

IFMG
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS
GERAIS – CAMPUS FORMIGA
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
GABRIEL SANTIAGO RAIMUNDO RODRIGUES

DESENVOLVIMENTO, PROJETO E EXECUÇÃO DE CABINE DE SUBESTAÇÃO
EM MÉDIA TENSÃO

FORMIGA – MG
2017

GABRIEL SANTIAGO RAIMUNDO RODRIGUES

**DESENVOLVIMENTO, PROJETO E EXECUÇÃO DE CABINE DE SUBESTAÇÃO
EM MÉDIA TENSÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica
do Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia de Minas Gerais como requisito
para obtenção do título de bacharel em
Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Msc. Gustavo Lobato
Campos

FORMIGA – MG

2017

GABRIEL SANTIAGO RAIMUNDO RODRIGUES

**DESENVOLVIMENTO, PROJETO E EXECUÇÃO DE CABINE DE SUBESTAÇÃO
EM MÉDIA TENSÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica
do Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia de Minas Gerais como requisito
para obtenção do título de bacharel em
Engenharia Elétrica.

Avaliado em: ____ de _____ de ____.

Nota: _____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Msc. Gustavo Lobato Campos - Orientador

Prof. Msc. Mariana Guimarães dos Santos - Membro

Prof. Msc. Patrick Santos de Oliveira – Membro

**FORMIGA
2017**

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho, primeiramente a Deus por me iluminar e me dar paciência em todas as horas. Aos meus pais pelo espírito de luta e garra. A minha irmã Gabriele pela irmandade. À minha namorada Luisa pelo companheirismo. Aos meus avós, em especial ao Vovô José Vieira, pelas orações. A todos os amigos e companheiros de jornada por nunca me abandonarem nesta caminhada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço inicialmente a oportunidade de emprego oferecida pelo meu pai José Ricardo Rodrigues e luta para construção da empresa ENGGIMAX-Engenharia e Serviços EIRELI – ME, sem isto este trabalho não poderia ser feito. Agradeço à empresa Contrusol, em especial ao engenheiro José Martins, ao Itamar e ao Willis, pelo investimento em nosso trabalho, acreditando em nossa capacidade de realização das obras. A toda equipe de funcionários da ENGGIMAX sem eles esses projetos nunca sairiam do papel.

Agradecimento à Fábrica de Refrigerantes Mantiqueira, especialmente ao Márcio, por nos dar total liberdade e auxílio na fábrica e pela construção de uma amizade. Ao meu orientador Gustavo Lobato que mesmo em um período complicado me auxiliou e me deu os puxões de orelha necessários para a confecção deste trabalho. A todos meus professores que colocaram um tijolinho na minha parede de conhecimento. Aos meus familiares e amigos eu deixo aqui meu obrigado pelo apoio. Por fim, um agradecimento às minhas 5 mulheres, Mamãe Cláudia, Irmã Gabriele, Namorada Luisa e Vovós Antônia e Lúcia.

“A Felicidade só é completa quando compartilhada”

RESUMO

A energia elétrica, nos dias de hoje, é indispensável para a vida humana devido à contínua evolução tecnológica, perceptível, por exemplo: com o aumento da automação industrial, interligação de redes de conhecimento, dentre vários outros. As unidades industriais assim como os grandes aglomerados comerciais (como *shoppings centers* e hipermercados) demandam grande quantidade da energia produzida em nosso país, e desta forma, optam, muitas vezes, pela compra de energia elétrica em média/alta tensão.

Esta escolha é válida pelo seu menor custo quando comparado ao fornecimento em baixa tensão. A diferença monetária justifica-se pelo fluxo de potência em média/alta tensão demandar menor valor de corrente elétrica, diminuindo a secção transversal do condutor de transmissão, e assim reduzindo a estrutura necessária das torres de transmissão para suporte dos cabos. Além disto, o sistema de média/alta tensão demanda menor manutenção e menos materiais e equipamentos que o sistema em baixa tensão. Assim, esta economia é passada para o consumidor em forma de valores tarifários de energia inferiores.

Porém, para o fornecimento de energia elétrica em Média Tensão é necessário à unidade consumidora respeitar alguns requisitos estabelecidos pela concessionária de energia, no caso de Minas Gerais pela Companhia de Energética de Minas Gerais (CEMIG). Dentre os requisitos, está à construção de um dos sete tipos de Subestação de Energia Elétrica em Média Tensão (CEMIG, 2013). Os diferentes modelos são oriundos de diferenças associadas, entre outras, ao tamanho, número de baias, potência instalada e entrada de energia.

Assim, este trabalho tem por objetivo apresentar a construção de uma subestação de energia tipo 2 – Medição, Proteção com ou sem Transformação (CEMIG, 2013). Será assim apresentado no decorrer desta monografia um estudo de caso, destacando etapas relativas ao desenvolvimento, projeto e execução da referida obra na cidade de Itamonte – MG, na Fábrica de Refrigerantes Mantiqueira, subestação tipo 2 – Medição, Proteção com transformação interna de 1MVA.

Palavras chave: Fornecimento de Energia Elétrica, Subestação, Média Tensão, CEMIG®.

ABSTRACT

Nowadays, electrical energy is indispensable for human life due to continuous technological evolution, noticeable, for instance, on the increase of industrial automation systems, interconnection of knowledge networks, among others. Industrial units, as well as other large commercial conglomerates (such as shopping malls and supermarkets) demand a large proportion of the energy generated in our country. Thus, they often choose to purchase electrical energy in medium/high voltage.

This choice is worth for its low cost (when compared to low voltage supply). The monetary difference is justified because the medium/ high voltage power flow requires less electrical current, reducing the cross-section of the transmission conductor, and, thus, reducing the structure of the transmission towers for cable supporting. In addition, the medium/high voltage system requires less maintenance and less materials and equipment than the system at low voltage. This economy is passed on to the customers in forms of lower energy tariff values.

However, for the supply of electrical energy in medium voltage, it is necessary that the consumer unit complies with certain requirements proposed by the energy concessionaire, in the case of Minas Gerais, by the *Companhia de Energética de Minas Gerais* (CEMIG®). Among these requirements, there is the construction of one of the seven types of medium voltage electric substation (CEMIG, 2013). The different models come from differences associated to the size, number of bays, installed power and energy input, among others.

Thus, this paper aims to present the construction of a type 2 power substation - Measurement, Protection With or Without Transformation (CEMIG, 2013). A case study is presented through this monograph, highlighting stages related to the design, development and execution of this project in the city of Itamonte-MG, in the soft drinks factory plant *Mantiqueira*, type 2 substation - Measurement, Protection With Internal Transformation of 1MVA.

Keywords: Electrical Energy Supply, Substation, Medium Voltage, CEMIG®.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Capacidade de condução de corrente em Ámpères para cabos unipolares justapostos ou tripolares ao ar livre com condutor de cobre, com tensão de operação menor ou igual a 8,7/15kV. temperatura do condutor de 90C, temperatura ambiente 30C.....	19
Tabela 2 - Classificação dos Consumidores de Energia em Alta Tensão.	20
Tabela 3 - Tarifa Convencional CEMIG.....	21
Tabela 4 - Tabela Tarifária Horo Sazonal Azul CEMIG A2	22
Tabela 5 - Tabela Tarifária Horo Sazonal Azul CEMIG A3	23
Tabela 6 - Tabela Tarifária Horo Sazonal Azul CEMIG A3a	23
Tabela 7 - Tabela Tarifária Horo Sazonal Azul CEMIG A4	24
Tabela 8 - Tabela Tarifária Horo Sazonal Azul CEMIG AS	24
Tabela 9 - Tabela Tarifária Horo Sazonal Verde CEMIG A3a.....	25
Tabela 10 - Tabela Tarifária Horo Sazonal Verde CEMIG A4	25
Tabela 11 - Tabela Tarifária Horo Sazonal Azul CEMIG AS	26
Tabela 12 - Dimensionamento de Transformador de Corrente (TC) para tensão de fornecimento de 13,8kV.	42
Tabela 13 - Dimensionamento de Transformador de Potencial (TP) para tensão de fornecimento de 13,8kV.	43
Tabela 14 - Parâmetros Mínimos de Disjuntores de Média Tensão.....	46
Tabela 15 – Parâmetros Mínimos de Para-raios.	47
Tabela 16 – Impedância percentual do transformador.	51
Tabela 17 - Dimensionamento de barramentos de média tensão.	57
Tabela 18 - Afastamento mínimo entre os barramentos de média tensão.	57
Tabela 19 – Demanda Individual Motores trifásicos 220V	65
Tabela 20 - Levantamento de Carga Fábrica de Refrigerantes Mantiqueira	68
Tabela 21 – Dimensões das Grades de Proteção.....	72
Tabela 22 – Dados de Parametrização do Relé.....	89
Tabela 23 – Lista de Material básica para confecção de subestação.	92

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Subestação nº1: Transformador instalado em poste de seção circular 10x600 ou 11x600.....	27
Figura 2 - Subestação Tipo 2 - Medição, Proteção com ou sem Transformação.....	28
Figura 3 - Subestação tipo 3 - Cubículo de medição a 3 elementos	29
Figura 4 - Subestação tipo 4 - Subestação blindada de portas abertas	29
Figura 5 - Subestação tipo 5 - Medição, proteção e transformação	30
Figura 6 - Subestação tipo 6 - Subestação blindada instalada em carreta móvel	31
Figura 7 - Subestação tipo 1 e 2 compartilhada.....	31
Figura 8- Fluxograma de ligação de Subestação	33
Figura 9 - Fluxograma de compra de energia	34
Figura 10 - Subestação em alvenaria.....	39
Figura 11 - Transformador de Corrente de Medição para tensão de 13,8kV	42
Figura 12 - Transformador de Potencial de Medição para tensão de 13,8kV	43
Figura 13 - Mesa Suporte para TCs e TPs de Medição	44
Figura 14 - Caixa de Medição CM-4.....	45
Figura 15 - Disjuntor de média tensão	46
Figura 16 - Chave seccionadora tripolar com fusível	48
Figura 17 - Relé de proteção Pextron® 7104T.....	49
Figura 18 - Caixa de Proteção com relé microprocessado.....	49
Figura 19 - Circuito de comando de abertura do disjuntor através de comando de relé microprocessado.	52
Figura 20 - Coordenograma de Proteção	54
Figura 21 - Transformador de potencial com isolamento a óleo.....	55
Figura 22 - Transformador de potencial a seco com isolamento de epóxi	55
Figura 23 - Bucha de passagem de porcelana com isolamento de 15kV.....	58
Figura 24 - Eletroduto de aço de imersão a quente.	59
Figura 25 - Eletroduto espiralado corrugado flexível em polietileno de alta densidade	60
Figura 26 - Eletroduto de PVC rígido	60
Figura 27 - Placa de Advertência	61
Figura 28 - Tampa Caixa de Inspeção	62
Figura 29 - Diagrama Unifilar Fábrica de Refrigerantes Mantiqueira	69

Figura 30 - Planta baixa Subestação Fábrica de Refrigerantes Mantiqueira	70
Figura 31 – Corte de planta, vista de parede inferior.	71
Figura 32 - Vista frontal de grade de proteção	71
Figura 33 - Vista em corte AA e detalhe A da grade de proteção	72
Figura 34 - Corte de planta BB – Baia de medição.	73
Figura 35 - Suporte de TCs e TPs para medição, com todas as tubulações	74
Figura 36 - Fixação de Suporte de TCs e TPs no piso da subestação	74
Figura 37 - Execução de baia de proteção de Subestação	75
Figura 38 - Instalação de caixa de medição CM-4	76
Figura 39 - Corte de Planta – Vista da baia de proteção pela entrada.....	77
Figura 40- Corte de Planta – Vista de parede Superior.....	77
Figura 41 - Baia de proteção, disjuntor de média tensão	78
Figura 42 - Alavanca de acionamento de chave seccionadora tripolar da baia de proteção	79
Figura 43 - Corte de planta DD - baia de transformação.....	79
Figura 44 - Baia de transformação	80
Figura 45 - Corte de Planta – Parte exterior da subestação parede direita ou entrada da subestação	81
Figura 46 - Malha de aterramento subestação tipo 2 Fábrica de Refrigerantes Mantiqueira.....	82
Figura 47 - Detalhe de haste de aterramento.....	82
Figura 48 - Poste e entrada de serviço, figuras complementares.	84
Figura 49 - Caixa de Inspeção – Formato, profundidade e tampa	84
Figura 50 - Diagrama de Ligação Relé microprocessado PEXTRON 7104 T	87
Figura 51 - Coordenograma de Proteção – Relé PREXTON 7104 T, Demanda 400W, Curva Extremamente Inversa.....	90
Figura 52 - Localização da Cabine de Subestação na Fábrica.	93

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 Justificativa.....	15
1.2 Objetivo	16
1.3 Estrutura.....	17
2 REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1 Sistema Elétrico de Potência	18
2.2 Classificação Tarifária	20
2.3 Subestações de Energia	26
2.4 – Processo de ligação de Subestação	32
2.5 Mercado livre de energia.....	34
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	37
3.1 Responsabilidade Técnica	37
3.2 Construções Cíveis e Alvenaria.....	38
3.3 Aquisição dos Materiais	39
3.4 Aterramento	40
3.5 Medição de Energia Consumida	41
3.6 Equipamentos de Proteção	45
3.7 Transformadores de carga	55
3.8 Equipamentos e materiais de ligação.....	56
3.9 Ramal de entrada.....	58
3.10 Responsabilidades adicionais	60
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	63
4.1 Construção da Subestação na cidade de Itamonte-MG na Fábrica de Refrigerantes Mantiqueira.	63

4.1.1 Levantamento de Carga	63
4.1.2 Diagrama Unifilar	69
4.1.3 Planta da Instalação da Subestação	69
4.1.4 Aterramento	81
4.1.5 Entrada de Serviço	83
4.1.6 Proteção	85
4.1.7 Informações Adicionais.....	91
5 CONCLUSÃO.....	94
5.1 Considerações Finais.....	94
5.2 Trabalhos Futuros	95
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	96

1 INTRODUÇÃO

O Sistema Elétrico de Potência é composto pelos sistemas de geração, transmissão e distribuição. Segundo o Banco de Informação de Geração, BIG, da Agência Nacional de Energia Elétrica, ANEEL, na data de 24/03/2017, o Brasil possuía cerca de 151,6 GW (ANEEL, 2017) de geração de potência instalada, excluindo a quantidade de energia comprada dos países vizinhos. Todo sistema de geração é conectado às fontes de consumo pelos segmentos de transporte (transmissão e distribuição).

O ramo industrial brasileiro e aglomerados comerciais demandam cerca de 57% da energia elétrica do país (EPE, 2014). Com o aumento do preço da energia, devido à seca dos últimos anos, e eventual expansão industrial ou comercial, buscando reduzir gastos, estes consumidores de energia elétrica vêm optando pela compra de energia em tensões mais elevadas, média ou alta tensão.

Porém, para ser optante deste modelo de compra e fornecimento, o consumidor deve atender as normas técnicas da concessionária de energia em que está interligado e possuir um valor mínimo de demanda estipulado pela mesma. Em Minas Gerais, a regulamentação é feita pela concessionária de energia elétrica, CEMIG. Embora, o consumidor esteja conectado ao segmento de transporte de energia elétrica pertencente a CEMIG, este não será obrigado a comprar energia diretamente dela e ser optante do mercado livre de energia. Comércio este possível devido à interligação de todo sistema elétrico brasileiro, neste caso o consumidor pagará a concessionária somente tarifa referente ao transporte da energia elétrica e mesmo comprando energia de outro fornecedor deve respeitar às normas vigentes da concessionária na qual está conectado.

A CEMIG em seu acervo técnico possui normas de distribuição sendo a ND 5.3 - Fornecimento de Energia Elétrica em Média Tensão Rede de Distribuição Aérea ou Subterrânea, a norma vigente para o fornecimento de energia nestes moldes. Esta norma é consonante com todas as normas de seu acervo técnico: com as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT, NBR 5410 – Instalações Elétricas de Baixa tensão, NBR 14039 – Instalações Elétricas de Média Tensão; com as Resoluções 395/2009, 414/2010 e 479/2012 da ANEEL, assim

como as últimas resoluções, atos ou normativas como a número 057 de 1995 do Conselho Regional de Engenharia e Agronomia de Minas Gerais, CREA-MG.

A norma ND 5.3 expõe critérios para o fornecimento de energia elétrica em rede trifásica de média tensão, com valores nominais de 13,8kV; 22kV e 34,5kV, para demandas superiores a 75kW independentemente da localização ou atividade econômica. Dentre os parâmetros expostos há a construção de uma Subestação de Energia Elétrica, tema que será apresentado neste trabalho.

Subestação de Energia Elétrica é o ponto de ligação entre a rede de transmissão/distribuição da concessionária de energia e o consumidor (BARROS e GREDA, 2013). Sendo assim, fica definida, pela CEMIG®, como subestação a instalação compreendendo o ramal de entrada, poste ou pontalete particular, caixas, dispositivo de proteção, aterramento e ferragens, de responsabilidade do consumidor, preparada de forma a permitir a ligação da unidade consumidora a rede de transporte da concessionária (CEMIG, 2013).

Será apresentado neste texto um estudo de caso de compra de energia elétrica em média tensão pertencente ao ramo industrial do estado de Minas Gerais, empregando como solução técnica a construção de uma subestação. Os critérios de dimensionamento e parametrização dos materiais, ferramentas e equipamentos dos setores de medição e proteção de uma Subestação de Energia Elétrica serão apresentados e discutidos.

O estudo de caso apresentado refere-se a Fábrica de Refrigerantes Mantiqueira, localizada no município de Itamonte-MG. Devido a expansão do mercado de refrigerantes, a demanda contratada será inicialmente de 400kVA com expansão futura de até 1MVA, com tensão de fornecimento de 13,8kV e tipo de subestação nomeada em norma da CEMIG® como subestação nº2 – Medição, Proteção com ou sem Transformação. Sendo o transformador instalado dentro da subestação com potência nominal de 1MVA a óleo isolante possuindo tensão primária de 13,8kV e secundária de 127/220V, para alimentar toda fábrica.

1.1 Justificativa

Embora exista no curso de Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Minas Gerais – IFMG Campus Formiga, várias disciplinas para estudo do sistema elétrico de potência como: Distribuição de Energia Elétrica, Transmissão de Energia Elétrica,

Sistemas Elétricos de Potência, Instalações Elétricas Industriais, dentre outras, o desenvolvimento de projetos e execução de obras de subestação em média tensão é pouco apresentado justificado pela gama de assuntos contido nas disciplinas e o tempo escasso no semestre letivo.

Devido à economia na transmissão de energia em tensão mais elevada, suas tarifas são mais baratas. Por exemplo, um consumidor com recebimento e faturamento em tensão com valores entre 2,3kV e 25kV paga, em bandeira verde R\$ 0,33604 por kWh consumido (tarifa convencional CEMIG em 2017). Em comparação um consumidor que possui recebimento e faturamento de energia em baixa tensão, em bandeira verde, paga R\$ 0,53122 por kWh consumido (tarifa convencional CEMIG em 2017).

Em busca desta economia e de uma energia mais “limpa”, livre de harmônicos (por possuir próprio transformador de potencial) e demais impurezas da rede, empresas e grandes aglomerados comerciais têm optado cada vez mais pelo recebimento de energia elétrica em média/alta tensão. Porém, faltam profissionais capacitados para desenvolver projetos e executar os serviços necessários para adequação do consumidor ao recebimento desta energia.

Assim, desbravando novos desafios se deu a escolha deste tema de trabalho propondo novos conteúdos e conhecimento a comunidade acadêmica.

1.2 Objetivo

Este trabalho tem como um de seus objetivos fomentar a curiosidade de alunos e profissionais ao tema de subestações, tarifas de energia e mercado de energia livre, apresentando conceitos que possam elucidar o leitor sobre o assunto. Assim, aumentando o número de profissionais capazes de desenvolver projetos e executar serviços na área.

Por fim, esta monografia tem por objetivo apresentar um estudo de caso real com a apresentação de desenvolvimento, projeto e instalação de subestação de média tensão realizados pela empresa ENGGIMAX Engenharia e Serviços Eireli ME em parceria com a empresa Construsol Construções Elétrica & Civil Ltda.

1.3 Estrutura

Todo o trabalho tem como foco o fornecimento de energia elétrica em média tensão. São apresentadas no Capítulo 2 referências bibliográficas justificando o fornecimento de energia elétrica em tensões elevadas, tarifas de consumo conforme a classe de tensão do consumidor, caracterização de uma subestação com recebimento de energia em média tensão e seus exemplos, processos administrativos de montagem e fornecimento de energia elétrica e por fim é apresentado o mercado de energia livre. No Capítulo 3 são apresentadas especificações e ferramentas necessárias para a confecção de uma subestação de energia em média tensão. No Capítulo 4 está presente o resultado do trabalho desenvolvido, ou seja, detalhes da subestação construída, sendo apresentados cálculos, circuitos e figuras da mesma. Por último, no Capítulo 5, conclui-se o trabalho, com apresentação de possíveis trabalhos futuros.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Antes de iniciar qualquer trabalho, em qualquer área de atuação é extremamente importante ao profissional conhecer as normas técnicas e os trabalhos teóricos para se embasar e possuir amplo conhecimento sobre o assunto. Assim, neste capítulo apresentaremos referências bibliográficas sobre subestação de energia elétrica em média tensão que ajudarão ao leitor elucidar sobre o assunto.

2.1 Sistema Elétrico de Potência

O Sistema Elétrico de Potência, SEP, é o setor responsável pela geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. No Brasil o sistema é composto predominantemente, por usinas geradoras hidroelétricas, além de possuir, em pequena porção, geração eólica, térmica, nuclear, solar entre outras. É função do SEP transportar fluxos de potência às cargas (consumidores) a ele ligadas (KAGAN, OLIVEIRA e ROBBA, 2005). Esta potência fornecida a seus clientes é quantificada pela tensão de fornecimento multiplicada pela corrente necessária para suprir a demanda de consumo, conforme Equação 1 (BARROS e GEDRA, 2013):

$$S = V \times I \quad (1)$$

Onde: S é o valor nominal de potência total transmitido, em volt-ampere[VA];

V é o valor nominal de tensão da rede ou sistema, em volt[V];

I é o valor nominal de corrente transmitida pelo sistema, em ampere[A].

A potência S entregue às cargas possui valor fixo, com os valores de tensão V e corrente I variáveis. Buscando reduzir custos e perdas de energia ao longo da transmissão de energia elétrica, opta-se por elevar os valores de tensão e assim, consequentemente, os valores de corrente são reduzidos. Tal ação é justificada, pois, quanto maiores os valores de corrente maior será a bitola do condutor de energia, conforme Tabela 1(NBR 14039, 2005). Além disto, uma ampliação na bitola do condutor acarreta um maior peso do material promovendo um maior esforço das torres de transmissão sendo necessário reforço nas mesmas (BARROS e GEDRA, 2013).

Tabela 1 - Capacidade de condução de corrente em Âmperes para cabos unipolares justapostos ou tripolares ao ar livre com condutor de cobre, com tensão de operação menor ou igual a 8,7/15kV. temperatura do condutor de 90C, temperatura ambiente 30C.

Seção [mm²]	Corrente máxima transportada [A]	Seção [mm²]	Corrente máxima transportada [A]
10	87	185	510
16	114	240	602
25	150	300	687
35	183	400	796
50	221	500	907
70	275	630	1027
95	337	800	1148
120	390	1000	1265
150	445		

Fonte: NBR 14039, 2005

Embora o aumento da bitola A do condutor diminua a resistência R do mesmo para uma distância fixa L , conforme Equação 2 (SCHMIDT, 2013), a perda de potência P devido ao efeito Joule sofre maior efeito pela corrente elétrica I por ele transportado, devido ao valor de corrente ser elevado ao quadrado, conforme Equação 3 (BARRO e GEDRA, 2013).

$$R = \rho \times \frac{L}{A} \quad (2)$$

Onde: R é o valor de resistência elétrica do condutor de transmissão, em Ohm[Ω];

ρ é o valor de resistividade elétrica do material do condutor de transmissão, em Ohm metro[Ω.m];

L é o valor da distância percorrida pelo condutor, em metros[m];

A é o valor da seção de circular do condutor, em metro quadrado[m²].

$$P = R \times I^2 \quad (3)$$

Onde: P é o valor de potência dissipada por efeito Joule, em Watts[W];

R é o valor de resistência elétrica do cabo de transmissão, em Ohm[Ω];

I é o valor de corrente transmitida pelo sistema, em ampere[A].

Segundo a NR10 - Norma Regulamentadora nº10 do Ministério do Trabalho e Emprego, todo valor de tensão superior a 1kV é considerado alta tensão. Segundo a ABNT, as tensões de valores inferiores a 1kV são consideradas baixa tensão; as tensões com valores compreendidos entre 1kV e 36,2kV são denominadas média tensão, valores superiores a 36,2kV são considerados alta tensão. Assim, é importante destacar, que este trabalho seguirá a nomenclatura da ABNT.

2.2 Classificação Tarifária

Segundo a ANEEL (2010), em sua resolução 414 de 09/09/2010, os consumidores de energia elétrica são classificados conforme o valor de tensão por eles recebido. Os consumidores então são subdivididos entre os que recebem energia em baixa tensão (grupo B) e os que recebem energia em alta tensão (grupo A). O grupo de consumidores de energia de alta tensão são novamente divididos, conforme pode ser verificado Tabela 2.

Tabela 2 - Classificação dos Consumidores de Energia em Alta Tensão.

Grupo de Consumidor	Tensão de Fornecimento
A1	Igual ou superior a 230kV
A2	Entre 88kV e 138kV
A3	De 69kV
A3a	Entre 30kV e 44kV
A4	Entre 2,3kV e 25kV
AS	Subterrânea inferior a 2,3kV

Fonte: BARROS e GEDRA, 2013.

Para a tarifação do consumo de energia elétrica leva-se em conta a qual grupo de consumidor o cliente pertence. Além disto, o consumidor pode optar por três tipos de tarifação distintos entre si pelos valores cobrados em período de ponta, fora de ponta, para períodos úmidos e secos e os reflexos de variação dos níveis de tensão durante o dia.

Conforme definido pela ANEEL (2013), período de ponta é um horário determinado pela concessionária de energia, na qual o consumidor está conectado, composto por três horas consecutivas do dia entre 17:00 e 22:00hs, válido apenas em dias úteis (BARROS e GEDRA, 2013). Para Minas Geras o horário de ponta é definido pela CEMIG® entre o período de 18:00 as 21:00hs. Define-se ainda o

período úmido pelos meses compreendidos entre dezembro e abril, e período seco pelos meses compreendidos entre maio e novembro, sendo que estes períodos também influenciam nos valores de tarifação (CEMIG, 2012). Em períodos úmidos o custo de produção de energia é menor, sendo assim, a tarifa de energia é mais barata. Já nos períodos secos, a falta de chuvas acarreta em uma insuficiência de produção de energia elétrica por meio de hidroelétricas, sendo então necessário o acionamento de usinas termoeletricas, o que impacta em um custo de produção de energia elétrica mais elevado (BARROS e GEDRA, 2013). As Tabelas de 3 a 11 apresentam os tipos de classes de tarifação e tarifas fornecidas pelas CEMIG e enquadradas nas bandeiras de tarifação:

- Tarifa Convencional: Está tarifa não possui diferenciação entre os preços devido a horários ou períodos do ano, assim não permite que o consumidor perceba os reflexos decorrentes do horário de utilização de energia elétrica.

Tabela 3 - Tarifa Convencional CEMIG

A3a 30kV a 44kV	Demanda	Bandeira Verde - R\$/kWh	Bandeira Amarela - R\$/kWh	Bandeira Vermelha 1 - R\$/kWh	Bandeira Vermelha 2 - R\$/kWh
Demanda	31,86	-	-	-	-
Consumo	-	0,33604	0,35104	0,36604	0,38104
A4 2,3kV a 25kV	Demanda	Bandeira Verde - R\$/kWh	Bandeira Amarela - R\$/kWh	Bandeira Vermelha 1 - R\$/kWh	Bandeira Vermelha 2 - R\$/kWh
Demanda	31,86	-	-	-	-
Consumo	-	0,33604	0,35104	0,36604	0,38104
As Subterrâneo	Demanda	Bandeira Verde - R\$/kWh	Bandeira Amarela - R\$/kWh	Bandeira Vermelha 1 - R\$/kWh	Bandeira Vermelha 2 - R\$/kWh
Demanda	51,39	-	-	-	-
Consumo	-	0,35501	0,37001	0,38501	0,40001

Fonte: CEMIG, (2017)

- Tarifa Horo Sazonal Azul: Possui valores estabelecidos de demanda e consumo de energia em ponta e fora de ponta. Os valores de energia em horários de ponta são mais caros que em horários fora de ponta. Além disto, em caso de ultrapassagem de demanda contratada paga-se o valor mais caro

de demanda. São escolhas tarifárias obrigatórias de consumidores dos grupos A1, A2 e A3. Porém, a CEMIG não dispõe de fornecimento de energia em tensões de 230kV ou superior não atendendo os consumidores do grupo A1.

Tabela 4 - Tabela Tarifária Horo Sazonal Azul CEMIG A2

A2 88kV a 138kV	Demand a	Bandeira Verde R\$/kWh	Bandeira Amarela R\$/kWh	Bandeira Vermelha 1 R\$/kWh	Bandeira Vermelha 2 R\$/kWh
Demanda Ponta	6,21	-	-	-	-
Demanda Fora Fora de ponta	2,06	-	-	-	-
Demanda Ultrap. Ponta	12,42	-	-	-	-
Demanda Ultrap. Fora de Ponta	4,12	-	-	-	-
Consumo Ponta Período Seco	-	0,44242	0,45742	0,47242	0,48742
Consumo Ponta Período Úmido	-	0,44242	0,45742	0,47242	0,48742
Consumo F. Ponta Período Seco	-	0,31328	0,32828	0,34328	0,35828
Consumo F. Ponta Período Úmido	-	0,31328	0,32828	0,34328	0,35828

Fonte: CEMIG, (2017)

Tabela 5 - Tabela Tarifária Horo Sazonal Azul CEMIG A3

A3 69kV	Demand a	Bandeira Verde R\$/kWh	Bandeira Amarela R\$/kWh	Bandeira Vermelha 1 R\$/kWh	Bandeira Vermelha 2 R\$/kWh
Demanda Ponta	18,64	-	-	-	-
Demanda Fora Fora de ponta	5,26	-	-	-	-
Demanda Ultrap. Ponta	37,28	-	-	-	-
Demanda Ultrap. Fora de Ponta	10,52	-	-	-	-
Consumo Ponta Período Seco	-	0,45350	0,46850	0,48350	0,49850
Consumo Ponta Período Úmido	-	0,45350	0,46850	0,48350	0,49850
Consumo F. Ponta Período Seco	-	0,32436	0,33936	0,35436	0,36936
Consumo F. Ponta Período Úmido	-	0,32436	0,33936	0,35436	0,36936

Fonte: CEMIG, (2017)

Tabela 6 - Tabela Tarifária Horo Sazonal Azul CEMIG A3a

A3a 30kV a 44kV	Demand a	Bandeira Verde R\$/kWh	Bandeira Amarela R\$/kWh	Bandeira Vermelha 1 R\$/kWh	Bandeira Vermelha 2 R\$/kWh
Demanda Ponta	31,67	-	-	-	-
Demanda Fora Fora de ponta	9,06	-	-	-	-
Demanda Ultrap. Ponta	63,34	-	-	-	-
Demanda Ultrap. Fora de Ponta	18,12	-	-	-	-
Consumo Ponta Período Seco	-	0,45442	0,46942	0,48442	0,49942
Consumo Ponta Período Úmido	-	0,45442	0,46942	0,48442	0,49942
Consumo F. Ponta Período Seco	-	0,32528	0,34028	0,35528	0,37028
Consumo F. Ponta Período Úmido	-	0,32528	0,34028	0,35528	0,37028

Fonte: CEMIG, (2017)

Tabela 7 - Tabela Tarifária Horo Sazonal Azul CEMIG A4

A4 2,3kV a 25kV	Demand a	Bandeira Verde R\$/kWh	Bandeira Amarela R\$/kWh	Bandeira Vermelha 1 R\$/kWh	Bandeira Vermelha 2 R\$/kWh
Demanda Ponta	31,67	-	-	-	-
Demanda Fora Fora de ponta	9,06	-	-	-	-
Demanda Ultrap. Ponta	63,34	-	-	-	-
Demanda Ultrap. Fora de Ponta	18,12	-	-	-	-
Consumo Ponta Período Seco	-	0,45442	0,46942	0,48442	0,49942
Consumo Ponta Período Úmido	-	0,45442	0,46942	0,48442	0,49942
Consumo F. Ponta Período Seco	-	0,32528	0,34028	0,35528	0,37028
Consumo F. Ponta Período Úmido	-	0,32528	0,34028	0,35528	0,37028

Fonte: CEMIG, (2017)

Tabela 8 - Tabela Tarifária Horo Sazonal Azul CEMIG AS

AS Subterrâneo	Demand a	Bandeira Verde R\$/kWh	Bandeira Amarela R\$/kWh	Bandeira Vermelha 1 R\$/kWh	Bandeira Vermelha 2 R\$/kWh
Demanda Ponta	41,39	-	-	-	-
Demanda Fora Fora de ponta	21,59	-	-	-	-
Demanda Ultrap. Ponta	82,78	-	-	-	-
Demanda Ultrap. Fora de Ponta	43,18	-	-	-	-
Consumo Ponta Período Seco	-	0,47339	0,48839	0,50339	0,51839
Consumo Ponta Período Úmido	-	0,47339	0,48839	0,50339	0,51839
Consumo F. Ponta Período Seco	-	0,34425	0,35925	0,37425	0,38925
Consumo F. Ponta Período Úmido	-	0,34425	0,35925	0,37425	0,38925

Fonte: CEMIG, (2017)

- Tarifa Horo Sazonal Verde: Neste tipo de tarifação o consumidor possui um valor de demanda fixo, não variável durante os períodos de ponta e fora de ponta. Porém os valores de tarifa de consumo variam nos períodos de ponta e fora de ponta, sendo a tarifa em período de ponta mais cara. Embora possua valor de demanda fixo, em caso de ultrapassagem de demanda contratada paga-se tarifa mais cara. Porém a CEMIG possui distribuição para essa tarifa a partir da tensão A3a.

Tabela 9 - Tabela Tarifária Horo Sazonal Verde CEMIG A3a

A3a 30kV a 44kV	Demand a	Bandeira Verde R\$/kWh	Bandeira Amarela R\$/kWh	Bandeira Vermelha 1 R\$/kWh	Bandeira Vermelha 2 R\$/kWh
Demanda	9,06	-	-	-	-
Demanda Ultrap. Fora de ponta	18,12	-	-	-	-
Consumo Ponta Período Seco	-	1,22163	1,23663	1,25163	1,26663
Consumo Ponta Período Úmido	-	1,22163	1,23663	1,25163	1,26663
Consumo F. Ponta Período Seco	-	0,32528	0,34028	0,35528	0,37028
Consumo F. Ponta Período Úmido	-	0,32528	0,34028	0,35528	0,37028

Fonte: CEMIG, (2017)

Tabela 10 - Tabela Tarifária Horo Sazonal Verde CEMIG A4

A4 2,3kV a 25kV	Demand a	Bandeira Verde R\$/kWh	Bandeira Amarela R\$/kWh	Bandeira Vermelha 1 R\$/kWh	Bandeira Vermelha 2 R\$/kWh
Demanda	9,06	-	-	-	-
Demanda Ultrap. Fora de ponta	18,12	-	-	-	-
Consumo Ponta Período Seco	-	1,22163	1,23663	1,25163	1,26663
Consumo Ponta Período Úmido	-	1,22163	1,23663	1,25163	1,26663
Consumo F. Ponta Período Seco	-	0,32528	0,34028	0,35528	0,37028
Consumo F. Ponta Período Úmido	-	0,32528	0,34028	0,35528	0,37028

Fonte: CEMIG, (2017)

Tabela 11 - Tabela Tarifária Horo Sazonal Azul CEMIG AS

AS Subterrâneo	Demand a	Bandeira Verde R\$/kWh	Bandeira Amarela R\$/kWh	Bandeira Vermelha 1 R\$/kWh	Bandeira Vermelha 2 R\$/kWh
Demanda	21,59	-	-	-	-
Demanda Ultrap. Fora de ponta	43,18	-	-	-	-
Consumo Ponta Período Seco	-	1,47610	1,49110	1,50610	1,52110
Consumo Ponta Período Úmido	-	1,47610	1,49110	1,50610	1,52110
Consumo F. Ponta Período Seco	-	0,34425	0,35925	0,37425	0,38925
Consumo F. Ponta Período Úmido	-	0,34425	0,35925	0,37425	0,38925

Fonte: CEMIG, (2017)

2.3 Subestações de Energia

Conforme Tabelas apresentadas na seção anterior, fica evidente que quanto maior a tensão de recebimento, menor a tarifação da energia elétrica consumida. Isto se justifica devido ao maior investimento de infraestrutura feito pela concessionária de energia, conforme já mencionado. Além disto, o sistema em baixa tensão requer requisitos de construção, manutenção e operação que o sistema em alta tensão não necessita (BARROS e GEDRA, 2013).

Contudo, para o consumidor receber energia, em alta/média tensão, o mesmo deve respeitar alguns requisitos. Segundo a ANEEL (2010), em sua resolução 414, caso o consumidor possua demanda entre 75kW e 2500kW o mesmo deve receber energia elétrica em tensão inferior a 69kV. Em caso de demanda superior a 2500kW o consumidor deve receber energia elétrica em tensão igual ou superior a 69kV. Porém, caso o consumidor com demanda superior a 2500kW deseja se conectar a uma tensão inferior a 69kV fica a cargo da concessionária avaliar a disponibilidade da rede e aceitar ou não a conexão (ANEEL, 2010).

É fato também que o consumidor que optar pelo recebimento de energia elétrica em média/alta tensão deve arcar com os custos da infraestrutura de recebimento e transformação dessa energia. Sendo necessária a construção de uma subestação.

Uma subestação é o ponto de conexão, entre o consumidor e a concessionária de energia, onde se recebe a energia em média/alta tensão, composto por equipamentos e componentes responsáveis pela medição, proteção e transformação de energia (CEMIG, 2013). São documentados vários tipos e configurações de subestação, e neste trabalho serão apresentadas as configurações expostas na norma ND 5.3 da CEMIG. Especialmente as de média tensão com tensão de fornecimento fase-fase trifásico em delta de 13,8; 22 e 34,5kV (a tensão 34,5kV também pode ser distribuída em estrela) com frequência de 60Hz.

- Subestação nº1: Transformador instalado em poste de seção circular 10x600 ou 11x600, conforme Figura 1 (WORLD ELÉTRICA, 2016).

Este tipo de subestação é empregada para o fornecimento de demanda em até 300kW, usando apenas um transformador com tensão primária de 13,8; 22 ou 34,5kV e tensão secundária de 440/225V ou inferior. A medição de energia consumida acontecerá nos 3 elementos de fase e em baixa tensão. A proteção será feita por disjuntor em caixa moldada ou por disjuntor termo magnético ajustável (CEMIG, 2013).

Figura 1 - Subestação nº1: Transformador instalado em poste de seção circular 10x600 ou 11x600



Fonte: WORLD ELÉTRICA, (2016)

- Subestação nº2: Medição e proteção com ou sem transformação, conforme Figura 2 (SILVA e CARVALHO, 2016).

Cubículo em alvenaria, usado para qualquer valor de demanda superior a 75kW. A medição de energia consumida é feita a 3 elementos de fase e em média tensão. A proteção é feita por disjuntores e relés de proteção e em média tensão. A transformação, se houver, acontecerá logo após o cubículo de proteção. Se não houver transformação em seu interior, cabos de alta/média tensão (três cabo fase e um cabo neutro), saem da subestação até o transformador (es) (BARROS e GEDRA, 2013).

Figura 2 - Subestação Tipo 2 - Medição, Proteção com ou sem Transformação



Fonte: SILVA e CARVALHO, (2016)

- Subestação nº3: Cubículo de medição a 3 elementos, conforme Figura 3 (BVK ENGENHARIA, 2016).

Este tipo de fornecimento de energia é restrito a ligação de obras e fornecimento às empresas concessionárias de energia. A medição é feita em média tensão e a proteção acontece individualmente a cada transformador (CEMIG, 2013).

Figura 3 - Subestação tipo 3 - Cubículo de medição a 3 elementos



Fonte: BVK ENGENHARIA, (2016)

- Subestação nº4: Subestação blindada, conforme Figura 4 (ATS ENGENHARIA, 2016).

Cubículo metálico compartimentado, com dispositivos de alívio de pressão e ventilação natural ou forçada, instalação abrigada ou ao tempo. Medição e proteção acontecem a 3 elementos de fase e em média tensão (AES ELETROPAULO, 2011).

Figura 4 - Subestação tipo 4 - Subestação blindada de portas abertas



Fonte: ATS ENGENHARIA, (2016)

- Subestação nº5: Medição, Proteção e Transformação, conforme Figura 5 (SUBESTAÇÃO, 2016).

Cubículo em alvenaria ou metálico, com demanda de energia limitada entre 75 e 300kVA. Proteção e medição acontecem à média tensão e obrigatoriamente o transformador é instalado no interior da subestação (CEMIG, 2013).

Figura 5 - Subestação tipo 5 - Medição, proteção e transformação



Fonte: SUBESTAÇÃO.COM (2016)

- Subestação nº6: Subestação blindada instalada em carreta móvel (subestação móvel), conforme Figura 6 (BLOG CEMIG, 2016).

Subestação móvel é constituída por cubículo blindado com transformador em seu interior, construída na caçamba do caminhão ou carreta preparada. Possui demanda máxima de 500kVA. Não possui medição quando usada para instalações provisórias, a fatura é feita conforme contrato com a CEMIG®. Deve possuir proteção conforme subestação nº4 (CEMIG, 2013).

Figura 6 - Subestação tipo 6 - Subestação blindada instalada em carreta móvel



Fonte: BLOG CEMIG, (2016)

- Subestação nº1 e nº2 compartilhada, conforme Figura 7 (PROTEC PROJETOS, 2016).

Subestação construída quando um ou mais consumidores compartilham da entrada de energia. Não podendo ser construída no interior de nenhuma das propriedades e o local de construção deve ser de comum acesso entre os consumidores. Deve ser feita por pessoas jurídicas. Todos os consumidores devem possuir demanda superior a 75kW. A proteção e a medição de energia devem ser como as subestações nº1 e nº2 (CEMIG, 2013).

Figura 7 - Subestação tipo 1 e 2 compartilhada



Fonte: PROTEC PROJETOS, (2016)

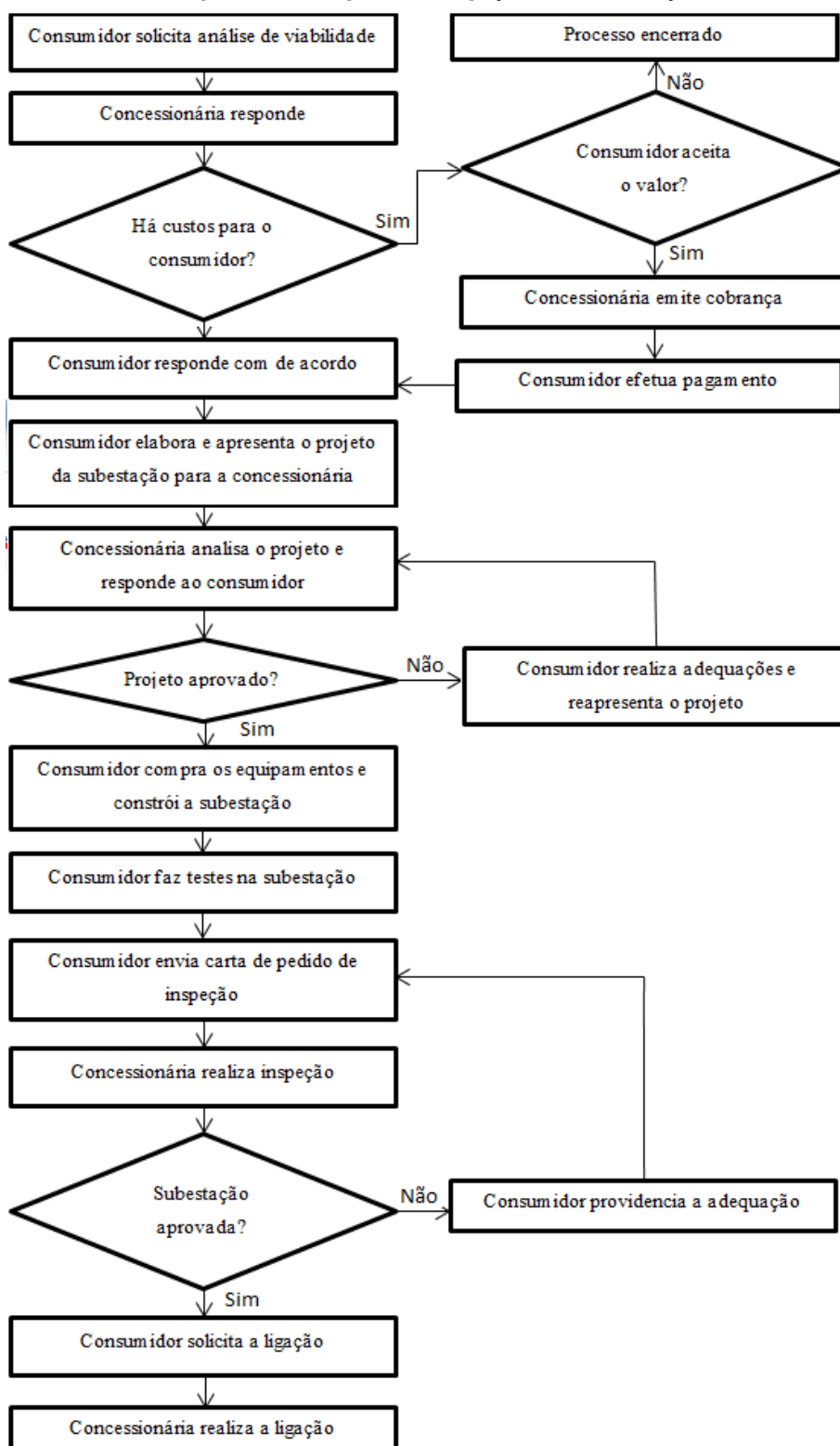
2.4 – Processo de ligação de Subestação

Para ligação de uma subestação de energia elétrica existem processos burocráticos que devem ser cumpridos. Cada concessionária de energia possui seu procedimento de ligação, porém, em geral segue do seguinte modo. O consumidor deve pedir a concessionária um estudo de viabilidade da construção de uma subestação, neste estudo o consumidor terá ciência se a rede ao qual ele irá se interligar terá ou não condições de suportar a carga demandada por ele. Em caso negativo a concessionária deverá fazer a adequação de rede, sendo que esta adequação poderá gerar custos ao consumidor (BARROS e GEDRA, 2013). Quando a concessionária escolhida é a CEMIG®, constatada a necessidade de adequação de rede, o consumidor arca com os custos e doa à concessionária toda a construção recebendo desta doação créditos futuros em faturas posteriores (CEMIG, 2013). Existem regras que definem a participação financeira do consumidor e estão estabelecidas na Resolução 250 de 2007 da ANEEL. Porém se o consumidor não aceitar arcar com estes custos o processo será encerrado.

Em caso positivo de viabilidade ou assumida a responsabilidade do consumidor em arcar os custos, gera-se então um contrato entre a concessionária de energia e o consumidor. A partir disto o consumidor elabora o projeto de subestação e apresenta à concessionária de energia. O projeto deve ser confeccionado por um responsável técnico capacitado, habilitado e registrado no CREA, órgão que expedirá uma Anotação de Responsabilidade Técnica, ART, que será anexada ao projeto. O projeto pode ser aprovado ou reprovado para fazer adequações necessárias. Com o projeto aprovado o consumidor deve obter os materiais e equipamentos necessários para a construção da subestação (BARROS e GEDRA, 2013).

Após a construção da subestação o cliente faz um pedido de inspeção a concessionária, podendo ser reprovada ou não. Em caso de reprova, o consumidor deverá providenciar as adequações necessárias e pedir nova vistoria. Em caso de aprovação o consumidor solicita a ligação e a subestação é finalmente ligada. Na Figura 8 (BARROS e GEDRA, 2013) apresenta-se um fluxograma resumido de todo processo.

Figura 8- Fluxograma de ligação de Subestação



Fonte: BARROS E GREDA (2013)

Destaca-se que toda instalação deve estar de acordo com as normas da concessionária de energia e com as normas da ABNT referente a instalações de

tensão mais elevada. As concessionárias se resguardam o direito de vistoriar as instalações em baixa tensão do consumidor, verificando conformidade com a NBR 5410 – Instalações elétricas em baixa tensão, além de vistoriar a carga instalada declarada em projeto.

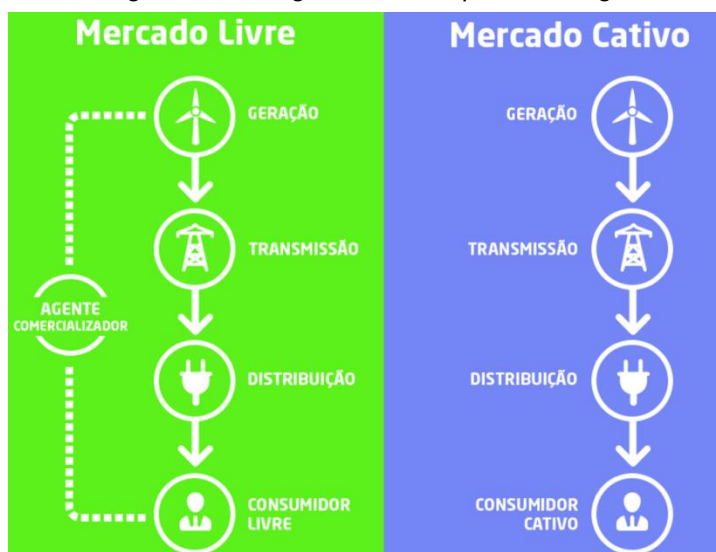
Neste contexto, este trabalho terá como meta abordar o processo burocrático, construção e alimentação de uma subestações nº2 para atendimento de uma fábrica de refrigerantes, seguindo as normas da CEMIG® ND - 5.3.

2.5 Mercado livre de energia

Embora conectado à rede da concessionária de energia o consumidor não é obrigado a comprar energia direto da concessionária. Para optar por este tipo de compra o consumidor deve entrar no mercado de energia livre.

O mercado livre de energia foi instaurado pelo então presidente Fernando Henrique Cardoso em 1995 visando criar maior concorrência e competitividade entre as empresas brasileiras, com o passar dos anos a legislação do mercado de energia livre sofreu modificações, porém continua sendo controlado pela ANEEL. Neste mercado o consumidor de energia elétrica poderá escolher seu fornecedor por toda extensão do Sistema Interligado Nacional, SIN (CELESC, 2016). O fluxograma presente na Figura 9 (COMERC, 2016) exemplifica bem o mercado livre de energia.

Figura 9 - Fluxograma de compra de energia



Fonte: COMERC (2016)

Ainda para entender sobre o mercado de energia livre é de grande valia conhecer alguns conceitos, como os apresentados a seguir:

- ACR - Ambiente de Contratação Regular ou Mercado Cativo

Na ACR, os agentes de distribuição (CEMIG, AES Eletropaulo, Ligth, etc.), através de leilões públicos promovidos pela ANEEL (Poder Cedente) e operacionalizada pela Câmara de Comercialização de Energia Elétrica, CCEE, adquirem a energia para atender seu mercado de consumidores cativos, ou seja, os consumidores compram a energia de concessionárias de distribuição ao qual estão ligados. Sendo assim o consumidor cativo não possui direito de negociação de preços, ficando sujeito às tarifas de fornecimento estabelecidas pela ANEEL. Pagando apenas uma fatura de energia no mês constando os serviços de distribuição e geração de energia (COMERC, 2016).

- ACL - Ambiente de Contratação Livre ou Mercado Livre de Energia

Neste ambiente o consumidor negocia diretamente com os geradores de energia elétrica ou com os agentes comercializadores. A barganha é feita de forma bilateral e com condições livres de negociação de prazo, preço, demanda. Assim o consumidor paga a fatura mensal pela transmissão e distribuição a concessionária de energia a qual está ligada, tarifa regulada, e uma segunda fatura referente a compra de energia, com o preço negociado (COMERC, 2016).

A CEMIG, devido ao mercado de energia livre se subdividiu em duas, a CEMIG Geração responsável pela compra de energia em pregões e a CEMIG Transmissão e Distribuição responsável pela transmissão e distribuição de energia até a unidade consumidora. Portanto o consumidor cativo paga a concessionária em sua fatura mensal os dois tipos de serviço e o consumidor livre paga sua fatura mensal a concessionária apenas o serviço de transmissão e distribuição.

O mercado de energia livre possui grandes vantagens ao consumidor como listadas a seguir:

- Redução de custo devido à negociação direta de preço, prazo e demanda;

- Previsibilidade orçamentária comprando energia com antecedência e se esquivando das variações do mercado;
- Poder de decisão, podendo escolher seus fornecedores de energia;
- Sustentabilidade podendo o consumidor comprar energia de fontes renováveis.

No mercado livre de energia existem dois tipos de consumidores, a saber:

•Consumidor Especial:

Unidade ou conjunto de unidades consumidoras localizadas em área contínua ou de mesmo CNPJ, cuja carga seja maior ou igual a 500 kW (soma das demandas contratadas) e tensão mínima de 2,3 kV. O Consumidor Especial pode contratar apenas Energia Incentivada (CELESC, 2016).

•Consumidor livre:

Unidade consumidora com demanda contratada igual ou superior a 3MVA, tensão mínima de 69 kV, para data de conexão elétrica anterior a 08/07/1995, ou 2,3 kV, para ligação após julho/1995. O Consumidor Livre Convencional pode contratar Energia Convencional ou Incentivada (CELESC, 2016).

Importante lembrar que Energia Convencional é a energia produzida por termoeletricas e grandes hidroelétricas e a Energia Incentivada é gerada por de fontes renováveis, como energia de biomassa, energia eólica, energia solar ou por pequenas centrais hidroelétricas com potências limitadas a 30MW, sendo que estas produções recebem incentivos governamentais de modo a se tornarem mais competitivos, recebendo descontos (de 50%, 80% ou 100%) na tarifa do uso de distribuição (COMERC, 2016).

A inserção do consumidor, seja ele livre ou especial, ao mercado de energia livre deve ocorrer através de participações de pregões e o consumidor não pode estar com contrato vigente com a concessionária. A presença do consumidor ao pregão pode ser feita por ele, proprietário da unidade consumidora, ou por intermédio de agentes de comercialização. Todas as negociações e pregões são auditados pela ANEEL e fiscalizados pelo CCEE. A ANEEL possui legislação, atos e resoluções referentes ao mercado de energia livre e que devem ser seguidos pelos fornecedores, consumidores e agentes de comercialização (COMERC, 2016).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados tópicos importantes para desenvolvimento, projeto e instalação das subestações. Serão detalhadas as responsabilidades do fornecedor de energia (CEMIG) e do consumidor proprietário da unidade consumidora. Toda documentação aqui apresentada está fundamentada em Normas da CEMIG, Normas da ABNT, Resoluções do CREA-CONFEA, Normativas da ANEEL, assim como bibliografias relacionadas ao assunto.

3.1 Responsabilidade Técnica

Antes de iniciar qualquer processo burocrático perante a concessionária de energia, o consumidor deve procurar um profissional capacitado e habilitado em instalações de média/alta tensão, ou qualquer empresa especializada no assunto que possua em seu quadro de empregados um funcionário com essas especificações para a elaboração do projeto da subestação de energia. Este profissional deve ser um engenheiro eletricista em dia com suas obrigações com o CREA de sua região.

Após a contratação do profissional ou empresa especializada, este passa a ser o responsável técnico, RT, pelo projeto e posteriormente pela execução das instalações. Logo, o mesmo responde perante a concessionária de energia pelo consumidor, assumindo quaisquer consequências referentes ao projeto e execução no âmbito civil e criminal do sistema judiciário (AEAA, 2017).

Porém, antes da entrada do projeto para análise junto à concessionária de energia, primeiramente o responsável técnico deve tomar conhecimento da disponibilidade de carga da concessionária para a região do projeto. Caso exista a disponibilidade, o responsável pode submeter o projeto para análise. Entretanto, em caso negativo o consumidor deve aguardar a melhoria de rede da concessionária ou arcar com os custos de tal melhoria. Em seguida o engenheiro confecciona o projeto e envia à concessionária para análise. Destaca-se que a CEMIG possui prazo de 15 dias corridos ao contar da data do protocolo de entrada do projeto para análise do mesmo. Se for necessária qualquer adequação ao projeto a concessionária irá informar e o RT deverá adequar, até que o mesmo esteja conforme as normas da

concessionária. Qualquer alteração do projeto requer nova análise, para toda análise do projeto na CEMIG a mesma requer novamente o prazo de 15 dias corridos para a mesma. Com a aprovação do projeto o consumidor deve iniciar as instalações da subestação (CEMIG, 2013).

A aprovação do projeto é apenas uma das etapas necessárias para a ligação de energia elétrica para a nova unidade consumidora. Existem outras etapas e adequações que são necessárias, dentre elas a adequação da unidade consumidora nas normas de instalações elétricas da ABNT ou qualquer norma complementar, se caso necessário.

A execução do projeto já aprovado, pela concessionária CEMIG, deve ocorrer no prazo máximo de 12 meses após a aprovação. Findado este prazo e atestando a não execução, o projeto deve ser novamente analisado. Embora o projeto já tenha sido aprovado anteriormente, não há garantias de aprovação posterior, a concessionária analisará todo o projeto novamente, podendo requerer alterações (CEMIG, 2013).

3.2 Construções Cíveis e Alvenaria

Com o projeto aprovado o consumidor deve iniciar as construções cíveis e de alvenaria, necessárias para suportar os equipamentos elétricos fundamentais para o recebimento de energia em média/alta tensão.

A subestação deve ser construída dentro da propriedade do consumidor, a no máximo 5,00 metros da divisa com a via pública (passeio). Quando construída a divisa com o passeio não será permitida a instalação de portas e janelas nesta parede de divisa. Se a divisa de propriedade se der por paredes, esta não poderá ser usada, sendo necessária, por medida de segurança, a construção de nova parede. Em sua localização não podem passar tubulações de água, gás, vapor, esgoto, etc (CEMIG, 2013). A construção será feita em alvenaria conforme apresentada na Figura 10, exceto nos casos de subestação blindada, ou subestação tipo 1.

Figura 10 - Subestação em alvenaria.



Fonte: ACERVO PESSOAL

A subestação não poderá dar acesso a pessoas por janelas, sacadas, lajes ou qualquer tipo de acesso. A mínima distância destes locais deve ser de 1,70 metros na horizontal e 3,20 metros na vertical. Distância mínima que também deve ser respeitado à divisa de propriedades vizinhas (CEMIG, 2013).

Para a subestação tipo 1, será necessário somente o poste com capacidade de sustentar o transformador, cabeamento de entrada primária do transformador e o cabeamento de saída do transformador, este último passando no interior de eletroduto galvanizado a quente. Na subestação blindada não existe construção em alvenaria.

3.3 Aquisição dos Materiais

A lista básica de materiais deve estar anexada em projeto aprovado, por isto, é recomendado que a aquisição dos materiais seja feita após a aprovação do

projeto. Destaca-se que os TCs, TP's, o medidor de energia e qualquer equipamento ou material usado pela CEMIG para medição de energia elétrica consumida serão fornecidas pela concessionária, apresentando todos os laudos técnicos necessários para que os mesmos estejam aptos ao uso (CEMIG, 2013).

Os materiais e equipamentos adquiridos como: condutores, transformador de potência, eletrodutos, caixas, disjuntores, relé de proteção, chaves, ferragens, bucha de passagem, barramentos, hastes de aterramento, etc. somente serão aceitos pela CEMIG se constados no Manual do Consumidor nº11 – Materiais e Equipamentos Aprovados para Padrões de Entrada, em suas normas como ND 5.3, ou em catálogos da ANEEL, como por exemplo o anexo III. Entretanto, o material pode ser recusado, em inspeção, caso o mesmo tenha perdido suas características (CEMIG, 2017).

Em caso de aquisição de materiais que não constam em nenhuma biblioteca destas, e a sua instalação for necessária, o consumidor deve informar a CEMIG e a mesma emitir laudo e sua instalação deve ocorrer somente após autorização da concessionária.

3.4 Aterramento

Em uma instalação elétrica, o aterramento elétrico é realizado mediante um fio ligado diretamente a terra. O fio é conectado a corpos de metais, que estão cravados na terra. A finalidade do aterramento é desviar o excesso de corrente do equipamento elétrico, evitando sobrecarga. Geralmente o aterramento é feito em malha e conectados a corpos de metais chamados hastes ou eletrodos (NBR 14039, 2005).

Em subestações a malha deve ser construída pelo consumidor, percorrendo toda a subestação. A quantidade mínima de hastes é diretamente proporcional à demanda (CEMIG, 2013):

- Cargas menores ou iguais a 150kVA devem conter 4 hastes;
- Cargas entre 150kVA e menores que 500 kVA devem conter 9 hastes;
- Cargas maiores que 500kVA devem conter 12 hastes.

A malha deve ser feita com cabo de cobre nu, rígido, seção mínima de 50mm² sendo estes conectados as hastes cravadas no chão por conector ou soldas exotérmicas. As hastes devem ser constituídas de cobre ou de alumínio em forma

de canaleta enterradas com espaço mínimo do comprimento da haste: 240 mm. A cava ou buraco, onde se crava as hastes, deve ser revestido de tubo de PVC ou revestido por argamassa, protegida por tampa de concreto ou ferro fundido (CEMIG, 2015).

A resistência resultante da malha de aterramento deve possuir valor igual ou inferior a 10 ohms, valor verificado pela CEMIG na inspeção da subestação. Se a resistência resultante de aterramento possuir valor superior a 10 ohms, deve se aumentar a malha e o número de hastes de modo a obter o valor especificado (CEMIG, 2013).

Todos os materiais ou equipamentos como: carcaças de transformadores, portas, suportes metálicos, janelas ou quaisquer utensílios que possuam partes metálicas devem ser aterrados (NBR 14039, 2005), o condutor de aterramento deste procedimento poderá ser de bitola de 25mm². Além das partes metálicas o condutor neutro e a malha de terra dos cabos de entrada de energia elétrica deverão ser conectados a malha.

3.5 Medição de Energia Consumida

O setor de medição de energia elétrica é o setor de responsabilidade da concessionária de energia, gerando a fatura de conta de energia. Os equipamentos de medição, TCs, TPs, registradores eletrônicos e chaves de aferição somente serão ligados e instalados após a vistoria da CEMIG (CEMIG, 2013). A fim de estreitar uma boa relação entre o responsável técnico e a concessionária, geralmente, a instalação do suporte, a fixação e o barramento de ligação dos TCs e TPs com o ramal de entrada, é feito pela equipe de montagem do responsável técnico.

O dimensionamento do Transformador de Corrente (TC) de medição, ilustrado na Figura 11 (ZILMER, 2017), para a tensão de 13,8kV deve seguir a Tabela 12 (CEMIG, 2013).

Figura 11 - Transformador de Corrente de Medição para tensão de 13,8kV



Fonte: ZILMER (2017)

Tabela 12 - Dimensionamento de Transformador de Corrente (TC) para tensão de fornecimento de 13,8kV.

TRANSFORMADOR DE CORRENTE RELAÇÃO A A	DEMANDA KVA	
	FT = 1	FT =1,5
5 -- 5	ATÉ 100	ATÉ 100
10 --5	DE 100 A 200	DE 100 A 200
15 -- 5	DE 150 A 300	DE 150 A 400
20 -- 5	DE 200 A 400	DE 200 A 600
25 -- 5	DE 250 A 500	DE 250 A 750
30 -- 5	DE 300 A 600	DE 300 A 900
40 -- 5	DE 400 A 800	DE 400 A 1200
50 -- 5	DE 500 A 1000	DE 500 A 1500
75 -- 5	DE 750 A 1500	DE 750 A 2250
100 -- 5	DE 1000 A 2000	DE 1000 A 3000
150 -- 5	DE 1500 A 3000	DE 1500 A 4500
200 -- 5	DE 2000 A 4000	DE 2000 A 6000
300 -- 5	DE 3000 A 6000	DE 3000 A 9000
400 -- 5	DE 4000 A 8000	DE 4000 A 12000

Fonte: CEMIG (2013)

Já para o dimensionamento do Transformador de Potencial (TP) de medição, ilustrado na Figura 12 (ZILMER, 2017), deve-se usar a Tabela 13 (CEMIG, 2013).

Figura 12 - Transformador de Potencial de Medição para tensão de 13,8kV



Fonte: ZILMER (2017)

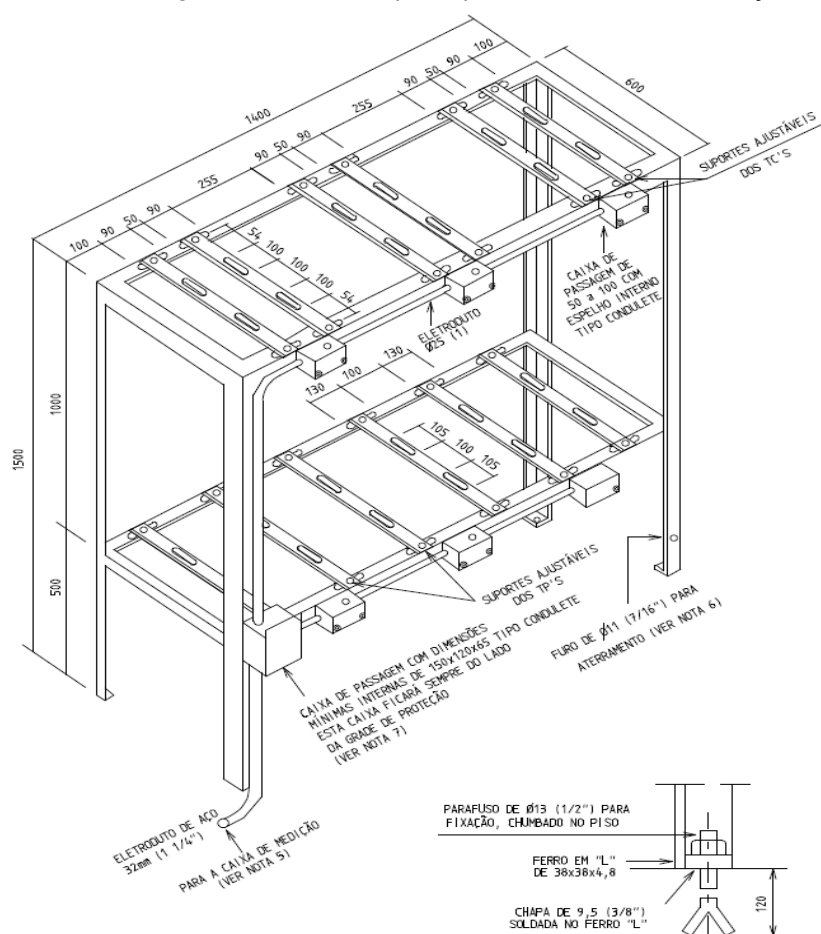
Tabela 13 - Dimensionamento de Transformador de Potencial (TP) para tensão de fornecimento de 13,8kV.

TRANSFORMAÇÃO DE POTENCIAL RELAÇÃO DE TRANSFORMAÇÃO	MEDIÇÃO
70 -- 1	A TRÊS ELEMENTOS

Fonte: CEMIG (2013)

Apresenta-se somente dimensionamentos de TCs e TPs para a tensão de 13,8kV, devido à localidade de montagem da subestação desenvolvida, projetada e executada pelo aluno/autor, possuir tal tensão de alimentação. Na norma ND 5.3 contém o dimensionamento para todas as tensões de fornecimento da CEMIG em média tensão. Os TCs e TPs devem ser fixados em mesa suporte conforme o desenho da Figura 13 (CEMIG, 2013).

Figura 13 - Mesa Suporte para TCs e TP's de Medição



Fonte: CEMIG (2013)

Em caixa de medição CM-4, ilustrado na Figura 14 (FUNDIÇÃO ALFA LTDA, 2017), são instalados o medidor eletrônico ou aparelho de medição. A CM-4 será lacrada pela CEMIG a fim de conter qualquer alteração de medição. Imediatamente abaixo da caixa de medição, deve ser instalada uma plataforma basculante confeccionada em madeira ou metal, de 500x500 mm, para suportar os equipamentos de leitura (peso máximo de 20 daN) utilizados pela equipe de medição de consumo de energia elétrica (CEMIG, 2013).

Figura 14 - Caixa de Medição CM-4



Fonte: FUNDIÇÃO ALFA LTDA (2017)

A distância máxima entre a caixa de medição e os TCs e TPs é de 12,5 metros. Os eletrodutos contendo a fiação de sinal dos TCs e TPs até a caixa de medição devem ser externos. Não serão admitidos eletrodutos embutidos na parede, piso ou teto. O material do eletroduto será de aço galvanizado de diâmetro mínimo de 40mm (1,5 polegadas). Toda a tubulação deve estar fixada em abraçadeiras, não podendo de forma alguma estar bamba (CEMIG, 2013).

Conforme dito no capítulo anterior, a medição de energia elétrica consumida será feita em média tensão, nos três elementos de fase. A cobrança será feita conforme grupo de consumo, também explicada no capítulo anterior. Em qualquer situação será feita a aferição de consumo de energia, podendo ser feita em qualquer momento por uma equipe credenciada pela CEMIG. Cabe ao consumidor proporcionar segurança e acesso as equipes de medição.

3.6 Equipamentos de Proteção

Constitui-se proteção de subestação os equipamentos responsáveis por seccionamento do circuito de alimentação em caso de interferências, causadas por sobre-tensão, sobre-corrente, sub-tensão, harmônicos, etc. Que podem causar danos materiais e físicos e/ou óbito as pessoas próximas. Os equipamentos usados, geralmente, são: relé microprocessado, TC's e TPs de proteção, disjuntor, para-raios, chave fusível (MAMEDE FILHO e MAMEDE, 2011).

Os disjuntores são aparelhos de segurança eletromecânicos usados para seccionamento de circuitos (MAMEDE FILHO, 2013). Nas subestações o disjuntor usado será de média tensão, ilustrado na Figura 15 (BA ELÉTRICA, 2017), com proteção mínima de sobrecorrente, exceto nas subestações de número 1 onde nestas serão empregados disjuntores de baixa tensão térmico (CEMIG, 2013).

Figura 15 - Disjuntor de média tensão



Fonte: BA ELÉTRICA (2017)

O disjuntor deve possuir acionamento automático na abertura, com seu comando de abertura, *trip*, dado por relé microprocessado, sendo eles a vácuo ou com qualquer líquido isolante não inflamável, com as características mínimas descritas na Tabela 14 (CEMIG, 2013).

Tabela 14 - Parâmetros Mínimos de Disjuntores de Média Tensão

Características elétricas	13,8kV	22kV	34,5kV
Uso	interno	interno	interno
Tensão nominal (kV)	15	25	35
Frequência Nominal (Hz)	60	60	60
Corrente nominal mínima (A)	350	350	600
Capacidade de interrupção simétrica mínima (kA)	10	10	8,37

Fonte: CEMIG (2013)

Outro dispositivo de proteção são os para-raios, usados para evitar que as descargas atmosféricas possam causar algum dano físico ou material a subestação.

Sua instalação deve respeitar a norma NBR 5419 – Proteção de Estruturas Contra Descargas Atmosféricas. Os para-raios devem possuir invólucro polímero, blocos resistores de óxido de zinco sem centelhadores, e desligamento automático. O condutor de ligação do para-raios deve ser conectado ao aterramento da subestação, sendo ele de cobre nu, seção mínima de 50mm². O dimensionamento do para-raios deve seguir os parâmetros da Tabela 15 (CEMIG, 2013).

Seu uso é necessário quando as subestações não estão abrigadas, ou seja, não sendo parte integrante da edificação ou desrespeitando distância mínima descrita na Norma NBR 5419. Quando não houver necessidade, a proteção contra descargas atmosférica da subestação será a existente na edificação. Quando necessário o para-raio é de uso exclusivo da subestação.

Tabela 15 – Parâmetros Mínimos de Para-raios.

Características dos para-raios	13,8kV	22kV	34,5kV
Tensão nominal (kV)	12	21	30
Corrente nominal (kA)	10	10	10
Tensão residual máxima para corrente ingreme (10kA - 1μs de frente) - kV	48	84	120
Tensão residual máxima para corrente de descarga Nominal (10kA - 8/20) - kV	43	76	108

Fonte: CEMIG (2013)

Entre as seções de medição, proteção, transformação e saída deverá existir um sistema de seccionamento com função de isolar cada seção. O equipamento responsável por esse seccionamento é a chave seccionadora tripolar, ilustrado na Figura 16 (SAREL, 2016). A chave deve possuir abertura conjunta em todas as fases, possuir proteção contra sobrecorrente através de fusíveis de rápida atuação, além disto, deve possuir atuação manual com acionamento sobre alavanca. O acionamento manual é usado para a desenergização da subestação para limpeza e conservação ou quaisquer que seja o fator de segurança.

Figura 16 - Chave seccionadora tripolar com fusível



Fonte: SAREL (2016)

Por último, tem-se o relé de proteção microprocessado responsável pelo seccionamento dos disjuntores de média tensão, mostrado na Figura 17. Este tipo de proteção é considerada secundária, uma vez que a mesma não tem contato direto com a tensão e corrente nominal da subestação, sendo então necessário o uso de TCs e TP abaixadores que enviam sinais de corrente e tensão em valores que o relé é capaz de processar (MAMEDE FILHO e MAMEDE, 2011).

Serão colhidos pelos TCs sinais de corrente das três fases e do neutro. O TP é responsável pelo sinal de tensão de uma das fases, necessário para alimentação do relé. O cabeamento de sinal deve passar por tubulação de aço galvanizado externa de 50mm de diâmetro. É extremamente necessária atenção à polaridade dos TCs e TP para o perfeito funcionamento do relé. As funções mínimas contidas no relé microprocessado devem ser:

- Função 50: proteção de sobrecorrente instantânea;
 - Função 51: proteção de sobrecorrente temporizada;
 - Função 32: proteção direcional, somente quando houver gerador.
- (MAMEDE FILHO e MAMEDE, 2011).

O relé deve atuar em alterações de fase e neutro, sendo então necessário possuir a função de proteção a neutro 50N e 51N. Na Figura 17 (PEXTRON, 2016) vemos um exemplo de relé Pextron® 7104T, possuindo as funções 50, 50N, 51 e 51N.

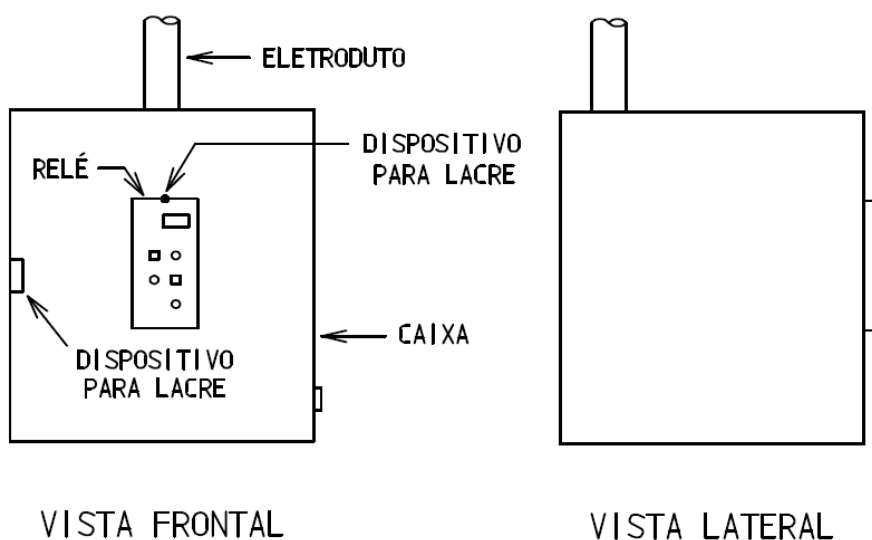
Figura 17 - Relé de proteção Pextron® 7104T



Fonte: PEXTRON (2016)

O aparelho deve ser instalado dentro da subestação, em caixa própria, ilustrada na Figura 18 (CEMIG, 2013). Esta caixa deve ser metálica, possuindo tampa basculante e local para instalação de lacre da CEMIG. Além disto, deve possuir três aberturas, a primeira para recebimento do eletroduto de cabeamento de sinais, a segunda para visualização do funcionamento do relé protegido por vidro ou acrílico transparente e a terceira para ventilação com proteção em forma de tela.

Figura 18 - Caixa de Proteção com relé microprocessado



Fonte: CEMIG (2013)

Deve também se prover um sistema, alimentado pelo TP de proteção ou o lado de baixa tensão do transformador da unidade, que em caso de curto circuito, mantenha a alimentação do relé durante um tempo mínimo necessário para o envio de sinal para seccionamento do disjuntor, também instalado dentro da caixa do relé (CEMIG, 2013). Usualmente este sistema é constituído por um “no break” de potência mínima de 1kVA, conectado a saída de algum dos transformadores de potencial. O sistema pode ser substituído por um conjunto de baterias.

Em caso de falta é extremamente necessário à contínua alimentação do relé para seu perfeito funcionamento, processamento e seccionamento do disjuntor. A autonomia do sistema deve ser de no mínimo duas horas, garantindo a sinalização dos eventos ocorridos e acesso a memória de registro do relé (CEMIG, 2013).

Para a parametrização do relé é necessário cálculo de corrente nominal e partida do relé, da corrente de magnetização do(s) transformador(es) e o ponto de ANSI do transformador. Na norma da Cemig ND 5.3 foram retiradas as equações necessárias para parametrização que serão apresentadas a seguir:

- Cálculo de correntes nominais e de partida do rele.

A corrente nominal (I_n) é calculada a partir da demanda máxima(demanda contratada) de acordo com projeto, considerando fator de potência de 0,92. A corrente de partida do relé (I_r) é a corrente nominal acrescida de 5%, considerando a ultrapassagem de demanda contrata em 5%. A corrente de partida de neutro máxima (I_N) será um terço da corrente nominal de fase (CEMIG, 2013).

$$I_n = W / (1,73 \times V \times 0,92) \quad I_r = I_n \times 1,05 \quad I_N = I_n / 3 \quad (4)$$

W é a demanda contratada em kW.

V é a tensão nominal entre fase em kV.

- Cálculo da corrente de magnetização do(s) transformador(es)

A corrente de magnetização (I_m ou I_{rush}) é a corrente que surge durante a magnetização do núcleo do transformador até a saturação do núcleo. Em transformadores a óleo ou com encapsulamento em epóxi com potência de até 2MVA, a I_m será 8 vezes a corrente nominal do sistema e seu tempo de duração será de 0,1s. Para potências superiores a 2MVA a I_{rush} e seu tempo de duração devem ser informados pelo fabricante. É necessária a informação

desta corrente para a não atuação do relé de proteção na energização do transformador. No caso de mais de um transformador por subestação, a corrente considerada deve ser a do maior transformador, somada as correntes nominais dos demais (CEMIG, 2013). Em situações normais:

$$I_{rush} = 8 \times I_n \quad (5)$$

- Cálculo do ponto de ANSI dos transformadores

O ponto de *ANSI* é o máximo valor de corrente por fase que um transformador pode suportar durante um período definido de tempo sem se danificar. Quando for usado transformadores delta/estrela é necessário o cálculo do ponto *nansi*, valor máximo de corrente de neutro que um transformador pode suportar sem se danificar, o ponto *nansi* é 0,58 vezes o ponto de *ansi*. As correntes *ansi* e *nansi* depende dos valores de I_n e $Z\%$, que é a impedância percentual do transformador (CEMIG, 2013). Sendo assim:

$$I_{ansi} = (100/Z\%) \times I_n \quad I_{nansi} = 0,58 \times I_{ansi} \quad (6)$$

A impedância percentual do transformador é necessária para lançar os pontos no diagrama de coordenação/seletividade, posteriormente detalhado, deve ser encontrada na Tabela 16.

Tabela 16 – Impedância percentual do transformador.

$Z\%$ (Ω)	PONTO ANSI (A)	TEMPO MÁX. DE DURAÇÃO (s)
Até 4	$25 \times I_n$	2
Até 5	$20 \times I_n$	3
Até 6	$16,6 \times I_n$	4
Até 7	$14,3 \times I_n$	5

Fonte: CEMIG (2013)

Sempre que possível à curva de atuação do relé deve ficar “abaixo” do ponto *ANSI* do transformador de menor potência, tanto para a função de proteção de fase como a de neutro (ou terra).

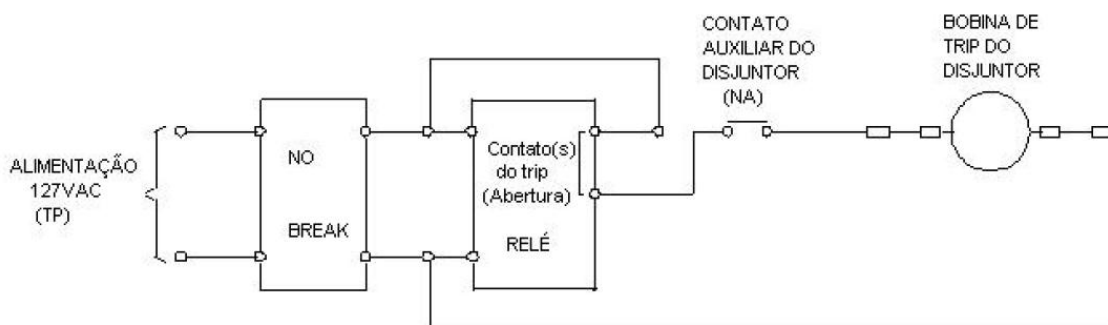
A CEMIG deve fornecer ainda os valores de curto-circuito. Informação necessária para dimensionamento de TCs e TP de proteção. Para dimensionamento é recomendável que a corrente de curto circuito, fornecida pela CEMIG, não seja 50 vezes maior que a corrente primária dos transformadores de

corrente. É necessário considerar a corrente de partida do TC, usualmente usa-se 10% do valor de corrente nominal primária.

Conhecendo todos os parâmetros deve-se então parametrizar o relé de proteção microprocessado. Primeiramente o relé escolhido deve possuir resolução máxima de ajuste da corrente de fase de 5% e provido de meios que impeçam a alteração de seus parâmetros, remotamente ou em loco. Parâmetros estes previamente analisados pela CEMIG e enviados em projeto elétrico. O bloqueio pode ser por lacres, chave interna, senha de bloqueio de alteração remota, etc. O relé com função 50 e 51, deve atender todas as formas transitórias de faltas.

As funções 51 e 51N devem começar sua sensibilização a partir de uma corrente I_p , onde I_p é a corrente I_n acrescida de 5%. Caso o valor de corrente ultrapasse I_p o relé iniciará a contagem de tempo, enviando sinal de “trip” ao disjuntor se necessário. Sendo assim quando observado pelo relé um valor de corrente em desarmonia as condições normais, ocorrerá o fechamento de contato, enviando um sinal de “trip” ao disjuntor, desligando a energia do sistema (PEXTRON, 2017). O circuito de abertura do disjuntor segue em Figura 19 (CEMIG, 2013).

Figura 19 - Circuito de comando de abertura do disjuntor através de comando de relé microprocessado.



Fonte: CEMIG (2013)

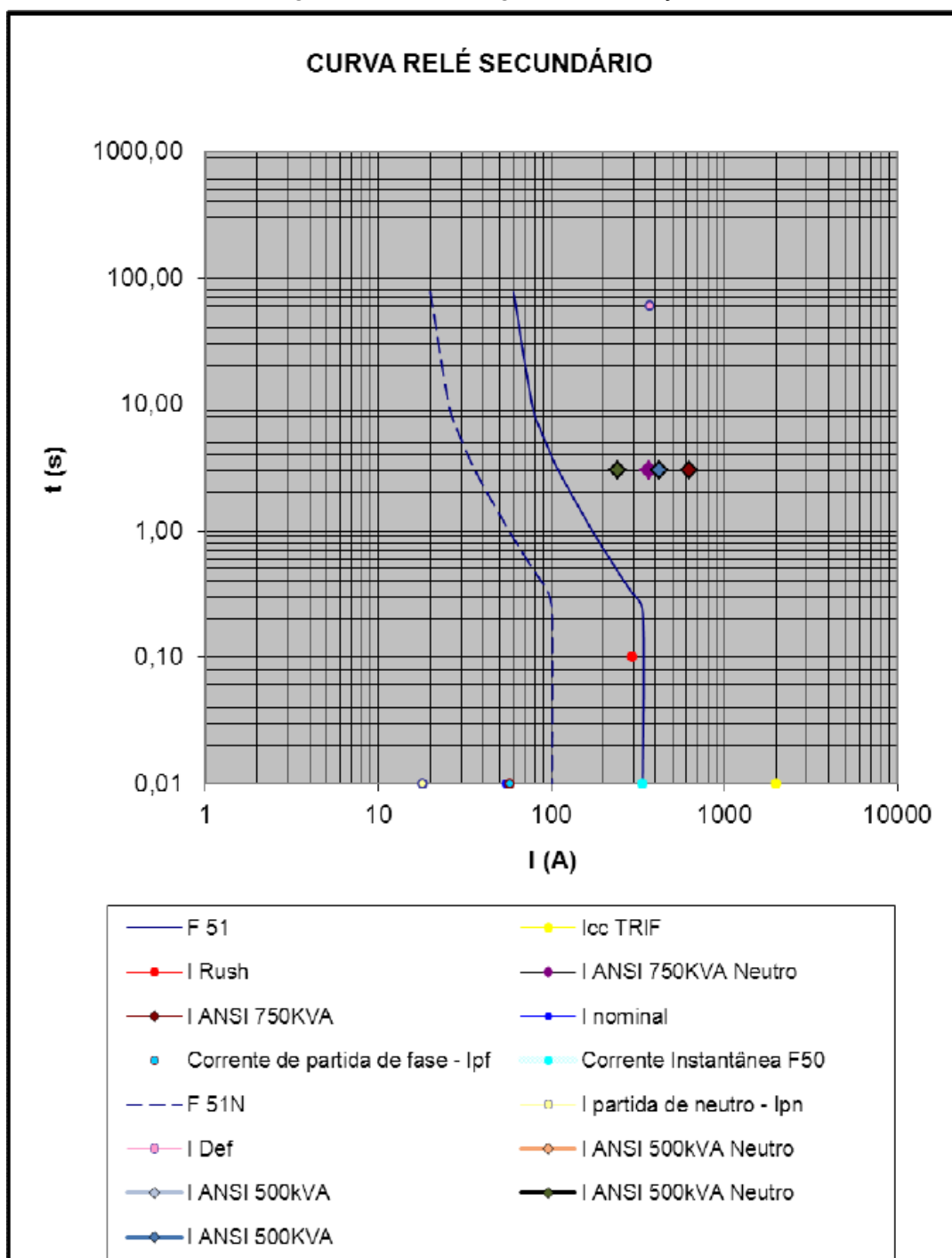
A inserção de informações no relé difere por modelos e marcas a serem usados. Todas as informações necessárias para parametrização do mesmo deverão ser colhidas nos manuais e/ou catálogos da fabricante. Devem ser informados no memorial de cálculo para ajuste do relé todos os parâmetros programáveis do relé com seus respectivos valores para serem programados.

Finalmente, é necessária a construção do coordenograma que é o gráfico que mostra toda a coordenação e a seletividade dos dispositivos de proteção da subestação. Ele possui eixo Tempo x Corrente e deve ser de formato bi-log. Devem ser plotadas as seguintes curvas:

- Valores de corrente de curto circuito no ponto de derivação fornecidos pelas CEMIG.
- Corrente nominal I_n .
- Corrente de partida do relé I_p de fase e de neutro.
- Curva IEC extremamente inversa do relé como ajustes definidos no projeto, informações colhidas por catálogos ou manual do relé, de fase e neutro.
- Ajuste de atuação instantânea para fase e terra, reta perpendicular ao eixo das correntes.
- Pontos de ANSI do(s) transformador(es) de fase e neutro.
- Corrente de magnetização dos transformadores I_m .

Este gráfico deve auxiliar na melhor sequência de energização das cargas da unidade consumidora. Todos os parâmetros devem ser identificados com clareza e necessariamente os dados devem ser referidos a tensão primária de média tensão. Segue a seguir um exemplo de coordenograma ilustrado na Figura 20 (CEMIG, 2013).

Figura 20 - Coordenograma de Proteção



Fonte: CEMIG (2013)

Toda montagem e instalação dos aparelhos de proteção são de responsabilidade do cliente e/ ou responsável técnico. Os cálculos, a parametrização do relé e a escolha do mesmo são de responsabilidade do responsável técnico. Sendo assim, o responsável técnico deverá conhecer todos os aparelhos e

equipamentos dentro da subestação a serem protegidos e os que devem atuar para a proteção dos demais (CEMIG, 2013).

3.7 Transformadores de carga

Transformadores são dispositivos físicos de indução eletromagnética, capazes de elevar ou reduzir níveis de tensão e corrente (JORDÃO, 2002), nas Figuras 21 (SOLUÇÕES INDUSTRIAIS, 2016) e 22 (WEG, 2016) observa-se exemplos de transformadores de carga com isolação em óleo e com isolação a seco utilizando epóxi como isolante, respectivamente.

Figura 21 - Transformador de potencial com isolação a óleo



Fonte: SOLUÇÕES INDUSTRIAIS (2016).

Figura 22 - Transformador de potencial a seco com isolação de epóxi



Fonte: WEG (2016)

As características construtivas dos transformadores de potencial usados devem respeitar as normas da ABNT. Transformadores a óleo e com potência até 300kVA devem respeitar a NBR 5440 – Transformadores para redes aéreas de distribuição – REQUISITOS. Transformadores a óleo de potência superior a 300kVA até 2MVA devem respeitar as normas NBR 5356 – Transformadores de Potência e capítulo 4 da NBR – 9369 – Transformadores subterrâneos – Características elétricas e mecânicas. Transformadores a óleo e com potência superior a 2MVA devem respeitar a norma NBR 5356 – Transformadores de Potência. Transformadores a seco encapsulados por epóxi devem respeitar os requisitos das normas NBR-10295 – Transformadores de potência secos – Especificação e NBR - NBR 5356 – Transformadores de Potência. Podendo ser exigida pela concessionária laudo técnico confirmando compatibilidade com as normas e sendo hábil ao uso.

O primário do transformador deve ser em delta e seu secundário em estrela a quatro fios, com seu neutro conectado ao aterramento da subestação. A instalação do “trafo” deve ser feita em lugares ventilados e que permitam manutenção, remoção e operação. Quando a subestação ocupar parte constituinte da edificação, sua porta de acesso será na parte interna da edificação sendo obrigatório o uso de transformadores a seco e encapsulados por epóxi, mesmo se a subestação constar com paredes de alvenaria e portas corta-fogo (CEMIG, 2013).

A ventilação, em regiões de atmosfera poluída no ambiente ou dentro da subestação, deve ser forçada e possuir a vazão mínima de 2500m³/h para cada 500kVA de potência instalada. Em condições normais a ventilação será feita por meio de janelas dimensionadas conforme potência do transformador. É necessário 1m² de janela por cada 300kVA de potência instalada (CEMIG, 2013).

3.8 Equipamentos e materiais de ligação

Os equipamentos e materiais de ligação são responsáveis pelo transporte de tensão e corrente entre os blocos de medição, proteção e transformação. O primeiro material a ser apresentado são os barramentos de média tensão, estes devem ser de cobre nu e seção transversal de qualquer formato. Seu dimensionamento deve respeitar a Tabela 17.

Tabela 17 - Dimensionamento de barramentos de média tensão.

CORRENTE I (A)	SEÇÃO MÍNIMA - COBRE NÚ S (mm ²)	DIÂMETRO MÍNIMO - BARRAMENTO EM FORMA DE VERGALHÃO
		COBRE NÚ (Polegada)
DE 21 A 100	50	3/8'
ACIMA DE 100	S deve ser tal que $I/S \leq 2$.	

Fonte: CEMIG (2013)

Os barramentos devem possuir afastamento mínimo a fim de evitar interações eletromagnéticas entre eles e possíveis curto circuitos. O afastamento deve respeitar a Tabela 18.

Tabela 18 - Afastamento mínimo entre os barramentos de média tensão.

TENSÃO	ÁREA							
	ABRIGADA				AO TEMPO			
NOMINAL (KV)	FASE-FASE (mm)		FASE-NEUTRO(mm)		FASE-FASE (mm)		FASE-NEUTRO(mm)	
	MÍNIMO	INDICADO	MÍNIMO	INDICADO	MÍNIMO	INDICADO	MÍNIMO	INDICADO
13,8	150	200	115	150	170	300	130	200
22	270	350	190	250	380	500	260	350
34,5	390	500	265	350	590	700	390	500

OBS: Em subestações blindadas os valores podem ser alterados e deverão ser acordados com a Cemig.

Fonte: CEMIG (2013)

Todas as emendas e derivações devem ser feitas por conectores apropriados para a mesma ou por soldas exotérmicas. Os barramentos de média tensão devem ser pintados respeitando as seguintes cores:

- FASE A: VERMELHA;
- FASE B: BRANCA;
- FASE C: MARRON;
- NEUTRO: AZUL (CEMIG, 2013).

Para a transição entre as baias, são usadas buchas de passagem, ilustrada na Figura 23 (GERMER ISOLADORES, 2017). As buchas são de média tensão revestidas de isolador de porcelana, fixados em chapas metálicas chumbadas nas paredes de alvenaria divisórias. São especificadas conforme tensão de entrada.

Figura 23 - Bucha de passagem de porcelana com isolamento de 15kV.



Fonte: GERMER ISOLADORES (2017)

3.9 Ramal de entrada

Ramal de entrada é o ponto de ligação entre a rede da concessionária de energia e o ponto de medição de consumo de energia elétrica do consumidor, podendo também ser nomeado como entrada de energia. Todo o ramal de ligação é feito exclusivamente por uma equipe autorizada, regularizada e credenciada da CEMIG. A conexão dos cabos de fase é feita aos barramentos de fase da subestação, os condutores são unipolares de alumínio ou cobre, isolados com XLPE-90°C ou EPR-90°C, ligados conforme tensão de distribuição. A conexão do condutor neutro da CEMIG deverá ser conectada ao aterramento da subestação, o cabo de neutro deve possuir 70mm² ser de cobre ou alumínio e estar nu. Visando obter a mesma corrente e a mesma queda de tensão em todas as fases os condutores devem possuir o mesmo comprimento e serem livres de emendas. A instalação dos condutores deve se dar de modo que constituem um sistema trifásico (CEMIG, 2013).

O ponto de entrada será único e não deverá cortar patrimônio de terceiros. Além disto, o ramal de ligação possuirá comprimento máximo de 30 metros, medidos da base do poste ou ponto de derivação da rede de distribuição subterrânea da CEMIG ao ponto de entrega.

Todos os condutores de entrada devem passar por dutos de passagens. A blindagem metálica dos condutores deve ser aterrada nas duas extremidades. A carcaça das “muflas” (terminal termo contrátil usado em cabos de potência) e a blindagem dos cabos devem ser ligadas ao aterramento. Tudo isto deve ser

vistoriado pela CEMIG e o descumprimento acarretará no não fornecimento de energia.

Existem dois tipos de entrada de energia fornecidos pela CEMIG: ramal de ligação aéreo e o ramal de ligação subterrâneo. O ramal de entrada aéreo poderá ser conectado em qualquer lado da propriedade, desde que, não corte terrenos ou áreas de terceiros. As distâncias mínimas, medidas na vertical entre o ponto de maior flecha e o solo, que os condutores do ramal de ligação aéreo devem ser instalados são estabelecidas conforme norma da CEMIG ND 5.2. As demais informações são definidas na NBR15688-Rede de Distribuição de Energia Elétrica.

É necessário ainda constatar a estabilidade mecânica do poste escolhido e sua capacidade de demanda. A instalação do ramal aéreo deve estar em consonância com as exigências das normas da CEMIG e normativas relacionadas.

Para a ligação do ramal subterrâneo, diferentemente da ligação de ramal aéreo, a entrada, preferencialmente, deve ser feita pela frente da unidade consumidora. Os condutores devem estar protegidos por dutos, situado desde a derivação da rede da CEMIG passando pela caixa de inspeção e entrando a divisa da propriedade. O eletroduto deve ser de 100mm e ser dos seguintes materiais:

- Aço de imersão a quente, conhecido também como aço galvanizado ou eletroduto pesado, ilustrado na Figura 24 (CASA DOS TUBOS, 2017)

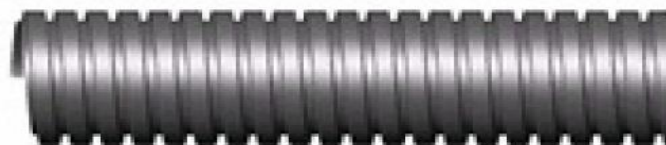
Figura 24 - Eletroduto de aço de imersão a quente.



Fonte: CASA DOS TUBOS (2017)

- Material espiralado corrugado flexível em polietileno de alta densidade, ilustrado na Figura 25 (TUBOLINE, 2017).

Figura 25 - Eletroduto espiralado corrugado flexível em polietileno de alta densidade



Fonte: TUBOLINE (2017)

- PVC rígido, ilustrado na Figura 26 (PE TUBOS, 2017).

Figura 26 - Eletroduto de PVC rígido



Fonte: PE TUBOS (2017)

Demais especificações dos eletrodutos estão contidas na norma da CEMIG ND 5.3. Toda instalação subterrânea de entrada deve estar em consonância com a norma da CEMIG ND 2.3 – Instalações Básicas de Redes de Distribuição Subterrâneas.

3.10 Responsabilidades adicionais

O consumidor tem como responsabilidade a conservação e acesso da subestação. Assim ele deve possuir funcionários capacitados para trabalhos na subestação e em equipamentos elétricos em geral ou contratar terceiros para a execução desses serviços. Os funcionários ou terceiros contratados para a execução do serviço devem possuir conhecimento nas normas de segurança, sabendo que o local oferece risco de morte, metodologia de “controle de risco” e os EPIs e EPCs mínimos as serem utilizados.

Em qualquer tipo de subestação é vetada a utilização de materiais ou equipamentos que não sejam vinculados às funções de proteção, medição ou transformação. Exemplos: banco de capacitores, quadro de baixa tensão, etc.

Nas subestações nº2, 3, 4 e 5 deve ser fixada placa com os dizeres “PERIGO DE MORTE – MÉDIA TENSÃO”, ilustrado na Figura 27 (TOWBAR, 2017). Inclusive quando a subestação for construída como parte integrante da edificação e utilizar porta corta fogo.

Figura 27 - Placa de Advertência



Fonte: TOWBAR (2017)

As caixas de inspeção devem ser do tipo ZC, conforme exemplo ilustrativo da Figura 28 (BLOG CEMIG, 2016), e deverão ser construídas no passeio público, em locais sem trânsito de veículos (exceto garagens) e respeitar o nível do passeio. Destinadas exclusivamente para a passagem dos condutores de ramal de entrada ou ligação, sendo vedada o uso a passagem de demais cabos de outras funções.

Figura 28 - Tapa Caixa de Inspeção



Fonte: BLOG CEMIG (2016)

Além disto, para evitar umidade e surgimento de pragas, na extremidade superior de todos os eletrodutos deve-se usar massa de vedação. Para facilitar o acesso e manutenção em caso de falta de energia, as lâmpadas de energia devem possuir autonomia mínima de 2 horas (CEMIG, 2013).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados do trabalho, como projetos, desenvolvimento e construção da subestação, assim como serão apresentados comentários acerca dos mesmos.

4.1 Construção da Subestação na cidade de Itamonte-MG na Fábrica de Refrigerantes Mantiqueira.

No Brasil, a produção de refrigerantes destaca-se como o principal item do setor de bebidas. Esse ramo apresenta números robustos, respondendo por fração significativa do valor da indústria de transformação (ABRASEL, 2016).

A produção de refrigerantes no ano de 2014 registrou alta de 1,46% comparada a 2013. Segundo dados do Sistema de Controle de Produção de Bebidas, Sicobe, publicado pela Secretaria da Receita Federal foram 15,8 bilhões de litros de refrigerante produzidos. (ADMINISTRADORES, 2016).

Para 2015, a estimativa foi de um crescimento na produção do setor de bebidas como um todo. Com as mudanças na legislação tributária, como a entrada do setor de refrigerantes no Simples Nacional, a expectativa é de desenvolvimento setorial e boas vendas, principalmente para as empresas regionais. Além da situação tributária favorável, o forte verão previsto para o ano, assim como um número maior de feriados em 2015, pode acarretar um maior consumo de bebidas (ABRASEL, 2016).

Desta forma a Fábrica de Refrigerantes Mantiqueira, impulsionada pelo mercado favorável, necessitava, para o aumento de sua produção, contratar uma demanda superior de energia para viabilizar aumento da sua produção. Desta forma a construção de uma subestação de entrada de energia com a demanda de 1MVA foi avaliada, projetada e construída, sendo apresentada neste item do trabalho.

4.1.1 Levantamento de Carga

Inicialmente, para adequação de demanda a ser contratada e o tipo de subestação a ser construída, é feito o levantamento de carga existente na unidade consumidora e realizado um cálculo de demanda.

Na instalação da fábrica a demanda de energia requerida por iluminação e tomadas de uso geral é de respectivamente, 5,271 kVA e 7,353 kVA, totalizando assim 12,624 kVA instalados. A fábrica ainda possui motores trifásicos e macaco eletromecânico. Os motores se diferem pelo uso e pela potência, a maioria deles sendo 220V e somente o macaco eletromecânico sendo 380V. Como a demanda medida pela concessionária de energia é quantificada em kW (quilowatts) será multiplicado a potência em CV (cavalo-vapor) um fator de mudança de unidade (fm) de 0,735499 para a transformação de unidades de CV para kW. O cálculo para a demanda em kVA (quilovolt-ampere) foi feito usando a Equação 7 (FITZGERALD, KINGSLEY e KUSKO, 1978).

$$Demanda[kVA] = \frac{n \times pcv \times fm}{fp} \quad (7)$$

Onde: n é o número de motores do mesmo tipo;

pcv é a potência do motor em CV;

fm é o fator de mudança de unidade de CV para kW;

fp é o fator de potência de cada motor.

Entretanto, na norma CEMIG ND 5.1 e 5.2, o cálculo de demanda da unidade consumidora a rede da concessionária de energia em kVA para motores trifásicos 220V difere da fórmula acima. A fórmula usada leva em conta a quantidade de motores semelhantes e a demanda individual do motor absorvida da rede, conforme Equação 8.

$$Demanda\ kVA = n \times demanda\ individual\ absorvida\ da\ rede \quad (8)$$

Onde: n é o número de motores semelhantes;

demanda individual absorvida da rede: colhida na Tabela 19.

Tabela 19 – Demanda Individual Motores trifásicos 220V

Valores nominais do Motor					Demanda individual Absorvida da rede kVA			
Potência		Cosφ	η	Corrente (220 V) A	1 Motor	2 Motores	3 a 5 Motores	>5 Motores
Eixo CV	Absorvida Rede kW				(I)	(II)	(III)	(IV)
1/6	0,25	0,67	0,49	0,9	0,37	0,30	0,26	0,22
1/4	0,33	0,69	0,55	1,2	0,48	0,38	0,34	0,29
1/3	0,41	0,74	0,60	1,5	0,56	0,45	0,39	0,34
1/2	0,57	0,79	0,65	1,9	0,72	0,58	0,50	0,43
3/4	0,82	0,76	0,67	2,8	1,08	0,86	0,76	0,65
1,0	1,13	0,82	0,65	3,7	1,38	1,10	0,97	0,83
1,5	1,58	0,78	0,70	5,3	2,03	1,62	1,42	1,22
2,0	1,94	0,81	0,76	6,3	2,40	1,92	1,68	1,44
3,0	2,91	0,80	0,76	9,5	3,64	2,91	2,55	2,18
4,0	3,82	0,77	0,77	13	4,96	3,97	3,47	2,98
5,0	4,78	0,85	0,77	15	5,62	4,50	3,93	3,37
6,0	5,45	0,84	0,81	17	6,49	5,19	4,54	3,89
7,5	6,90	0,85	0,80	21	8,12	6,50	5,68	4,87
10	9,68	0,90	0,76	26	10,76	8,61	7,53	6,46
12,5	11,79	0,89	0,78	35	13,25	10,60	9,28	7,95
15	13,63	0,91	0,80	39	14,98	11,98	10,49	8,99
20	18,40	0,89	0,82	54	20,67	16,54	14,47	12,40
25	22,44	0,91	0,82	65	24,66	19,73	17,26	14,80
30	26,93	0,91	0,83	78	29,59	23,67	20,71	17,76
50	44,34	0,90	0,83	125	49,27	-	-	-
60	51,35	0,89	0,86	145	57,70	-	-	-
75	62,73	0,89	0,88	180	70,48	-	-	-

Fonte: CEMIG (2015)

Segue o cálculo de demanda dos motores da fábrica

- Motores tipo 1: Macaco Eletromecânico

Motor trifásico 380V alimentação a 4 fios, potência (pcv): 0.5CV, fator de potência(fp): 0.85, quantidade(n): 4 motores

Cálculo de demanda em kVA, calculado conforme Equação 7

$$Demanda[kVA] = \frac{n \times pcv \times fm}{fp} = \frac{4 \times 0,5 \times 0,735499}{0,85} \sim 1,72kVA \quad (9)$$

- Motores tipo 2: Motor trifásico:

Motor trifásico 220V alimentação a 3 fios, potência: 1.0CV, fator de potência: 0.85, quantidade (n): 19 motores

Cálculo de demanda em kVA, calculado conforme Equação 8.

$$Demanda\ kVA = 19 \times 0,83 = 15,77\ kVA \quad (10)$$

- Motores tipo 3: Motor trifásico:

Motor trifásico 220V alimentação a 3 fios, potência: 1.5CV, fator de potência: 0.85, quantidade (n): 2 motores

Cálculo de demanda em kVA, calculado conforme Equação 8.

$$Demanda\ kVA = 2 \times 1,22 = 2,44\ kVA \quad (11)$$

- Motores tipo 4: Motor trifásico:

Motor trifásico 220V alimentação a 3 fios, potência: 2.0CV, fator de potência: 0.85, quantidade (n): 15 motores

Cálculo de demanda em kVA, calculado conforme Equação 8.

$$Demanda\ kVA = 15 \times 1,44 = 21,60\ kVA \quad (12)$$

- Motores tipo 5: Motor trifásico:

Motor trifásico 220V alimentação a 3 fios, potência: 3.0CV, fator de potência: 0.85, quantidade (n): 28 motores

Cálculo de demanda em kVA, calculado conforme Equação 8.

$$Demanda\ kVA = 28 \times 2,18 = 61,04\ kVA \quad (13)$$

- Motores tipo 6: Motor trifásico:

Motor trifásico 220V alimentação a 3 fios, potência: 4.0CV, fator de potência: 0.85, quantidade (n): 2 motores

Cálculo de demanda em kVA, calculado conforme Equação 8.

$$Demanda\ kVA = 2 \times 2,98 = 5,96\ kVA \quad (14)$$

- Motores tipo 7: Motor trifásico:

Motor trifásico 220V alimentação a 3 fios, potência: 5.0CV, fator de potência: 0.85, quantidade (n): 10 motores

Cálculo de demanda em kVA, calculado conforme Equação 8.

$$Demanda\ kVA = 10 \times 3,37 = 33,70\ kVA \quad (15)$$

- Motores tipo 8: Motor trifásico:

Motor trifásico 220V alimentação a 3 fios, potência: 10.0CV, fator de potência: 0.85, quantidade (n): 10 motores

Cálculo de demanda em kVA, calculado conforme Equação 8.

$$Demanda\ kVA = 10 \times 3,37 = 33,70\ kVA \quad (16)$$

- Motores tipo 9: Motor trifásico:

Motor trifásico 220V alimentação a 3 fios, potência: 20.0CV, fator de potência: 0.85, quantidade (n): 6 motores

Cálculo de demanda em kVA, calculado conforme Equação 8.

$$Demanda\ kVA = 6 \times 12,40 = 74,40\ kVA \quad (17)$$

- Motores tipo 10: Motor trifásico:

Motor trifásico 220V alimentação a 3 fios, potência: 25.0CV, fator de potência: 0.85, quantidade (n): 5 motores

Cálculo de demanda em kVA, calculado conforme Equação 8.

$$Demanda\ kVA = 5 \times 14,8 = 74,00\ kVA \quad (18)$$

- Motores tipo 11: Motor trifásico:

Motor trifásico 220V alimentação a 3 fios, potência: 50.0CV, fator de potência: 0.86, quantidade (n): 1 motores

Cálculo de demanda em kVA, calculado conforme Equação 8.

$$Demanda\ kVA = 1 \times 49,27 = 49,27\ kVA \quad (19)$$

A CEMIG exige para motores com potência igual ou superior a 50CV dados adicionais como:

Rotor: em gaiola;

Corrente nominal: 118A;

Corrente de partida: 518A;

Tipo de Partida: Assistida por chave estrela-triângulo.

- Motores tipo 12: Motor trifásico:

Motor trifásico 220V alimentação a 3 fios, potência: 75.0CV, fator de potência: 0.86, quantidade (n): 2 motores

Cálculo de demanda em kVA, calculado conforme Equação 8.

$$Demanda\ kVA = 2 \times 70,48 = 140,96\ kVA \quad (20)$$

A CEMIG exige para motores com potência igual ou superior a 50CV dados adicionais como:

>> Primeiro motor de 75,0CV

Rotor: em gaiola;

Corrente nominal: 173A;

Corrente de partida: 800A;

Tipo de Partida: Assistida por chave estrela-triângulo.

>> Segundo motor de 75,0CV

Rotor: em gaiola;

Corrente nominal: 184A;

Corrente de partida: 368A;

Tipo de Partida: Assistida por chave *soft-starter*.

Após levantamento de carga foi construída a Tabela 20

Tabela 20 - Levantamento de Carga Fábrica de Refrigerantes Mantiqueira

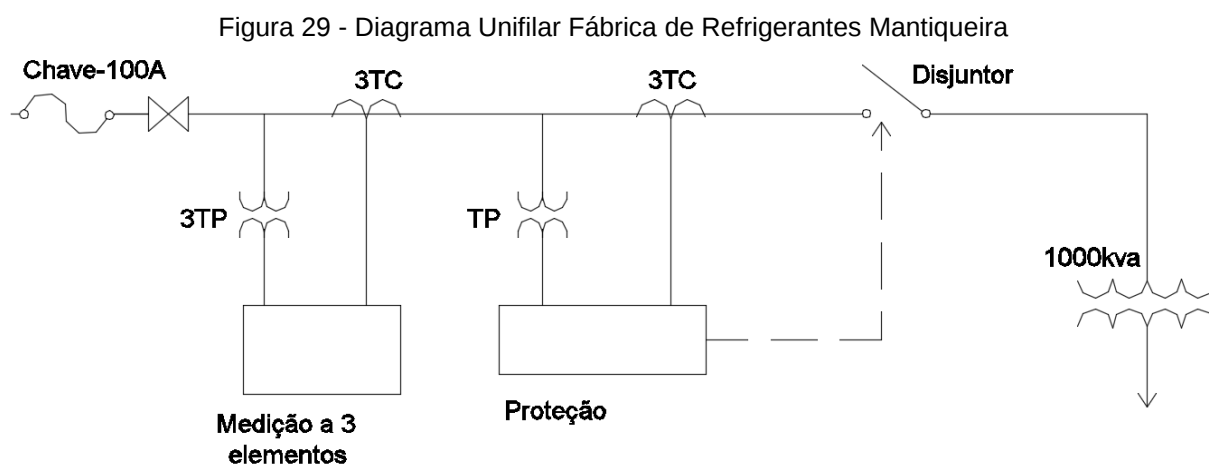
Relação de Cargas							
Item	Descrição	Fases	Tensão	Quantidade	CV	kVA total	FP
1	Lâmpada fluorescente 32W	1	220	165	-	5,271	0,85
2	Lâmpada V.M. 250W	1	220	25	-	7,353	0,85
3	Macaco eletromecânico	4	380	4	0,5	1,72	0,85
4	Motor trifásico tipo 2	3	220	19	1	15,77	0,85
5	Motor trifásico tipo 3	3	220	2	1,5	2,44	0,85
6	Motor trifásico tipo 4	3	220	15	2	21,60	0,85
7	Motor trifásico tipo 5	3	220	28	3	61,04	0,85
8	Motor trifásico tipo 6	3	220	2	4	5,96	0,85
9	Motor trifásico tipo 7	3	220	10	5	33,70	0,85
10	Motor trifásico tipo 8	3	220	10	10	64,60	0,85
11	Motor trifásico tipo 9	3	220	6	20	74,40	0,85
12	Motor trifásico tipo 10	3	220	5	25	74,00	0,86
13	Motor trifásico tipo 11	3	220	1	50	49,27	0,86
14	Motor trifásico tipo 12	3	220	2	75	140,96	0,86
	Total Cargas [Kva]					558,08	

Fonte: ACERVO PESSOAL

A carga total é de 558,08kVA, o consumidor irá ser atendido por uma subestação tipo2, Medição, Proteção e Transformação. Entrada e saída subterrânea, transformador de 1MVA, 13800/220/127. O transformador usado é de carga superior à demanda devido à expectativa de expansão futura da fábrica. A carga a ser contratada inicialmente será de 400kW, sendo aumentada após expansão futura, prevista para o segundo semestre de 2018.

4.1.2 Diagrama Unifilar

Foi elaborado o diagrama unifilar da instalação, ilustrado na Figura 29, contendo a entrada de serviço, a proteção da CEMIG, os TCs e TP de medição, os TCs e TP de proteção, disjuntor de proteção de média tensão e a transformação com o Trafo de 1MVA.



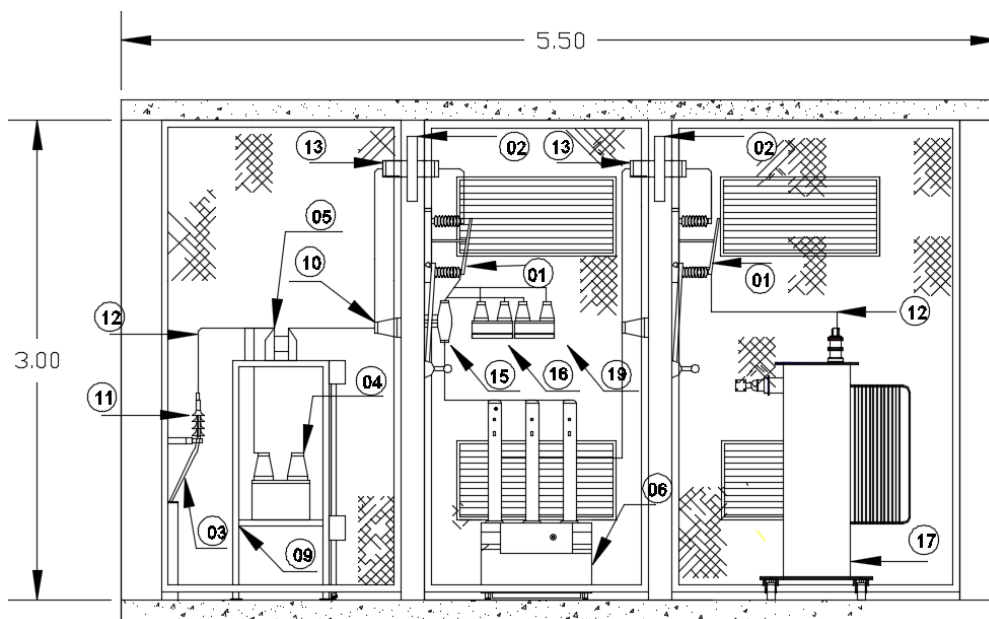
Fonte: ACERVO PESSOAL

4.1.3 Planta da Instalação da Subestação

A seguir são apresentadas as plantas da subestação de modo a enxergar de melhor maneira possível à construção da subestação. A Figura 30, planta baixa da subestação, mostra que a entrada do serviço ocorrerá pelo lado direito em três fases, interconectadas por barramentos aos de TCs e TP de medição, fixados na mesa de medição. Seguindo para baia de proteção por buchas de passagem ligadas aos barramentos.

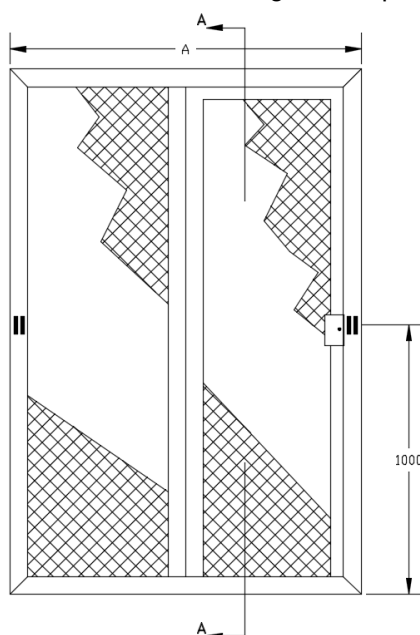
A Figura 31, mostra vista em corte AA da Figura 30, constando a mesma posição dos materiais já citados, porém com mais detalhes, como por exemplo as muflas de entrada de energia, a alavanca de comando da chave seccionadora tripolar e a existência de grades de proteção das baias ilustradas nas Figura 32 e 33 dimensionadas pela Tabela 21.

Figura 31 – Corte de planta, vista de parede inferior.



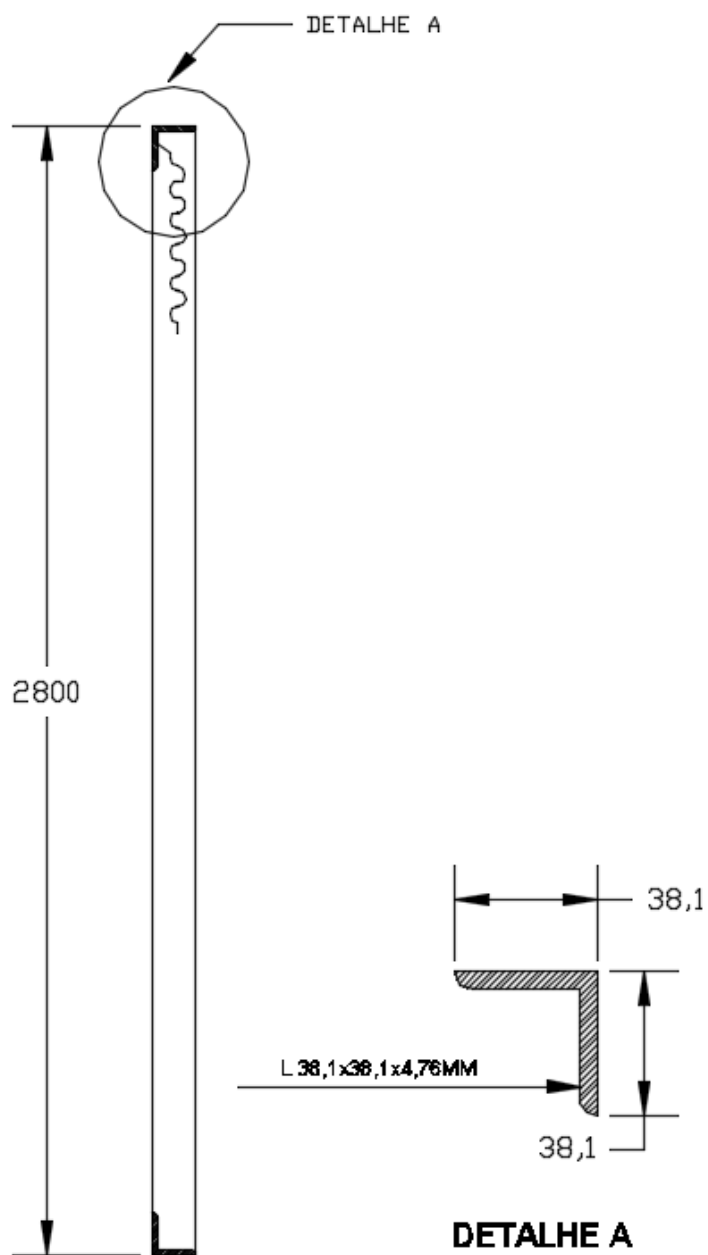
Fonte: ACERVO PESSOAL

Figura 32 - Vista frontal de grade de proteção



Fonte: ACERVO PESSOAL

Figura 33 - Vista em corte AA e detalhe A da grade de proteção



Fonte: ACERVO PESSOAL

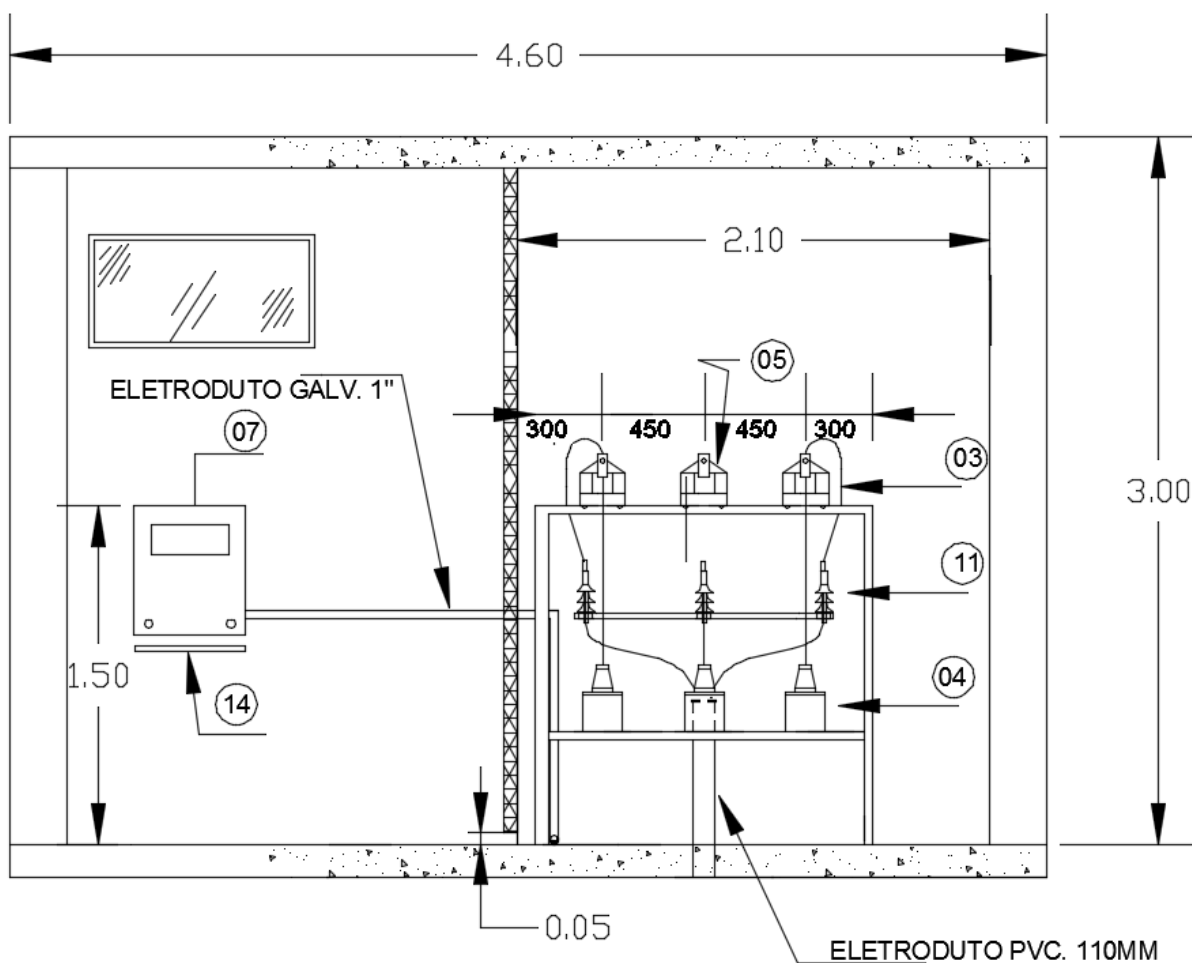
Tabela 21 – Dimensões das Grades de Proteção

Dimensões	Cubículo de medição	Cubículo de proteção	Cubículo de transformação
Altura(mm)	3000	3000	3000
Largura(mm)	1500	1400	1800

Fonte: ACERVO PESSOAL

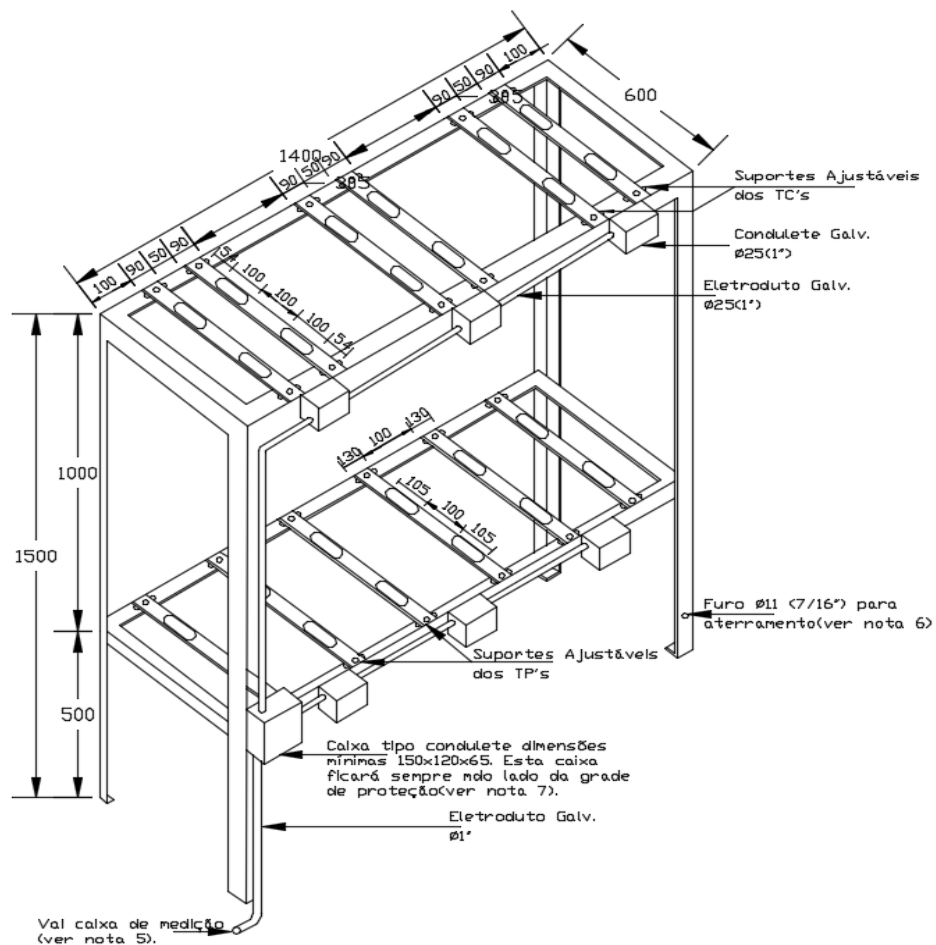
A Figura 34 é o corte BB da planta baixa, apresentando TCs e TPs de medição, mesa suporte, tubulação de sinais de medição, caixa de medição CM-4 e plataforma basculante a baixo de CM-4. A especificação de mesa suporte com todas as cotas e maneiras de fixação serão ilustradas nas Figuras 35 e 36

Figura 34 - Corte de planta BB – Baia de medição.



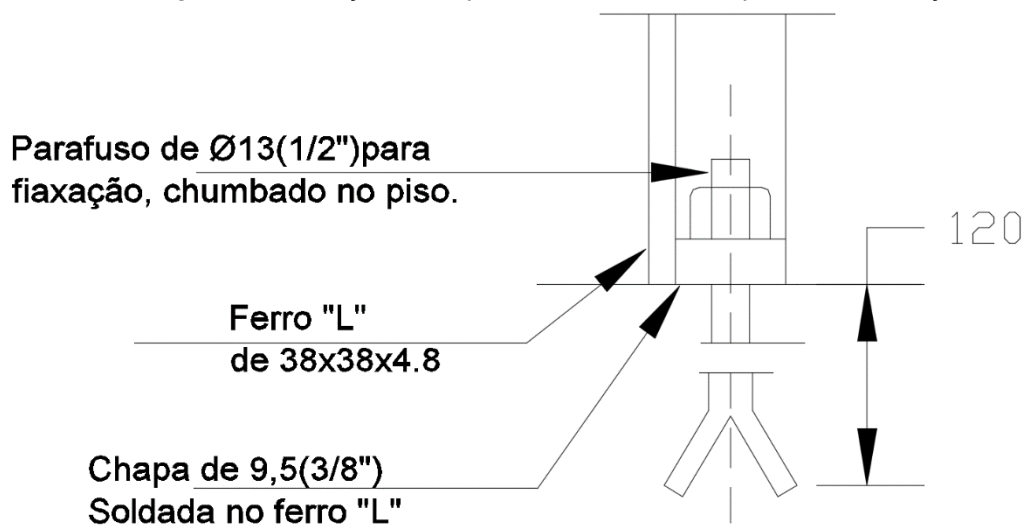
Fonte: ACERVO PESSOAL

Figura 35 - Suporte de TCs e TP's para medição, com todas as tubulações



Fonte: ACERVO PESSOAL

Figura 36 - Fixação de Suporte de TCs e TP's no piso da subestação



Fonte: ACERVO PESSOAL

As Figuras 37 e 38, ilustram respectivamente a execução da baia de proteção e a instalação da caixa de medição CM-4.

Figura 37 - Execução de baia de proteção de Subestação



Fonte: ACERVO PESSOAL

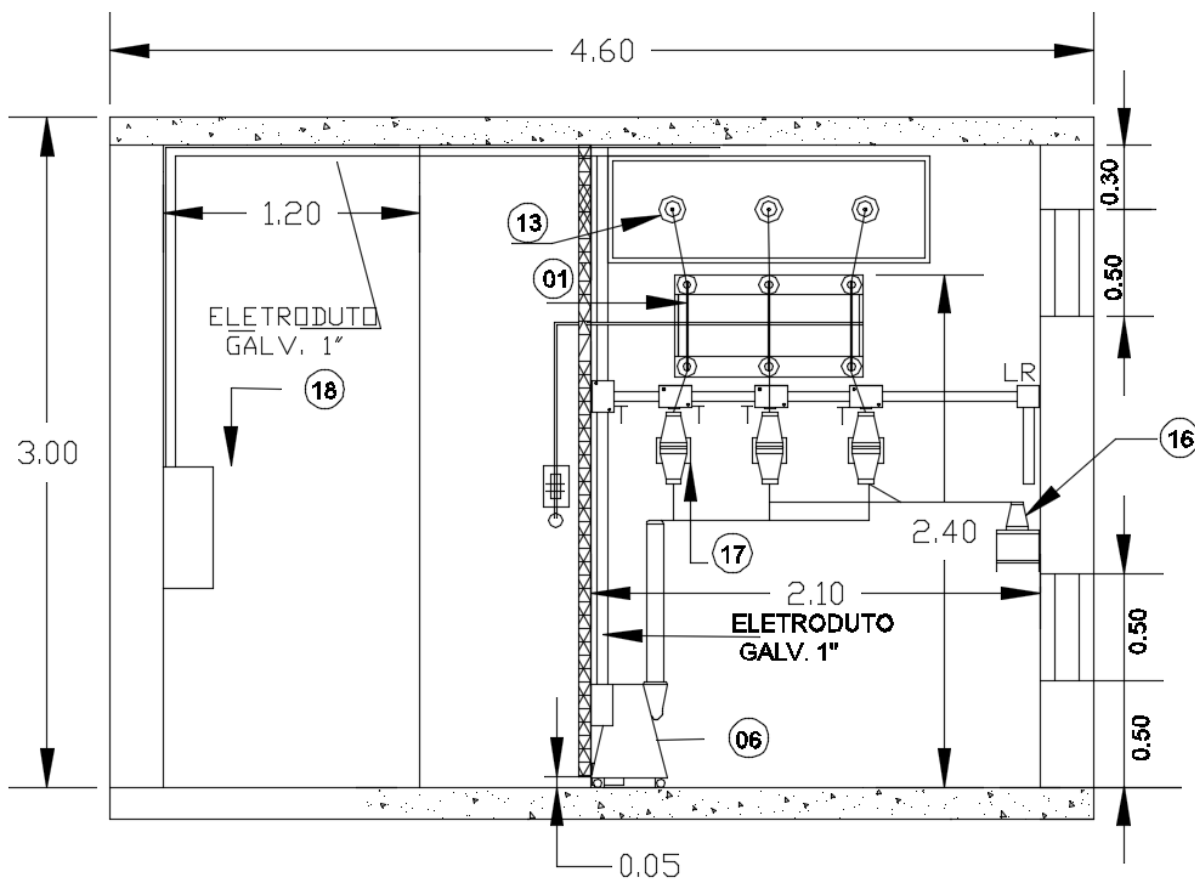
Figura 38 - Instalação de caixa de medição CM-4



Fonte: ACERVO PESSOAL

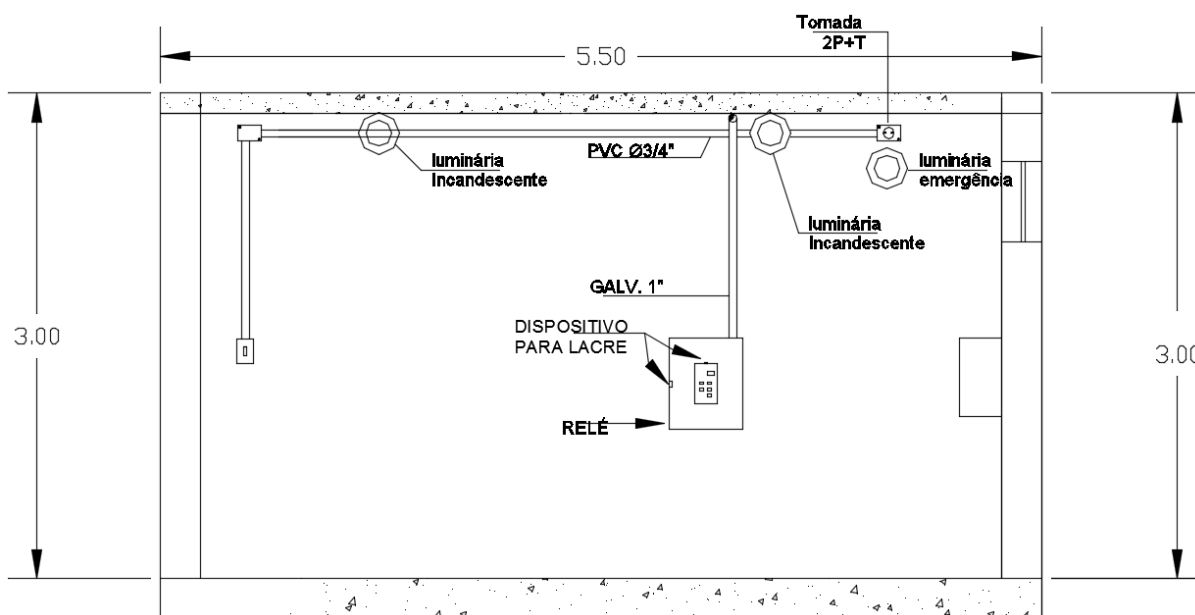
A baia de proteção, ilustrada na Figura 39, nos mostra com mais clareza o eletroduto de amostragem de sinais para o relé microprocessado e a posição dos dispositivos de proteção. A Figura 40 nos mostra o recebimento do eletroduto de sinais a caixa de relé microprocessado, as luminárias, interruptores, lâmpada de emergência e tomada alimentados por TP a 127V.

Figura 39 - Corte de Planta – Vista da baía de proteção pela entrada



Fonte: ACERVO PESSOAL

Figura 40- Corte de Planta – Vista de parede Superior



Fonte: ACERVO PESSOAL

As Figuras 41 e 42 ilustram a execução dos serviços da baía de proteção.

Figura 41 - Baia de proteção, disjuntor de média tensão



Fonte: ACERVO PESSOAL

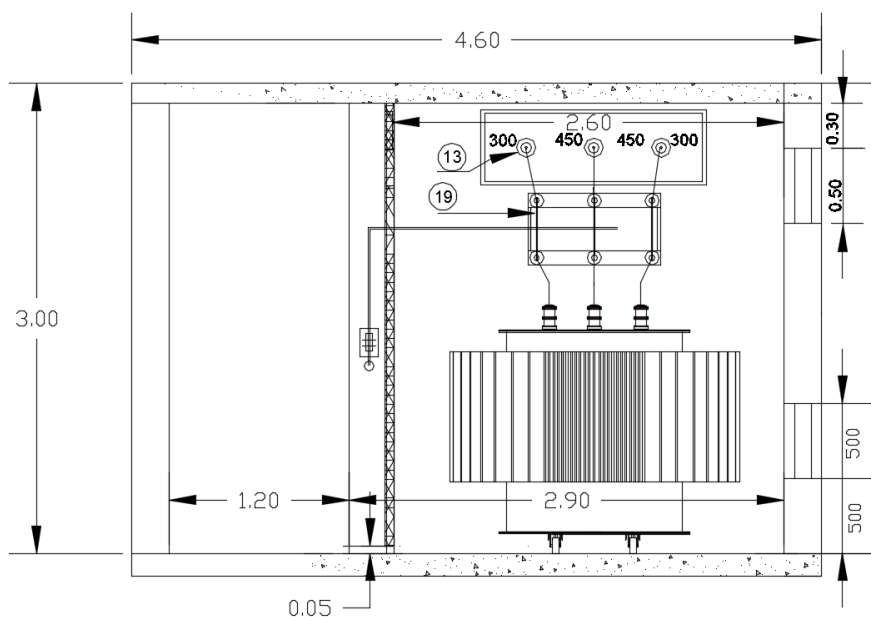
Figura 42 - Alavanca de acionamento de chave seccionadora tripolar da baia de proteção



Fonte: ACERVO PESSOAL

A última baia é a baia de transformação ilustrada na Figura 43, pelo corte de planta baixa DD.

Figura 43 - Corte de planta DD - baia de transformação



Fonte: ACERVO PESSOAL

A Figura 44 ilustra a instalação do transformador em sua baia.

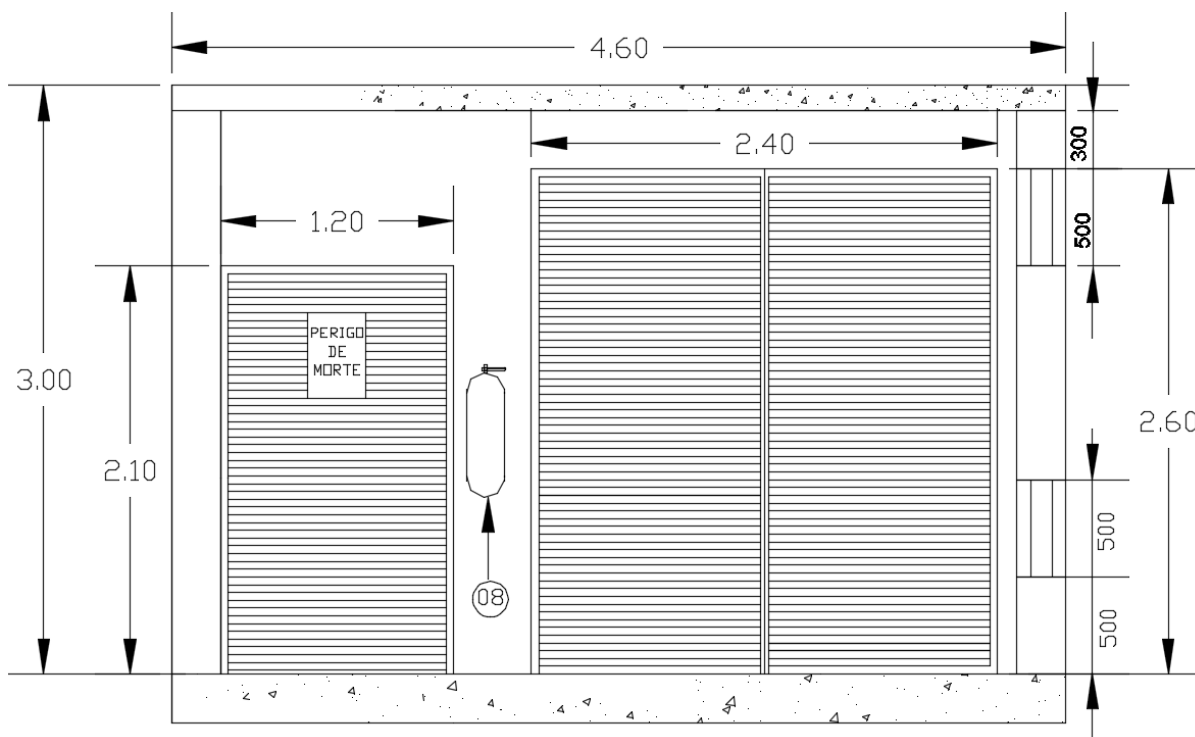
Figura 44 - Baia de transformação



Fonte: ACERVO PESSOAL

Finalizando, na Figura 45 expõe a entrada da subestação apresentando grade e porta de ventilação. Além disto, apresenta extintor de incêndio e placa de advertência na porta.

Figura 45 - Corte de Planta – Parte exterior da subestação parede direita ou entrada da subestação

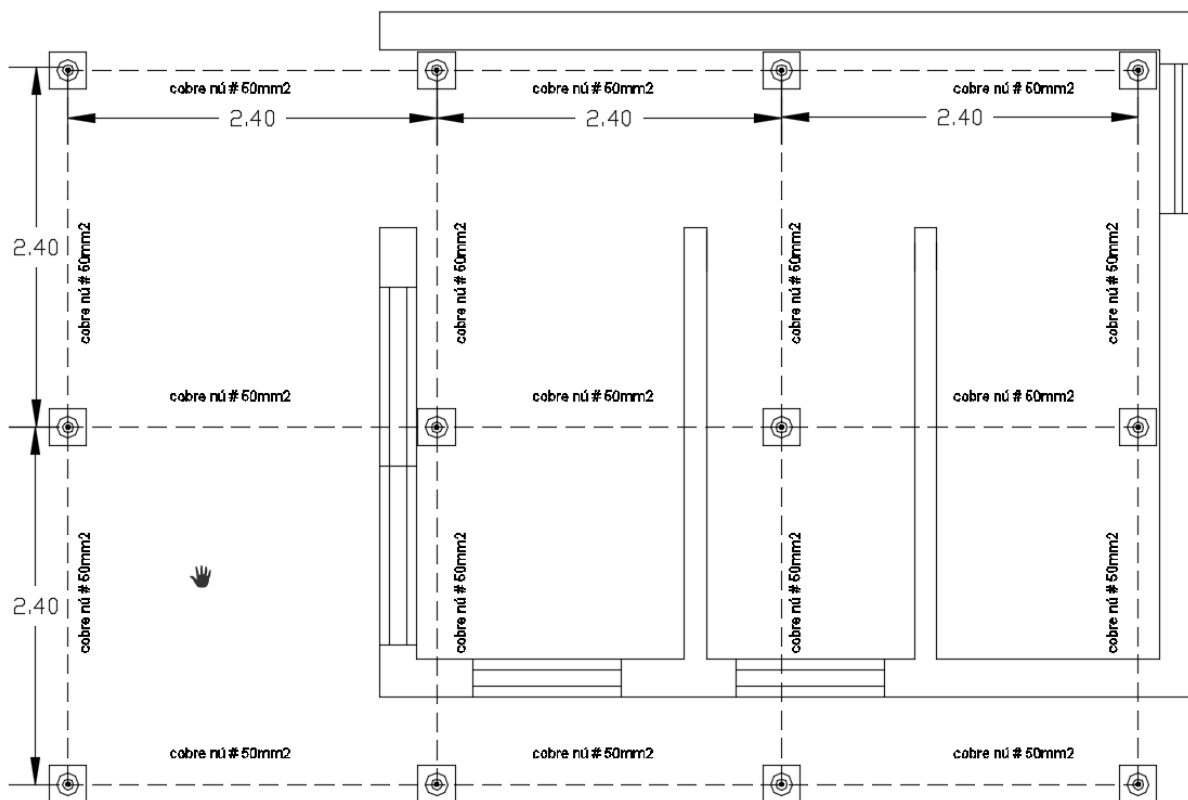


Fonte: ACERVO PESSOAL

4.1.4 Aterramento

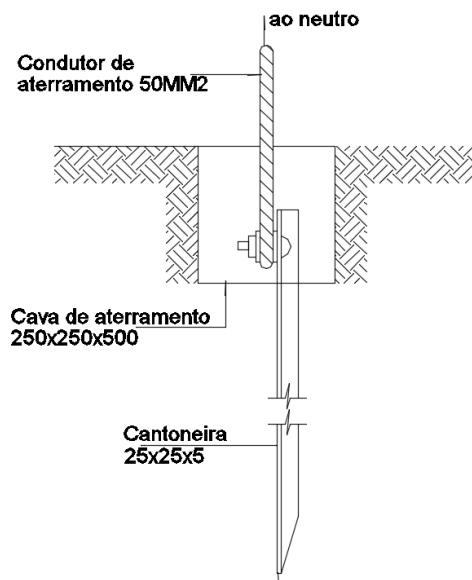
Conforme dito anteriormente e constando em norma da CEMIG ND 5.3, para demandas maiores que 500kVA a malha de aterramento deve possuir no mínimo 12 hastes fixadas no chão, a distância entre elas deve ser de no mínimo o comprimento da haste (2,40 metros) e o condutor de aterramento ser de cabo de cobre nu 50mm² de seção. Apresenta-se então nas Figuras 46 e 47 a malha de aterramento da subestação e detalhe de aterramento.

Figura 46 - Malha de aterramento subestação tipo 2 Fábrica de Refrigerantes Mantiqueira



Fonte: ACERVO PESSOAL

Figura 47 - Detalhe de haste de aterramento



Fonte: ACERVO PESSOAL

Primeiramente nota-se que a malha de aterramento ultrapassou os limites da subestação, respeitando os parâmetros mínimos da norma. A malha de aterramento possui resistência ôhmica menor ou igual a 10 Ohms em todos os pontos vistoriados

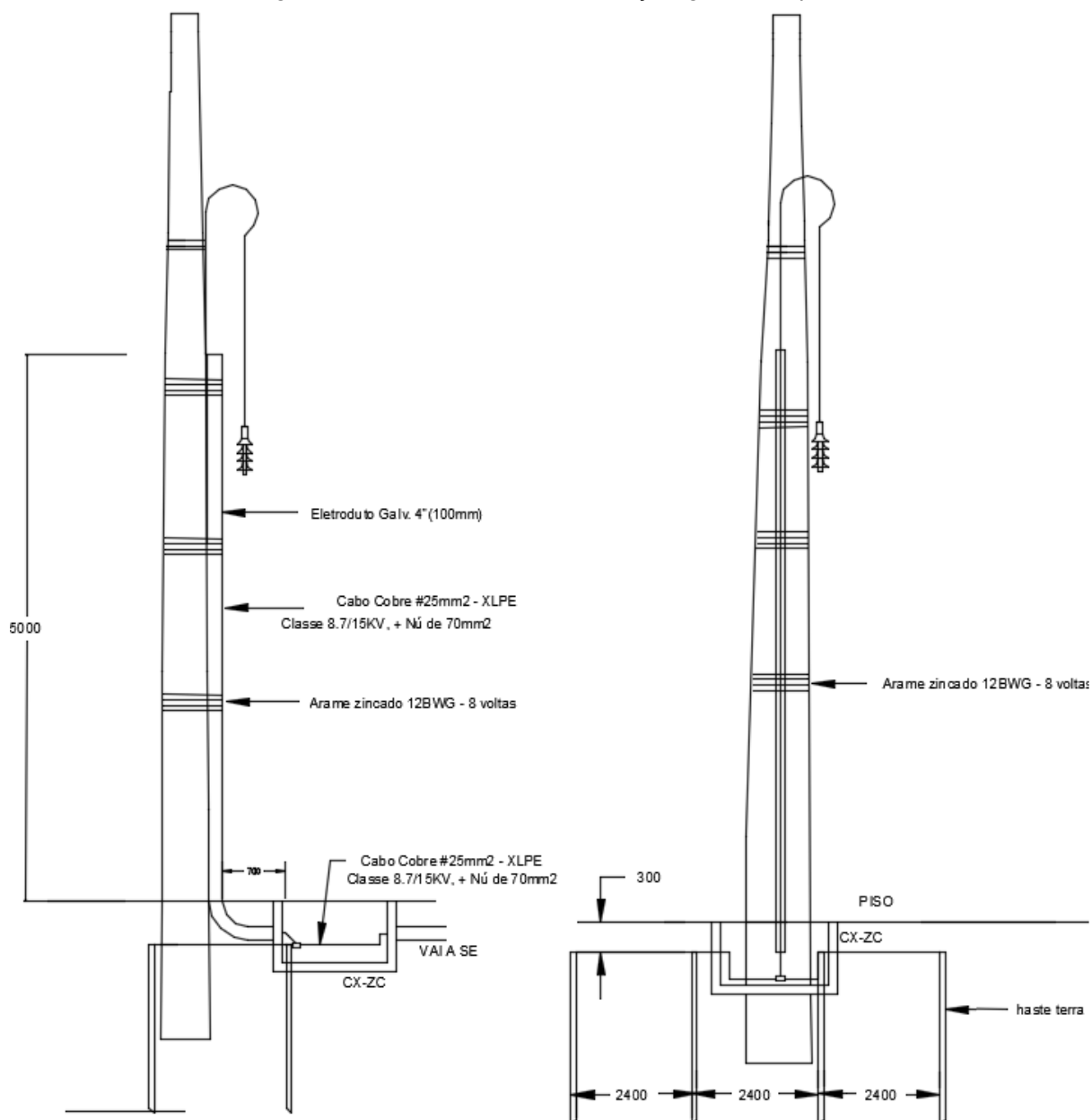
pela CEMIG. Todas as cavas de aterramento possuem 25cm de lado e 50cm de profundidade e após fechado o aterramento são preenchidas com massa de cimento e brita, além de serem tapadas com tampas de ferro. Para as hastes de aterramento são usadas cantoneiras de 25mm de lado e 5mm de espessura e fincadas a 2,40m de profundidade.

O neutro da instalação, da Subestação e da CEMIG deve também ser conectado ao aterramento. Todas as partes metálicas de materiais, equipamentos, portas, etc, devem ser aterradas, porém para estes materiais o condutor de aterramento pode possuir a seção de 25mm².

4.1.5 Entrada de Serviço

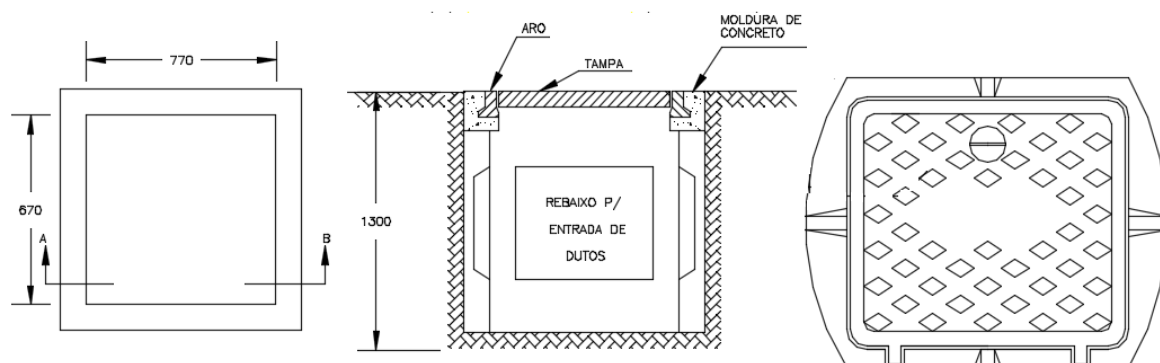
A entrada do serviço será subterrânea, e a chegada do ramal será por meio de poste conforme Figura 48. Os cabos de entrada de fase são de cobre de 50mm² de seção, material isolante XLPE, classe 8.7/15kV. O cabo de neutro é cobre nu de 70mm² de seção. Direcionados a caixa de inspeção, ilustrado na Figura 49, por um eletroduto de aço galvanizado de 100mm de diâmetro seguido por uma curva de mesmo material. O eletroduto é fixado ao poste por arame zincado 12BWG com 8 voltas. A caixa de inspeção é de formato retangular de lados de 67 cm e 77 cm com profundidade de 1,3 metros, emoldurada por concreto e tapada por tampa de ferro com abertura basculante. Todas as partes metálicas são aterradas na cava mais próxima da subestação.

Figura 48 - Poste e entrada de serviço, figuras complementares.



Fonte: ACERVO PESSOAL

Figura 49 - Caixa de Inspeção – Formato, profundidade e tampa



Fonte: ACERVO PESSOAL

4.1.6 Proteção

O sistema de proteção é composto por três partes. A parte de processo e controle, que processa os dados dos TCs e TP de proteção e manda comando de “trip” ou não, este processo é gerenciado por um relé microprocessado. Outra parte é a de seccionamento, composta por disjuntor de média tensão que através de um sinal enviado pelo relé, comanda ou não a abertura do circuito. Por último existe a parte de colhimento de dados, que é feita pelos TCs e TP fixado na baia de proteção.

Para o dimensionamento dos TCs de proteção, primeiramente deve-se calcular a corrente de entrada, Equação 21:

$$I_{entrada} [A] = \frac{P[kW]}{V[kV] \times 0,92 \times 1,73} = \frac{1000kW}{13,8kV \times 0,92 \times 1,73} = 45,53A \quad (21)$$

Onde: $I_{entrada}$: é a corrente de entrada em amperes

$P[kW]$: potência contratada em kVA

$V[kV]$: é a tensão em média tensão de fornecimento em kV

Sendo assim a corrente de entrada nominal é de 45,53A, o TC escolhido para cada fase é de fator de transformação 100/5, tensão de isolamento 15kV. Justificado pela corrente de curto-circuito fornecida pela CEMIG, suportando toda a corrente de entrada como corrente de curto circuito.

A escolha do TP, foi feita de maneira mais simples, devendo atender a tensão de isolamento de entrada, e a tensão de saída sendo em baixa tensão. Assim a escolha do TP possui as seguintes características potência nominal de 1kVA, tensão de isolamento de 15kV e tensão de saída 220/127V. Compondo assim a parte de colhimento de dados. Os TCs e TP estão ilustrados nas Figuras 11 e 12.

A parte de seccionamento de proteção é composto por disjuntor tripolar de média tensão com acionamento automático na abertura, potência de 250MVA e 350A, possuindo pequeno volume de óleo isolante. É um dispositivo robusto, resistente a altos graus de curtos-circuitos. Possui acionamento por molas de fricção, e seu comando de trip é enviado pelo relé de proteção, ilustrado na Figura 15.

Embora a chave seccionadora seja um equipamento de seccionamento de circuitos e possuir características de material de proteção quando possui elo-fusível contra sobre corrente, a mesma não participa da parte de proteção porque não é um equipamento controlável remotamente ou por meio de relé microprocessado, sendo controlado manualmente por alavanca de comando. Geralmente, quando não possui proteção contra sobre corrente, este equipamento é utilizado para isolamento de circuitos, seccionando a alimentação do mesmo, garantindo segurança para trabalhos de manutenção e conservação dos outros materiais como: transformadores e disjuntores de média tensão. As chaves seccionadoras são equipamentos de proteção indireta e não controláveis. Para esta subestação foi utilizada uma chave seccionadora tripolar de acionamento simultâneo, de abertura sobre carga de 15kV e 200A, com elo-fusível, ilustrada na Figura 16.

Por último a parte de controle, constituída por relé microprocessado. O relé escolhido para esta subestação foi o relé PEXTRON 7104, ilustrado na Figura 17. Relé de proteção microprocessado podendo trabalhar como proteção principal ou de retaguarda. Proteção monofásica, bifásica, trifásica e trifásica mais neutro, podendo ser utilizado na proteção de sobrecorrente em linhas de transmissão, distribuição, cabines primárias, distribuição industrial, alimentadores, transformadores, motores, barramentos e geradores. Devido suas características de tropicalização (temperatura e umidade), permite a instalação em cubículos (painéis) ao tempo ou abrigados e com alimentação auxiliar CA/CC (PEXTON, 2016).

Possui as funções de sobre corrente instantânea de fase e neutro (funções 50/50N), as funções de sobre corrente temporizada de fase, neutro e sensor de terra (funções 51/51N/51GS). Possui logicas de bloqueio para alteração em loco ou remota. Programação simples e *auto-check*. Possui 4 entradas de medição de corrente trifásica independente e 4 contatos de *trip* independente para todas as funções. Possui dispositivo de lacre e fonte capacitiva incorporada (PEXTON,2016). Para a escolha do relé não foi relevante à disposição da função 32, proteção diferencial, devido a não existência de gerador dentro da subestação. Na Figuras 50 está ilustrado o diagrama de ligação do relé PEXTRON 7104.

$$\text{Corrente de partida de neutro} = I_p \times 0,33 = 19,21 \times 0,33 = 6,31A \quad (24)$$

- Corrente nominal do transformador (I_{n_trafo}):

$$I_{n_trafo} = \frac{P}{1,73 \times V} = \frac{1000}{1,73 \times 13,8} = 41,88A \quad (25)$$

Onde: P potência do Trafo em [kVA]

V tensão de alimentação em kV

- Corrente de magnetização do transformador (I_m):

$$I_m = I_{n_trafo} \times 8 = 41,88 \times 8 = 335,04A \text{ por } 0,1 \text{ segundos} \quad (26)$$

- Corrente de magnetização de neutro, um terço de I_m :

$$\begin{aligned} \text{Corrente de magnetização de neutro} &= I_m \times 0,33 = 335,04 \times 0,33 \quad (27) \\ &= 110,56A \text{ por } 0,1 \text{ segundos} \end{aligned}$$

- Ponto de I_{ANSI} e I_{NANSI} do transformador

A impedância percentual ($Z\%$) do Trafo é de até 5%, sendo assim:

$$I_{ansi} = I_{n_trafo} \times 20 = 41,88 \times 20 = 837,74A \text{ por } 3 \text{ segundos} \quad (28)$$

$$I_{nansi} = I_{ansi} \times 0,58 = 837,74 \times 0,58 = 485,90A \text{ por } 3 \text{ segundos} \quad (29)$$

- Temporização da Curva Extremamente Inversa

A temporização da curva será dada pela Equação 30, fornecida pelo fabricante:

$$t = 80 \times 0,2 / ((I - I_s)^2 - 1) \quad (30)$$

onde: I corrente instantânea

I_s corrente de partida.

Após os cálculos foi confeccionada Tabela 22

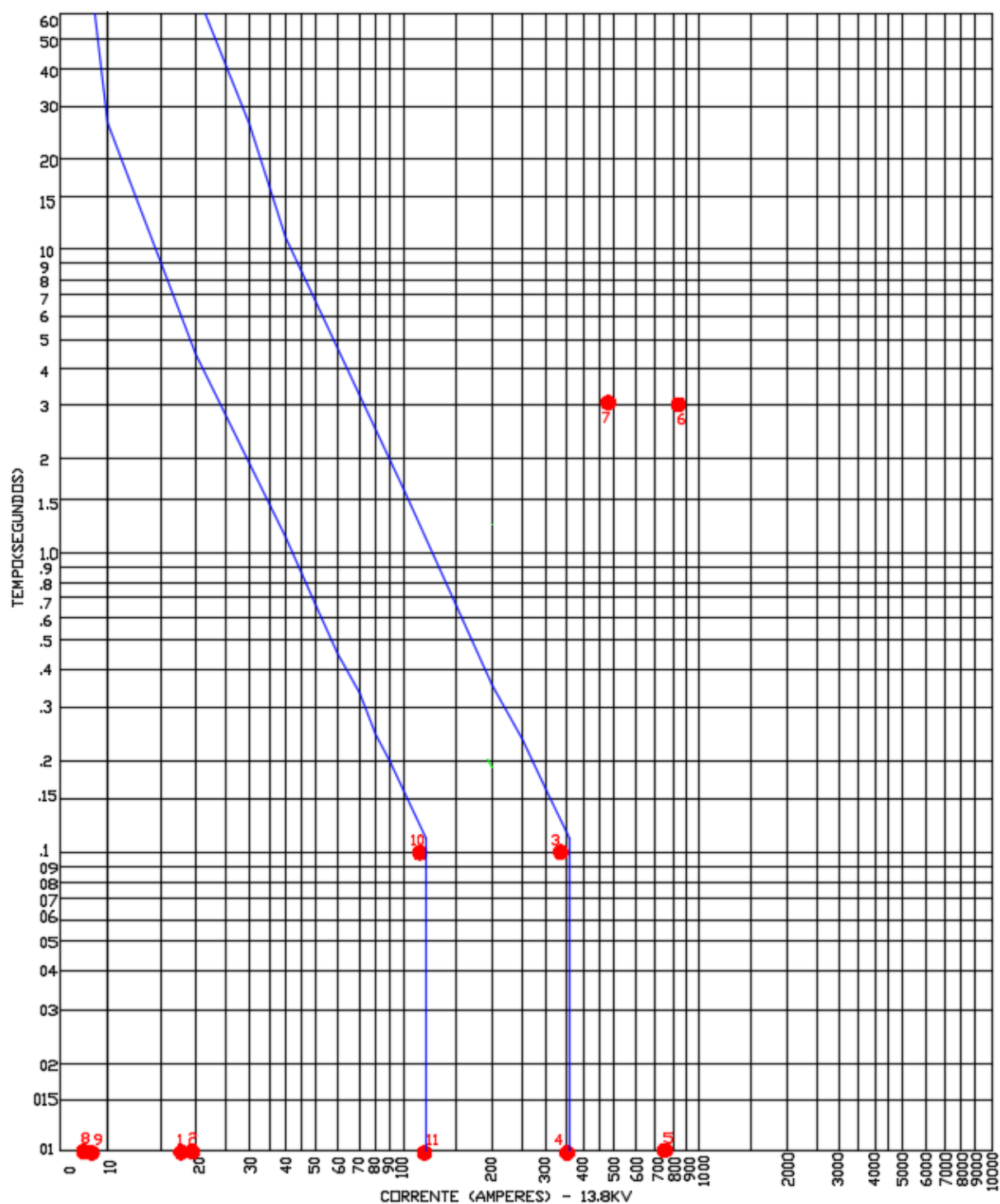
Tabela 22 – Dados de Parametrização do Relé

Parâmetros e Ajustes		
Parâmetro	Descrição do parâmetro	Faixa
Fase		
TC	Relação do transformador de corrente TC	20
I partida	Corrente de partida (A)	19,12
Curva	Tipo de curva de atuação de fase	EI
D.T.	Ajuste do dial de tempo para fase (s)	0,50
I def.	Corrente de partida tempo definido de fase (A)	Max.
T def.	Tempo da unidade definido de fase (s)	Max.
I inst.	Corrente instantânea de fase (A)	351,79
Neutro		
I partida	Corrente de partida (A)	6,31
Curva	Tipo de curva de atuação para neutro	EI
D.T.	Ajuste do dial de tempo para neutro (s)	0,50
I def.	Corrente de partida tempo definido de neutro (A)	Max.
T def.	Tempo da unidade definido de neutro (s)	Max.
I inst.	Corrente instantânea de neutro (A)	116,10

Fonte: ACERVO PESSOAL

Com os dados em mãos, com auxílio de *softwares* gráficos como, Excel e MATLAB, foi construído o coordenograma de proteção, ilustrado na Figura 51.

Figura 51 - Coordenograma de Proteção – Relé PREXTON 7104 T, Demanda 400W, Curva Extremamente Inversa



Fonte: ACERVO PESSOAL

Legenda:

1. Corrente nominal do circuito (fase)
2. Corrente de partida do circuito (fase)
3. Corrente de magnetização de fase do Trafo
4. Corrente instantânea de fase do Trafo

5. Corrente de curto circuito fornecida pela CEMIG
6. Ponto de I_{ANSI} do Trafo
7. Ponto de I_{NANSI} do Trafo
8. Corrente nominal do circuito (neutro)
9. Corrente de partida do circuito (neutro)
10. Corrente de magnetização de neutro do Trafo
11. Corrente instantânea de neutro do Trafo

Tempo definido: máximo

Corrente definida: máxima

Dial de tempo: 0,2s

4.1.7 Informações Adicionais

Após apresentação de informações de materiais, ferramentas e especificações para a confecção de projeto e execução de uma subestação, deve-se elaborar uma lista de material básica, conforme apresentada na Tabela 23. Esta lista deve estar presente em projeto aprovado pela CEMIG, porém, além destes materiais são necessárias peças sobressalentes e complementares para a construção da subestação, como por exemplo, parafusos, porcas, arruelas, dentre outros.

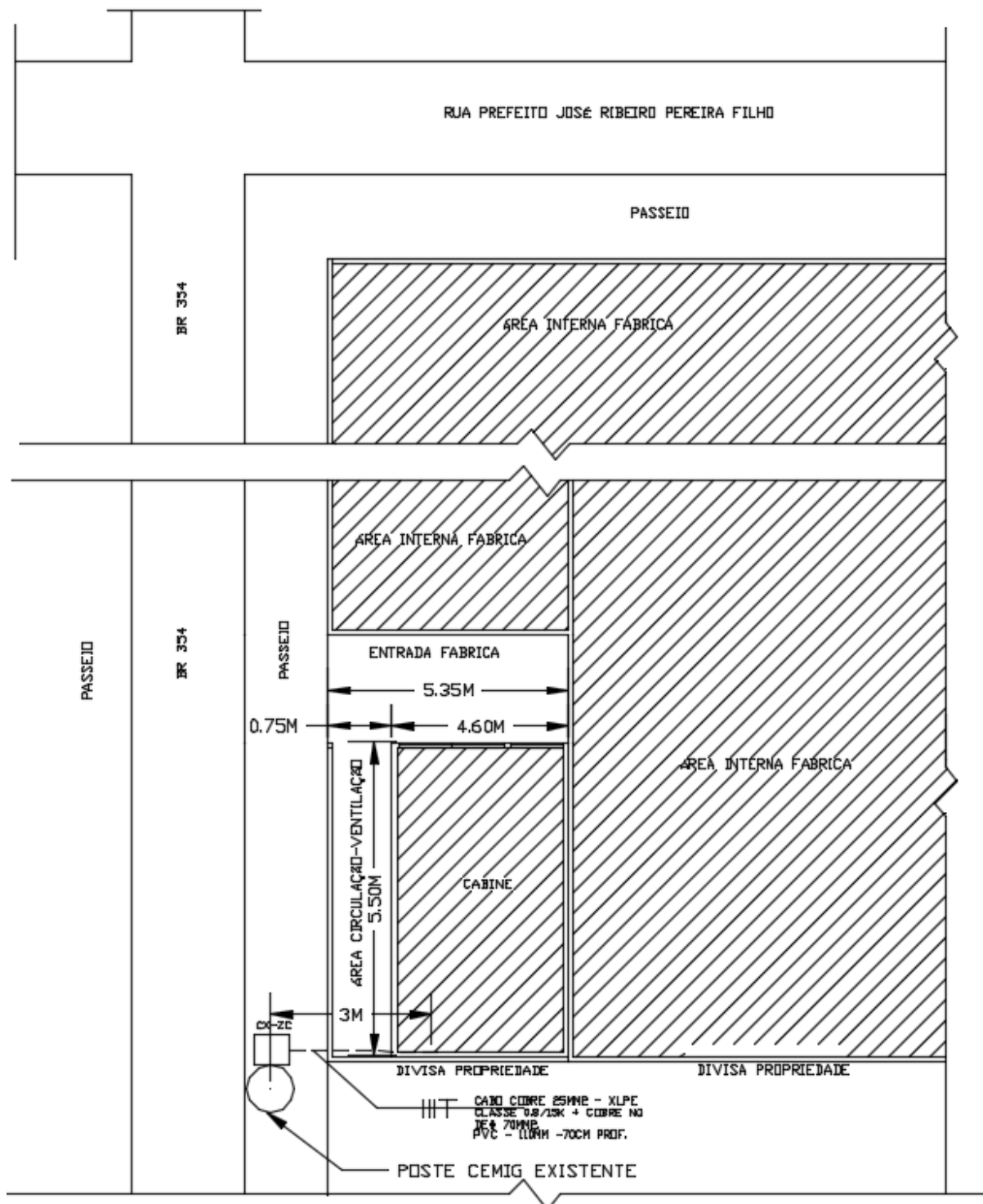
Tabela 23 – Lista de Material básica para confecção de subestação.

Item	QT.	Unid.	Descrição
1	2	UN.	Chave sec. tripolar, ac. Simultâneo, abertura sob carga, 15kV, 200A
2	2	UN.	Chapa de passagem - bucha interno/interno
3	V	UN.	Cabo de alumínio 3x1x50+3/8P, isolado EPR/XLPE, classe 8,7/15kV
4	3	UN.	TP 15kV para medição (propriedade CEMIG) - 70/1
5	3	UN.	TC 15kV para medição (propriedade CEMIG) - 40/5 FT 1,5
6	1	UN.	Disjuntor acionamento automático na abertura 250MVA-350A pequeno volume de óleo
7	1	UN.	Caixa tipo CM-4
8	1	UN.	Extintor de incêndio tipo pó químico ABC
9	1	UN.	Suporte para TC's e TP's
10	6	UN.	Isolador pedestal epoxi 15kV
11	3	UN.	Terminal termo-contrátil uso interno MUFLA
12	V	UN.	Terminal de cobre eletrolítico de 3/8"
13	6	UN.	Bucha de passagem interno/interno
14	1	UN.	Plataforma basculante 500x500mm
15	3	UN.	TC 15kV para proteção 100/5
16	1	UN.	TP 15kV para proteção 1kVA - 220/127V
17	1	UN.	Transformador isolamento a óleo, 1000kVA 13800/220/127 V
18	1	UN.	Relé de proteção secundária URPE 7104 No break 1000VA
19	1	UN.	TP 15kV para iluminação 1kVA - 220/127V

Fonte: ACERVO PESSOAL

Outra informação importante é a localização geográfica da subestação, ilustrado na Figura 52, tanto para a equipe de execução de obras tanto para a concessionária de energia. Esta localização serve para a concessionária quantificar o número de clientes que ficaram sem energia no ato de ligação da subestação e até mesmo para futuras manutenções e melhorias na sua rede.

Figura 52 - Localização da Cabine de Subestação na Fábrica.



Fonte: ACERVO PESSOAL

5 CONCLUSÃO

Neste capítulo concluiremos o trabalho, apresentando todos os desafios encontrados e sanados para a sua confecção e por fim apresentaremos os possíveis trabalhos futuros sobre o tema.

5.1 Considerações Finais

O ramo industrial de engenharia elétrica é muito vasto, principalmente em média tensão. Destaca-se também que subestação de energia em média tensão é um campo que requer muito estudo e responsabilidade ao responsável técnico, incluindo requisitos associados com perícia e acurácia aos técnicos de montagem. O projeto, desenvolvimento e por fim construção da subestação, apresentados nesta monografia, em vistoria feita pela CEMIG, foi aprovada, sendo inclusive seu projeto e montagem recebendo elogios. Importante citar que as empresas responsáveis pela obra e citadas neste trabalho possuem grande experiência neste mercado ainda não muito disseminado pelo Brasil, principalmente em Minas Gerais.

O objetivo deste trabalho era o desenvolvimento, desde o conhecimento em projetos, até execução de uma subestação, executando com o menor custo e exercendo suas funções de maneira adequadas. Inicialmente foi feita pesquisa bibliográfica necessária para conhecimento de normas e resoluções para a projeção das subestações. Toda a execução da subestação, desde a aquisição dos materiais a instalação dos mesmos, foi acompanhada pelo aluno e autor deste trabalho.

Quando chegamos ao final de um curso, queremos colocar em prática todo nosso conhecimento adquirido na graduação, foi então uma excelente oportunidade para minha carreira como futuro engenheiro eletricista trabalhar como encarregado de projetos e execução de serviços e aplicar doutrina adquirida no processo de graduação e conhecendo novas ideias e conceitos de trabalho. Porém, como foi o primeiro trabalho nesta área, a falta de experiência na execução de projetos deste porte, além da montagem de toda subestação foi um grande desafio. Assim, após período árduo de estudos e trabalhos se deu a conclusão desta monografia constatando vasto conhecimento sobre fornecimento de energia elétrica em média/alta tensão e suas normas técnicas vigentes. Esta mestria serviu para aplicar

a mesma solução em diferentes ramos e atividades econômicas em obras de *shoppings centers*, supermercados e hospitais, posteriormente.

5.2 Trabalhos Futuros

O conhecimento e experiências adquiridos não são válidos somente para compra de energia elétrica, como também para venda de energia gerada por meios incentivados e renováveis como biomassa, solar, entre outras que, necessitam da montagem de subestações elevadoras de tensão para inserir a energia gerada na rede de transmissão.

Além disto, após a conclusão dos trabalhos da subestação de energia elétrica e a compra de energia, há ainda trabalhos a serem realizados. Um exemplo é o ajuste do fator de potência do consumidor, calculado pelo memorial de massa de consumo de energia elétrica e corrigido por bancos de capacitores. Outro exemplo é o comando de partida de motores e quaisquer manutenções elétricas industriais necessárias para o contínuo funcionamento da produção.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRASEL – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE BARES E RESTAURANTES. Produção de refrigerantes deve subir 5%. Disponível em: <http://www.abrasel.com.br/noticias/3192-20012015-producao-de-refrigerante-deve-subir-5.html> Data de acesso 10/01/2016.

ADMINISTRADORES. Setor de bebidas registrou aumento de produção em 2014. Disponível em: <http://www.administradores.com.br/noticias/negocios/setor-de-bebidas-registrou-aumento-de-producao-em-2014/97106/> Data de acesso 10/01/2016.

AES ELETROPAULO – FORNECIMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA EM TENSÃO PRIMÁRIA DE DISTRIBUIÇÃO. Ed. 2011. Disponível em: https://www.aeseletropaulo.com.br/padroes-e-normas-tecnicas/manuais-normas-tecnicas-e-de-seguranca/LIG%20MT%202011/LIG_MT_2011_VAC.pdf

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. ANEXO III – MÓDULOS CONSTRUTIVOS DE SUBESTAÇÕES DE DISTRIBUIÇÃO. CATÁLOGO REFERENCIAL DE MÓDULOS PADRÕES DE CONTRUÇÃO DE SUBESTAÇÕES, LINHAS E REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. Data: 22/09/2010.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. Banco de Informação de Geração BIG. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm> Data do acesso: 24/03/2017.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST. Data de vigência 01/01/2011.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. - Resolução N°395, de 04 de Dezembro de 1998. Estabelece os procedimentos gerais para registro e

aprovação de estudos de viabilidade e projeto básico de empreendimentos de geração hidrelétrica, assim como da autorização para exploração de centrais hidrelétricas até 30 MW e dá outras providências.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. - Resolução N°414, de 09 de Setembro de 2010. Estabelece as Condições Gerais de Fornecimento de Energia Elétrica de forma atualizada e consolidada.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. - Resolução N°479, de 03 de Abril de 2012. Altera a Resolução Normativa nº 414, de 9 de setembro de 2010, que estabelece as Condições Gerais de Fornecimento de Energia Elétrica de forma atualizada e consolidada.

ASBRA – ASSOCIAÇÃO DE SUPERMERCADOS DE BRASÍLIA. Produção de refrigerantes pode crescer 5% em 2015 com nova tributação. Disponível em: <http://www.asbra.com.br/noticia/producao-de-refrigerantes-pode-crescer-5-em-2015-com-nova-tributacao> Data de acesso: 10/01/2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14039 - Instalações Elétricas em Média Tensão. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15465 – Sistema de eletrodutos plásticos para instalações elétricas de Baixa Tensão – Requisitos de Desempenho. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15688 – Rede de Distribuição de Energia Elétrica. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15715 – Sistemas de dutos corrugados de polietileno para infra-estrutura de cabos de energia e telecomunicações - Requisitos. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5356 – Transformadores de Potência. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5410 – Instalações Elétricas em Baixa Tensão. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5419 – Proteção Estrutural contra Descargas Atmosféricas. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5598 – Eletrodutos de aço carbono, com revestimento protetor e rosca BSP - Requisitos. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5984 – Norma Geral do Desenho Técnico. Rio de Janeiro, 2000.

ASSOCIAÇÃO DOS ENGENHEIROS E ARQUITETOS DE APUCARANA – AEAA. Disponível em: <http://aeaa.com.br/site/> Data de acesso: 02/02/2017.

ATS ENGENHARIA – OBRAS. Disponível em: <http://atseng.com.br/index.php/component/content/?view=featured> Data de acesso: 26/05/2016.

BA ELÉTRICA – PRODUTOS. Disponível em: <http://www.baeletrica.com.br/produtos/categoria/djuntores-acessorios> Data do acesso: 24/03/2016.

BARROS, B. F.; GEDRA R. L. CABINE PRIMÁRIA: Subestação de Alta Tensão de Consumidor. 2. Ed. São Paulo: Editora Érica Ltda 2013.

BLOG CEMIG - CONCESSIONÁRIA DE ENERGIA DE MINAS GERIAS. Disponível em: <http://blog.cemig.com.br/> Data de acesso: 25/09/2016.

BVK ENGENHARIA – REALIZAÇÕES. Disponível em: [http://bvkengeharia.com.br/#\[AbreEmDIV\]ajax.asp?link=list_galgrupo](http://bvkengeharia.com.br/#[AbreEmDIV]ajax.asp?link=list_galgrupo). Data de acesso: 26/05/2016.

CASA DOS TUBOS – PRODUTOS. Disponível em: <http://casatubos.com.br/> Data de acesso: 05/08/2016.

CELESC. O Mercado de Energia. Disponível em: <http://novoportal.celesc.com.br/portal/index.php/celesc-geracao/comercializacao/o-mercado-de-energia>. Data de acesso: 10/01/2016.

COMERC ENERGIA. O MERCADO LIVRE DE ENERGIA. Disponível em: http://www.comerc.com.br/comerc/o_mercado_livre_de_energia.asp. Data de acesso: 10/01/2016.

COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS - CEMIG. Manual do Consumidor nº11 – Belo Horizonte-MG, 2015

COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS - CEMIG. ND 5.1: Fornecimento de Energia Elétrica em Tensão Secundária Rede de Distribuição Aérea Edificações Individuais – Belo Horizonte - MG, 2015.

COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS - CEMIG. ND 5.2: Fornecimento de Energia Elétrica em Tensão Secundária Rede de Distribuição Aérea Edificações Coletivas – Belo Horizonte - MG, 2015.

COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS - CEMIG. ND 5.3: Fornecimento de Energia Elétrica em Média Tensão Rede de Distribuição Aérea ou Subterrânea – Belo Horizonte - MG, 2013.

CONCESSIONÁRIA DE ENERGIA DE MINAS GERIAS - CEMIG. Cartilha da Economia de Energia: 75 Dicas. Volume único. Belo Horizonte. Setor de Eficiência Energética da Superintendência de Desenvolvimento da Capital Belo Horizonte, 2012.

CONCESSIONÁRIA DE ENERGIA DE MINAS GERIAS - CEMIG. Glossário CEMIG. Última atualização 23/02/2015; 12h40 Disponível em:

<http://ri.cemig.com.br/static/ptb/glossario.asp?idioma=ptb> Data do acesso: 29/03/2017.

CONCESSIONÁRIA DE ENERGIA DE MINAS GERIAS - CEMIG. Valores de Tarifas e Serviços Disponível em: http://www.cemig.com.br/pt-br/atendimento/Paginas/valores_de_tarifa_e_servicos.aspx Data do acesso: 29/03/2017.

EBC Agência Brasil. Abraceel: 700 empresas aderem ao mercado livre em busca de energia mais barata. Disponível em: <http://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2016-01/abraceel-700-empresas-aderem-ao-mercado-livre-em-busca-de-energia-mais> Data de acesso: 10/01/2016.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA EPE. Consumo anual de energia elétrica por classe (nacional) 1995-2014. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/mercado/Paginas/Consumonacionaldeenergiael%C3%A9tricaaporclasse%E2%80%931995-2009.aspx> Data do acesso: 24/03/2017.

FITZGERALD, A. E.. KINGSLEY JR. C., KUSKO, A. Máquinas Elétricas. 1.Ed. São Paulo. Editora: McGraw-Hill do Brasil. 1978.

FUNDIÇÃO ALFA – PRODUTOS. Disponível em: <http://www.fundicaoalfa.com.br/produtos.html> Data de acesso: 12/02/2017.

GERMER ISOLADORES – PRODUTOS. Disponível em: <http://www.germerisoladores.com.br/Produtos.asp> Data de acesso: 11/12/2016.

JORDÃO, R. B. TRANSFORMADORES. 1. Ed. São Paulo. Editora Edgard Blucher, 2002.

KAGAN, N.; OLIVEIRA, C. C. B.; ROBBA, E. J. INTRODUÇÃO AOS SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. 1. ed. São Paulo: Editora Blucher 2005.

MAMEDE FILHO, J. Instalações Elétricas Industriais. 9. Ed. São Paulo Editora: LTC. 2017.

MAMEDE FILHO, J. Manual de Equipamentos Elétricos. 4Ed. São Paulo Editora: LTC. 2013

MAMEDE FILHO, J; MAMEDE, D. R. Proteção de Sistemas Elétricos de Potência. 1.Ed. São Paulo. Editora: LTC. 2011

MERCADO LIVRE DE ENERGIA ELÉTRICA. VISÃO GERAL. Disponível em: <http://www.mercadolivredeenergia.com.br/> Data de acesso: 10/01/2016.

NORMA REGULAMENTADORA 10 – NR 10. Disponível em: <http://www.guiatrabalhista.com.br/legislacao/nr/nr10.htm>. Data de acesso: 05/11/2016.

PE TUBOS – PRODUTOS. Disponível: <http://www.petubos.com.br/produtos> Data de acesso: 24/03/2017.

PEXTRON. URPE 7104. Disponível em: <http://www.pextron.com.br/produtos/relés-de-protecao-multifuncao/urpe-7104-sobrecorrente-trifasico.html> Data de acesso: 02/07/2015.

PROTEC PROJETOS – PROJETOS. Disponível em: http://www.protecengenharia.com.br/index_projetos.htm Data de acesso: 24/03/2016.

SAREL – PRODUTOS. Disponível em: <http://www.sarel.com.br/produtos/sec/sr/> Data de acesso: 24/03/2016.

SCHMIDT, W. Materiais Elétricos: Condutores e Semicondutores. 2. ed. Vol.1 São Paulo: Editora Edgard Blucher 2013.

SILVA e CARVALHO – PRODUTOS. Disponível em:
<http://silvaecarvalho.com.br/produtos> Data de acesso: 26/05/2016.

SOLUÇÕES INDUSTRIAIS. Disponível em:
<http://www.solucoesindustriais.com.br/login> Data de acesso: 09/09/2016.

SUBESTAÇÕES.COM – SERVIÇOS. Disponível em: <http://subestacoes.com/>
Data de acesso: 29/09/2016.

TOWBAR – SINALIZAÇÃO DE SEGURANÇA. Disponível em:
<https://towbar.com.br/loja2/> Data de acesso: 24/03/2017.

TUBOLINE – PRODUTOS. Disponível: <http://www.tuboline.com.br/produtos.php>
Data de acesso: 03/02/2017.

WEG TRANSFORMADORES – Transformadores a Seco. Disponível em:
<http://old.weg.net/br/Produtos-e-Servicos/Geracao-Transmissao-e-Distribuicao-de-Energia/Transformadores/Transformadores-a-Seco> Data de acesso
15/09/2016.

WORLD ELÉTRICA – Obras. Disponível em:
<http://www.worldelettrica.com.br/Galeria/79> Data do acesso: 26/05/2016.

ZILMER – PRODUTOS, Transformadores para instrumentos. Disponível em:
http://www.zilmer.com.br/prod_instrumentos.asp Data de acesso: 02/02/2017.