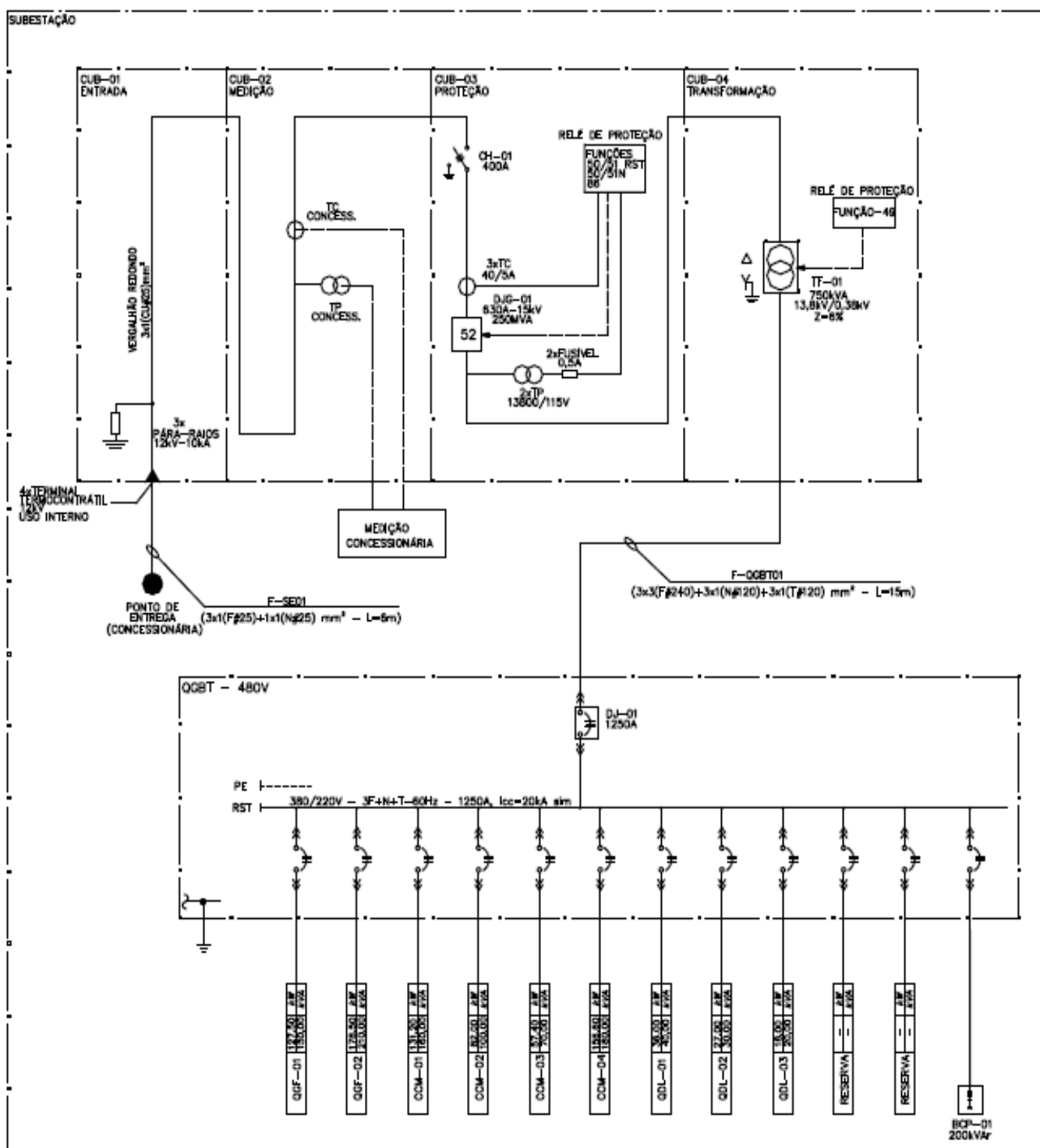
Tabela 4.15 - Folha de dados do banco de capacitores (DICEL, 2013).

Banco de capacitores (BCP-01)	
Tipo de acionamento	Automático
Tensão nominal (kV)	0,38
Nível de isolamento (kV)	1,00
Frequência nominal (Hz)	60,00
Potência nominal (kVAr)	200,00
Quantidade de estágio	4 (4 x 50 kVAr)
Filtro dessintonia	Sim

4.1.15 Diagrama Unifilar

Conforme os resultados obtidos nos itens anteriores e de acordo com as normas citadas neste trabalho, juntamente com a norma da concessionária local, obtêm-se o diagrama unifilar geral da subestação a ser instalada, ilustrado na Figura 4.5.

Figura 4.5 – Diagrama unifilar geral da subestação.



Como pode ser visto no diagrama unifilar, a subestação é alimentada de forma subterrânea por cabos de média tensão com uma tensão nominal de 13,8 kV. A partir da mufla, toda ligação é feita por barramentos primários do tipo vergalhão, que interliga todo sistema de medição (TC's e TP's de medição), sistema de proteção de média tensão (disjuntor

de potência, chave seccionadora e relés de proteção) até o transformador de potência que reduzirá a tensão nominal para 380 V que alimentará o quadro geral de baixa tensão através de condutores de baixa tensão. Também será instalado um banco de capacitores que fará a correção do fator de potência de forma automática, quando for necessário.

4.2 Dimensionamento físico da subestação

4.2.1 Altura da subestação

Para a determinação da altura da subestação, aplica-se a equação (3.15), com os seguintes dados:

H_t	=	2200 (obtido através da tabela 4.6)	mm
H_{ac}	=	900 (critério de projeto)	mm
H_c	=	600 (obtido através da tabela 4.10)	mm
H_i	=	200 (obtido através da tabela 4.4)	mm
H_{ab}	=	200 (obtido através da concessionária local)	mm

$$H_{se} = H_t + H_{ac} + H_c + H_i + H_{ab} = 2200 + 900 + 600 + 200 + 200 = 4100 \text{ mm}$$

Portanto a altura da subestação será de 4,10 metros que está de acordo com os padrões mínimos exigidos pela concessionária local, que é de 4,00 metros.

4.2.2 Porta de entrada da subestação

Para a determinação da largura da porta de acesso da subestação, aplica-se a equação (3.16), com o seguinte dado obtido na tabela 4.6:

$$D_t = 1100 \text{ mm}$$

$$L_p = D_t + 0,6 = 1,1 + 0,6 = 1,7 \text{ m}$$

Portanto, como a altura do maior equipamento instalado na subestação, no caso o transformador, é de 2,20 metros, a dimensão da porta de acesso será de 1,70 m x 2,50 m, com abertura para fora, conforme as exigências da concessionária local.

4.2.3 Área de circulação

Conforme citado no item 3.6.3 deste trabalho, para a determinação da área de circulação do corredor da subestação, considera-se a pior condição, ou seja, a condição do gradil do cubículo de transformação totalmente aberto, apresentando uma largura de 2,50 metros. Portanto para obter um espaçamento mínimo livre de 0,70 metros, a largura do corredor da subestação deve apresentar 3,20 metros.

4.2.4 Cubículo de transformação

Para determinação do espaço físico mínimo deste cubículo, aplica-se a equação (3.18), com os dados do transformador dimensionado (TF-01), obtidos na tabela 4.6.

$$\begin{array}{lcl} \text{Profundidade} & = & 2000 \text{ mm} \\ \text{Largura} & = & 1100 \text{ mm} \end{array}$$

A profundidade mínima do cubículo será:

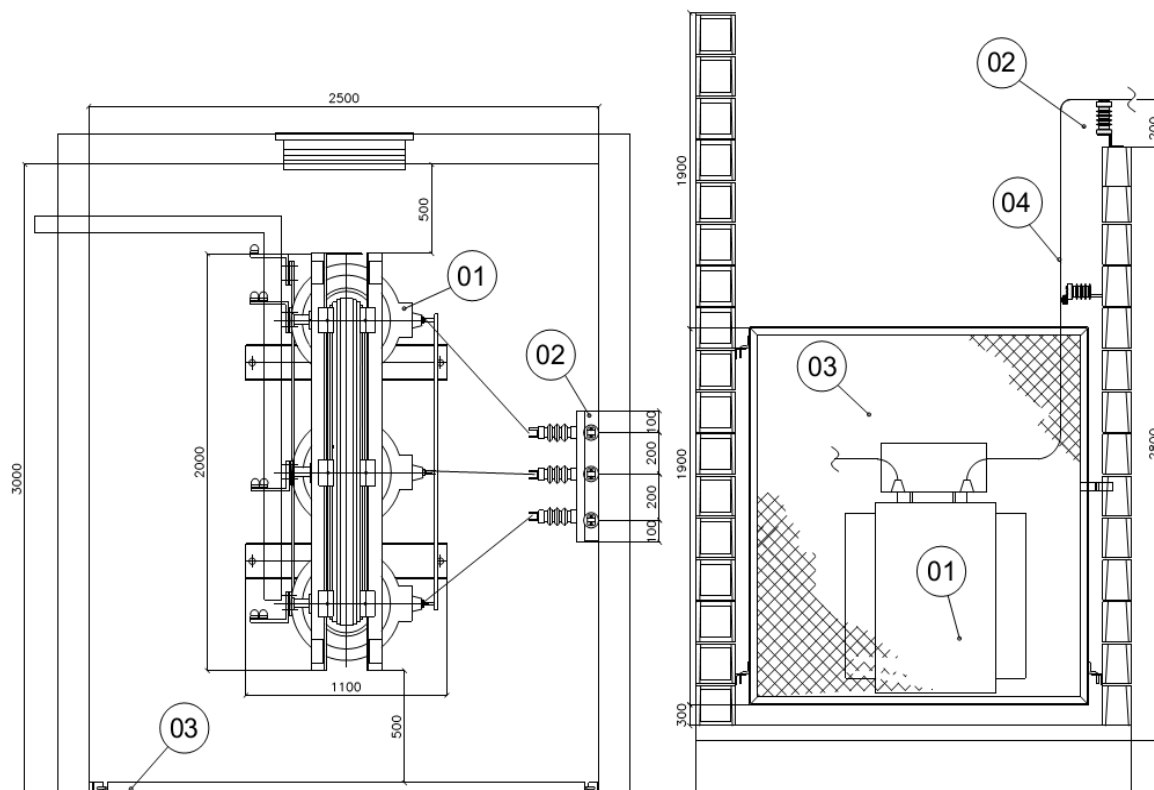
$$D_{pt} = D_t + 1,0 = 2,00 + 1,00 = 3,00 \text{ m}$$

A largura mínima do cubículo será:

$$D_{pt} = D_t + 1,0 = 1,10 + 1,00 = 2,10 \text{ m}$$

Porém a norma da concessionária local estabelece uma largura mínima de 2,50 metros, portanto a dimensão do cubículo de transformação será 3,00 metros de profundidade por 2,50 metros de largura. A Figura 4.6 ilustra o arranjo físico do cubículo de transformação, com todas as medidas em milímetro.

Figura 4.6 – Arranjo físico do cubículo de transformação.



ITEM	DESCRIÇÃO
01	TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA A SECO 750kVA - 13,8kV/0,38kV
02	ISOLADORES DO TIPO PEDESTAL - CLASSE 15kV
03	GRADE DE TELA METÁLICA
04	VERGALHÃO DE COBRE 25mm ²

Para se ter uma melhor simetria dos cubículos instalados na subestação, adotou-se que a profundidade do posto de transformação seja o mesmo para os demais postos, tais como o cubículo de entrada, medição e de proteção.

4.2.5 Cubículo de proteção

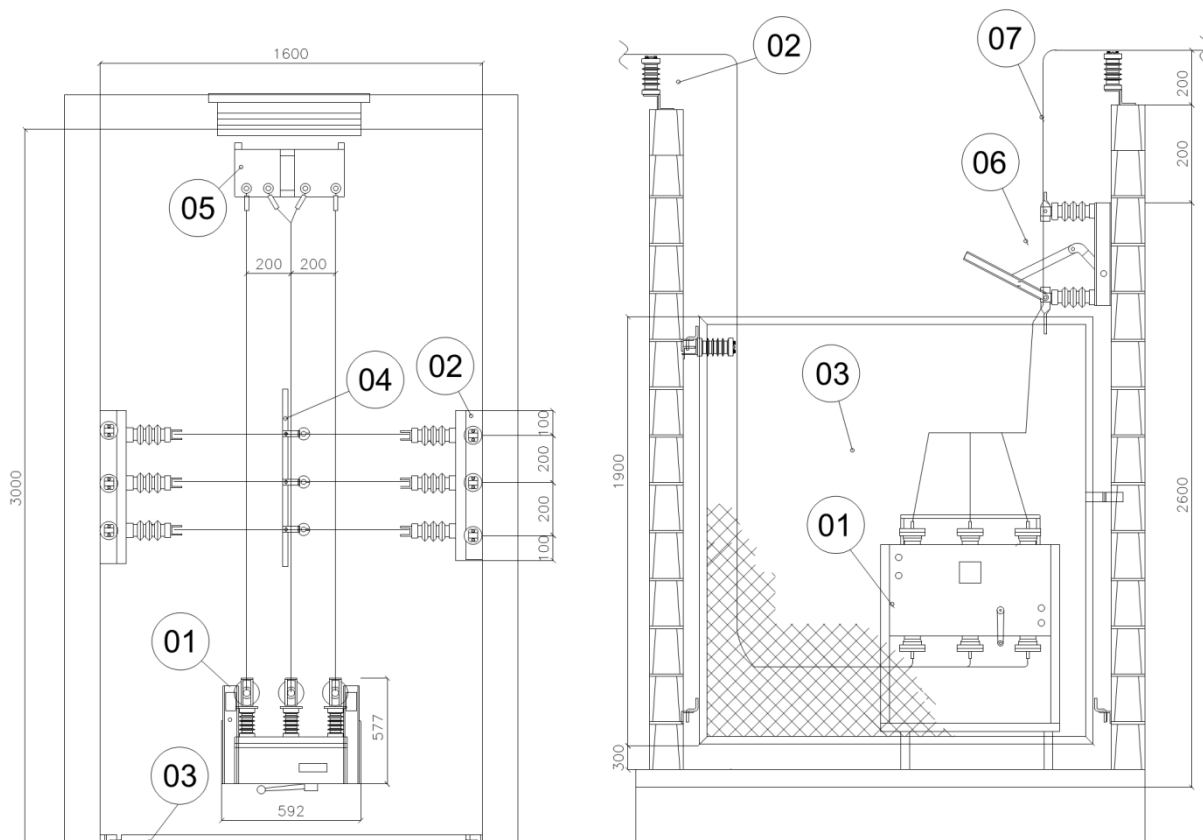
Para determinação do espaço físico mínimo deste cubículo, aplica-se a equação (3.17), com os dados do disjuntor de potência dimensionado (DJG-01), obtidos na tabela 4.7.

$$\text{Largura} = 592 \text{ mm}$$

$$D_{pp} = D_d + 1,0 = 0,59 + 1,00 = 1,59 \text{ m}$$

Portanto, a dimensão do cubículo de proteção será de 1,60 metros de largura por 3,00 metros de profundidade, que esta de acordo com as dimensões mínimas estabelecidas pela concessionária local. A Figura 4.7 ilustra o arranjo físico do cubículo de proteção, com todas as medidas em milímetro.

Figura 4.7 – Arranjo físico do cubículo de proteção.



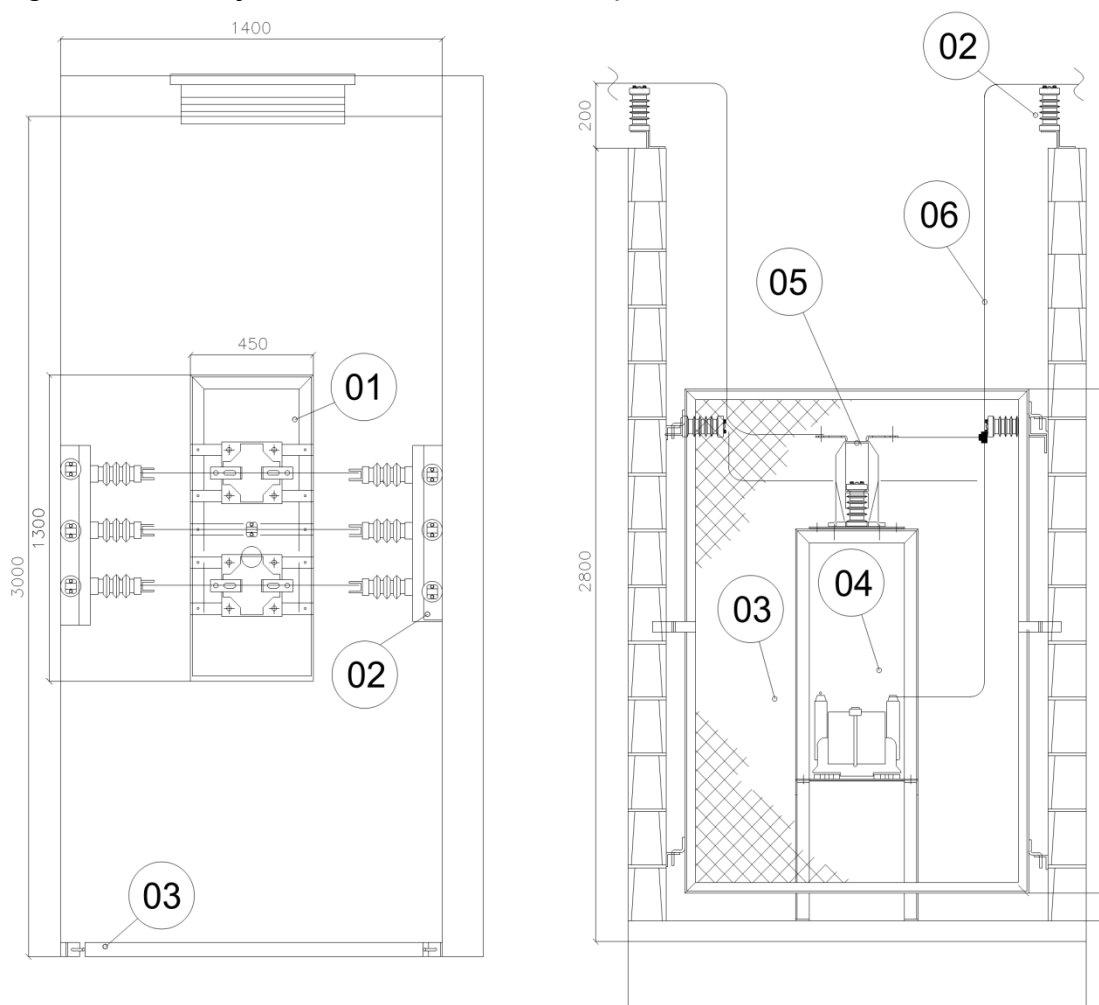
ITEM	DESCRIÇÃO
01	DISJUNTOR DE POTÊNCIA - 630A/250MVA
02	ISOLADORES DO TIPO PEDESTAL - CLASSE 15kV
03	GRADE DE TELA METÁLICA
04	TRANSFORMADORES DE CORRENTE - CLASSE 15kV
05	TRANSFORMADORES DE POTENCIAL - CLASSE 15kV
06	CHAVE SECCIONADORA - CLASSE 15kV
07	VERGALHÃO DE COBRE 25mm ²

4.2.6 Cubículo de medição

Para determinação do espaço físico mínimo do cubículo medição, é necessário conhecer a forma de instalação dos transformadores de corrente e de potencial. No caso da concessionária CPFL, os transformadores de medição são instalados em prateleiras metálicas, com as dimensões já estabelecidas, apresentando uma altura de 1,40 metros, profundidade de 1,30 metros e largura de 0,45 metros (CPFL, 2013).

De acordo com os padrões da concessionária local, o cubículo de medição deve ter uma dimensão de 1,40 metros de largura por 3,00 metros de profundidade. A Figura 4.8 ilustra o arranjo físico do cubículo de medição, com todas as medidas em milímetro.

Figura 4.8 – Arranjo físico do cubículo de medição.

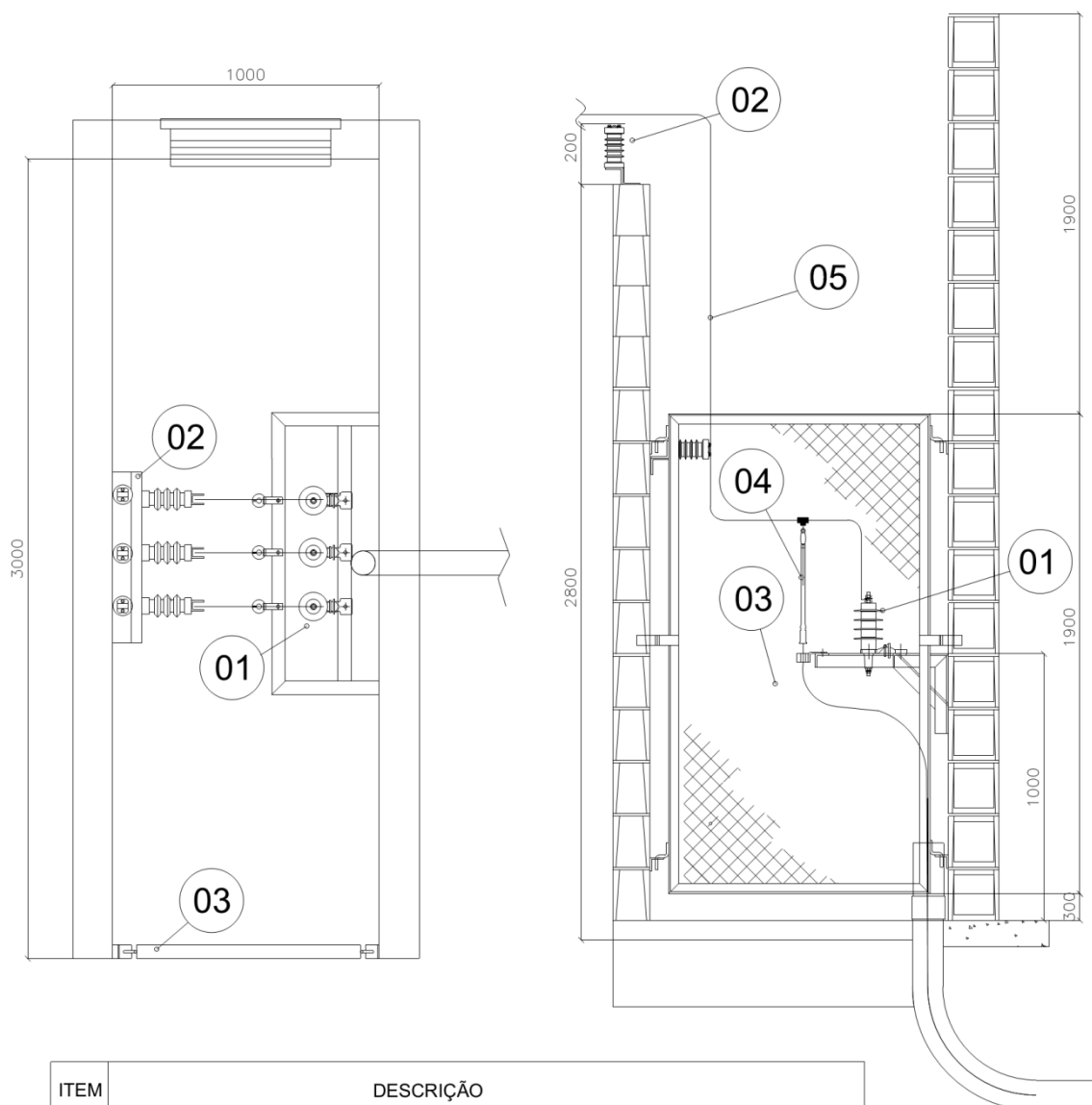


ITEM	DESCRIÇÃO
01	PRATELEIRA DE TRANSFORMADORES DE CORRENTE E POTENCIAL
02	ISOLADORES DO TIPO PEDESTAL - CLASSE 15kV
03	GRADE DE TELA METÁLICA
04	TRANSFORMADORES DE CORRENTE (CONCESS.)
05	TRANSFORMADORES DE POTENCIAL (CONCESS.)
06	VERGALHÃO DE COBRE 25mm ²

4.2.7 Cubículo de entrada

Conforme com os padrões da concessionária local, o cubículo de entrada deverá ter uma dimensão de 1,00 metros de largura por 3,00 metros de profundidade. A Figura 4.9 ilustra o arranjo físico do cubículo de entrada, com todas as medidas em milímetro.

Figura 4.9 – Arranjo físico do cubículo de entrada.



ITEM	DESCRIÇÃO
01	PARÁ-RAIOS POLIMÉRICO 12kV/10kA COM DISPARO AUTOMÁTICO - CLASSE 15KV
02	ISOLADORES DO TIPO PEDESTAL - CLASSE 15KV
03	GRADE DE TELA METÁLICA
04	MUFLA - CLASSE 15kV
05	VERGALHÃO DE COBRE 25mm ²

4.2.8 Arranjo Final da Subestação

Conforme os resultados obtidos nos itens anteriores e de acordo com a norma da concessionária local, obtêm-se o arranjo geral da subestação a ser instalada, ilustrado nas Figuras 4.10 e 4.11.

Figura 4.10 – Arranjo físico da subestação.

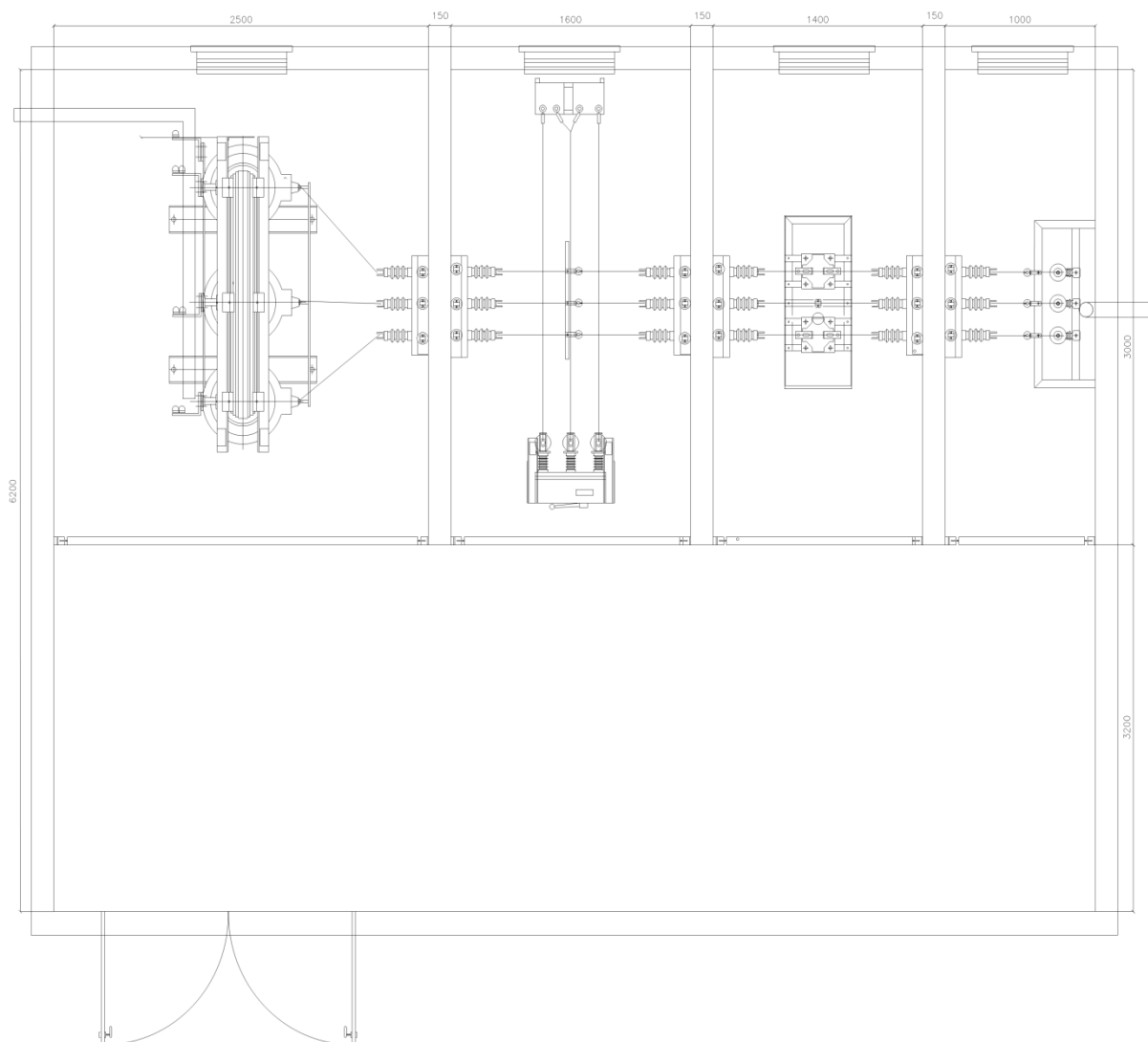
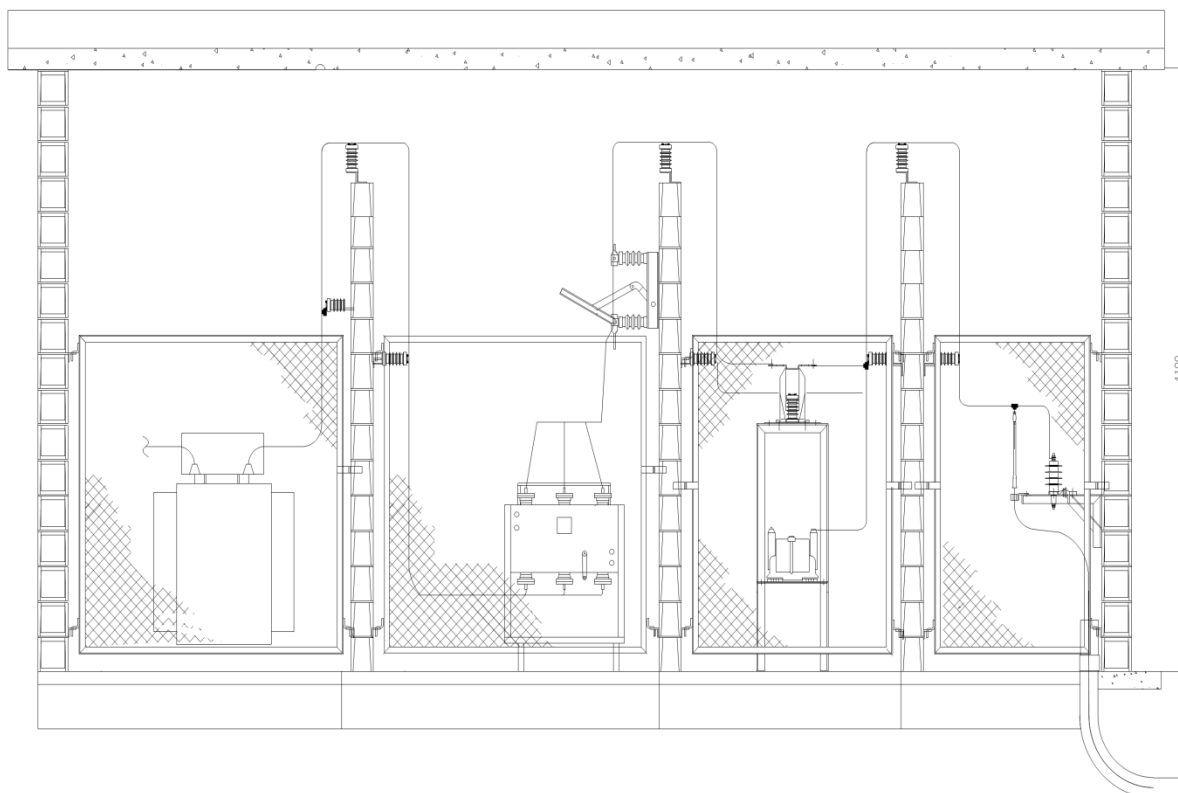


Figura 4.11 – Arranjo físico da subestação vista lateral.



Portanto, a subestação dimensionada terá uma dimensão total de 7,1 m de comprimento por 6,2 m de largura, com uma altura de 4,1 m. Apresentará 4 (quatro) cubículos, sendo estes:

- Cubículo de entrada, destinado a receber os alimentadores de média tensão do ponto da concessionária até a mufla de entrada da subestação;
- Cubículo de medição, de uso exclusivo da concessionária, que tem a finalidade de medição da energia elétrica, onde se localiza os equipamentos de medição, tais como: transformadores de corrente e de potencial;
- Cubículo de proteção, destinado à instalação dos dispositivos de proteção da rede primária, tais como disjuntor de potência, chave seccionadora e relés de proteção;
- Cubículo de transformação, local onde é instalado o transformador de potência, que alimentará todo o complexo.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As subestações são de grande importância, são elas que desempenham o papel de transmitir, receber e adequar os níveis de tensão e corrente da energia elétrica para a sua utilização.

Por isso é necessário conhecer alguns conceitos importantes para realização de um projeto elétrico básico de uma subestação abrigada de classe 15 kV, tais como o funcionamento e o entendimento de cada equipamento que compõem a subestação.

A partir da escolha onde será alocada a subestação é necessário verificar se a empresa se enquadra no tipo de fornecimento de energia elétrica, em relação ao nível de tensão disponível e as normas regentes da concessionária local.

Nota-se que após o enquadramento do fornecimento de energia, é preciso fazer um estudo nas cargas instaladas que serão alimentadas pela subestação, tais como o estudo de demanda, que é um fator importante para o dimensionamento do transformador de potência e o estudo de fator de potência, que tem a finalidade de verificar se é necessário a instalação de banco de capacitores.

Após definido os estudos de cargas se têm a parte mais importante do projeto, que é o dimensionamento e a especificação dos equipamentos elétricos. O dimensionamento correto de um equipamento garante a confiabilidade de transmissão da energia elétrica e garante a segurança dos seres humanos.

Também se percebe que na literatura sobre o assunto de projetos de subestações, embora existente, não se explicita de forma didática as etapas que relacionam o dimensionamento e os critérios de escolha dos equipamentos. Por essa razão é necessário se ter um roteiro básico e um procedimento para elaboração do projeto. Também existem softwares comerciais que auxiliam no dimensionamento e especificação dos equipamentos.

Ao longo do trabalho foram citadas várias normas, que são fundamentais cumpri-las para qualquer tipo de projeto. No caso em particular de um projeto de uma subestação são usadas duas em especial: a NBR 14039 – Instalações elétricas de média tensão de 1,0 kV a 36,2 kV (ABNT, 2005) e a NBR 5410 - Instalações elétricas de baixa tensão (ABNT, 2004).

Por fim, foi mostrado a elaboração de um projeto básico de uma subestação abrigada de classe 15 kV, de forma a criar um roteiro básico de auxiliar como dimensionar e especificar os equipamentos elétricos que compõem uma subestação, como seu arranjo físico.

REFERÊNCIAS

ABB. **A evolução das subestções.** Disponível em: <<http://www.abb.com.br/cawp/db0003db002698/008c8dd09ef21a20c12576e40047e7a3.aspx>>
.Acesso em: 11 abr. 2013a.

ABB. **Aplicativo para projeto DocWin.** Disponível em: <<http://www.abb.com.br/>>. Acesso em: 21 jun. 2013.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução normativa nº 414.** Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/biblioteca/downloads/livros/REN_414_2010_atual_REN_499_2012.pdf>. Acesso em: 28 abr. 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT Catálogo.** Disponível em: <<http://www.abntcatalogo.com.br/>>. Acesso em: 20 abr. 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5034:** Buchas para Tensões alternadas superiores a 1 kV. Rio de Janeiro, 1989.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5410:** Instalações Elétricas de Baixa Tensão. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5419** Proteção de estruturas contra descargas atmosféricas. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6855:** Transformadores de Potencial Indutivos. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6856:** Transformador de Corrente. Rio de Janeiro, 1993.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8669:** Dispositivos Fusíveis Limitadores de Corrente – Especificação. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10020**: Transformadores de Potencial de Tensão Máxima de 15 kV, 24,2 kV e 36,2 kV. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10295**: Transformadores de Potência Secos. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14039**: Instalações Elétricas de Média Tensão de 1 kV a 36,2 kV. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR IEC 60439-1**. Conjuntos com ensaio de tipo totalmente testados (TTA) e conjuntos com ensaio de tipo parcialmente testado (PTTA). Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR IEC 60947-2**. Disjuntores. Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR IEC 62271-102**. Seccionadores e Chaves de Aterramento. Rio de Janeiro, 2001.

COMISSÃO TRIPARTITE PERMANENTE DA NEGOCIAÇÃO DO SETOR ELÉTRICO NO ESTADO DE SP. **Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade**. Disponível em: <<http://www.fundacentro.gov.br/dominios/ctn/anexos/cdNr10/Manuais/Manual%20NR-10.pdf>>. Acesso em: 15 mar. 2013.

COMPANHIA PAULISTA DE FORÇA E LUZ. GED 2856 – **Fornecimento em tensão primária 15 kV, 25 kV e 34,5 kV**. Disponível em: <<http://www.cpfl.com.br/LinkClick.aspx?fileticket=syPN4jIR7Yc%3d&tabid=1417&mid=2064>>. Acesso em 20 jun. 2013.

COMTRAFO. **Comtrafo Transformadores**. Disponível em: <<http://www.comtrafo.com.br>>. Acesso em 01 ago. 2013.

CREDER, Hélio. **Instalações elétricas**. 15ª ed. Rio de Janeiro. LTC, 2007. 428p.

DIAGNERG. **NR-10 histórico.** Disponível em: <http://www.diagnerg.com.br/?kurole=nr10>>. Acesso em: 21 abr. 2013.

DICEL. **Dicel Engenharia.** Disponível em: <http://www.dicelrs.com.br/>>. Acesso em: 01 ago. 2013.

FUNDAÇÃO COGE. **Relatório nº acidentados com arco elétrico por ano.** Disponível em: http://www.funcoge.org.br/csst/relat2010/pdf/br/ste/arco_ano.pdf> Acesso em: 21 abr. 2013.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 60364:** Low-voltage electrical installations. New York 2006.

LIMA FILHO, D. L. **Projeto de instalações elétricas prediais.** 6ª ed. São Paulo: Ed. Érica, 2001. 254p.

MAMEDE FILHO, João. **Instalações elétricas industriais.** 8ª ed. Rio de Janeiro: LTC. 2011. 666p.

MAMEDE FILHO, João. **Manual de equipamentos elétricos.** 3ª ed. Rio de Janeiro: LTC. 2005. 774p.

MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO. **NR 10 – Segurança em instalações e serviços em eletricidade.** Disponível em: http://portal.mte.gov.br/data/files/8A7C812D308E216601310641F67629F4/nr_10.pdf>. Acesso em 21 abr. 2013.

O SETOR ELÉTRICO. **Evolução das subestações.** Disponível em: <http://www.osetoreletrico.com.br/web/component/content/article/58-artigos-e-materias-relacionadas/98-evolucao-das-subestacoes.html>>. Acesso em: 11 abr. 2013a.

O SETOR ELÉTRICO. **Relés e contadores.** Disponível em: <http://www.osetoreletrico.com.br/web/a-revista/edicoes/169-reles-e-contadores.html>>. Acesso em: 12 abr. 2013b.

O SETOR ELÉTRICO. **Redes de comunicação em subestações de energia elétrica – Norma IEC 61850.** Disponível em: <http://www.osetoreletrico.com.br/web/documentos/fasciculos/Ed54_fasc_automacao_subestacoes_capVII.pdf>. Acesso em: 19 abr. 2013c.

PRESSMAT. **Quadro e Painéis para Eletroeletrônica.** Disponível em: <<http://www.pressmat.com.br/>>. Acesso em 01 ago. 2013.

PRYSMIAN. **Prysmian Group.** Disponível em: <<http://www.prysmian.com.br/>>. Acesso em 01 ago. 2013.

RAYCHEN. **RAYCHEN.** Disponível em: <http://www.comtel.com.br/files/catalogo_raychem.pdf>. Acesso em 01 ago. 2013.

SCHAK. **SCHAK.** Disponível em: <<http://www.schak.com.br/>>. Acesso em 01 ago. 2013

SCHNEIDER ELECTRIC. **SCHNEIDER ELECTRIC** Disponível em: <<http://www.schneider-electric.com.br/>>. Acesso em 01 ago. 2013

SCHNEIDER ELECTRIC. **Aplicativo para projeto Ecodial Advance Calculation.** Disponível em: <<http://www.schneider-electric.com/download/br/bz/results/0/0/1559950-Ecodial-Advanced-Calculation-current/0/>>. Acesso em: 22 mar. 2013.

SCHNEIDER ELECTRIC. **Aplicativo para projeto ID-Spec Large.** Disponível em: <http://www.schneider-electric.com.br/sites/brasil/pt/produtos-servicos/distribuicao-electrica/oferta-de-produtos/apresentacao-gama.page?c_filepath=/templatedata/Offer_Presentation/3_Range_Datasheet/data/pt/local/electrical_distribution/id_spec_large.xml#>. Acesso em: 22 mar. 2013.

SHOAIB KHAN. **Industrial power systems.** 1ª ed. NW. CRC, 2007. 486p.

SIEMENS. **Aplicativo para projeto Simaris.** Disponível em: <<http://www.automation.siemens.com/mcms/electrical-design-software/pt/Pages/software-para-projetos-eletricos.aspx>>. Acesso em: 21 jun. 2013.

TARGET. Um histórico da normalização das instalações elétricas de média tensão.

Disponível em: < http://www.target.com.br/portal_new/Home.aspx?pp=27&c=2139>. Acesso em: 21 abr. 2013.