

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS

RODRIGO DUARTE SAMPAIO

SUBESTAÇÕES DE ENERGIA ELÉTRICA: METOLOGIA E DIMENSIONAMENTO
PARA UMA PLANTA ELÉTRICA INDUSTRIAL

Manaus

2020



UFAM - Engenharia Elétrica - Eletrotécnica

SUBESTAÇÕES DE ENERGIA ELÉTRICA: METOLOGIA E DIMENSIONAMENTO PARA UMA PLANTA ELÉTRICA INDUSTRIAL

Rodrigo Duarte Sampaio

Trabalho de conclusão de curso apresentado à coordenação do curso de Engenharia Elétrica - Eletrotécnica da Universidade Federal do Amazonas, como parte necessária para a obtenção do título de bacharel em engenharia elétrica.

Orientador:

Ozenir Farah da Rocha Dias

Manaus

2020

Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

S192s Sampaio, Rodrigo Duarte
Subestações de energia elétrica: metodologia e dimensionamento para uma planta elétrica industrial / Rodrigo Duarte Sampaio . 2020
105 f.: il. color; 31 cm.

Orientador: Ozenir Farah da Rocha Dias
TCC de Graduação (Engenharia Elétrica - Eletrotécnica) -
Universidade Federal do Amazonas.

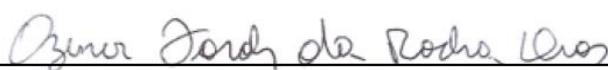
1. Metodologia. 2. subestações. 3. equipamentos. 4. planta industrial. I. Dias, Ozenir Farah da Rocha. II. Universidade Federal do Amazonas III. Título

SUBESTAÇÕES DE ENERGIA ELÉTRICA: METOLOGIA E DIMENSIONAMENTO
PARA UMA PLANTA ELÉTRICA INDUSTRIAL

Rodrigo Duarte Sampaio

MONOGRAFIA SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA -
ELETROTÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO ELETRICISTA.

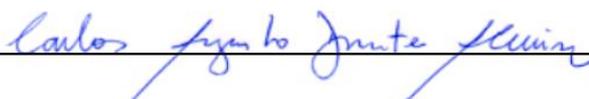
Aprovada por:



Prof. Dr. Ozenir Farah da Rocha Dias



Prof.ª M.ª Cristiane Lucia de Freitas



Prof. Esp. Carlos Augusto Duarte Alecrim

Manaus

2020

AGRADECIMENTOS

Este trabalho representa o encerramento de um longo e árduo caminho de dedicação e estudos. Agradeço primeiramente a Deus por me proporcionar este momento tão sonhado em minha vida, por diversas vezes me senti cansado e desmotivado, mas graças a Ele pude perseverar e vencer os obstáculos durante a graduação e assim conquistar meus objetivos acadêmicos.

Agradeço também aos meus pais, Emanuel e Francisca, que me apoiaram e me incentivaram em toda minha vida, mesmo nos momentos mais difíceis eles estavam lá, me dando forças e confiando em mim.

Gostaria de agradecer também a todos os colegas e amigos que fiz durante esses anos cursando engenharia elétrica, juntos passamos por momentos de grandes alegrias e dificuldades, alguns infelizmente não puderam concluir seus estudos e ficaram pelo caminho. No entanto, a ajuda, o conhecimento e os momentos que vivemos e compartilhamos juntos, nunca serão esquecidos. Tais experiências vividas foram essenciais para que eu pudesse me tornar a pessoa que sou atualmente e conseqüentemente chegar neste momento tão aguardado.

Por fim agradeço a Universidade Federal do Amazonas e a todo corpo docente que fizeram parte da minha graduação, através deles pude adquirir conhecimentos inestimáveis referentes à parte técnica e acadêmica, valores profissionais, éticos e morais que carregarei por toda minha vida.

*Suba o primeiro degrau com fé. Não é necessário que
você veja toda a escada. Apenas dê o primeiro passo.*

Martin Luther King

Resumo da Monografia apresentada à UFAM como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de bacharel em Engenharia Elétrica

SUBESTAÇÕES DE ENERGIA ELÉTRICA: METODOLOGIA E DIMENSIONAMENTO PARA UMA PLANTA ELÉTRICA INDUSTRIAL

Rodrigo Duarte Sampaio

Dezembro/2020

Orientador: Ozenir Farah da Rocha Dias

Curso: Engenharia Elétrica - Eletrotécnica

O presente trabalho de fim de curso apresenta uma metodologia e dimensionamento de uma subestação de energia elétrica industrial. Serão apresentados procedimentos de cálculo utilizados para o dimensionamento de uma subestação de 13,8 kV, com carga instalada de até 2500 kVA. Inicialmente serão apresentados os principais elementos que constituem uma subestação de energia elétrica, desde seus princípios de funcionamento, quanto os critérios utilizados em projetos definidos em normas. Em seguida será demonstrada uma metodologia didática de dimensionamento dos equipamentos de uma subestação de energia elétrica através de planilhas no Excel programadas. Por fim, o trabalho apresenta um estudo de caso do dimensionamento de uma subestação de energia elétrica de uma planta industrial seguindo os procedimentos contidos em normas vigentes através da metodologia criada.

Palavras-chave: Metodologia; subestação, equipamentos, planta industrial.

Abstract of Monograph presented to UFAM as a partial fulfillment of the requirements for the bachelor of electrical engineering.

ELECTRIC POWER SUBSTATIONS: METHODOLOGY AND SIZING FOR AN INDUSTRIAL ELECTRIC PLANT

Rodrigo Duarte Sampaio

December/2020

Advisor: Ozenir Farah da Rocha Dias

Course: Electrical Engineering - Electrotechnical

The present end-of-course work presents a methodology and dimensioning of an industrial electric energy substation. Calculation procedures used to design a 13.8 kV substation, with an installed load of up to 2500 kVA, will be presented. Initially, the main elements that constitute an electric power substation will be presented, from its operating principles, as well as the criteria used in projects defined in standards. Next, a didactic methodology for dimensioning the equipment of an electrical substation will be demonstrated using programmed Excel spreadsheets. Finally, the work presents a case study of the dimensioning of an electric power substation of an industrial plant following the procedures contained in current standards through the created methodology.

Keywords: Methodology; substation, equipment, industrial plant.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO	15
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO	16
1.2 OBJETIVOS	17
1.2.1 Objetivo geral	17
1.2.2 Objetivo específico	17
1.3 PROCEDIMENTO METODOLÓGICO	17
1.4 ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO	18
CAPÍTULO 2: SUBESTAÇÕES DE ENERGIA (SES)	19
2.1 CLASSIFICAÇÃO DAS SUBESTAÇÕES (SES)	21
2.1.1 Subestação central de transmissão	22
2.1.2 Subestação receptora de transmissão	22
2.1.3 Subestação de subtransmissão	22
2.1.4 Subestação de consumidor	22
2.1.5 Subestação de seccionadoras, de manobra ou chaveamento	23
2.2 CLASSIFICAÇÃO DAS SUBESTAÇÕES QUANTO ÀS EDIFICAÇÕES	24
2.2.1 Subestações externas	24
2.2.2 Subestações abrigadas	25
2.2.3 Subestações blindadas	25
2.3 EQUIPAMENTOS DE UMA SUBESTAÇÃO	26
2.3.1 Para-Raios	27
2.3.1.1 Parâmetros para escolha do para-raio	28
2.3.2 Mufla terminal	29
2.3.3 Bucha de passagem	29
2.3.3.1 Parâmetros para escolha de buchas de passagem	31
2.3.4 Chaves seccionadoras	32
2.3.4.1 Chaves seccionadores fusíveis	33
2.3.4.2 Parâmetros para escolha de chave seccionadora fusível tripolar	33
2.3.5 Barramento	34
2.3.5.1 Arranjo de barramento	35
2.3.5.2 Barramento simples	35
2.3.5.3 Barramento de transferência	36
2.3.5.4 Barramento duplo a dois disjuntores	37
2.3.6 Disjuntor	37
2.3.6.1 Disjuntores a vácuo	38

2.3.6.2 Parâmetros para escolha do disjuntor.....	39
2.3.7 Sistemas de proteção	39
2.3.7.1 Relé	40
2.3.7.2 Temporização	41
2.3.8 Transformadores de potência.....	41
2.3.8.1 Tipos de ligação	43
2.3.8.2 Meio isolante	44
2.3.8.3 Impedância percentual	44
2.3.8.4 Placa de identificação.....	45
2.3.8.5 Parâmetros para escolha de um transformador de potência	45
2.3.9 Transformadores de medição e proteção	46
2.3.9.1 Transformador de corrente.....	46
2.3.9.2 Transformador de potencial.....	49
CAPÍTULO 3: ETAPAS DE IMPLANTAÇÃO DE UMA SUBESTAÇÃO	52
3.1 ESPECIFICAÇÃO DE FAIXA DE TENSÃO PARA SUBESTAÇÕES.....	54
3.1.1 Subestações de média tensão	54
3.2 PARTES COMPONENTES DE UMA SUBESTAÇÃO.....	54
3.2.1 Ponto de ligação.....	55
3.2.2 Ramal de ligação.....	55
3.2.3 Ponto de entrega	55
3.2.4 Subestação com entrada aérea	56
3.2.5 Subestação com entrada subterrânea.....	56
3.3 SUBESTAÇÃO ABRIGADA EM ALVENARIA	57
3.3.1 Posto de medição primária	57
3.3.2 Posto de proteção primária	58
3.3.3 Posto de transformação	59
CAPÍTULO 4: METODOLOGIA DIDÁTICA.....	60
4.1 DEFINIÇÃO DO BARRAMENTO DE MÉDIA TENSÃO	60
4.2 DEFINIÇÃO DO BARRAMENTO DE BAIXA TENSÃO	61
4.3 DIMENSIONAMENTO DO TRANSFORMADOR DE CORRENTE PARA MEDIÇÃO	63
4.4 DIMENSIONAMENTO DO TRANSFORMADOR DE POTENCIAL PARA MEDIÇÃO	63
4.5 DIMENSIONAMENTO DO DISJUNTOR DE MÉDIA TENSÃO.....	64
4.6 DIMENSIONAMENTO DOS TRANSFORMADORES DE PROTEÇÃO.....	64
4.7 DIMENSIONAMENTO DO RELÉ	65
4.8 DIMENSIONAMENTO DA CHAVE FUSÍVEL.....	68
4.9 DIMENSIONAMENTO DA CHAVE SECCIONADORA TRIPOLAR	68
4.10 DIMENSIONAMENTO DOS ELOS FUSÍVEIS	69

4.11 DIMENSIONAMENTO DOS ELOS FUSÍVEIS DA CHAVE DE DERIVAÇÃO	70
4.12 DIMENSIONAMENTO DO PARA-RAIOS	70
4.13 PLANILHA DE DIMENSIONAMENTO	71
CAPÍTULO 5: ESTUDO DE CASO DE UMA PLANTA ELÉTRICA GENÉRICA.....	76
5.1 SUBESTAÇÃO DE UMA FÁBRICA GENÉRICA	81
5.2 DIMENSIONAMENTO DE UMA SUBESTAÇÃO	81
CAPÍTULO 6: CONSIDERAÇÕES FINAIS	91
6.1 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS.....	92
CAPITULO 7: REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	93
ANEXOS	97
ANEXO 1	97
ANEXO 2	98
ANEXO 3	99
ANEXO 4	102
ANEXO 5	104
ANEXO 6	106

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Consumo de energia elétrica no Brasil (em GWh).	15
Figura 2 - Consumo de energia elétrica por setor (em GWh).	16
Figura 3 - Diagrama de blocos do sistema elétrico de potência elétrica.	21
Figura 4: Representação simplificada de um sistema de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica.	23
Figura 5 - Subestação simplificada (ou externa).	24
Figura 6 - Subestação abrigada.	25
Figura 7 - Subestação blindada	25
Figura 8 - Vista frontal de uma subestação com ramal de entrada aéreo.	27
Figura 9 - Para-raio	28
Figura 10 - Mufla terminal	29
Figura 11 - Bucha De Passagem Interna/Externa.	30
Figura 12 - Bucha de passagem e derivação para medição.	31
Figura 13 - Chave seccionadora fusível tripolar	33
Figura 14 – Barramento de cobre retangular.	34
Figura 15 – Barramento de cobre circular.	34
Figura 16 - Arranjo de barramento simples.	35
Figura 17 - Barramento principal e de transferência.	36
Figura 18 - Barramento duplo a dois disjuntores.	37
Figura 19 - Disjuntor a Vácuo de Média Tensão VBW	38
Figura 20 - Arco elétrico.	39
Figura 21 - Relé de proteção URPE 7104T 50/51 (3F+1neutro).	40
Figura 22 - Construção de transformador do tipo núcleo envolvente.	42
Figura 23 - Transformador de potência	42
Figura 24 - Ligação estrela e triângulo sobrepostos.	43
Figura 25 - Placa de identificação de transformador de potência trifásico.	45
Figura 26 - Circuito simplificado de um transformador de corrente.	47
Figura 27 - Transformador de corrente.	47
Figura 28 - Circuito simplificado de um transformador de potencial.	50
Figura 29 - Transformador de potencial indutivo.	50
Figura 30 - Elementos de entrada de serviço de uma unidade consumidora de alta-tensão.	55
Figura 31 - Ramal de ligação aérea	56
Figura 32 - Ramal de ligação subterrânea.	57
Figura 33 - Posto de proteção primária (compartimento ao meio).	58

Figura 34 - Disjuntor geral de média tensão acompanhado de um relé 50/51.....	59
Figura 35 - Posto de transformação contendo um transformador a seco.	59
Figura 36 - Planilha de dimensionamento para componentes de subestação de energia elétrica.	72
Figura 37 - Cálculos utilizados para o ajuste do relé de proteção.	73
Figura 38 - Coordenograma de ajuste de fase - 300 kVA.	74
Figura 39 - Coordenograma para ajuste de neutro - 300 kVA.	75
Figura 40 - Planilha de dimensionamento para componentes de subestação de 500 kVA.	77
Figura 41 - Cálculos utilizados para o ajuste de um relé de proteção - 500 kVA.	78
Figura 42 - Coordenograma de ajuste de fase - 500 kVA.	79
Figura 43 - Coordenograma de ajuste de neutro - 500 kVA.	80
Figura 44 - Poste de derivação.....	82
Figura 45 - Corte de uma subestação - Isoladores, chave seccionadora tripolar e outros.	83
Figura 46 - Corte de uma subestação - Posto de medição primária.	84
Figura 47 - À direita localiza-se o posto de proteção primária.	85
Figura 48 - Posto de transformação.....	87
Figura 49 - Subestação de energia elétrica de 13.8 kV.....	88
Figura 50 - Diagrama unifilar de uma subestação de energia elétrica -1ª parte	89
Figura 51 - Diagrama unifilar de uma subestação de energia elétrica -2ª parte	90

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Bucha de passagem para uso exterior (Dimensões em mm).....	30
Tabela 2 - Bucha de passagem para uso interior-exterior (Dimensões em mm).	31
Tabela 3 - Cargas nominais para TCs a 60 Hz e 5 A.	48
Tabela 4 - Cargas dos principais aparelhos para transformadores de corrente.	49
Tabela 5 - Características elétricas dos transformadores de potencial.	51
Tabela 6 - Cargas das bobinas de aparelhos de medição e proteção.	51
Tabela 7 - Dimensionamento de barramento de média tensão.	61
Tabela 8 - Dimensionamento de barramento de baixa tensão.	62
Tabela 9 - Dimensionamento do transformador de corrente de medição em 13,8 kV.....	63
Tabela 10 - Dimensionamento do transformador de potencial em 13,8 kV.....	63
Tabela 11 - Disjuntor de média tensão - 13,8 kV e 34,5 kV.....	64
Tabela 12 - Transformador de potencial (TP) de proteção - 13,8 kV e 34,5 kV.....	64
Tabela 13 - Transformadores de corrente (TC) de proteção - 13,8 kV e 34,5 kV.	65
Tabela 14 - Chave fusível - 13,8 kV e 34,5 kV.....	68
Tabela 15 - Chave seccionadora tripolar - 13,8 kV e 34,5 kV.	69
Tabela 16 - Dimensionamento dos elos fusíveis para proteção dos transformadores.....	69
Tabela 17 - Dimensionamento dos elos fusíveis utilizados na chave de derivação da rede da distribuidora.	70
Tabela 18 - Para-raios - 13,8 kV e 34,5 kV.	70
Tabela 19 - Ajustes de relé de sobrecorrente – Fase.	86
Tabela 20 - Ajustes de relé de sobrecorrente – Neutro.....	86

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO

Com o passar dos anos a demanda por energia elétrica vem aumentando em níveis consideráveis, como observado na figura 1. Isto se deve em grande parte à ampliação e crescimento da economia nacional, a qual vem sendo estimulada através de políticas públicas que proporcionaram uma oferta maior e conseqüentemente um consumo mais elevado de energia elétrica à uma maior parcela da sociedade, conforme E.P.E (2020). Esta parcela da sociedade inclui o aumento de consumidores residências e indústrias dos mais diferentes ramos da economia.



Figura 1 - Consumo de energia elétrica no Brasil (em GWh).

Fonte: (Empresa de pesquisa energética, 2020, p.1)

Com o crescente avanço da indústria nas últimas décadas criou-se a necessidade de ampliação da capacidade dos sistemas elétricos de potência, tanto no que tange a geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. Para que os sistemas de potência possam suprir essa demanda crescente de forma eficiente e confiável, faz-se necessário a criação, ampliação e modernização dos seus equipamentos como transformadores, equipamentos de proteção, entre outros.

Frente a isso, o presente trabalho propõe uma metodologia de dimensionamento para os componentes essenciais para funcionamento, proteção e confiabilidade de uma subestação de energia elétrica para uma planta industrial.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Uma grande parcela da energia elétrica gerada no Brasil é consumida pelo setor industrial, de acordo com E.P.E (2020). Com a modernização e o avanço tecnológico constante, a demanda por energia elétrica vem crescendo gradativamente. Os grandes consumidores industriais de energia elétrica necessitam em suas instalações de uma subestação, a qual é responsável pela transformação, medição e proteção das grandezas elétricas presentes nos sistemas elétricos de potência.

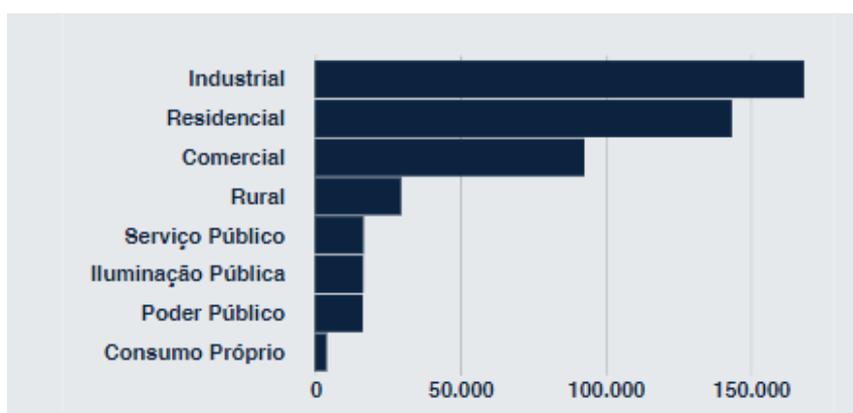


Figura 2 - Consumo de energia elétrica por setor (em GWh).

Fonte: (Empresa de pesquisa energética, 2020, p.1)

Para que os sistemas elétricos presentes em diversos setores industriais possam operar de forma confiável, faz-se necessário a criação de metodologias que possam oferecer ferramentas úteis na elaboração de projetos de subestações de energia elétrica de plantas industriais.

Sendo assim, o estudo de subestações de energia elétrica se torna de grande relevância para garantir as operações fabris de forma eficiente, segura e econômica.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivo apresentar uma metodologia de dimensionamento para os equipamentos essenciais ao funcionamento, proteção e confiabilidade de uma subestação de energia elétrica par uma planta industrial.

1.2.2 Objetivo específico

Apresentar conceitos teóricos e definições dos componentes presentes em uma subestação de energia elétrica.

Determinar os equipamentos e ajustes necessários ao funcionamento de uma subestação de energia elétrica.

Elaborar uma planilha didática no programa Microsoft Excel para o dimensionamento dos equipamentos de uma subestação.

Apresentar um estudo de caso do dimensionamento de uma subestação de energia elétrica de uma planta industrial.

1.3 PROCEDIMENTO METODOLÓGICO

O presente trabalho será uma pesquisa aplicada, cujo objetivo é a realização de uma pesquisa exploratória sobre o material bibliográfico presente na literatura. O procedimento técnico utilizado será de pesquisa bibliográfica. O método de abordagem a ser seguido será o hipotético-dedutivo e a elaboração será feita a partir do método de procedimento monográfico. Sendo assim, o trabalho será dividido nas seguintes etapas:

1- O trabalho terá início através da realização de pesquisas bibliográficas sobre os elementos pertencentes a uma subestação, sendo apresentado o seu princípio de funcionamento e metodologia de dimensionamento;

2- Elaboração de uma metodologia didática para o dimensionamento de tais equipamentos apresentados na fundamentação teórica;

3- Elaboração de um estudo de caso para o dimensionamento de uma subestação de energia elétrica de uma unidade fabril genérica;

4- Redação e defesa da monografia.

1.4 ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO

O presente trabalho é apresentado em seis capítulos, conforme descrito a seguir:

No capítulo 1 é apresentada a introdução do trabalho contendo a contextualização, os objetivos e os procedimentos metodológicos.

No capítulo 2 é apresentada a pesquisa bibliográfica contendo os equipamentos mais utilizados em subestações.

No capítulo 3 é apresentado os tipos de arranjos e instalações que serão adotadas para a construção da subestação.

No capítulo 4 é apresentado um método de dimensionamento para os componentes presentes na subestação

No capítulo 5 é apresentado o estudo de caso de uma planta industrial genérica, contendo os equipamentos utilizados e seus respectivos ajustes

No capítulo 6 são apresentadas as considerações finais acerca dos objetivos propostos pelo tema deste trabalho.

CAPÍTULO 2: SUBESTAÇÕES DE ENERGIA (SES)

Os sistemas elétricos de potência desempenham um papel de grande importância para o desenvolvimento socioeconômico de qualquer país. Eles têm como função essencial fornecer energia elétrica aos consumidores, seja eles consumidores residenciais ou grandes indústrias. Os sistemas elétricos de potência devem ser robustos e confiáveis de maneira que possam garantir o fornecimento de energia elétrica de maneira ininterrupta e dentro dos padrões de qualidades especificados em normas do setor elétrico.

A energia elétrica disponível para consumo em ambientes residenciais, comerciais e industriais, é produzida através da transformação de outra forma de energia, através de uma fonte primária, em energia elétrica. As fontes de energia primárias são: energia mecânica potencial, que se encontra em quedas d'águas presente em rios com grandes desníveis de altura, energia mecânica cinética, presente no movimento de pás eólicas movimentadas pelo ar, energia térmica, presente em diversos tipos de combustíveis e muitas outras. Todas essas fontes citadas podem ser convertidas em eletricidade.

Segundo Operador Nacional do Sistema (2020), cerca de 65,7% da produção de energia elétrica baseia-se na transformação de energia hidráulica, devido ao grande potencial hídrico existente no país. A geração de energia elétrica oriunda de energia hidráulica, ocorre em instalações chamadas de usinas hidrelétricas (usina geradora). Devido aos grandes centros consumidores de energia estarem localizados a longas distâncias das usinas geradoras, faz-se necessário a presença de sistemas de transmissão de energia elétrica. Estes sistemas desempenham a função de conectar os sistemas geradores, conduzindo a energia elétrica gerada até os consumidores finais.

De acordo com Kagan (2005), as potências transportadas apresentam valores consideravelmente altos, bem como as longas distâncias percorridas para o transporte da mesma. Devido a restrição de isolamento do sistema de geração, sua tensão elétrica de operação limita-se em no máximo de 25 kV, como consequência uma elevada corrente elétrica é produzida ($P=V.I$) para gerar a potência nominal do sistema de geração. Desta forma, torna-se impraticável o transporte desta energia nos mesmos níveis de operação da usina geradora. Para elevar a tensão da energia elétrica e reduzir a corrente elétrica para níveis compatíveis com o transporte adequado, faz-se o uso de subestações de elevação. O valor da tensão de operação do sistema de transmissão é estabelecido em função da distância a ser percorrida e do montante de energia a ser transportada.

O grande montante de energia elétrica precisa ter sua tensão rebaixada ao se aproximar dos grandes centros urbanos de consumo. Como existem consumidores com potência que variam de alguns W até MW, é inviável o suprimento de todos os usuários na tensão de transmissão. Para que os grandes consumidores de energia, tais como fábricas, utilizar a energia elétrica, é necessário o rebaixamento da tensão por meio de uma subestação de subtransmissão, este nível de tensão é chamado de tensão de subtransmissão ou alta tensão, segundo Kagan (2005).

Conforme Kagan (2005), os sistemas de subtransmissões suprem as subestações de distribuições, que são responsáveis por mais um rebaixamento da tensão, esta por sua vez, denominada de tensão de distribuição primária ou média tensão. A rede de distribuição primária irá alimentar os transformadores de distribuição, dos quais irão ocorrer derivações, que por sua vez irão formar a rede de distribuição secundária ou rede de baixa tensão, na qual estão conectados os consumidores residências e comerciais de baixo consumo. A seguir compreende-se de maneira sucinta as etapas e suas respectivas funções desde a geração, transmissão e distribuição da energia elétrica, conforme figura 3.

Como se pode observar, as subestações desempenham um papel bastante relevante dentro do sistema elétrico de potência, elas estão presentes tanto em momentos de elevação, como rebaixamento de tensão, e também nos sistemas de distribuição primário e secundário. Devido a essa importância, este trabalho se voltará aos estudos de subestações focadas em consumidores de média e alta tensão.

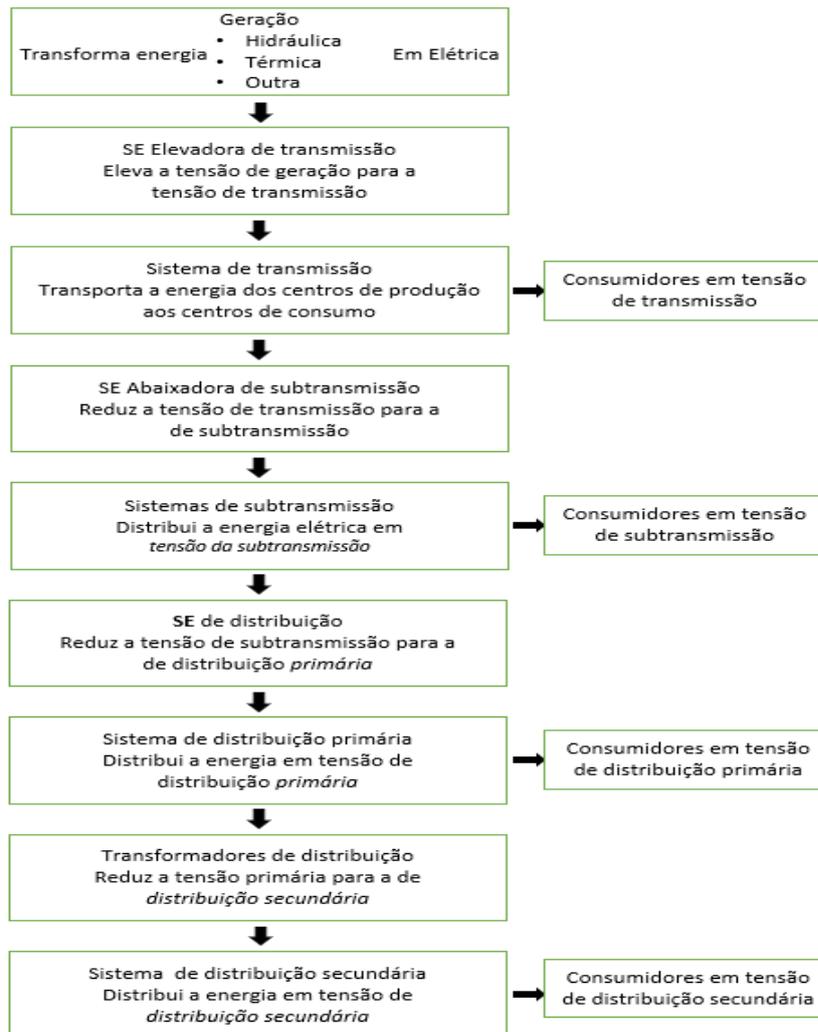


Figura 3 - Diagrama de blocos do sistema elétrico de potência elétrica.

Fonte: Adaptado de Kagan (2005, p.2).

2.1 CLASSIFICAÇÃO DAS SUBESTAÇÕES (SES)

As subestações de energia elétrica são locais onde há um conjunto de equipamentos, tais como disjuntores, chaves seccionadoras, transformadores de potencial (TP), transformadores de corrente (TC), relés, muflas e muitos outros equipamentos que serão apresentados nas próximas seções deste trabalho. Todos esses elementos tem como objetivo modificar as características elétricas do fluxo de potência, para que as mesmas, como por exemplo, tensão e corrente elétrica possam ser medidas e destinadas de forma segura e adequada para suas respectivas cargas. De acordo com Mamede (2017), as subestações de energia elétrica podem ser classificadas de acordo com sua finalidade específica. Elas podem ser denominadas como:

2.1.1 Subestação central de transmissão

A energia elétrica presente nos sistemas de potência é gerada em usinas e essas usinas podem ser hidroelétricas, térmicas, eólicas, entre outras. No entanto essa energia gerada não apresenta níveis de tensão adequados para o transporte a longas distâncias através das linhas de transmissão. Sendo assim, se faz necessário a presença de uma subestação central de transmissão, esse tipo de subestação se encontra localizada nas proximidades das usinas geradoras de energia elétrica, e tem como objetivo principal elevar os níveis de tensão elétrica, com o intuito de garantir o transporte mais eficiente do fluxo de potência gerado. Esse tipo de subestação também é conhecido como subestação elevadora.

2.1.2 Subestação receptora de transmissão

Para que o fluxo de potência gerado seja transmitido de forma eficiente através das linhas de transmissão por vários quilômetros, é necessário um aumento de tensão por meio da subestação central de transmissão. A potência gerada ao chegar nas barras dos grandes centros de consumo deve ser novamente convertida em outros níveis de tensão. Desta vez para níveis de tensão menores, essa transformação ocorre em subestações situadas ao final das linhas de transmissão, que por sua vez estão próximas de áreas onde haverá grande consumo de energia elétrica. Estas subestações são denominadas de subestações receptoras de transmissão. Também são conhecidas como subestações abaixadoras.

2.1.3 Subestação de subtransmissão

São subestações que dão origem aos alimentadores de distribuição primários. Estes por sua vez são circuitos que conduzem a energia elétrica em níveis de média tensão das subestações de transmissão até os transformadores de distribuição. Essas subestações ficam geralmente localizadas próximas aos grandes centros consumidores e estão conectadas às subestações de subtransmissão.

2.1.4 Subestação de consumidor

Segundo Mamede (2017), são subestações destinadas a fornecer energia elétrica aos consumidores finais. Estas são conectadas aos alimentadores de distribuição primária. Elas possuem no interior de suas instalações transformadores particulares usados para adequar os níveis de corrente e tensão de acordo com as necessidades do consumidor. Essa subestação é

construída em propriedade privada, ou seja, encontra-se situada nas edificações do consumidor final.

2.1.5 Subestação de seccionadoras, de manobra ou chaveamento

Esse tipo de subestação está localizado ao longo dos sistemas de distribuição primária, elas operam em um mesmo nível de tensão elétrica, proporcionando assim, a ramificação da rede ao longo de uma determinada área. Essa derivação da rede através das subestações seccionadoras permite que circuitos diferentes possam se conectar ou desconectar, conforme necessidade da concessionária de energia elétrica responsável, também permite que circuitos sejam desligados em casos necessários para a realização de manutenções periódicas ou reparos emergenciais.

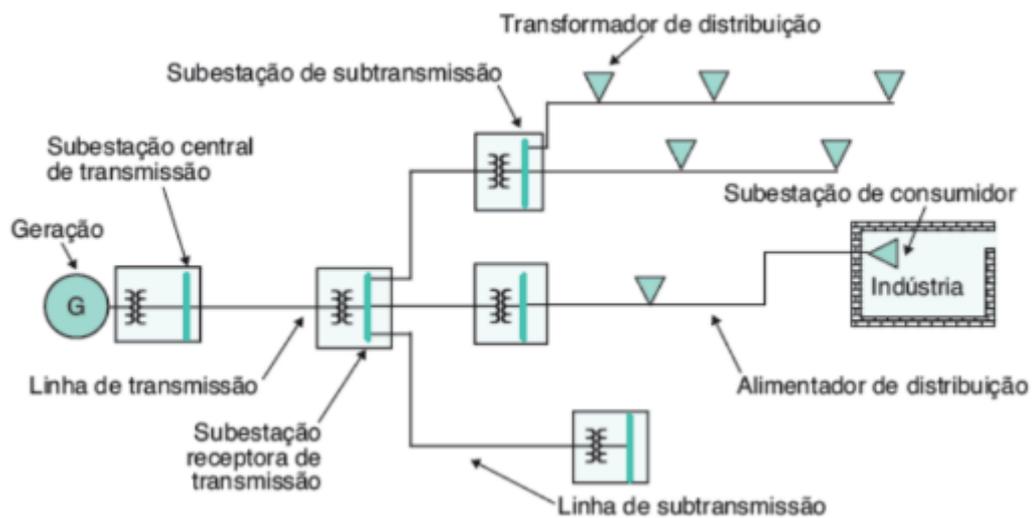


Figura 4: Representação simplificada de um sistema de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica.

Fonte: (Mamede, 2017, p.422)

De acordo com a figura 4, pode-se observar de maneira simplificada um sistema de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. Para que o transporte de energia elétrica seja realizado de maneira eficiente, é necessário a aplicação de subestações para a adequação dos níveis de tensão durante os diferentes estágios do sistema.

Na geração de energia, está presente uma subestação central de transmissão, responsável pela elevação de tensão para níveis compatíveis com a transmissão. Em seguida, ao final da linha de transmissão, situa-se uma subestação receptora de transmissão, esta irá rebaixar a tensão. Neste ponto do sistema, a tensão elétrica irá percorrer as linhas de

subtransmissão e mais uma vez ser convertida através das subestações de subtransmissão, deste modo, a energia elétrica estará em condições de alimentar os circuitos alimentadores de distribuição primária.

E por fim, tem-se aos transformadores de distribuição, os quais fornecerão energia elétrica em tensões compatíveis com a maioria dos equipamentos utilizados pelos consumidores residências e comerciais.

2.2 CLASSIFICAÇÃO DAS SUBESTAÇÕES QUANTO ÀS EDIFICAÇÕES

Além da classificação quanto à finalidade de utilização, as subestações podem ser classificadas através da sua forma construtiva, as mais comuns são: subestações externas, abrigadas e blindadas.

2.2.1 Subestações externas

São aquelas que possuem suas edificações e equipamentos localizados ao ar livre. São continuamente expostas às intempéries como raios solares, chuvas, ventos, entre outros. Esse tipo de subestação requer um número mais elevado de manutenções devido à exposição contínua dos equipamentos às intempéries já citadas, o que causa uma deterioração mais rápida dos componentes. Nesse tipo de configuração o transformador pode ser instalado em uma estrutura composta por um ou dois postes, como se pode observar na figura 5.



Figura 5 - Subestação simplificada (ou externa).

Fonte: (Eletrosá, 2020, p1)

2.2.2 Subestações abrigadas

São aquelas que possuem edificações abrigadas ou cobertas, podendo estar situadas dentro de prédios ou câmaras subterrâneas ou abrigos próprios, conforme figura 6. É o tipo mais usado na indústria, pois oferece baixo custo de manutenção. Em contra partida, necessita de áreas relativamente maiores para a sua instalação.



Figura 6 - Subestação abrigada.

Fonte: (Eletrosá, 2020, p1)

2.2.3 Subestações blindadas

São subestações que possuem seus equipamentos presentes no interior de um compartimento blindado por chapas de aço carbono, esses compartimentos (também podem ser chamados de módulos ou invólucros) podem ser acoplados em novos módulos caso haja necessidade de ampliação posterior, como se pode observar na figura 7. Esse tipo de configuração permite que a subestação possa ser instalada em locais com pouco espaço, devido às suas dimensões de tamanho reduzido.



Figura 7 - Subestação blindada

Fonte: (ENGELCO, 2015, p.2).

2.3 EQUIPAMENTOS DE UMA SUBESTAÇÃO

Subestações podem ser compreendidas como instalações ou habitáculos destinados ao alojamento de vários equipamentos, instrumentos de medição e entre outros, que operam de forma conjunta com o intuito de modificar os níveis de tensão e corrente elétrica, podendo assim proporcionar o controle do fluxo de energia e promover proteção e opções de comando aos sistemas elétricos de potência.

Nas próximas seções do presente trabalho, serão apresentados os principais equipamentos de uma subestação, os quais são:

- Para-raios
- Mufla terminal
- Bucha de passagem
- Chave Seccionadora
- Chaves Seccionadoras Fusíveis
- Barramento
- Disjuntor
- Transformador de Potência
- Transformadores de Medida
- Relé 50/51

Os principais equipamentos presentes em uma subestação podem ser observados com o auxílio da figura 8.

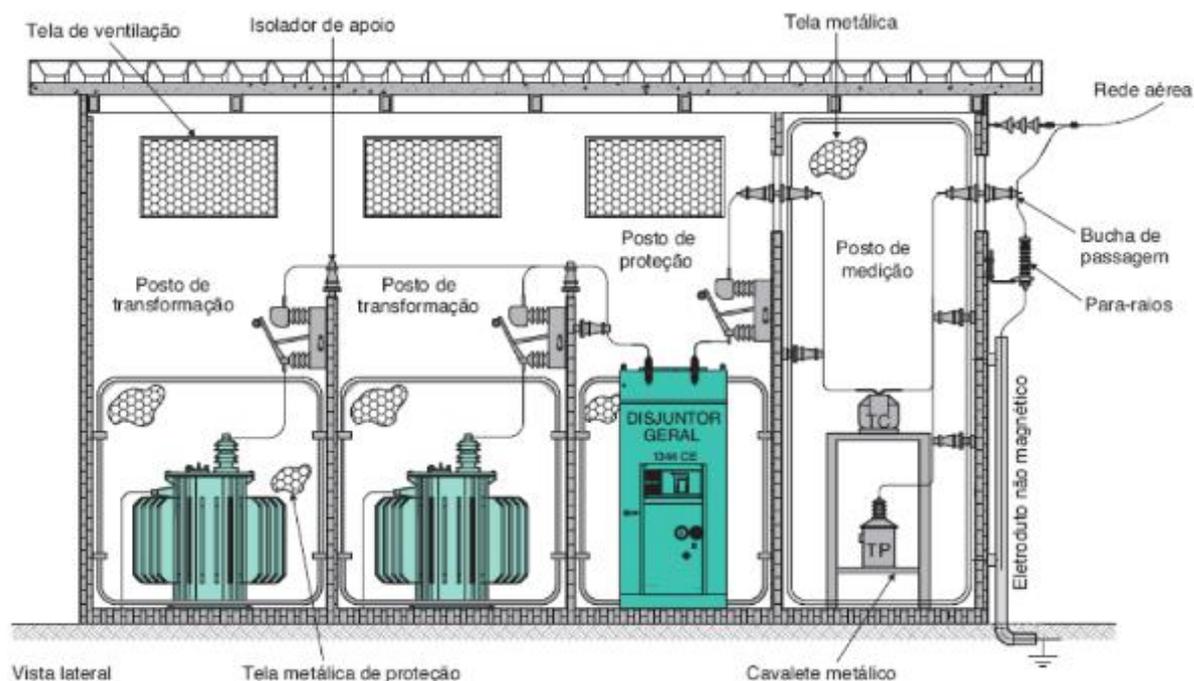


Figura 8 - Vista frontal de uma subestação com ramal de entrada aéreo.

Fonte: (Mamede 2017, p.432)

2.3.1 Para-Raios

Para-raios são dispositivos utilizados para proteger equipamentos presentes em uma subestação da ação de descargas atmosféricas. Eles proporcionam confiabilidade e continuidade do funcionamento da subestação.

A presença de para-raios em subestações tem como objetivo impedir que surtos de sobretensões oriundas de descargas atmosféricas, que eventualmente se propagam através dos cabos e demais condutores presentes nas linhas de transmissão, possam atingir e causar danos aos demais equipamentos presentes na subestação. Dessa forma, os para-raios desempenham a função de limitadores para os níveis de tensão, sendo assim, eles impedem que a tensão alcance níveis indesejados para o funcionamento dos demais equipamentos, evitando assim, transtornos e prejuízos econômicos.



Figura 9 - Para-raio

Fonte: (Professor Cide, 2011, p.1)

Na figura 9, pode-se observar um para-raio e de acordo com D'Ajuz (1985), pode-se compreender o funcionamento de um para-raio como sendo um dispositivo constituído de um elemento resistivo não linear, podendo este estar ou não associado em série com um centelhador. Em condições normais de uso, o para-raio funciona de forma análoga a um circuito aberto. Nos momentos em que há o surgimento de sobretensões, provocadas por descargas atmosféricas, o centelhador irá disparar, fazendo assim, surgir a circulação de corrente elétrica no elemento resistivo não linear. Dessa maneira o elemento resistivo não permitirá que a tensão em seus terminais extrapole os níveis desejados.

2.3.1.1 Parâmetros para escolha do para-raio

Para se especificar um para-raio, algumas grandezas devem ser informadas como a tensão máxima presente na instalação, corrente de descarga nominal e tensões residuais:

- **Tensão nominal máxima:** É o valor eficaz (ou RMS) da tensão elétrica em regime permanente de operação para o qual o para-raio será especificado. O para-raio deverá suportar a tensão máxima especificada em regime de operação, sem que isso acarrete prejuízos em seu funcionamento.
- **Corrente de descarga nominal:** É o valor de pico da corrente elétrica que deverá ser suportada pelo para-raio. Em instalações elétricas tanto de 13,8 kV ou 34,5 kV, recomenda-se o uso de para-raios com corrente de descarga nominal igual a 10 kA, segundo norma técnica de *Fornecimento de Energia Elétrica em Média Tensão (13,8kV e 34,5 kV)*, da Eletrobras – Amazonas Energia.

- **Tensão residual:** É o valor de tensão elétrica a qual o para-raio deverá suportar em seus terminais após o surgimento da corrente de descarga ou sobretensões causadas por surtos de manobras de longa duração.

2.3.2 Mufla terminal

A mufla terminal consiste em um dispositivo usado para oferecer isolamento elétrico nas extremidades de um condutor isolado quando este está conectado a um condutor nu ou terminal de ligação de equipamentos, de acordo com Mamede (2005). Também é utilizada para finalizar extremidades de condutores empregados na média ou alta tensão, conforme figura 10.



Figura 10 - Mufla terminal

Fonte: (Eletromarcos, 2020, p.1)

2.3.3 Bucha de passagem

São elementos isolantes utilizados em subestações de alvenaria e em equipamentos elétricos onde haja ligações por meio de rede subterrânea ou aérea entre compartimentos ou postos diferentes, bem como outras aplicações, conforme figura 11. Sendo assim, conclui-se que o objetivo principal da bucha de passagem é proporcionar uma abertura ou caminho para que um circuito elétrico possa passar de um habitáculo para outro da subestação.

As buchas de passagem podem ser caracterizadas para uso interno ou externo. Conforme Mamede (2005), as buchas de uso interno são as que possuem ambos os terminais contidos em um ambiente abrigado e que ofereça proteção às intempéries.



Figura 11 - Bucha De Passagem Interna/Externa.

Fonte: (GBL Comercial, 2014, p.1)

Podem ser construídos por meio de porcelana vitrificada ou resina epóxi. De maneira análoga, as buchas de uso externo apresentam os seus dois terminais expostos ao tempo. Na tabela 1, observa-se o nível de isolamento proporcionado por alguns tipos de buchas.

Outro tipo de bucha utilizada em subestações, são as de uso interno-externo, estas possuem um dos terminais exposto ao meio ambiente protegido contra as intempéries, enquanto o outro está instalado ao tempo, Mamede (2005).

Tabela 1 - Bucha de passagem para uso exterior (Dimensões em mm).

(Dimensões em ordem de grandeza)				
Corrente nominal (A)	Tensão (kV)	Dimensões		
		A	B	C
400	15	245	245	85
	25	311	311	98
	36	394	394	112

Adaptado de: (Mamede, 2005, p.214)

Na tabela 2 pode-se observar o nível de isolamento proporcionado por alguns tipos de buchas de uso interior-externo.

Tabela 2 - Bucha de passagem para uso interior-exterior (Dimensões em mm).

(Dimensões em ordem de grandeza)				
Corrente nominal (A)	Tensão (kV)	Dimensões		
		A	B	C
400	15	245	300	135
	25	311	340	135
	36	394	440	154

Adaptado de: (Mamede, 2005, p.216)

Conforme Mamede (2005), as buchas de passagem de uso interno são muito utilizadas em subestações prediais e industriais de média tensão, como ilustrado na figura 12.



Figura 12 - Bucha de passagem e derivação para medição.

Fonte: (JBV - Automação, 2020, p.1)

2.3.3.1 Parâmetros para escolha de buchas de passagem

Para se especificar uma bucha de passagem, algumas grandezas devem ser informadas como a tensão e correntes elétricas nominais presente na instalação.

- **Tensão nominal:** É o valor eficaz (ou RMS) da tensão elétrica em regime permanente de operação para o qual a bucha de passagem será especificada. A bucha deverá suportar a tensão nominal especificada em regime de operação, sem que isso acarrete prejuízos em seu funcionamento, segundo a NBR 5034 as tensões

nominais podem assumir valores entre: 1,3 - 3,6 - 7,2 - 12 - 15 - 25,8 - 38 - 48,3 - 72,5 - 92,4 - 145 - 242 - 362 - 460 e 800 kV.

- **Corrente de descarga nominal:** É o valor de corrente elétrica que deverá ser suportada pela bucha em condições nominais de uso. Segundo a NBR 5034 as correntes nominais podem assumir valores entre: 100 – 160 - 250 - 400 - 630 - 800 - 1.000 - 1.250 - 1.600 - 2.000 - 2.500 - 3.150 - 4.000 - 5.000 - 6.300 - 8.000 - 10.000 - 12.500 - 16.000 - 20.000 e 31.500 A. Segundo Mamede (2005), as buchas de passagem usadas em transformadores de potência devem ser dimensionadas para 20% de sobrecarga contínua.

2.3.4 Chaves seccionadoras

Em certas ocasiões é necessário seccionar um circuito elétrico. Esse seccionamento se faz necessário em determinadas situações como manutenção preventiva ou corretiva, manobras de teste e etc. Para que um circuito energizado, seja ele, uma subestação de energia elétrica ou um barramento de um quadro de cargas, possa ser desconectado da rede elétrica de alimentação de forma segura, é necessário o uso de uma chave seccionadora. A chave seccionadora consiste em um elemento mecânico de manobra. Quando a chave está na posição aberta, ela se torna um dispositivo de segurança responsável pela desconexão ou interrompimento de corrente elétrica entre a fonte e sua respectiva carga. Quando a chave está na posição fechada, ela se torna um elemento capaz de conduzir correntes elétricas em condições normais de operação ou em tempo reduzido durante curtos-circuitos.

Conforme D'Ajuz (1985), as chaves seccionadoras podem ser utilizadas em diversas situações dentro de uma subestação, tais como seccionamento de circuitos, necessidade de se isolar determinado equipamento ou linhas de energia, para que se possa realizar manutenção nos mesmos. Vale salientar que os terminais das chaves, quando as mesmas estão abertas, devem apresentar níveis de isolamento compatíveis com os níveis de tensão dos equipamentos as quais elas estão proporcionando a desconexão. A manutenção de chaves seccionadoras conectadas aos barramentos principais de alimentação de uma subestação pode ocasionar o desligamento de todos os equipamentos presentes na subestação.

2.3.4.1 Chaves seccionadores fusíveis

Consiste em uma chave tripolar dotada de três hastes isolantes, usualmente confeccionadas em epóxi ou fenolite. Essas hastes encontram-se montadas em paralelo a três cartuchos fusíveis, como se pode observar na figura 13. As hastes isolantes tem como função permitir a passagem de corrente elétrica. Em situações atípicas de operação, os fusíveis entram em operação e logo são deslocados de sua posição original, sinalizando assim, a ruptura do elo fusível. Esse tipo de chave apresenta comando simultâneo das três fases, o acionamento ocorre através de forma manual, através do funcionamento de um mecanismo auxiliado pela força de uma mola, de acordo com Mamede (2005).



Figura 13 - Chave seccionadora fusível tripolar

Fonte: (Sarel, 2013, p.1)

2.3.4.2 Parâmetros para escolha de chave seccionadora fusível tripolar

Para se especificar uma chave fusível tripolar, algumas grandezas devem ser informadas como a tensão e correntes elétricas nominais presente na instalação.

- **Tensão nominal:** É o valor eficaz (ou RMS) da tensão elétrica em regime permanente de operação para o qual a chave seccionadora será especificada, ela deverá suportar a tensão nominal especificada em regime de operação, sem que isso acarrete prejuízos em seu funcionamento.
- **Corrente de descarga nominal:** É o valor de corrente elétrica que deverá ser suportada pela chave em condições contínuas de uso.

2.3.5 Barramento

O barramento elétrico ou simplesmente barramento, é um elemento composto de material condutor, o material mais empregado na sua construção é o cobre, devido às suas características de grande condutividade de corrente elétrica e baixo custo econômico. Outro material utilizado na construção de barramentos é o alumínio.

Normalmente os barramentos são confeccionados em formatos de barras retangulares, mas também podem ser encontrados em formato de barras cilíndricas, como observado na figura 14 e 15. São responsáveis pelo fornecimento de tensão e condução da corrente elétrica nos circuitos presentes no interior de quadros de distribuição, painéis elétricos, subestações e entre outros.



Figura 14 – Barramento de cobre retangular.

Fonte: (Coppermetal, 2020, p.3)



Figura 15 – Barramento de cobre circular.

Fonte: EHE Indústria & Comércio, 2020, p.1)

Existem basicamente dois tipos principais de barramentos: barramentos de cobre não isolado (barramentos de fabricação específica) e barramentos de cobre isolado (barramentos pré-fabricados ou dutos de barra).

Segundo Mamede (2017), os barramentos de cobre não isolado são aqueles construídos com barras de cobre ou alumínio, estes possuem seção contínua e sem interrupções, suas dimensões são adaptadas de acordo com as necessidades de aplicação em quadros, subestações e etc. Em contrapartida, os barramentos de cobre isolado são elementos confeccionados em peças interconectáveis, podendo formar várias configurações, como por exemplo, derivações, juntas e etc. O barramento de cobre isolado encontra-se geralmente alojado no interior de condutos metálicos ou de material plástico rígido, são usualmente utilizados em circuitos com elevada carga.

2.3.5.1 Arranjo de barramento

Como visto anteriormente, barramentos são condutores de energia elétrica, geralmente fabricados em cobre ou alumínio, amplamente usados em subestações e demais circuitos, ele é responsável por receber toda tensão e corrente elétrica presente na subestação e conseqüentemente redistribuí-la para os circuitos subsequentes. A seguir serão apresentados alguns arranjos de barramentos para subestações, que nada mais são do que formas ou maneiras de conectarmos dois ou mais barramentos, transformadores, disjuntores e outros equipamentos, a fim de garantirmos um funcionamento interrupto da subestação. Serão apresentadas e mencionadas algumas características dos arranjos mais utilizados.

2.3.5.2 Barramento simples

Este tipo de arranjo é o mais simples e apresenta os custos de instalação mais baixos em relação aos outros tipos de configurações. Ele apresenta baixo índice de confiabilidade (não interrupção do fornecimento de energia elétrica), pois todos os circuitos se conectam na mesma barra, ou seja, se o barramento sofrer alguma falha e ocorrer atuação do seu sistema de proteção, toda subestação ficara sem energia elétrica, a figura 16 ilustra um arranjo de barramento simples. Deste modo, conforme Mamede (2017) este tipo de arranjo é recomendado para subestações que não necessitam de uma alta continuidade em seus serviços de fornecimento de energia.

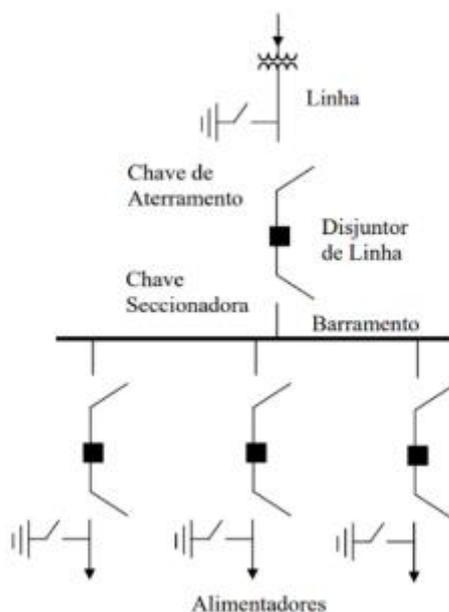


Figura 16 - Arranjo de barramento simples.

Fonte: (Leão, 2020, p.15)

2.3.5.3 Barramento de transferência

Uma subestação pode aumentar seu nível de confiabilidade operacional, acrescentando-se o uso de mais um barramento ao barramento principal. A conexão entre os dois barramentos, principal e o de transferência, ocorre por meio de um disjuntor, que em condições normais de operação encontrasse na posição “aberta”. De acordo com Mamede (2017), quando houver necessidade de manutenção em um dos disjuntores ou dos transformadores sem que haja a interrupção de energias às cargas, deve-se mudar fechar o disjuntor de transferência (posição “fechada”).

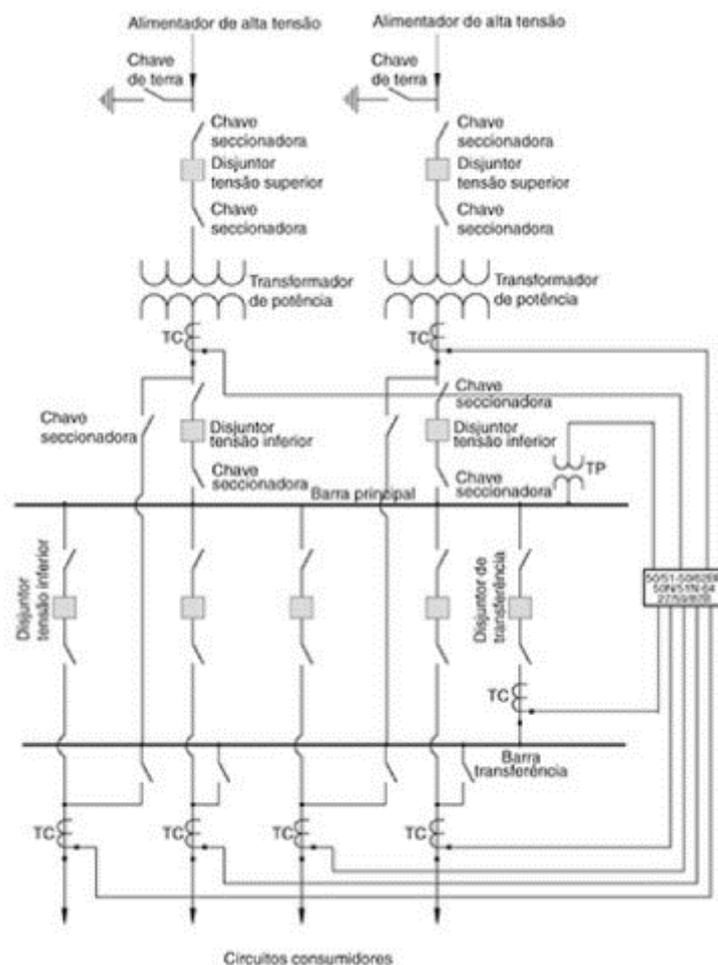


Figura 17 - Barramento principal e de transferência.

Fonte: (Mamede 2013, p.651)

Esta ação irá energizar o barramento de transferência, permitindo-se, o fechamento da chave seccionadora instalada em paralelo ao disjuntor que se deseja retirar de operação, posteriormente pode-se desconectar o referido disjuntor, abrindo, na sequência, as chaves

seccionadoras a jusante e a montante associadas ao disjuntor, alimentando, dessa forma, o circuito através do disjuntor de transferência, Mamede (2017). A figura 17 ilustra um arranjo de barramento de transferência.

2.3.5.4 Barramento duplo a dois disjuntores

Este tipo de configuração apresenta um custo bastante elevado, porém apresenta um ótimo índice de confiabilidade. Consiste em um arranjo onde os circuitos alimentadores das cargas estão conectados entre dois barramentos distintos, sendo assim, cada circuito contará com a proteção de dois disjuntores, deste modo, a interrupção ou fechamento de qualquer disjuntor não irá desligar os circuitos, observa-se o arranjo de barramento duplo a dois disjuntores, conforme figura 18.

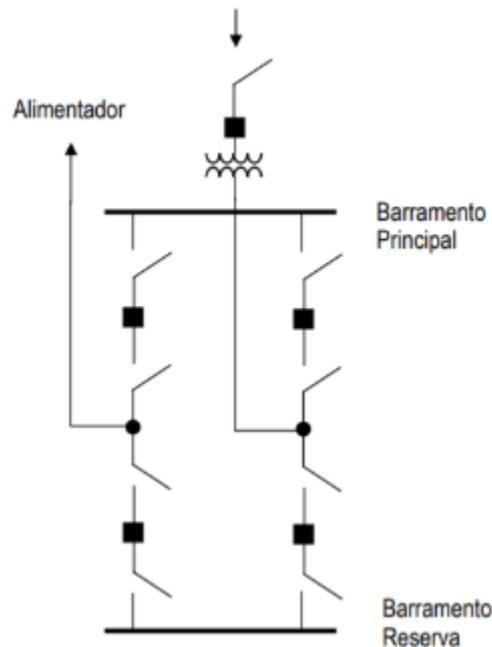


Figura 18 - Barramento duplo a dois disjuntores.

Fonte: (Leão, 2020, p.21)

2.3.6 Disjuntor

Disjuntores são dispositivos responsáveis pela interrupção da corrente elétrica em um circuito. Essas interrupções podem ocorrer devido à presença de correntes de faltas, sendo assim, os disjuntores necessitam atuar no menor intervalo de tempo possível. No entanto, os disjuntores também podem interromper corrente de circuitos que estejam operando a plena

carga ou em vazio, e a energizar circuitos em condições normais de operação ou condições de falta, de acordo com Mamede (2005).

São considerados um dos equipamentos de proteção mais importantes presentes numa subestação, pois podem interromper ou restabelecer o fluxo de corrente elétrica de cargas. Os principais tipos utilizados em subestações são: disjuntores a óleo, disjuntores a vácuo (ver ANEXO 4), disjuntores a ar comprimido e disjuntores a SF6, segundo Carleto (2017). No presente trabalho considerou-se o uso do disjuntor a vácuo, como ilustrado na figura 19.



Figura 19 - Disjuntor a Vácuo de Média Tensão VBW

Fonte: (WEG, 2020, p.1)

Entretanto, deve-se ressaltar que o uso de disjuntores deve ser feito sempre acompanhado de seus respectivos relés, pois estes contêm sensores que analisam as correntes elétricas de um determinado circuito. Desta forma, o disjuntor irá assumir sua posição de abertura, assim que receber um sinal de comando oriundo do relé, assim que o mesmo detectar anomalias fora das suas faixas de ajustes.

2.3.6.1 Disjuntores a vácuo

Constituem os tipos de disjuntores que utilizam câmaras de vácuo para promover a eliminação do arco elétrico. Vale mencionar que o arco elétrico se baseia em um fenômeno resultante da separação de dois terminais de um circuito elétrico energizado, conforme figura 20.



Figura 20 - Arco elétrico.

Fonte: (Vettel, 2020, p.1)

Os disjuntores a vácuo são amplamente utilizados em locais onde haja um número elevado de manobras. Podem realizar dez mil manobras em corrente alternada ou permanecer por um período de dez anos de funcionamento sem necessidade de manutenção, com base em Mamede (2005).

2.3.6.2 Parâmetros para escolha do disjuntor

Para se especificar um disjuntor, algumas grandezas devem ser informadas como:

- **Tensão nominal:** É o valor eficaz (ou RMS) da tensão elétrica em regime permanente de operação para o qual o disjuntor será especificado. O disjuntor deverá suportar a tensão máxima especificada em regime de operação, sem que isso acarrete prejuízos em seu funcionamento.
- **Corrente nominal:** É o valor eficaz (ou RMS) da corrente elétrica em regime permanente de operação para o qual o disjuntor será especificado. O disjuntor deverá suportar a corrente especificada em regime de operação, sem que isso acarrete prejuízos em seu funcionamento.
- **Corrente suportável de curta duração:** É o valor eficaz (ou RMS) da corrente elétrica que um disjuntor pode suportar por um curto período de tempo previamente especificado.

2.3.7 Sistemas de proteção

Para que ocorra o desligamento do disjuntor geral em ocasiões de sobrecorrente, utiliza-se o relé de sobrecorrente em subestações com fornecimento de energia elétrica em

tensões nominais de 13,8 kV e 34,5 kV, onde a potência da subestação apresenta capacidade acima de 300 kVA. No entanto, o uso de relé não é necessário para subestações de torre em poste simples onde há proteção no lado de baixa tensão seja efetuada por meio de disjuntores termomagnéticos em caixa moldada ou subestações construídas em alvenaria cuja potência dos transformador varia entre 75 kVA e 300 kVA, onde a proteção é realizada no lado de alta tensão por meio de chaves fusíveis e medição a 3 elementos na média tensão e com proteção geral na baixa tensão através de disjuntor, conforme a norma técnica *NDEE-01 - Fornecimento de Energia Elétrica em Média Tensão (13,8kV e 34,5 kV)*, da Eletrobras – Amazonas Energia (2014).

2.3.7.1 Relé

Em uma subestação de energia elétrica, o relé tem a função de proteger os sistemas elétricos através de ações de controle sobre os disjuntores (ver ANEXO 3). Estes dispositivos visam proteger os sistemas elétricos de danos causados por:

- Sobrecargas;
- Curtos-circuitos;
- Oscilações no nível de tensão elétrica;
- Oscilações na frequência dos sistemas elétricos.

De acordo com Mamede (2005), os relés representam uma vasta e numerosa quantidade de equipamentos e dispositivos, que diferem tanto em formas, tipos de construção e aplicações. Este trabalho se concentrará na aplicação do relé de sobrecorrente 50/51, com base na especificação técnica *Sistema de Proteção com Relé Microprocessado com Função 50/51 para Fase e Neutro*, da Eletrobras - Amazonas Energia. Através da figura 21, pode-se observar um relé de sobrecorrente 50/51.



Figura 21 - Relé de proteção URPE 7104T 50/51 (3F+1neutro).

Fonte: (Eletrotrafo, 2020, p.1)

2.3.7.2 Temporização

Os relés devem apresentar um tempo de acionamento o mais breve possível, assim que detectada qualquer tipo de falha no sistema. Entretanto, em certas ocasiões é necessário que o relé não envie sinais de abertura imediatamente para o disjuntor, isto corre por exigências de seletividade que envolvem um conjunto de vários equipamentos de proteção que atuam simultaneamente. Diante disso, pode-se inferir que os relés podem ser classificados com base em dois parâmetros de atuação distintos:

- Unidade instantânea (50): Atuação instantânea sobre o disjuntor, assim que detectado algum tipo de falha.
- Unidade temporizada (51): Apresentam um certo retardo no tempo de atuação sobre o disjuntor.

2.3.8 Transformadores de potência

Em um sistema elétrico de potência os níveis de tensão podem variar ao longo da geração, transmissão e distribuição da energia elétrica. Esses níveis de tensão variam de acordo com as necessidades técnicas e econômicas. Sendo assim, pode-se encontrar tensões que variam entre 13,8 kV e 25 kV na geração de energia, encontram-se também tensões entre 138 kV e 765 kV na transmissão e por fim, se observa na distribuição de energia níveis de tensão que variam de 13,8 kV até 34,5 kV, de acordo com D'Ajuz (1985).

Esta grande variação de tensão ao longo da geração, transmissão e distribuição da energia elétrica é obtida pelo uso de transformadores. Estes por sua vez são equipamentos que convertem a potência elétrica que possui um determinado nível de tensão e frequência, para outro nível de tensão diferente, mas com a mesma frequência.

Para Chapman (2013), o transformador pode ser compreendido como um conjunto de duas ou mais bobinas de fios enroladas em torno de um de um núcleo ferromagnético comum. Entre essas bobinas não existe uma conexão física, no entanto, as bobinas se conectam por meio de um fluxo magnético comum existente no interior do núcleo, conforme figura 22. O enrolamento ou bobina que está conectado a uma fonte de energia elétrica (CA), será denominado de enrolamento primário. As bobinas que estão conectadas às cargas, serão denominadas de enrolamento secundário ou enrolamentos de saída, caso exista um terceiro enrolamento, este será chamado de enrolamento terciário.

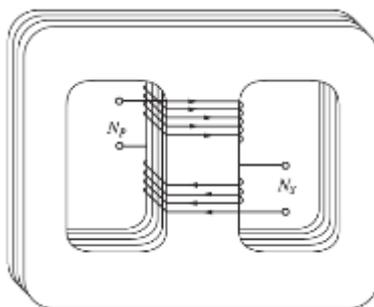


Figura 22 - Construção de transformador do tipo núcleo envolvente.

Fonte: (Chapman, 2013, p.68)

Na geração de energia faz-se necessário o uso de transformadores elevadores, esses transformadores encontram-se presentes nas usinas geradoras e são constituídos de dois enrolamentos, o enrolamento primário será na configuração delta e o enrolamento secundário será na configuração estrela aterrada. No momento em que um transformador aumenta a tensão elétrica, ele conseqüentemente irá diminuir a corrente elétrica, pois a potência elétrica deverá ser mantida. O uso de transformadores elevadores nos sistemas de transmissão é de grande importância, pois apresentam perdas baixas no transporte de potência elétrica ao longo das linhas de transmissão.

De acordo com Chapman (2013), as perdas de energia elétrica em sistema são proporcionais ao quadrado da corrente elétrica que circula nas linhas de transmissão. Sendo assim, um aumento de fator igual a 10 na tensão de uma linha de transmissão, resultaria em perdas elétricas 100 vezes menores, devido à redução das correntes elétricas presentes nos condutores. Na figura 23, observa-se um transformador de potência.



Figura 23 - Transformador de potência

Fonte: (Direct Industry, 2020, p1.)

2.3.8.1 Tipos de ligação

Os transformadores de potência trifásicos apresentam três terminais em seu lado de alta tensão (primário), denominados de H1, H2 e H3. De maneira análoga, tem-se 4 terminais no lado de baixa tensão (secundário), denominados de X0, X1, X2 e X3.

Diante disto, os transformadores de potência podem apresentar arranjos de conexões diferentes para seus enrolamentos. Quando um terminal de uma bobina se conecta outra bobina, denomina-se este arranjo de ligação delta ou triângulo. A tensão inserida entre dois destes terminais é chamada de tensão de linha.

O arranjo onde todas as bobinas se conectam em um mesmo ponto, denomina-se de ligação em estrela ou Y. A tensão inserida entre dois destes terminais é chamada de tensão de linha. No entanto a tensão medida entre uma bobina e o ponto em comum ou ponto n, é chamada de tensão de fase. Define-se a tensão de linha como sendo:

$$V_l = \sqrt{3} \cdot V_f$$

Os dois tipos de ligação podem ser observados conforme figura 24.

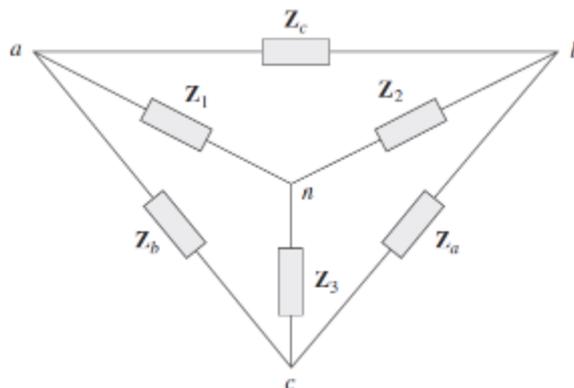


Figura 24 - Ligação estrela e triângulo sobrepostos.

Fonte: (Alexander, 2013, p.350)

Onde Z_a , Z_b e Z_c representam as bobinas ligadas em triângulo;
 Z_1 , Z_2 e Z_3 representam as bobinas ligadas em estrela.

2.3.8.2 Meio isolante

Os transformadores de potência podem ser classificados em duas classificações quanto ao uso de meio isolante. Essas classificações são: transformadores a seco e transformadores em líquido isolante.

De acordo com Mamede (2005), os transformadores a seco são equipamentos de custo elevado. Normalmente são empregados em locais onde haja grande riscos de incêndios. Os enrolamentos primários são constituídos por fitas de alumínio, formando as bobinas, que por sua vez são inseridas no interior de uma estrutura de ferro, sendo posteriormente encapsuladas em epóxi em um ambiente a vácuo.

No caso dos enrolamentos secundários, os mesmos são construídos por folhas de alumínio. A isolação é feita por meio de produtos inorgânicos à base de resina. O conjunto passa por um tratamento térmico a fim de alcançar a polimerização da isolação, efeito este que irá promover a união das folhas de alumínio, resultando em um bloco sólido, conforme Mamede (2005).

Os transformadores em líquido isolante utilizam óleo como meio isolante. Esse óleo pode ser mineral ou silicone. Neste tipo de transformador, os enrolamentos encontram-se imersos dentro do líquido isolante.

2.3.8.3 Impedância percentual

A impedância percentual consiste na representação da relação entre tensão de curto-circuito nos terminais secundários e a tensão nominal nos terminais primários, pode-se representa-la matematicamente por meio da seguinte equação:

$$Z_{pt} = \frac{V_{nccp}}{V_{npt}} \times 100 (\%)$$

Onde:

Z_{pt} é a impedância percentual;

V_{nccp} é a tensão nominal de curto-circuito inserida nos terminais primários;

V_{npt} é a tensão nominal nos terminais primários do transformador.

2.3.8.4 Placa de identificação

Os transformadores de potência apresentam uma placa de identificação, conforme observado na figura 25. Nela estão presentes informações importantes propriedades elétricas, características construtivas, tipos de ligação, impedância percentual, informações para manuseio e outros. A placa de identificação deverá ser confeccionada em aço inox ou alumínio anodizado, sua espessura mínima deverá ser de 0,8 mm, de acordo com Mamede (2005).

Sigma transformadores
Soluções com Energia

Av. das Indústrias, 45 - Área Industrial II
Lagoa Vermelha - RS - CEP: 95.300-000
CNPJ 93734911/0001-23
Fone: (54) 3358-2085

TRANSFORMADOR TRIFÁSICO

Nº Data Fabricação

Potência kVA Norma NBR 5440

Impedância % Tipo óleo isolante A

ALTA TENSÃO		TERMINAIS			
Tensão V	Pos.	Comutador Liga	H1	H2	H3
23.100	1	7-10 8-11 9-12			
22.000	2	10-4 11-5 12-6			
20.900	3	4-13 5-14 6-15			

Diagrama Fasorial Dyn1

BAIXA TENSÃO			
Tensão V	Terminais		Lig.
380	X1-X2	X2-X3 X3-X1	
220	X0-X1	X0-X2 X0-X3	

Volume L Massa total kg PI Nº 64

Elevação de temperatura óleo / enrolamento 50 / 55 °C

Material dos enrolamentos AT / BT

Nível de eficiência E Isento de PCB

INDÚSTRIA BRASILEIRA

Figura 25 - Placa de identificação de transformador de potência trifásico.

Fonte: (Sigma, 2020, p.12)

2.3.8.5 Parâmetros para escolha de um transformador de potência

Para se especificar um disjuntor, algumas grandezas devem ser informadas como:

- **Tensão nominal:** É o valor eficaz (ou RMS) da tensão elétrica em regime permanente de operação para o qual o transformador será especificado. O transformador de potencial deverá suportar a tensão máxima especificada em regime de operação, sem que isso acarrete prejuízos em seu funcionamento.

- **Corrente nominal:** É o valor de corrente elétrica em regime operação que circula nos terminais dos enrolamentos do transformador. O transformador deverá suportar a corrente especificada em regime de operação, sem que isso acarrete prejuízos em seu funcionamento.
- **Potência nominal:** Corresponde ao valor da potência aparente (em kVA), a qual o transformador deverá suportar.
- **Frequência nominal:** Corresponde ao valor de frequência (em Hz), na qual o transformador estará operando, esta frequência deve ser a mesma da rede de energia elétrica.

2.3.9 Transformadores de medição e proteção

Para que os equipamentos de medição e proteção, como por exemplo, os relés, funcionem de forma segura e economicamente viável, é necessário que as tensões e correntes elétricas sejam reduzidas para níveis menores. As correntes e tensões que circulam nos circuitos elétricos desses instrumentos de medida são oriundas dos transformadores de corrente e transformadores de potencial. Estes transformadores garantem um nível de isolamento maior contra as tensões elevadas presentes nos circuitos elétricos de potência. O uso destes transformadores permite que os equipamentos de medição e proteção possam ser construídos de forma mais compacta e menos robusta, resultantes de correntes e tensões de menor magnitude (ver ANEXO 5 e 6).

2.3.9.1 Transformador de corrente

O transformador de corrente é um equipamento utilizado para proporcionar correntes adequadas aos aparelhos de leitura, como ilustrado na figura 27. Consiste em um transformador onde as bobinas do primário estão conectadas em série com o circuito de alta tensão e as bobinas do secundário estão conectadas em série com o instrumento de leitura, conforme figura 26.

Segundo Mamede (2017), os transformadores de corrente possuem basicamente um enrolamento primário constituído de poucas espiras. Através de fenômenos de conversão de energia eletromagnética, onde a corrente elétrica circulante no primário, origina um fluxo magnético alternado que induz forças eletromotrizes nos enrolamentos primários e secundários.

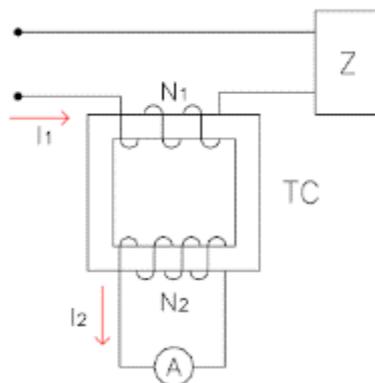


Figura 26 - Circuito simplificado de um transformador de corrente.

Fonte: (Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, 1999, p.30)

De maneira simplificada, as correntes elétricas elevadas que circulam em seu primário sofrem uma redução e passam a ter valores baixos, na ordem de 5 amperes em seus enrolamentos secundários. Através destes arranjos os instrumentos de medição e proteção podem ser projetados para suportarem correntes menores e conseqüentemente reduzirem seus custos de construção.



Figura 27 - Transformador de corrente.

Fonte: (Rehtom, 2020, p.1)

Para que o dimensionamento do transformador de corrente seja correto, é necessário saber a carga total que será instalada em seu secundário. A norma técnica NBR 6856 especifica as cargas nos enrolamentos secundários, conforme tabela 3.

Tabela 3 - Cargas nominais para TCs a 60 Hz e 5 A.

Designação	Resistência	Indutância	Potência nominal	Fator de potência	Impedância
	Ω	mH	VA	-	Ω
C2,5	0,09	0,116	2,5	0,9	0,1
C5,0	0,18	0,232	5,0	0,9	0,2
C12,5	0,45	0,580	12,5	0,9	0,5
C25	0,50	2,300	25,0	0,5	1,0
C50	1,00	4,600	50,0	0,5	2,0
C100	2,00	9,200	100,0	0,5	4,0
C200	4,00	18,400	200,0	0,5	8,0

Adaptado de: (Mamede, 2013, p.65)

De acordo Mamede (2017), vale ressaltar que esses valores de carga são para correntes iguais a 5 amperes no secundário do transformador, para outros valores de corrente, os valores das cargas devem ser multiplicados pelo quadrado da relação entre 5 amperes e a corrente secundária nominal correspondente.

Tabela 4 - Cargas dos principais aparelhos para transformadores de corrente.

Aparelhos	Consumo aproximado (VA)	
	Eletromecânico	Digital
Voltímetros registradores	15 a 5	0,15 a 3,5
Voltímetros indicadores	3,5 a 15	1,0 a 2,5
Wattímetros registradores	5 a 12	0,15 a 3,5
Wattímetros indicadores	6 a 10	1 a 2,5
Medidores de fase registradores	15 a 20	2,5 a 5
Medidores de fase indicadores	7 a 20	2,5 a 5
Frequencímetros registradores	7 a 15	0,15 a 3,5
Frequencímetros indicadores	1 a 15	1 a 2,5
Relés de tensão	10 a 15	0,1 a 0,5
Relés de sobrecorrente	5 a 10	1,5 a 6
Relés direcionais	25 a 40	2,5 a 6,5
Relés de distância	10 a 15	2,0 a 8
Relés diferenciais	8 a 15	2,0 a 8
Emissores de pulso	30	-
Amperímetros	2,9	0,15 a 3,5
Medidor de kW - kWh	2,2	0,94
Medidor de kvarh	2,2	0,94

Adaptado de: (Mamede, 2013, p.66)

Sendo assim, observa-se de maneira geral as principais cargas e seus respectivos equipamentos, os quais comumente são associados os transformadores de corrente para medição e proteção, conforme tabela 4.

2.3.9.2 Transformador de potencial

O transformador de potencial é um equipamento utilizado para alimentar as bobinas de potencial de equipamentos de medição. O transformador de potência tem como principal objetivo proporcionar o isolamento entre o circuito primário (alta tensão) e o circuito secundário (baixa tensão), como observado na figura 29.

De maneira simplificada, o transformador de potencial consiste em um arranjo onde as bobinas do secundário estão conectadas em série com o instrumento de leitura, conforme figura 28.

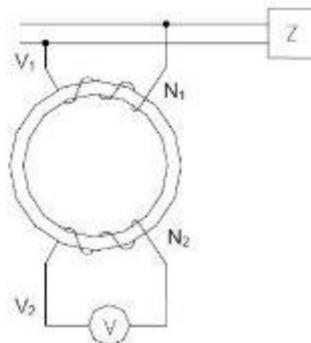


Figura 28 - Circuito simplificado de um transformador de potencial.

Fonte: (Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, 1999, p.39)

De acordo com Mamede (2017), os transformadores de potencial podem ser compreendidos como transformadores que possuem seu enrolamento primário com muitas espiras, com isso, pode-se obter uma tensão que seja compatível com os instrumentos de leitura. Geralmente as tensões padronizadas no secundário de um transformador de corrente são 115 V ou $115/\sqrt{3}$ V.



Figura 29 - Transformador de potencial indutivo.

Fonte: (Rehtom, 2020, p.1)

Com base em Mamede (2017), observa-se que os transformadores de potencial usualmente são utilizados para o uso em conjunto com equipamentos que possuem impedâncias elevadas, como por exemplo, voltímetros, relés de tensão, bobinas de tensão de medidores de energia, entre outros.

A carga nominal resultante do somatório de todos as cargas dos equipamentos conectados ao transformador de potencial, deverá estar de acordo com as cargas padronizadas na NBR 6853, conforme tabela 5.

Tabela 5 - Características elétricas dos transformadores de potencial.

Cargas nominais		Características a 60 Hz e 120 V					Características a 60 Hz e 66,3 V		
Designação		Potência aparente VA	Fator de potência -	Resistência Ohm	Indutância mH	Impedância Ohm	Resistência Ohm	Indutância mH	Impedância Ohm
ABNT	ANSI								
P12,5	W	12,5	0,10	115,2	3.402	1.152	38,4	1.014	384
P25	X	25	0,70	403,2	1.092	576	134,4	364	192
P75	Y	75	0,85	163,2	268	192	54,4	89,4	64
P200	Z	200	0,85	61,2	101	72	20,4	33,6	24
P400	ZZ	400	0,85	30,6	50	36	10,2	16,8	12

Adaptado de: (Mamede, 2013, p.91)

Tabela 6 - Cargas das bobinas de aparelhos de medição e proteção.

Aparelhos	Potência ativa	Potência reativa	Potência total
	W	var	VA
Medidor kWh	2,0	7,9	8,1
Medidor kvarh	3,0	7,7	8,2
Wattímetro	4,0	0,9	4,1
Motor do conjunto de demanda	2,2	2,4	3,2
Autotransformador de defasamento	3,0	13,0	13,3
Voltímetro	7,0	0,9	7,0
Frequencímetro	5,0	3,0	5,8
Fasímetro	5,0	3,0	5,8
Sincronoscópio	6,0	3,0	6,7
Cossímetro			12,0
Registrador de frequência			12,0
Emissores de pulso			10,0
Relógios comutadores			7,0
Totalizadores			2,0
Emissores de valores medidos			2,0

Adaptado de: (Mamede, 2013, p.91)

Sendo assim, observa-se de maneira geral as principais cargas e seus respectivos equipamentos, os quais comumente são associados os transformadores de potencial, conforme tabela 6.

CAPÍTULO 3: ETAPAS DE IMPLANTAÇÃO DE UMA SUBESTAÇÃO

Os procedimentos de implantação de uma subestação são constituídos das seguintes etapas, de acordo com NTU 005.2 – Critérios para Elaboração de Projetos de Subestação Tipo Urbana B - (2017):

- **Planejamento:** Deve-se considerar alguns fatores na construção de uma subestação, tais como o tipo de arranjo de barramento a ser utilizado,
- **Projeto Civil:** Deverá conter projetos tanto da parte civil, quanto da parte de arquitetônica. Nesta seção também deverá conter projetos de terraplanagem, plantas com a indicação das bases para fixação de equipamentos, canaletas, caixas de passagem, dutos, caixas coletoras para óleo de transformadores e outros. Projeto das instalações hidráulicas e teste de absorção do solo. Projeto de sistemas de combate a incêndio e ente outros projetos.
- **Projeto Eletromecânico:** Deverá conter planta de localização do pátio, arranjo de barramento da subestação, planta contendo estruturas e cabos de blindagem do pátio, instruções para montagem para cadeias de isoladores, para-raios, equipamentos e outros. Deverá conter também lista de materiais e memorial de cálculo.
- **Projeto de Aterramento:** O projeto do sistema de aterramento deverá compreender a malha de terra e as conexões das instalações, visando estabelecer as condições adequadas à correta operação dos componentes elétricos, como também a segurança ao pessoal. O projeto também deve apresentar medição de resistividade do solo, estratificação da resistividade do solo, calculo da resistividade aparente, potenciais de passo e de toque máximos suportáveis para a instalação, dimensionamentos dos condutores de malhas e outros.
- **Projeto de Iluminação:** O projeto de iluminação especifica que os reatores para acionamento das lâmpadas utilizadas para a iluminação de pátio e edificações deverão apresentar fator de potência maior que 0,92 indutivo e devem estar de acordo com as Normas Internacionais no que se refere à produção de harmônicos e compatibilidade eletromagnética. O sistema de iluminação deve ser composto em

três categorias principais: iluminação norma, iluminação complementar e iluminação de emergência.

- **Projeto de Proteção Contra Descargas Atmosféricas:** O projeto deve especificar que todas as estruturas deverão ser aterradas, de modo a propiciar a interligação da malha de terra da subestação e demais instalações da fábrica com os cabos e hastes do sistema de proteção contra descargas atmosféricas. Determina também que haja aterramento para todas as luminárias, estruturas metálicas e outros. O projeto deve conter memorial de cálculo, memorial descritivo, lista e especificações de materiais.
- **Custos:** Engloba todos os gastos referente a aquisição de equipamentos, mão de obra para montagem de estruturas, construção de edificações, montagem do canteiro de obras e demais custos que sejam relacionados à implantação de uma subestação.
- **Comissionamento:** Inclui os gastos com testes em instrumentos, materiais e estruturas, inspeção e calibração dos equipamentos envolvidos nos testes e outros. O comissionamento é necessário para que a implementação da subestação e demais empreendimentos similares possam ser aprovados.

O foco deste trabalho está no projeto elétrico de uma subestação de energia elétrica industrial, especificamente com nível de tensão de 13,8 kV.

Qualquer projeto elétrico, desde instalações residenciais até grandes sistemas de potência devem ser elaborados em conformidade com normas técnicas estabelecidas pelos órgãos fiscalizadores e concessionárias de energia de cada região.

Frente a isso, será utilizada a norma técnica *NDEE-01 - Fornecimento de Energia Elétrica em Média Tensão (13,8kV e 34,5 kV)*, da Eletrobras – Amazonas Energia – (2014). A referida norma aplica-se às instalações que necessitam de fornecimento de energia elétrica trifásica por meio do uso de subestações compartilhadas ou individuais, com tensões nominais que variam de 13,8 kV à 34,5 kV, possuindo uma carga instalada igual ou superior à 75 kVA e igual ou menor que 2.500 kVA. Esta norma visa proporcionar um alto nível de segurança e promover a proteção dos equipamentos e vidas de operadores presentes nas subestações de energia elétrica

3.1 ESPECIFICAÇÃO DE FAIXA DE TENSÃO PARA SUBESTAÇÕES

A capacidade nominal de uma subestação é designada através do valor das cargas elétricas presentes nas instalações da indústria, comércio, entre outros. A legislação por meio da norma *NDDE-01 - Fornecimento de Energia Elétrica em Média Tensão (13,8kV e 34,5 kV)*, da Eletrobras – Amazonas Energia - (2014), determina que o fornecimento de energia seja estabelecido em média tensão aos consumidores que possuam carga instalada superior a 75 kW e a demanda máxima a ser contratada pelo interessado, for igual ou inferior a 2.500 kW.

3.1.1 Subestações de média tensão

Este tipo de subestação é bastante recomendado para indústrias consideradas de pequeno ou médio porte, onde a demanda máxima não ultrapasse 2.500 kW. Muitos aspectos influenciam na escolha do tipo de edificação construtiva da subestação, entres esses aspectos, pode-se citar:

- Proximidade das cargas consumidoras.
- Espaço físico disponível para construção das instalações.
- Presença de áreas com gases inflamáveis, tóxicos e outros.
- Atmosfera agressiva, tais como alto nível de poluição do ar, atmosfera salina (maresia) e outros.

O projeto e dimensionamento de subestação abordado neste trabalho, irá adotar o conceito de subestação abrigada, no entanto, em determinadas ocasiões será utilizado o uso de outros tipos construtivos de subestação para ilustrar e assim facilitar a compreensão de determinados arranjos técnicos ou uso de equipamentos.

3.2 PARTES COMPONENTES DE UMA SUBESTAÇÃO

As subestações são compostas por alguns tipos de configurações e arranjo de estruturas. Essas estruturas ou componentes servem para auxiliar a conexão dos condutores dos sistemas elétricos de potência, pertencentes à concessionária de energia e o consumo de energia elétrica, na figura 30, observa-se os tipos de componentes e arranjos que permitem essas conexões.

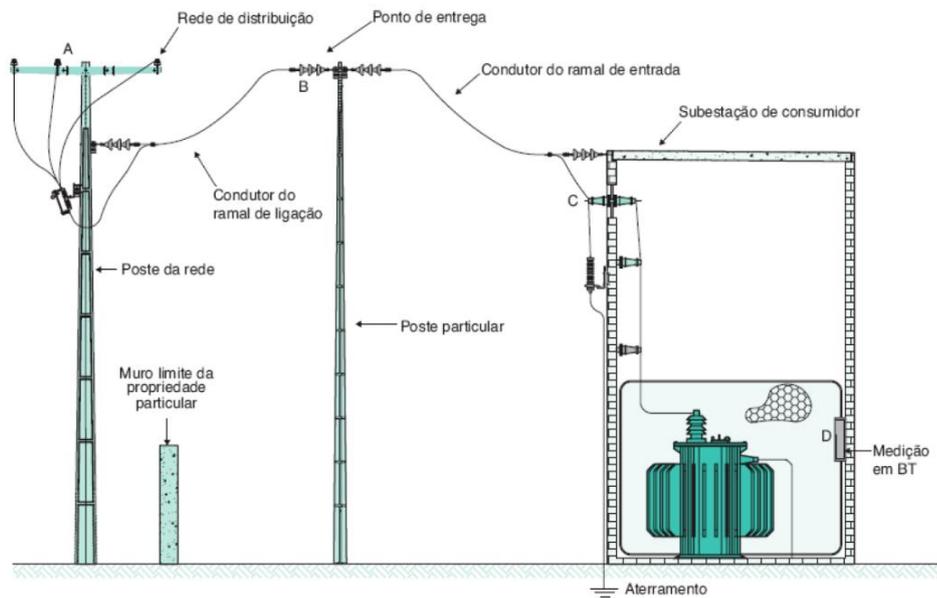


Figura 30 - Elementos de entrada de serviço de uma unidade consumidora de alta-tensão.

Fonte: (Mamede 2017, p.424)

3.2.1 Ponto de ligação

Corresponde ao local onde ocorre a derivação da rede de distribuição e o condutor do ramal de ligação.

3.2.2 Ramal de ligação

É o conjunto de condutores e equipamentos instalados pelos consumidores entre o ponto de entrega e a proteção geral ou quadro de distribuição geral, de acordo com NDDE-01 (2014).

3.2.3 Ponto de entrega

É o ponto onde a concessionária se compromete a fornecer energia elétrica. Neste ponto ocorre a conexão entre o sistema elétrico da concessionária de energia e os sistemas elétricos dos consumidores. A concessionária responsabiliza-se tecnicamente pela execução dos serviços de construção, operação e manutenção, de acordo com Mamede (2017).

De acordo com o tipo de construtivo da subestação escolhida pelo consumidor, o ponto de entrega poderá apresentar as seguintes características:

3.2.4 Subestação com entrada aérea

Em determinadas propriedades particulares, o ponto de entrega de energia encontra-se próximo ao poste da rede de distribuição, estando o ponto de entrega no limite ou próximo as delimitações da propriedade, a ligação entre o ponto de ligação e o ponto de entrega, ocorre por

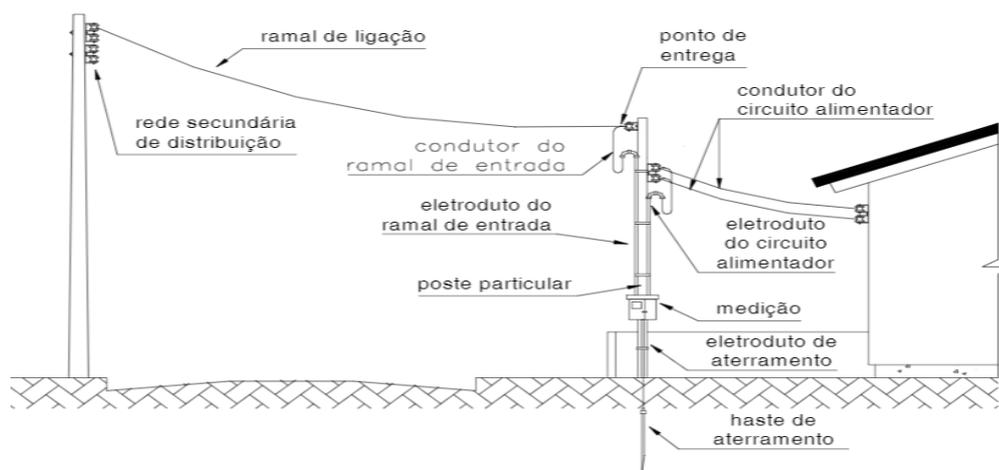


Figura 31 - Ramal de ligação aérea.

Fonte: (Docplayer, 2015, p.13)

meio de condutores instalados em posição aérea, conforme figura 31. Conforme NDEE-01 (2014), as instalações que possuem entrada aérea deverão utilizar cabos de alumínio isolados ou cabo protegido (spacer), que poderão ser multiplexados e autossustentados, com isolamento EPR ou XLPE. Este tipo de ramal necessita ser aterrado em ambas suas extremidades.

3.2.5 Subestação com entrada subterrânea

Consiste em um arranjo onde os condutores de energia elétrica são instalados no interior de eletrodutos alojados diretamente no solo, como se-pode observar na figura 32. No entanto, vale ressaltar que os ramais com entrada subterrânea só poderão ser utilizados em ocasiões em que não haja travessia de via pública ou terreno de terceiros, ficando a critério da distribuidora de energia elétrica, com base na NDEE-01 (2014).

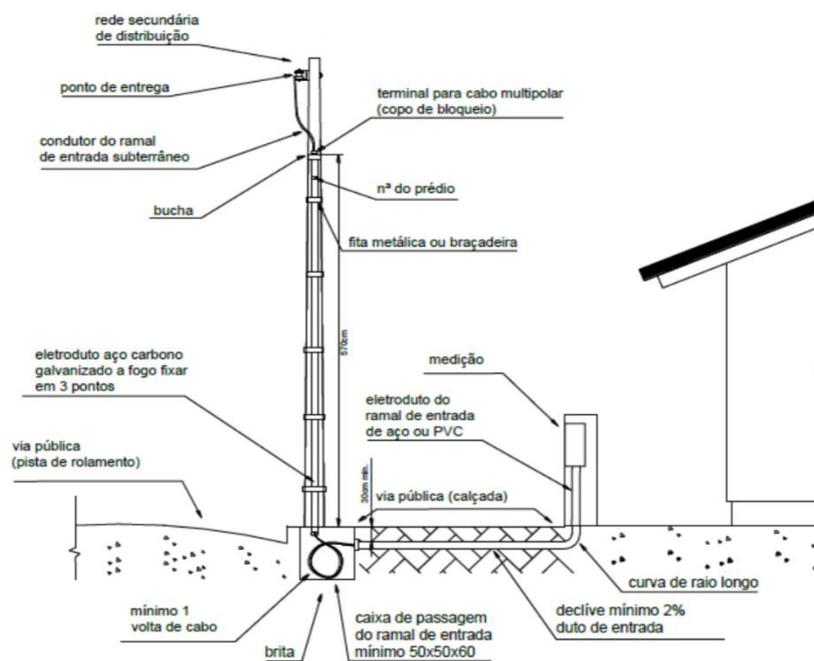


Figura 32 - Ramal de ligação subterrânea.

Fonte: (Docplayer, 2015, p.14)

3.3 SUBESTAÇÃO ABRIGADA EM ALVENARIA

Como já mencionado anteriormente no capítulo 2, subestações abrigadas são aquelas que possuem edificações abrigadas ou cobertas, geralmente são construídas em alvenaria e localizam-se próximas aos centros de cargas, no entanto necessitam de espaços físicos maiores para sua acomodação. As subestações em alvenaria proporcionam proteção contra as intempéries aos equipamentos presentes na mesma, tais como, transformadores, disjuntores, relés e outros.

Com base em Mamede (2017), as subestações em alvenaria podem ser divididas em compartimentos, os quais são denominados de postos ou cabines. Cada compartimento desses é destinado ao alojamento de equipamentos com funções já definidas.

3.3.1 Posto de medição primária

É o compartimento responsável por abrigar os equipamentos de aferição auxiliares de energia elétrica, tais como transformadores de corrente e transformadores de potencial.

Segundo Mamede (2017), o posto de medição primária é de uso exclusivo para a concessionária, sendo assim, o acesso à pessoas que não sejam funcionários da concessionária de energia, é terminantemente proibido.

3.3.2 Posto de proteção primária

É o compartimento responsável pela proteção geral da subestação, também cumpre o papel de posto para seccionamento. Este local é destinado a instalação das chaves seccionadoras, fusíveis e disjuntores, conforme figura 33.



Figura 33 - Posto de proteção primária (compartimento ao meio).

Fonte: (Saber Elétrica. 2020, p.1)

Segundo a NDEE 01 (2014), subestações que possuam capacidade instalada igual ou superior a 300 kVA, deverão apresentar proteção geral na média tensão por meio de um disjuntor acionado por relés secundários com as funções 50 e 51, ou por meio de chave seccionador e fusível, sendo que neste caso, adicionalmente, a proteção geral, na baixa tensão, deve ser realizada através do disjuntor, de acordo com a figura 34.



Figura 34 - Disjuntor geral de média tensão acompanhado de um relé 50/51.

Fonte: Própria.

3.3.3 Posto de transformação

É habitáculo ou compartimento da subestação onde os transformadores de potência serão abrigados, conforme figura 35.



Figura 35 - Posto de transformação contendo um transformador a seco.

Fonte: Própria.

CAPÍTULO 4: METODOLOGIA DIDÁTICA

Neste capítulo iremos abordar os procedimentos de cálculo utilizados para o dimensionamento de uma subestação de 13,8 kV, com carga instalada de até 2500 kVA.

Serão aplicados os conceitos vistos anteriormente no que diz respeito aos critérios de escolhas dos equipamentos utilizados e normas técnicas vigentes. Além disso, também será apresentada uma ferramenta de dimensionamento de equipamentos através de uma planilha do software Microsoft Excel. A planilha de dimensionamento apresentada neste trabalho foi elaborada pelo autor do presente trabalho. Com base nesta ferramenta e conhecimentos adquiridos neste trabalho, pode-se elaborar e analisar projetos que envolvam subestações de consumidor. Todas as equações apresentadas neste capítulo foram utilizadas para se determinar a parametrização dos equipamentos por meio da planilha de dimensionamento para componentes de subestação de energia elétrica.

Todas as recomendações de dimensionamento e ajustes de equipamentos presentes neste capítulo são fundamentadas na *NDEE-01 – Fornecimento de Energia Elétrica em Média Tensão (13,8kV e 34,5 kV)*, da Eletrobras – Amazonas Energia – (2014).

Os equipamentos de medição, como por exemplo, transformadores de corrente e potencial, medidores de energia eletrônicos e chaves de aferição, são de fornecimento e instalação exclusivos da própria concessionária de energia elétrica.

Os materiais e equipamentos presentes na subestação, tais como transformadores de potência, disjuntores, relés, para-raios, eletrodutos e outros, deverão ser adquiridos e serão de responsabilidade do próprio consumidor.

4.1 DEFINIÇÃO DO BARRAMENTO DE MÉDIA TENSÃO

Os barramentos de média tensão presentes em subestações, devem ser de cobre nu e podem possuir seção transversal de formatos variados.

A definição do barramento de média tensão será em função da corrente elétrica que circulará no primário do transformador de potencial. Para se encontrar o valor da corrente elétrica, adotou-se:

$$I = \frac{S}{V_l \times \sqrt{3}}$$

Onde: S é a potência aparente do transformador de potencial, em kVA;

V_l é tensão de linha no primário do transformador, em volts.

A tabela 7 mostra as seções mínimas para cada corrente elétrica associada.

Tabela 7 - Dimensionamento de barramento de média tensão.

CORRENTE I (A)	SEÇÃO MÍNIMA - COBRE NU S(mm²)
ATÉ 21	20
DE 21 A 100	50
ACIMA DE 100	S (NOTA 1)

Adaptado de: (NDEE 01, 2014, p. 52)

As cores utilizadas na pintura e identificação dos barramentos serão:

- Cor vermelha: Fase A;
- Cor branca: Fase B;
- Cor marrom: Fase C;
- Cor azul: Neutro;

4.2 DEFINIÇÃO DO BARRAMENTO DE BAIXA TENSÃO

Os barramentos de baixa tensão presentes em subestações, devem ser de cobre nu e podem possuir seção transversal de formatos variados. A escolha do barramento de baixa tensão serão em função da corrente elétrica que circulará no secundário do transformador de potencial.

Para se encontrar o valor da corrente elétrica, adotou-se:

$$I = \frac{S}{V_l \times \sqrt{3}}$$

Onde: S é a potência aparente do transformador de potencial, em kVA;

V_l é tensão de linha no secundário do transformador, em volts.

A seguir, de acordo com a tabela 8, observa-se valores de corrente elétrica e suas respectivas seções mínimas para barramento de cobre.

Tabela 8 - Dimensionamento de barramento de baixa tensão.

CORRENTE I (A)	SEÇÃO MÍNIMA DAS BARRAS DE COBRE S (mm²)
ATÉ 300	181
DE 301 A 400	211
DE 401 A 450	241
DE 451 A 500	272
DE 501 A 600	302
DE 601 A 675	332
DE 676 A 750	403
DE 751 A 900	483
DE 901 A 1200	665
DE 1201 A 1500	907
DE 1501 A 1800	1109
DE 1801 A 2100	1210
ACIMA DE 2100	S(NOTA 1)

Adaptado de: (NDEE 01, 2014, p. 51)

Os barramentos deverão apresentar isolamento termo contrátil nas cores:

- Cor vermelha: Fase A;
- Cor branca: Fase B;
- Cor marrom: Fase C;
- Cor azul: Neutro;

Ou todas as fases deverão ser da cor preta contendo fitas coloridas para auxílio na identificação.

Os barramentos deverão possuir afastamentos entre si de no mínimo 7 cm e suportar um aumento de 40° C em relação a temperatura ambiente.

4.3 DIMENSIONAMENTO DO TRANSFORMADOR DE CORRENTE PARA MEDIÇÃO

O transformador de corrente usado para medição deve possuir as características de acordo com a tabela 9.

Tabela 9 - Dimensionamento do transformador de corrente de medição em 13,8 kV.

TRANSFORMADOR DE CORRENTE RELAÇÃO A A	DEMANDA kVA	
	FT = 1	FT = 1,5
5-5	ATE 100	ATE 100
10-5	DE 100 A 200	DE 100 A 300
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

Adaptado de: (NDEE 01, 2014, p. 52)

4.4 DIMENSIONAMENTO DO TRANSFORMADOR DE POTENCIAL PARA MEDIÇÃO

O transformador de potencial usado para medição deve possuir as características de acordo com a tabela 10.

Tabela 10 - Dimensionamento do transformador de potencial em 13,8 kV.

TRANSFORMADOR DE POTENCIAL RELAÇÃO DE TRANSFORMAÇÃO	MEDIÇÃO
70:1	A TRÊS ELEMENTOS

Adaptado de: (NDEE 01, 2014, p. 53)

4.5 DIMENSIONAMENTO DO DISJUNTOR DE MÉDIA TENSÃO

Os disjuntores de média tensão utilizados em subestações deverão possuir acionamento automático na abertura e possuir proteção de sobrecorrente para o desligamento. O ajuste da proteção de sobrecorrente será realizado de acordo com a demanda solicitado pelo consumidor, conforme projeto da subestação. Os disjuntores de média tensão devem apresentar características conforme tabela 11.

Tabela 11 - Disjuntor de média tensão - 13,8 kV e 34,5 kV.

CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS	13,8kV	34,5kV
USO	interno	interno
TENSÃO NOMINAL (KV)	15	35
FREQUÊNCIA NOMINAL (HZ)	60	60
CORRENTE NOMINAL MÍNIMA (A)	350	600
CAPACIDADE DE INTERRUPÇÃO SIMÉTRICA MÍNIMA (KA)	10	8,37

Adaptado de: (NDEE 01, 2014, p. 56)

4.6 DIMENSIONAMENTO DOS TRANSFORMADORES DE PROTEÇÃO

Os transformadores de proteção, tanto de corrente (TC), quanto de potencial (TP), destinados aos serviços de proteção, apresentarão características conforme tabela 12 e tabela 13.

Tabela 12 - Transformador de potencial (TP) de proteção - 13,8 kV e 34,5 kV.

TENSÃO NOMINAL DA SUBESTAÇÃO	13,8kV	34,5kV
USO	INTERNO	INTERNO
TENSÃO MÁXIMA	15kV	38kV
FREQUÊNCIA NOMINAL	60HZ	60HZ
NÍVEL DE ISOLAMENTO	34/95kV	70/150kV
EXATIDÃO	0,6P150	0,6P150
POTÊNCIA TÉRMICA NOMINAL	600VA	600VA
TENSÃO PRIMÁRIA NOMINAL	7,9kV	19,9kV
RELAÇÃO NOMINAL	70:1	175:1
GRUPO DE LIGAÇÃO	2	2

Adaptado de: (NDEE 01, 2014, p. 56)

Tabela 13 - Transformadores de corrente (TC) de proteção - 13,8 kV e 34,5 kV.

TENSÃO NOMINAL DA SUBESTAÇÃO	13,8KV	34,5KV
USO	INTERNO	INTERNO
TENSÃO MÁXIMA	15KV	38KV
FREQUÊNCIA NOMINAL	60HZ	60HZ
NÍVEL DE ISOLAMENTO	34/95KV	70/150KV
EXATIDÃO	0,6	0,6
FATOR TÉRMICO NOMINAL	*	
CORRENTE TÉRMICA NOMINAL	*	*
CORRENTE PRIMÁRIA NOMINAL	*	*
CORRENTE SECUNDÁRIA NOMINAL	*	*

Adaptado de: (NDEE 01, 2014, p. 57)

4.7 DIMENSIONAMENTO DO RELÉ

O uso de disjuntor deverá ser acompanhado por um relé de sobrecarga com as funções 50 e 51 (fase e neutro). Em caso de falta de energia elétrica, o relé deverá ser alimentado por uma fonte de energia reserva, sendo ela um nobreak com potência mínima de 1000VA e com autonomia mínima de 2 horas.

O relé deverá apresentar mecanismos tais como, lacres, senhas de bloqueio e outros, afim de impossibilitar a alteração de sua parametrização, seja ela remota ou local.

A seguir será apresentado a metodologia e procedimentos de cálculos utilizados para a determinação dos ajustes de proteção para o relé. Estes cálculos foram realizados com o auxílio de uma planilha de dimensionamento através do software Microsoft Excel, fundamentada na norma *ET-003 – Sistemas de Proteção com Relé Microprocessado com Função 50/51 para Fase e Neutro*, da Eletrobras - Amazonas Energia – (2014).

Para que seja possível realizar os cálculos e consequentemente os ajustes do relé, é necessário que a concessionária informe ao engenheiro projetista os valores de curto-circuito para que possam ser especificados os transformadores de corrente e transformadores de potencial. A corrente de partida deverá ser considerada com um fator de 20% em relação à corrente dos transformadores de corrente, segundo ET-003 (2014).

Para que o dimensionamento seja efetuado de maneira correta, a concessionária deverá informar:

- Os níveis de curto-circuito;
- Relé de sobrecorrente do alimentador (fase) da concessionária;
- Relé de sobrecorrente do alimentador (neutro) da concessionária;

- Tensão de fornecimento;
- Impedâncias de sequência reduzida no ponto de entrega da subestação.

Em contrapartida, o projetista deverá informar:

- Potência dos transformadores;
- Impedância dos transformadores;
- Relé de sobrecorrente de fase do consumidor;
- Relé de sobrecorrente de neutro do consumidor;
- Distância entre o relé e o transformador de corrente;
- Resistência unitária do cabo;
- Consumo do relé;
- Corrente nominal.

Os cálculos utilizados para os ajustes serão apresentados a seguir, conforme ET-003 (2014).

Para se determinar a **impedância equivalente do sistema da concessionária (Z_{cc})**, temos:

$$Z_{cc} = \frac{\textit{Tensão de fornecimento}}{\sqrt{3} \times I_{cc}3F}$$

Onde: $I_{cc}3F$ é a corrente de curto-circuito trifásica.

Para se determinar a **impedância dos transformadores (Z_{trafo})**, logo:

$$Z_{trafo} = \frac{(\textit{Tensão de fornecimento})^2 \times Z\%_{trafo}}{\textit{Potência do trafo}}$$

Onde: $Z\%_{trafo}$ é a impedância percentual do transformador.

O **curto-circuito no secundário do transformador (I_{cc})** será determinado por meio de:

$$I_{cc} = \frac{\textit{Tensão de fornecimento}}{\sqrt{3} \times (Z_{cc} + Z_{trafo})}$$

A corrente **trifásica nominal máxima (I_n)** será determinada por meio de:

$$I_n = \frac{\text{Potência dos transformadores}}{\sqrt{3} \times \text{Tensão de fornecimento}}$$

A **corrente demandada** (I_{dem}) será determinada por meio de:

$$I_{dem} = \frac{\text{Demanda prevista}}{\sqrt{3} \times \text{Tensão de fornecimento} \times F.P}$$

Onde: $F.P$ é o fator de potência.

A **corrente de desbalanço** (I_{des}) será determinada por meio de:

$$I_{des} = I_{dem} \times 0,2$$

A **corrente de magnetização do transformador** (I_{mag}) será determinada por meio de:

$$I_{mag} = \frac{1}{\frac{1}{I_{cc}3F} + \frac{(1,73 \times V)}{P \times 10}}$$

Onde: V é a tensão e P é a potência do transformador em VA.

Para o cálculo do transformador de corrente, deve-se considerar a *corrente nominal primária* como:

$$I_{np} = \frac{I_{cc}3F}{20}$$

A **relação do transformador de corrente** (**RTC**) será dada por:

$$RTC = \frac{I_{np}}{I_{ns}}$$

Onde: I_{ns} é a corrente nominal do secundário do transformador de corrente.

A **impedância do cabo** (Z_{cabo}) será dada por:

$$Z_{cabo} = \frac{(R_{cabo} \times \text{Distância})}{1000}$$

Onde: R_{cabo} é a resistência elétrica do cabo.

A **impedância do relé** ($Z_{relé}$) será dada por:

$$Z_{relé} = \frac{\text{Consumo do relé}}{\text{Corrente nominal}^2}$$

A **impedância total** (Z_{total}) será dada por:

$$Z_{total} = 2xZ_{cabo} + Z_{relé} + Z_{tc}$$

Onde: Z_c é a impedância do transformador de corrente, esta deverá ser obtida com o fabricante do transformador de corrente.

A **tensão no secundário do transformador de corrente** será dada por:

$$V_s = \frac{I_{cc}3F}{RTC} x (Z_{tc} + 2xZ_{cabo} + Z_{relé})$$

O **ponto ANSI** é o valor máximo de corrente que um transformador de potência pode suportar durante dois segundos sem se danificar. Em casos de falta fase-terra e para transformadores com a configuração triângulo-estrela com neutro aterrado, seu valor pode ser determinado por:

$$I_{nansi} = 0,58 x \frac{100}{Z_{\%}} x I_n$$

4.8 DIMENSIONAMENTO DA CHAVE FUSÍVEL

As chaves fusíveis adotadas devem possuir as seguintes características, conforme a tabela 14. Se existirem na subestação dois ou mais transformadores de potência, é necessário que cada um destes transformadores possua uma proteção primária individual e uma chave fusível de abertura tripolar sob carga, de acordo com a tabela 14.

Tabela 14 - Chave fusível - 13,8 kV e 34,5 kV.

POTÊNCIA INSTALADA (P)	13,8 kV	34,5 kV
P < 750 kVA	TIPO C 100A	TIPO C 100A
1500 > P ≥ 750 kVA	TIPO C 200A	TIPO C 100A
P ≥ 1500 kVA	TIPO C 200A	TIPO C 200A

Adaptado de: (NDEE 01, 2014, p. 57)

4.9 DIMENSIONAMENTO DA CHAVE SECCIONADORA TRIPOLAR

As chaves seccionadoras tripolares presentes na subestação deverão ser próprias para uso interno, devendo estas possuírem acionamento manual e simultâneo por meio de alavanca provida de intertravamento mecânico em suas três fases e com indicação de posição “ABERTA” ou “FECHADA”, como observado na tabela 15.

Tabela 15 - Chave seccionadora tripolar - 13,8 kV e 34,5 kV.

TENSÃO NOMINAL DA SUBESTAÇÃO	13,8 KV	34,5 KV
USO	INTERNO	INTERNO
TENSÃO NOMINAL	15 KV	38 KV
CORRENTE NOMINAL	400 A	400 A
FREQUÊNCIA NOMINAL	60 HZ	60 HZ
CAPACIDADE NOMINAL DE INTERRUPÇÃO EM CURTO-CIRCUITO (MÍNIMA)	12,5 KA	12,5 KA
VALOR DE CRISTA NOMINAL DA CORRENTE SUPORTÁVEL (ID)	31,25 KA	31,25 KA
TENSÃO SUPORTÁVEL NOMINAL A FREQUÊNCIA INDUSTRIAL DURANTE 1 MINUTO (EFICAZ) A TERRA E ENTRE PÓLOS	36 KV	80 KV
TENSÃO SUPORTÁVEL NOMINAL A FREQUÊNCIA INDUSTRIAL DURANTE 1 MINUTO (EFICAZ) ENTRE CONTATOS ABERTOS	40 KV	88 KV
TENSÃO SUPORTÁVEL NOMINAL DE IMPULSO ATMOSFÉRICO (CRISTA) À TERRA E ENTRE PÓLOS	95 KV	200 KV
TENSÃO SUPORTÁVEL NOMINAL DE IMPULSO ATMOSFÉRICO (CRISTA) ENTRE CONTATOS ABERTOS	110 KV	220 KV
DURAÇÃO NOMINAL DA IT	3S	3S

Adaptado de: (NDEE 01, 2014, p. 57)

4.10 DIMENSIONAMENTO DOS ELOS FUSÍVEIS

Os transformadores de potência deverão ser protegidos por elos fusíveis com característica conforme tabela 16.

Tabela 16 - Dimensionamento dos elos fusíveis para proteção dos transformadores.

POTÊNCIA NOMINAL DO TRANSFORMADOR	CAPACIDADE DO ELO	
	13,8 Kv	34,5 kV
30	2H	1H
45	3H	2H
75	5H	2H
112,5	6K	3H
150	8K	5H
225	10K	6K
300	15K	8K
500	25K	10K
750	40K	15K
1000	50K	25K

Adaptado de: (NDEE 01, 2014, p. 58)

4.11 DIMENSIONAMENTO DOS ELOS FUSÍVEIS DA CHAVE DE DERIVAÇÃO

Os elos fusíveis utilizados na chave de derivação da rede da distribuidora deverão apresentar característica de acordo com a tabela 17.

Tabela 17 - Dimensionamento dos elos fusíveis utilizados na chave de derivação da rede da distribuidora.

DEMANDA (kVA)	CAPACIDADE DO ELO	
	13,8 kV	34,5 kV
Até 30	2H	1H
31 a 45	3H	2H
46 a 75	5H	2H
76 a 112,5	6K	3H
113 a 150	8K	5H
151 a 225	10K	6K
226 a 300	15K	8K

Adaptado de: (NDEE 01, 2014, p. 58)

4.12 DIMENSIONAMENTO DO PARA-RAIOS

A proteção contra descargas atmosféricas deverá ser feita por para-raios, os quais deverão possuir características compatíveis com a tabela 18.

Tabela 18 - Para-raios - 13,8 kV e 34,5 kV.

CARACTERÍSTICAS DOS PARA-RAIOS	13,8 KV	34,5 KV
TENSÃO NOMINAL (KV)	12	30
CORRENTE NOMINAL (KA)	10	10
TENSÃO RESIDUAL MÁXIMA PARA CORRENTE INGRIME (10 KA -1M DE FRENTE) - KV	48	120
TENSÃO RESIDUAL MÁXIMA PARA CORRENTE DE DESCARGA NOMINAL (10 KA – 8/20) - KV	43	108
INVÓLUCRO POLIMÉRICO	SIM	SIM
BLOCOS RESISTORES DE ZNO – SEM CENTELHADORES	SIM	SIM
EQUIPADO COM DESLIGADOR AUTOMÁTICO	SIM	SIM

Adaptado de: (NDEE 01, 2014, p. 58)

4.13 PLANILHA DE DIMENSIONAMENTO

Nesta seção será demonstrada a planilha de dimensionamento para equipamentos de uma subestação de energia elétrica. A planilha irá utilizar as tabelas apresentadas na norma NDEE-01 (2014) e as equações presentes na norma ET-003 (2014), conforme apresentadas anteriormente. Para iniciar a parametrização dos equipamentos utilizados, basta inserir a demanda especificada para a subestação no campo *Demanda (kVA)* e o *fator de sobrecarga*. Em seguida o usuário da planilha deverá especificar a tensão presente no primário e no secundário do transformador, nos respectivos campos: *Tensão no primário (kV)* e *Tensão no secundário (V)*.

Realizadas essas etapas, a planilha irá especificar os demais componentes automaticamente, de acordo com a figura 36. A figura 37 ilustra o equacionamento aplicado para se determinar os ajustes necessários ao relé de proteção de sobre corrente. O usuário também poderá realizar cálculos e gerar gráficos de coordenogramas para ajustes de relé, conforme as figuras 38 e 39. A seguir ilustra-se um exemplo de uma instalação, a qual apresenta demanda de 200 kVA, no entanto, considerou-se um fator extra igual a 20%, logo o transformador escolhido será o de 300 kVA (ver ANEXO 1 e 2).

DEMANDA KVA	200
Fator de sobrecarga	20

Dados do Transformador de Potência	
Tensão no primário (kV)	13,8
Tensão no secundário (V)	380
Potência do transformador (kVA)	300
Corrente no primário do transformador	12,55
Elo f. utilizado na c. de derivação da rede da distribuidora	10K
Corrente no secundário do transformador (A)	455,80
Impedância (Z%)	3,35
Corrente de curto-circuito - ICC (A)	13.606,06

Para-Raios	
Tensão nominal (kV)	12,00
Corrente nominal (kA)	10,00

Elo Fusível para proteção de transformadores	
Capacidade do elo fusível	15K

Dados do Transformador de Corrente (medição)	
Corrente primária no TC (A)	300,00
Corrente no secundário no TC (A)	5,00
Relação de espiras do TC (para fornecimento em 13,8 kV)	10-5
Relação de espiras do TC (para fornecimento em 34,5 kV)	5-5

Dados do Transformador de Potencial	
Tensão no primária do TP (V)	13.800
Tensão no secundário do TP (V)	197,14
Relação de espiras do TP (para fornecimento em 13,8 kV)	70:1
Relação de espiras do TP (para fornecimento em 34,5 kV)	175:1

Dados do Disjuntor Geral	
Tensão nominal (kV)	15
Fator de sobrecorrente p/disjuntor geral	1,2
Fator de temperatura (p/60°)	0,93
Corrente nominal do disjuntor geral (A):	508,68
Disjuntor geral da subestação (A):	510

Dimensionamento de Barramento de Média Tensão	
Seção mínima - Cobre nú (mm²)	20

300

Dimensionamento de Barramento de Baixa Tensão	
Seção mínima das barras de cobre (mm²)	272

Chave Fusível (para fornecimento em 13,8 kV)	
Tipo	TIPO C 100A

Chave Fusível (para fornecimento em 34,5 kV)	
Tipo	TIPO C 100A

Chave Seccionadora Tripolar (uso interno)	
Tensão nominal (kV)	15
Corrente nominal (A)	400
Frequência nominal (Hz)	60
Capacidade nominal de interrupção em curto-circuito (kA)	13

DEFINIÇÃO DOS RELÉS E AJUSTES	
-------------------------------	--

RELÉ DE SOBRECORRENTE – FASE		
Função	50/51	
Fabricante	PEXTRON	
Tipo	URPE-6104	
RTC	90	
Aj.Temporizado	0,18	A
Curva	0,30	MI
Aj Instantâneo	1,51	A

RELÉ DE SOBRECORRENTE – NEUTRO		
Função	50/51 N	
Fabricante	PEXTRON	
Tipo	URPE-6104	
RTC	90	
Aj.Temporizado	0,04	A
Curva	0,4	MI
Aj Instantâneo	0,8	A

Figura 36 - Planilha de dimensionamento para componentes de subestação de energia elétrica.

Fonte: Própria

DADOS DA INSTALAÇÃO	
Tensão de Fornecimento (V)	13.800
Fator de Potência	0,92

POTÊNCIA DOS TRANSFORMADORES	
Transformador 1 (VA)	300.000

IMPEDÂNCIA DOS TRANSFORMADORES Z%	
Transformador 1 (%)	3,4

CÁLCULOS:

IMPEDÂNCIA EQUIVALENTE DO SISTEMA DA CONCESSIONÁRIA	
$Z_{cc} = (\text{Tensão de Fornecimento}) / \sqrt{3} \times I_{cc3F}$	
Zcc (Ω)	0,98

IMPEDÂNCIA DOS TRANSFORMADORES	
$Z_{traf1} = [(\text{Tensão de Fornecimento})^2 \times Z\% \text{ trafo}] / \text{Potência do Trafo}$	
Ztraf1 (Ω)	21,27

CURTO-CIRCUITO NO SECUNDÁRIO DOS TRANSFORMADORES	
$I_{cctrafo} = \text{Tensão de Fornecimento} / \sqrt{3} \times (Z_{cc} + Z_{trafo})$	
IccTra1 (A)	358,10

CORRENTE NOMINAL MÁXIMA (Trifásica) – In	
$I_n = \text{Potencia dos Transformadores} / \sqrt{3} \times \text{Tensão de Fornecimento}$	
In (A)	12,55

CORRENTE DEMANDADA (Trifásica) – Idem	
$I_{dem} = \text{Demanda Prevista} / \sqrt{3} \times \text{Tensão de Fornecimento} \times FP$	
Idem (A)	13,64

CORRENTE DE DESBALANÇO – Ides	
$I_{des} = I_{dem} \times 0,20$	
Ides (A)	2,73

CORRENTE DE MAGNETIZAÇÃO – Imag	
$I_{mag} = 1 / ((1/I_{cc3F}) + (1,732 \times V) / (P \times 10))$	
Imag (A)	123,60

PONTO ANSI	
$I_{ansi-traf1} = 0,58 \times 100 / Z\% \times I_{traf1}$	
I ansi-traf1 (A)	217,3025024

CÁLCULO DO TC	
$I_n = I_{cc3F} / 20$	
In (A)	450

ESPECIFICAÇÃO DO TC		
	Primário	Secundário
TC	450	5
RTC (Relação de espiras)	90	

Ztc = 0,2 x Zburden	
Z burden do TC (Ω)	1
Ztc	0,2

SENSOR DE FASE

Temporizado= (Idem) x 1,2 / RTC	
Temporizado	0,18

Instantâneo = (1,1X Imag) / RTC	
Temporizado	1,51

SENSOR DE NEUTRO

Temporizado= (Idem) x 1,2 / RTC	
Temporizado	0,04

Instantâneo = < Iccf100 / RTC	
Instantâneo	0,80

Figura 37 - Cálculos utilizados para o ajuste do relé de proteção.

Fonte: (Própria)

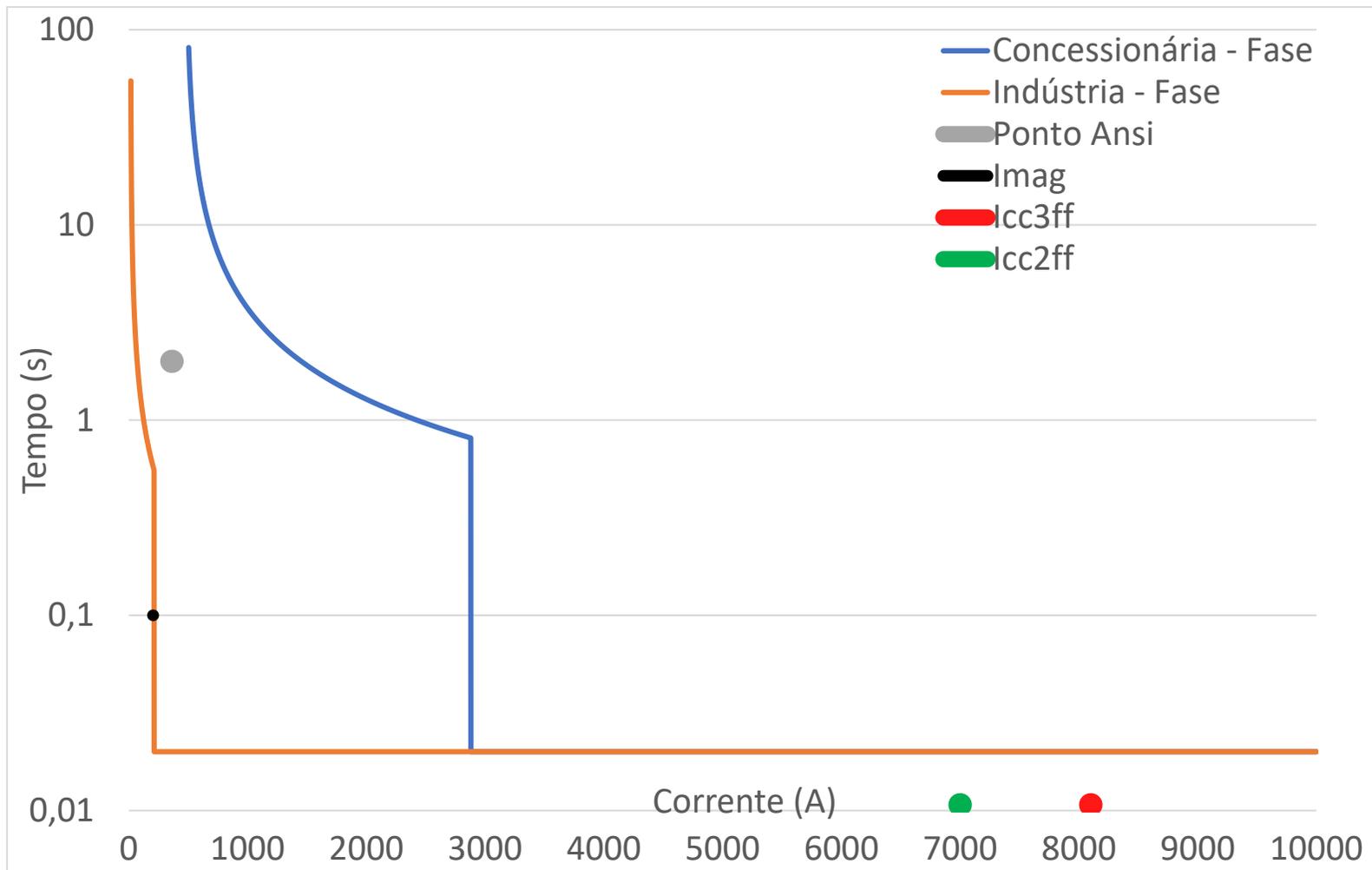


Figura 38 - Coordenograma de ajuste de fase - 300 kVA.

Fonte: (Própria)

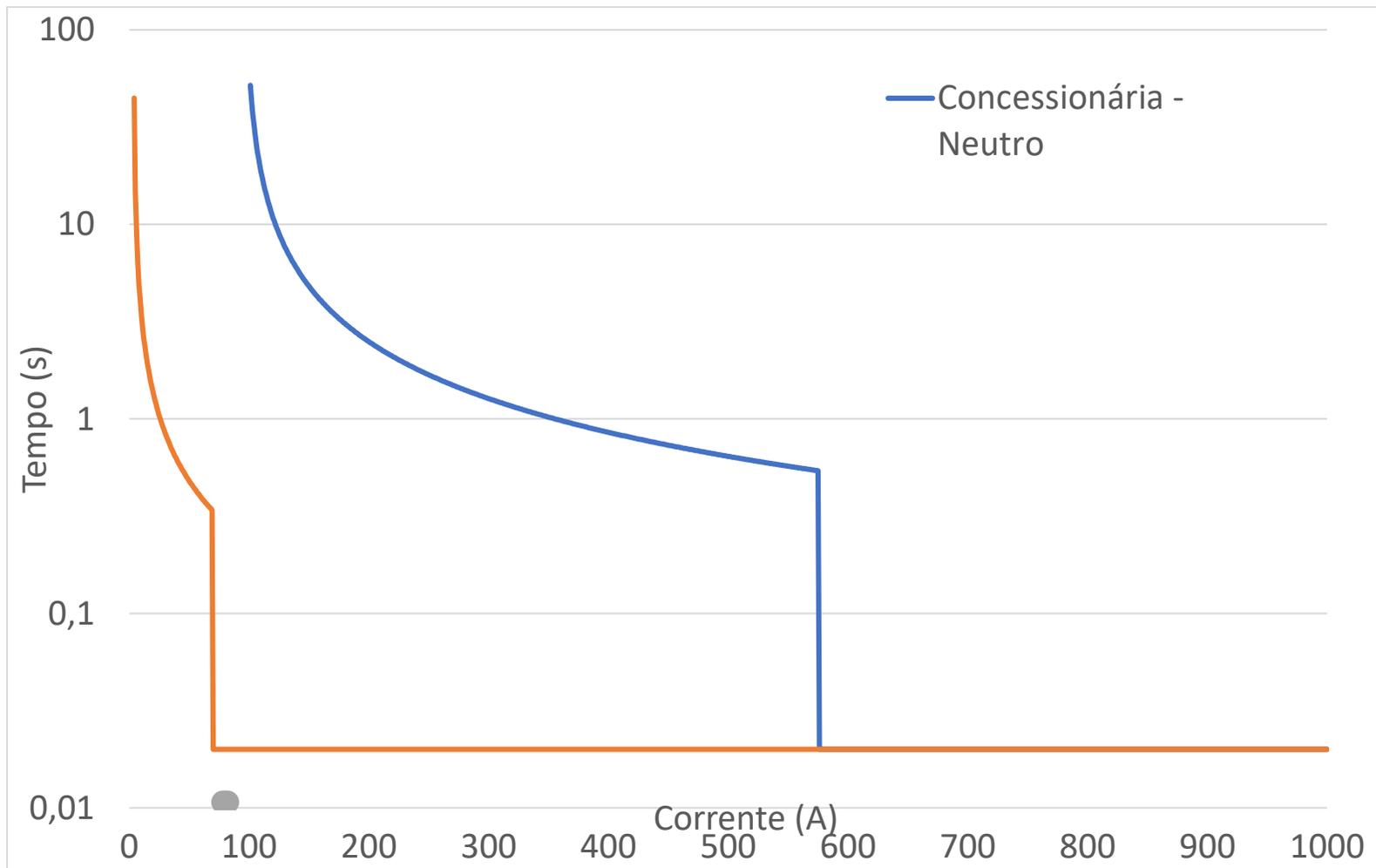


Figura 39 - Coodenograma para ajuste de neutro - 300 kVA.

Fonte: (Própria)

CAPÍTULO 5: ESTUDO DE CASO DE UMA PLANTA ELÉTRICA GENÉRICA

Neste capítulo apresenta-se um estudo de caso, no qual aborda-se uma subestação de 13,8 kV, a qual irá alimentar uma fábrica genérica que produzirá descartáveis plásticos. A carga considerada para o dimensionamento desta subestação será de 400 kVA, esta demanda está baseada no consumo de energia elétrica através do uso de circuitos de iluminação, circuitos para tomadas de forças, injetoras plásticas e demais equipamentos industriais presentes em uma fábrica deste segmento.

A partir deste capítulo, aplica-se os conceitos e normas vistos nas seções anteriores, no que tange as escolhas de equipamentos e seus ajustes. Os ajustes realizados com o auxílio da planilha de dimensionamento serão apresentados nas páginas a seguir, conforme ilustrado pela figura 40 e 41. Os coordenogramas serão ilustrados nas figuras 42 e figura 43.

Note que a demanda adotada para a fábrica é de 400 kVA, porém considerou-se um fator de sobre demanda de 20%. Sendo assim, será adotado a utilização de um transformador de 500 kVA.

DEMANDA KVA
 Fator de sobrecarga

Dados do Transformador de Potência	
Tensão no primário (kV)	13,8
Tensão no secundário (V)	380
Potência do transformador (kVA)	500
Corrente no primário do transformador	20,92
Elo f. utilizado na c. de derivação da rede da distribuidora	15K
Corrente no secundário do transformador (A)	759,67
Impedância (Z%)	4,50
Corrente de curto-circuito - ICC (A)	16.881,59

Para-Raios	
Tensão nominal (kV)	12,00
Corrente nominal (kA)	10,00

Elo Fusível para proteção de transformadores	
Capacidade do elo fusível	25K

Dados do Transformador de Corrente (medição)	
Corrente primária no TC (A)	300,00
Corrente no secundário no TC (A)	5,00
Relação de espiras do TC (para fornecimento em 13,8 kV)	20-5
Relação de espiras do TC (para fornecimento em 34,5 kV)	10-5

Dados do Transformador de Potencial	
Tensão no primária do TP (V)	13.800
Tensão no secundário do TP (V)	197,14
Relação de espiras do TP (para fornecimento em 13,8 kV)	70:1
Relação de espiras do TP (para fornecimento em 34,5 kV)	175:1

Dados do Disjuntor Geral	
Tensão nominal (kV)	15
Fator de sobrecorrente p/disjuntor geral	1,2
Fator de temperatura (p/60°)	0,93
Corrente nominal do disjuntor geral (A):	847,79
Disjuntor geral da subestação (A):	850

Dimensionamento de Barramento de Média Tensão	
Seção mínima - Cobre nú (mm²)	20

500

Dimensionamento de Barramento de Baixa Tensão	
Seção mínima das barras de cobre (mm²)	483

Chave Fusível (para fornecimento em 13,8 kV)	
Tipo	TIPO C 100A

Chave Fusível (para fornecimento em 34,5 kV)	
Tipo	TIPO C 100A

Chave Seccionadora Tripolar (uso interno)	
Tensão nominal (kV)	15
Corrente nominal (A)	400
Frequência nominal (Hz)	60
Capacidade nominal de interrupção em curto-circuito (kA)	13

DEFINIÇÃO DOS RELÉS E AJUSTES

RELÉ DE SOBRECORRENTE – FASE		
Função	50/51	
Fabricante	PEXTRON	
Tipo	URPE-6104	
RTC	90	
Aj. Temporizado	0,3	A
Curva	0,3	MI
Aj Instantâneo	2,49	A

RELÉ DE SOBRECORRENTE – NEUTRO		
Função	50/51 N	
Fabricante	PEXTRON	
Tipo	URPE-6104	
RTC	90	
Aj. Temporizado	0,06	A
Curva	0,4	MI
Aj Instantâneo	0,8	A

Figura 40 - Planilha de dimensionamento para componentes de subestação de 500 kVA.

Fonte: (Própria)

DADOS DA INSTALAÇÃO	
Tensão de Fornecimento (V)	13.800
Fator de Potência	0,92

POTÊNCIA DOS TRANSFORMADORES	
Transformador 1 (VA)	500.000

IMPEDÂNCIA DOS TRANSFORMADORES Z%	
Transformador 1 (%)	4,5

CÁLCULOS:

IMPEDÂNCIA EQUIVALENTE DO SISTEMA DA CONCESSIONÁRIA	
$Z_{cc} = (\text{Tensão de Fornecimento}) / \sqrt{3} \times I_{cc3F}$	
Zcc (Ω)	0,98

IMPEDÂNCIA DOS TRANSFORMADORES	
$Z_{traf1} = [(\text{Tensão de Fornecimento})^2 \times Z\% \text{ trafo}] / \text{Potência do Trafo}$	
Ztraf1 (Ω)	17,14

CURTO-CIRCUITO NO SECUNDÁRIO DOS TRANSFORMADORES	
$I_{cctraf1} = \text{Tensão de Fornecimento} / \sqrt{3} \times (Z_{cc} + Z_{traf1})$	
IccTra1 (A)	439,63

CORRENTE NOMINAL MÁXIMA (Trifásica) – In	
$I_n = \text{Potencia dos Transformadores} / \sqrt{3} \times \text{Tensão de Fornecimento}$	
In (A)	20,92

CORRENTE DEMANDADA (Trifásica) – Idem	
$I_{dem} = \text{Demanda Prevista} / \sqrt{3} \times \text{Tensão de Fornecimento} \times FP$	
Idem (A)	22,74

CORRENTE DE DESBALANÇO – Ides	
$I_{des} = I_{dem} \times 0,20$	
Ides (A)	4,55

CORRENTE DE MAGNETIZAÇÃO – Imag	
$I_{mag} = 1 / ((1/I_{cc3F}) + (1,732 \times V) / (P \times 10))$	
Imag (A)	203,92

PONTO ANSI	
$I_{ansi-traf1} = 0,58 \times 100 / Z\% \times I_{traf1}$	
I ansi-traf1 (A)	269,6160677

CÁLCULO DO TC	
$I_n = I_{cc3F} / 20$	
In (A)	450

ESPECIFICAÇÃO DO TC		
	Primário	Secundário
TC	450	5
RTC (Relação de espiras)	90	

Ztc = 0,2 x Zburden	
Z burden do TC (Ω)	1
Ztc	0,2

SENSOR DE FASE	
$\text{Temporizado} = (\text{Idem}) \times 1,2 / \text{RTC}$	
Temporizado	0,30

Instantâneo = (1,1X Imag) / RTC	
Temporizado	2,49

SENSOR DE NEUTRO	
$\text{Temporizado} = (\text{Idem}) \times 1,2 / \text{RTC}$	
Temporizado	0,06

Instantâneo = < IccT100 / RTC	
Instantâneo	0,80

Figura 41 - Cálculos utilizados para o ajuste de um relé de proteção - 500 kVA.

Fonte: (Própria)

GRÁFICO - Coordenação Fase

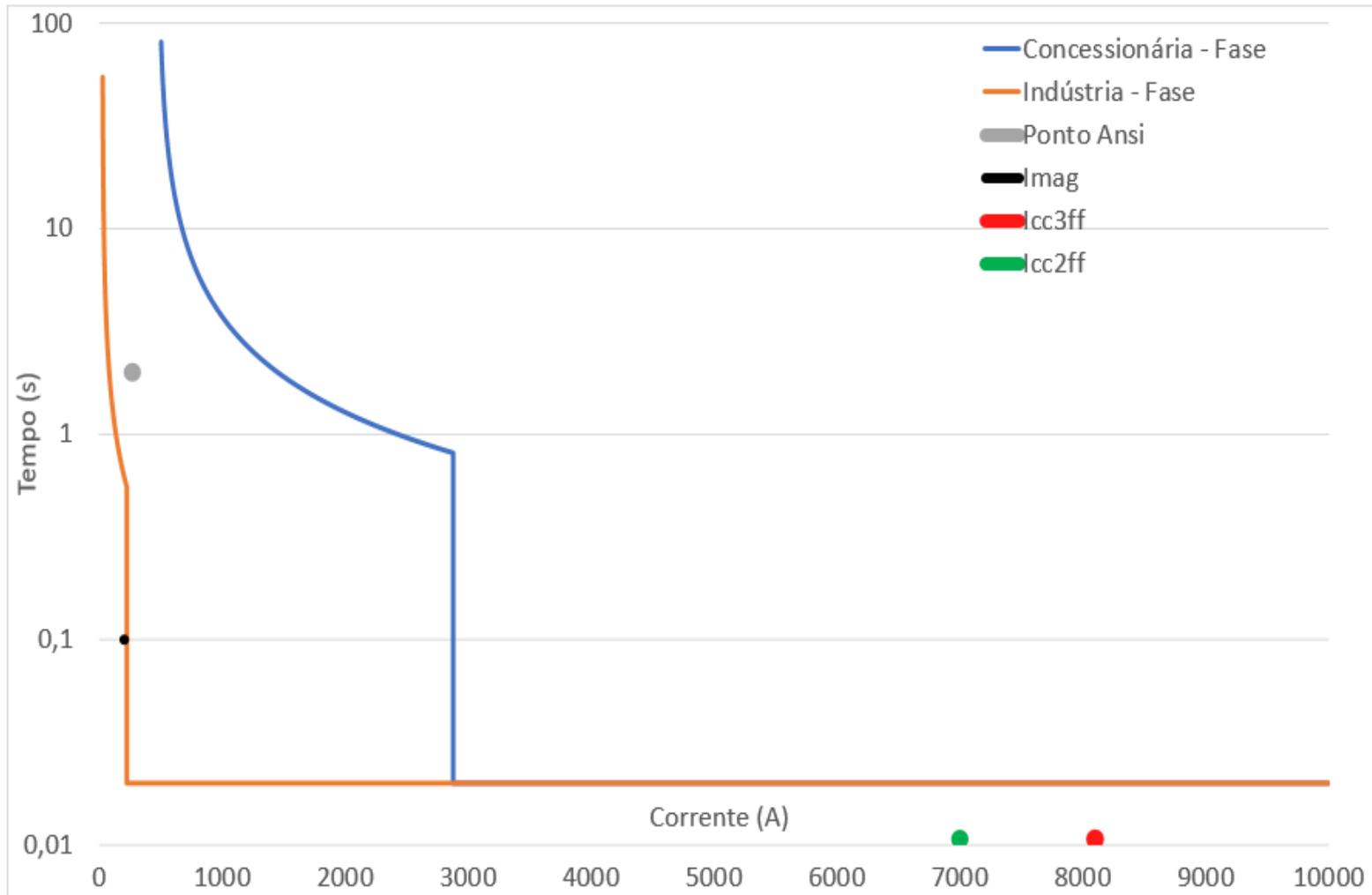


Figura 42 - Coordenograma de ajuste de fase - 500 kVA.

Fonte: (Própria)

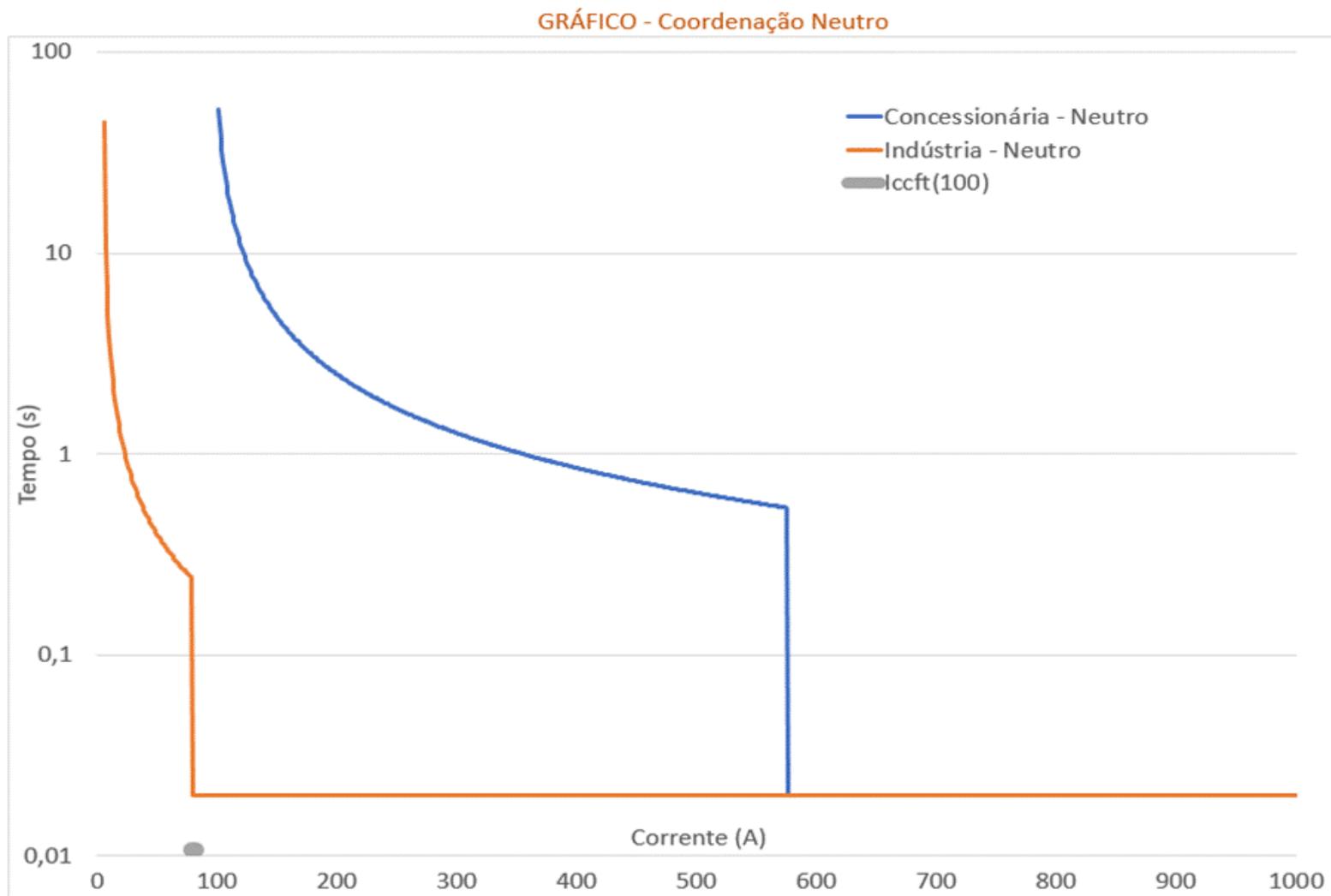


Figura 43 - Coordenograma de ajuste de neutro - 500 kVA.

Fonte: (Própria)

Os equipamentos utilizados na subestação foram especificados com base nas especificações propostas pela planilha de *dimensionamento para equipamentos de uma subestação*. Nesta planilha o projetista deverá fornecer o valor de demanda para instalação elétrica, no caso do presente estudo, foi adotada uma *demanda* de 400 kVA, depois o projetista deverá especificar um fator de *sobrecarga* para esta demanda adotada, no presente caso foi especificado um fator de 20%. Em seguida o usuário da planilha deverá especificar a tensão presente no primário e no secundário do transformador, nos respectivos campos: *Tensão no primário (kV)* e *Tensão no secundário (V)*. Fornecido esses parâmetros, a planilha irá especificar os ajustes dos demais equipamentos.

5.1 SUBESTAÇÃO DE UMA FÁBRICA GENÉRICA

A presente fábrica irá fazer uso de uma subestação do tipo abrigada (em alvenaria), com potência instalada igual a 400 kVA. A seguir, serão definidos os equipamentos utilizados na subestação e seus respectivos ajustes com base nas normas vigentes já vistas e dados fornecidos pela planilha de dimensionamento para componentes de subestação de energia elétrica.

5.2 DIMENSIONAMENTO DE UMA SUBESTAÇÃO

As ilustrações a seguir contendo estruturas, cubículos e equipamentos presentes na subestação foram geradas com auxílio do software AutoCAD 2019. Através da figura 44, pode-se observar o poste de ligação da concessionária de energia elétrica, o mesmo contará com um para-raio com tensão nominal de 12 kV e corrente nominal de 10 kA. Também contará com a presença de uma chave porta fusível ***Tipo C100 A***, com elo fusível ***25 k***.

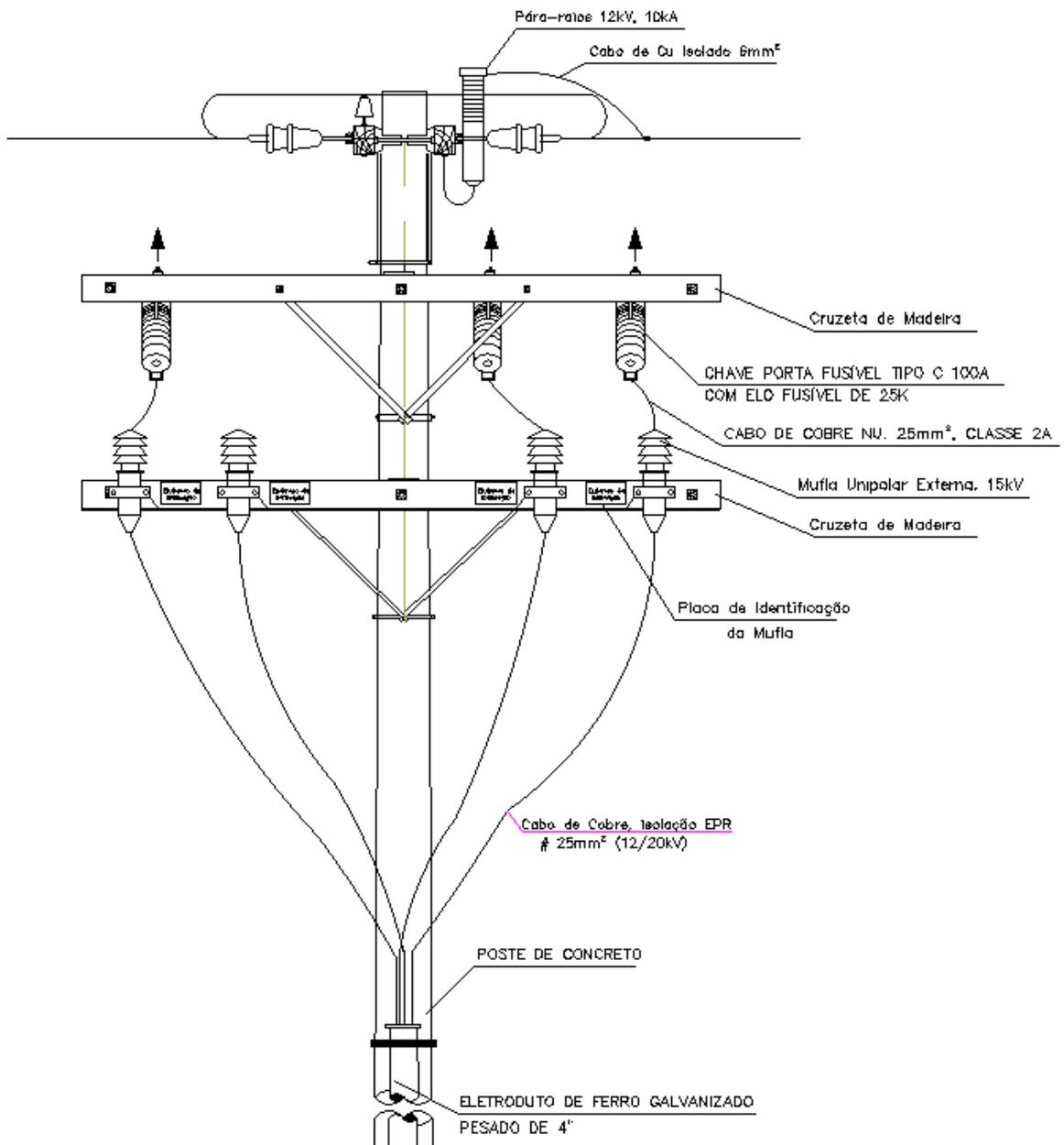


Figura 44 – Poste de derivação

Fonte: (Própria)

Os cabos de cobre percorrem o interior de um eletroduto de ferro galvanizado de 4" e posteriormente passam por uma caixa de passagem subterrânea medindo 50x50x50 cm. Os cabos de cobre isolados percorreram outro eletroduto, este por sua vez de material PVC, onde irão se conectar às muflas terminais de 15 KV, presente no interior da subestação. As muflas se conectarão ao barramento de cobre, como observado na figura 45.

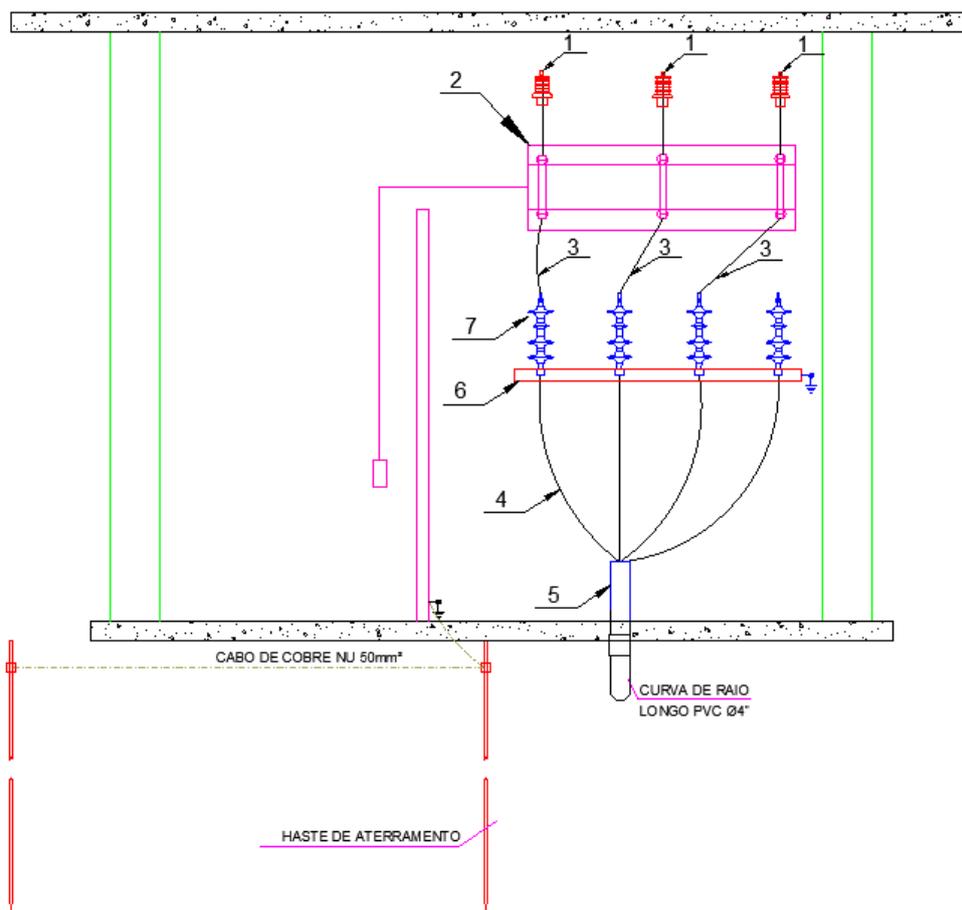


Figura 45 – Corte de uma subestação – Isoladores, chave seccionadora tripolar e outros.

Fonte: (Própria)

Onde:

- 1 - Isolador pedestal de 15 kV, para uso interno;
- 2 - Chave seccionadora tripolar de 15 kV – 200 A com comando simultâneo;
- 3 - Barramento de cobre de 453 mm²;
- 4 - Cabo unipolar com isolamento para 15 kV;
- 5- Duto de PVC ou ferro galvanizado com diâmetro de 4”;
- 6 - Cantoneira de 1/2" x 1/2" x 3/16" - comprimento de 180 cm
- 7 – Mufla terminal de 15 kV

Como mencionado em capítulos anteriores, o posto de medição primária, será destinado para o uso dos equipamentos de medição, como transformadores de corrente e de potencial, conforme figura 46.

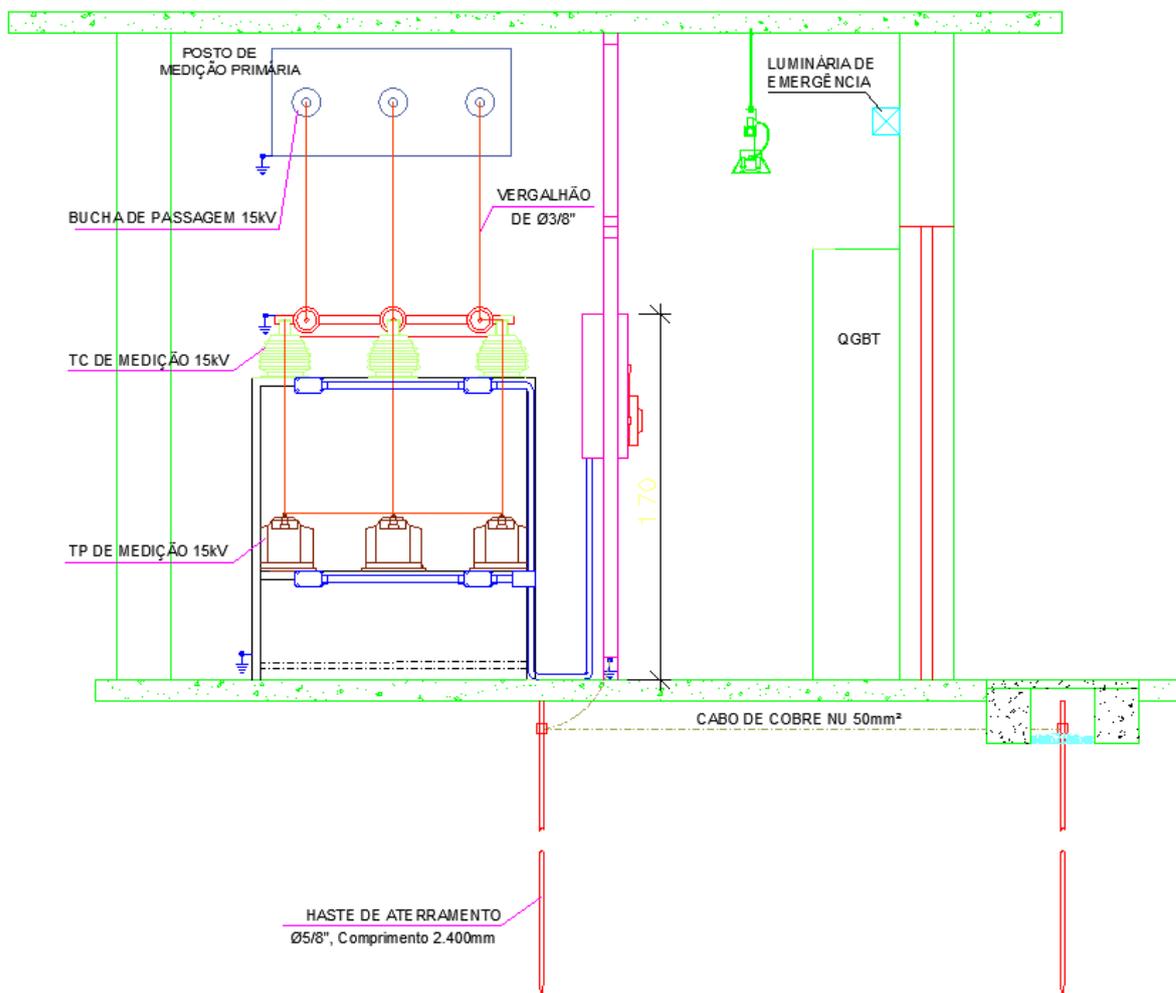


Figura 46 - Corte de uma subestação - Posto de medição primária.

Fonte: (Própria)

O transformador de potencial utilizado possuirá uma relação de transformação de 70:1. O transformador de corrente apresentará uma relação de transformação de 20:5.

O segundo compartimento presente na subestação é o posto de proteção primária, neste compartimento estará presente chaves seccionadoras tripolares de 13,8 kV, as quais terão capacidade para suportarem correntes nominais de 10 kA. Também se observa a presença de chaves seccionadoras tripolares. O disjuntor geral usado para proteção da subestação deverá ter capacidade para operar com tensões de até 15 kV e dispor de ajuste de corrente elétrica mínima

de 350 A. Com base na potência demanda de 400 kVA, a corrente máxima do disjuntor de baixa tensão será ajustada para 850 A.

A seguir pode-se observar o posto de medição primária com os respectivos equipamentos citados, conforme figura 47.

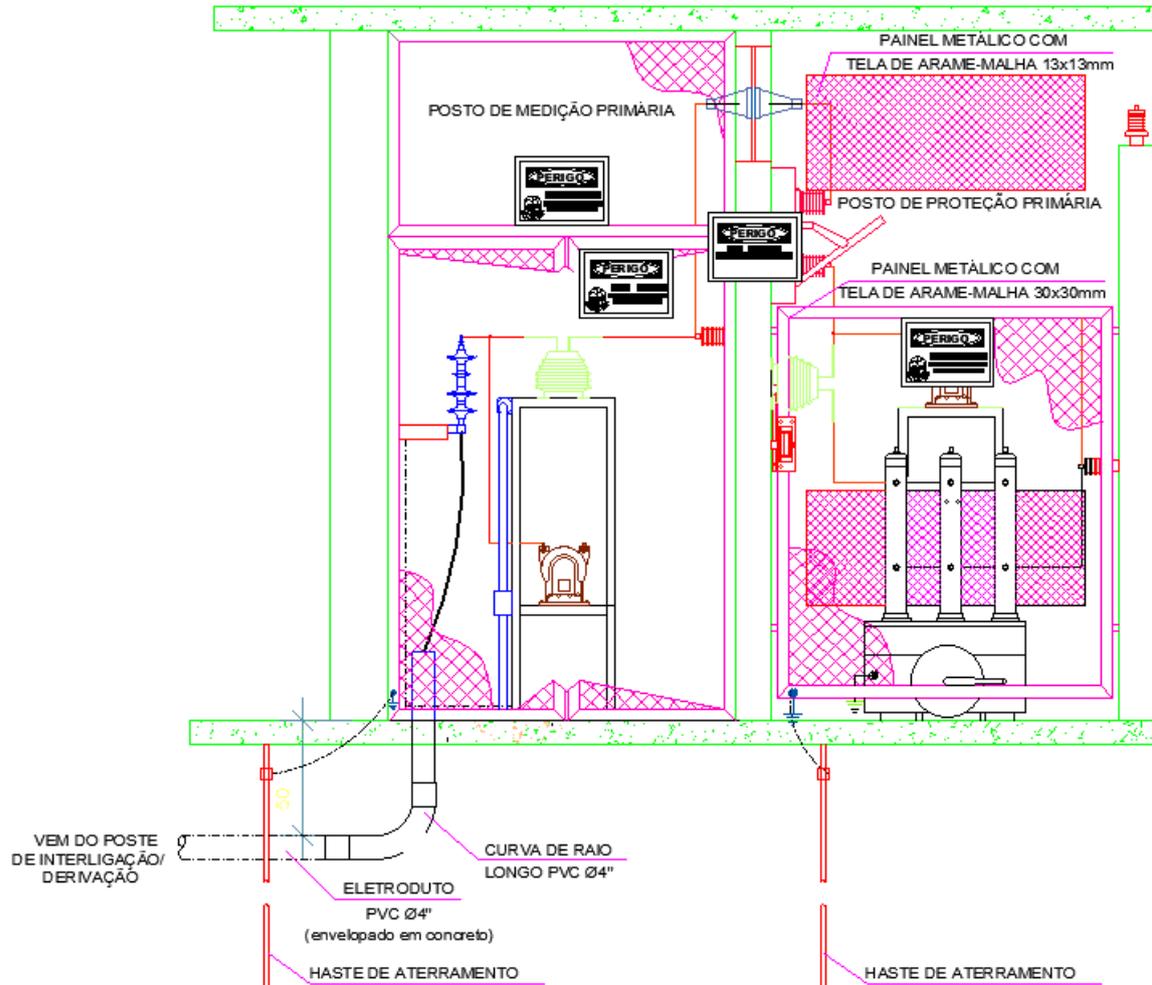


Figura 47 - À direita localiza-se o posto de proteção primária.

Fonte: (Própria)

Como visto anteriormente, a NBR 14039, estabelece que para instalações trifásicas com capacidade superior a 300 kVA, a proteção feita realizada pelo disjuntor de média tensão deverá ser acompanhada pelo uso de relés com as funções 50 e 51, com proteção de fase e neutro. Com base nisto, será adotado o uso de um relé microprocessado da fabricante PEXTRON, modelo URPE 6104. O referido relé contará com os seguintes ajustes.

Os ajustes de fase são mostrados na tabela 19.

Tabela 19 - Ajustes de relé de sobrecorrente – Fase.

RELÉ DE SOBRECORRENTE – FASE		
Função	50/51	
Fabricante	PEXTRON	
Tipo	URPE-6104	
RTC	90	
Aj. Temporizado	0,3	A
Curva	0,2	MI
Aj Instantâneo	2,5	A

Fonte: Própria

Os ajustes de neutro são mostrados na tabela 20.

Tabela 20 - Ajustes de relé de sobrecorrente – Neutro.

RELÉ DE SOBRECORRENTE – NEUTRO		
Função	50/51 N	
Fabricante	PEXTRON	
Tipo	URPE-6104	
RTC	90	
Aj. Temporizado	0,06	A
Curva	0,2	MI
Aj Instantâneo	0,80	A

Fonte: Própria

Por fim observa-se o posto de transformação, este cubículo irá ser destinado para a instalação de um transformador a óleo de 500 kVA, de acordo com a figura 48. Como citado anteriormente, as muflas são utilizadas para os condutores de energia elétrica possam ir de um cubículo um posto para outro, diante disto, considerou-se o uso de muflas com isolamento de até 15 kV.

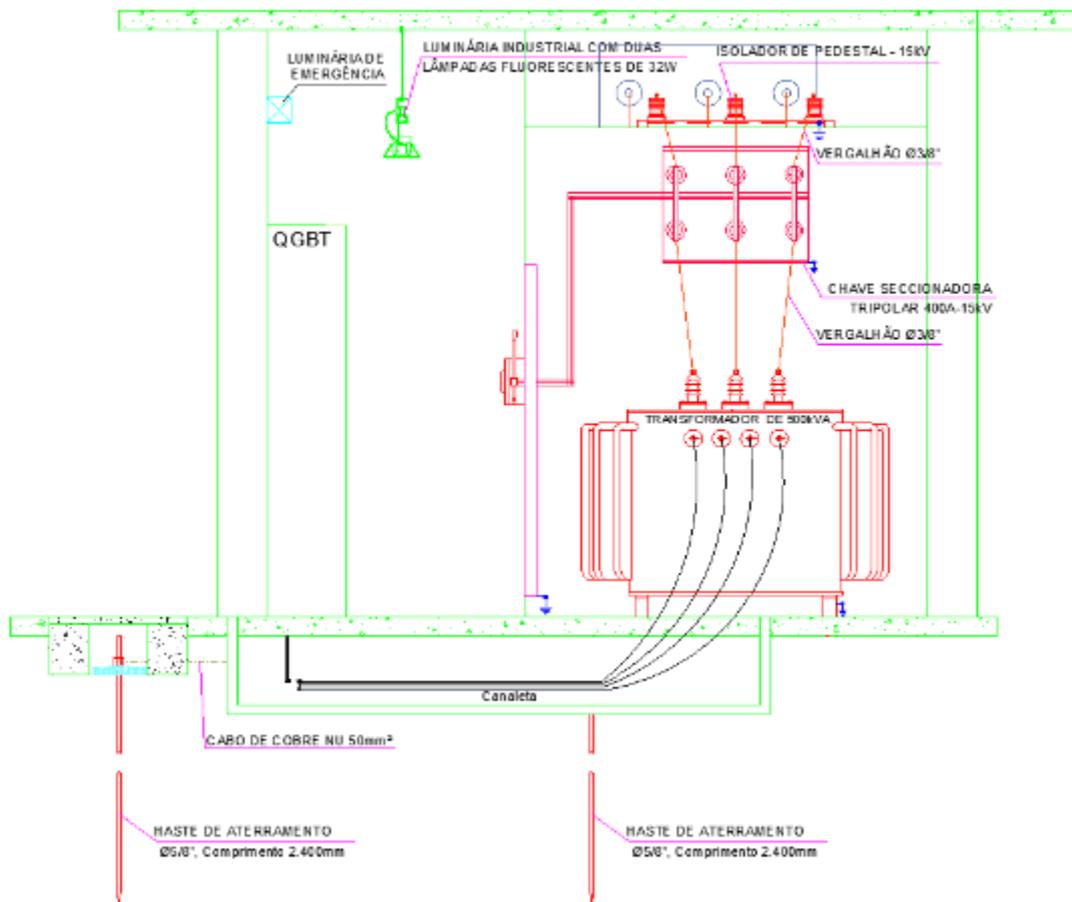


Figura 48 - Posto de transformação.

Fonte: (Própria)

Na figura 49, pode-se observar uma subestação contendo os três postos mencionados.

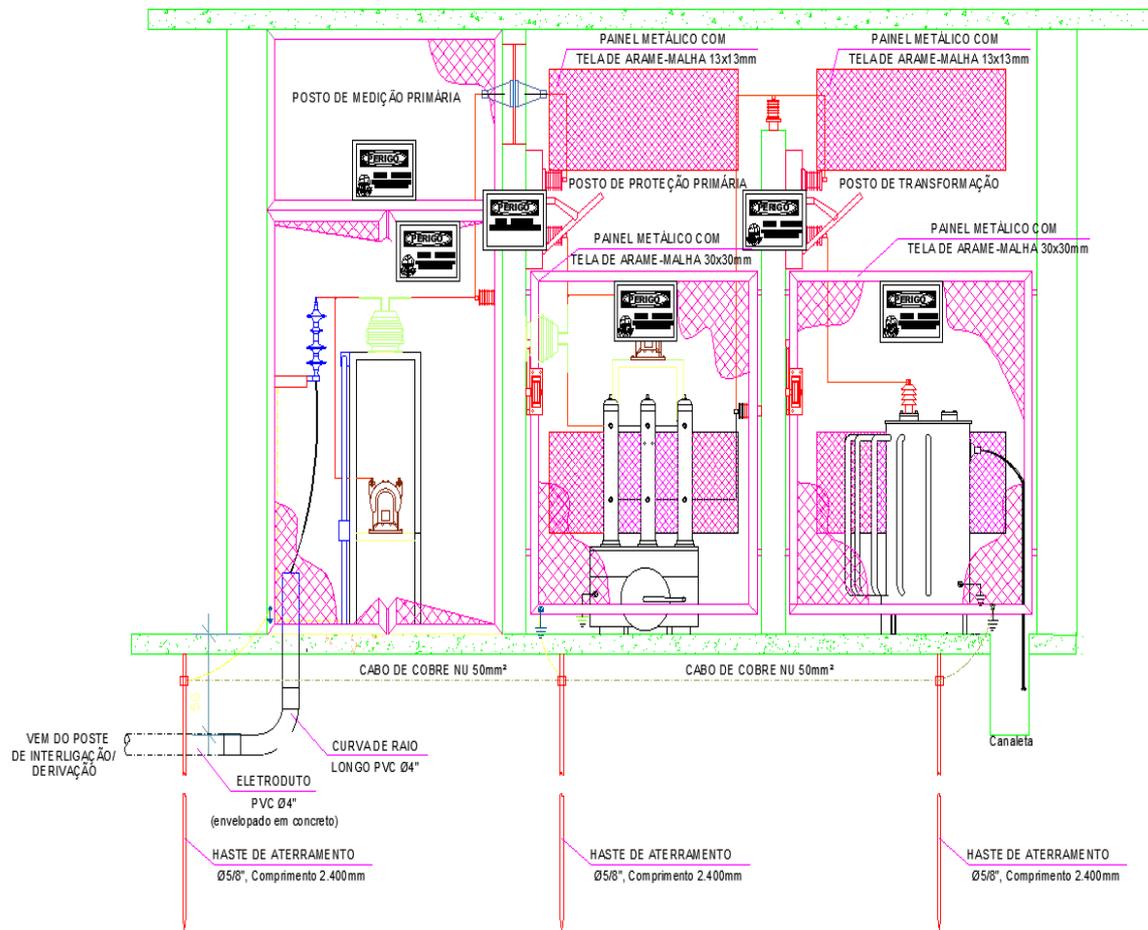


Figura 49 - Subestação de energia elétrica de 13.8 kV.

Fonte: (Própria)

Na figura 50 e 51, está presente a representação de uma subestação de energia elétrica e suas respectivas cargas de consumo.

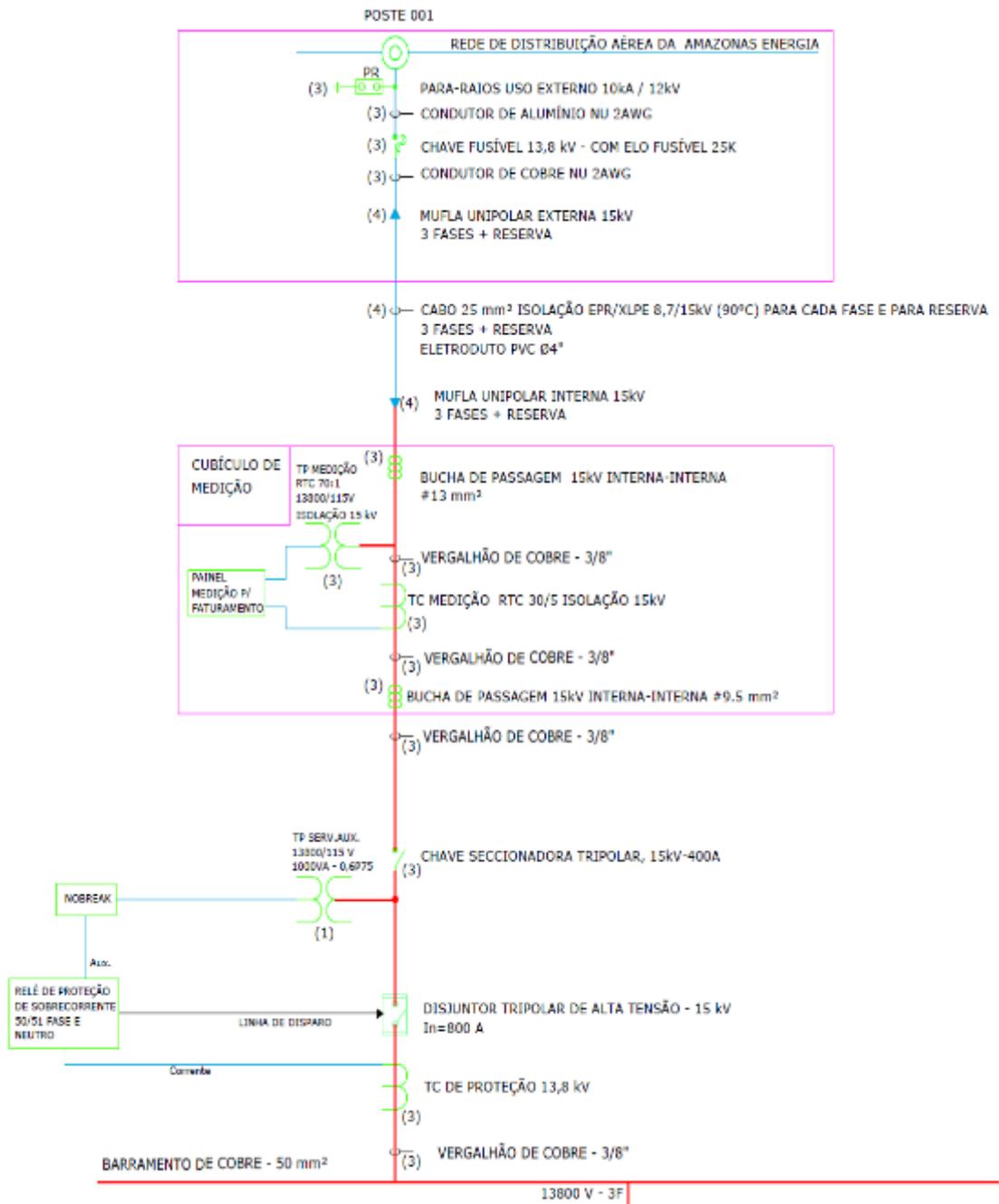


Figura 50 - Diagrama unifilar de uma subestação de energia elétrica -1ª parte

Fonte: (Própria)

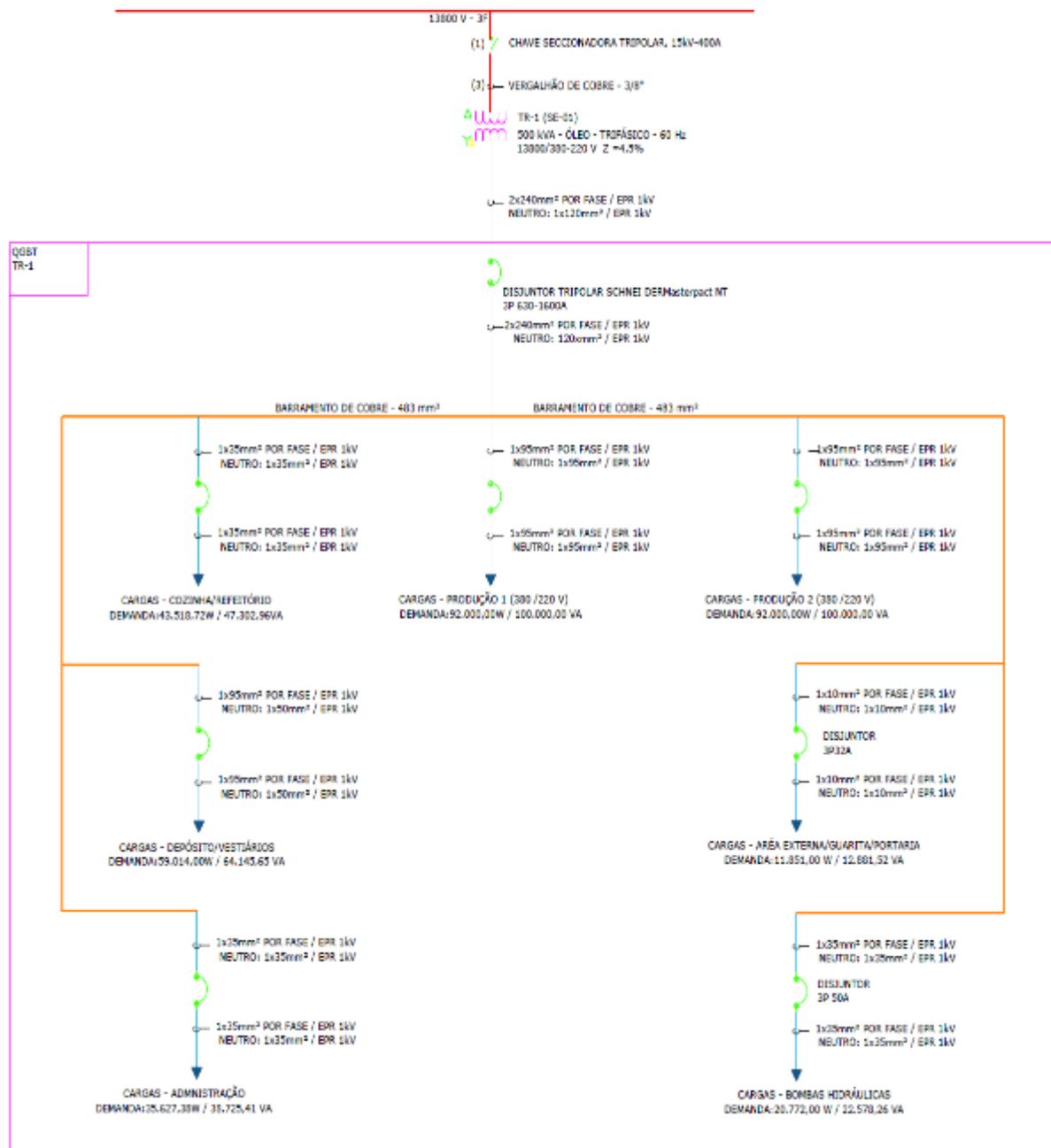


Figura 51 - Diagrama unifilar de uma subestação de energia elétrica -2ª parte

Fonte: (Própria)

CAPÍTULO 6: CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente trabalho abordou-se a importância de uma metodologia para se realizar dimensionamentos de projetos de subestações de energia elétrica, também se evidenciou os elementos principais que constituem uma subestação e demonstrou-se conceitos e normas envolvendo a empregabilidade e parametrização dos equipamentos utilizados.

A demanda de energia elétrica no Brasil vem aumentando de forma gradativa ao longo dos anos, grande parte desse aumento se deve ao crescimento da indústria, impulsionada pela produção de matérias primas e consumo de bens manufaturados. Frente a isso, o setor elétrico deve promover formas seguras, eficientes e econômicas de fornecimento de energia elétrica para seus consumidores industriais.

Diante deste cenário, criou-se a necessidade de elaboração de uma metodologia que reunisse conceitos sobre a funcionalidade e empregabilidade de equipamentos elétricos aplicados em subestações e o uso e interpretação das normas técnicas da concessionária de energia elétrica Amazonas Energia.

Através dos estudos realizados foi possível verificar a existência de vários equipamentos elétricos necessários ao funcionamento de uma subestação, sendo que cada equipamento apresentou características de funcionalidade e aplicabilidade distintas e limitações técnicas específicas. Também, observou-se uma gama de arranjos para subestações como, por exemplo, tipos de edificações, arranjos de barramentos e outros aspectos fundamentais. A norma de Fornecimento de Energia Elétrica em Média Tensão (13,8kV e 34,5 kV), da Eletrobras – Amazonas Energia, foi usada como uma das bases para a escolha e parametrização dos elementos constituintes deste trabalho.

A metodologia de dimensionamento foi elaborada com o auxílio de ferramentas computacionais através do software Microsoft Excel, com base nas especificações da norma técnica Fornecimento de Energia Elétrica em Média Tensão (13,8kV e 34,5 kV), da Eletrobras – Amazonas Energia.

O estudo de caso aplicado foi realizado considerando-se a implementação de uma subestação de energia elétrica para uma planta industrial genérica. Para esta subestação considerou-se um fornecimento de energia elétrica trifásica, em níveis de tensão de 13.800 V para a média tensão e níveis de 380 V para a baixa tensão. A demanda de energia elétrica considerada foi de 400 kVA, esta demanda foi estimada com base em levantamento de cargas,

considerando o uso de circuitos de força para tomadas, circuitos de iluminação, circuitos específicos para máquinas de injeção plásticas e outros.

A avaliação do estudo de caso baseou-se no uso das normas de fornecimento de energia elétrica em média tensão vigentes. Frente a isso pode-se determinar do tipo de edificação a ser adotada, escolha do arranjo de barramento a ser implementado na subestação e definição dos equipamentos utilizados, bem como nas suas respectivas parametrizações.

Dessa forma, conclui-se que os objetivos principais deste trabalho, tanto gerais, quanto específicos, foram alcançados de forma prática e eficiente através da metodologia de dimensionamento proposta.

6.1 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para continuidade deste trabalho ou artigos relacionados, seguem as propostas abaixo.

I - Incluir na planilha de dimensionamento a opção de acréscimo para mais um transformador de potência, tendo em vista que para subestações com demandas acima de 500 kVA, recomenda-se o uso de dois ou mais transformadores de potência.

CAPITULO 7: REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

D'Ajus, Ary *et al.* **Equipamentos elétricos - especificação e aplicação em subestações de alta tensão.** Rio de Janeiro: Furnas, 1985.

Frontin, Sergio de Oliveira (org.). **Equipamentos de alta tensão - Prospecção e Hierarquização de Inovações Tecnológicas.** 1. ed. Brasília: Goya Editora LTDA, 2013.

MAMEDE FILHO, JOÃO. **Instalações elétricas industriais.** 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017.

MAMEDE FILHO, JOÃO. **Manual de equipamentos elétricos.** 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2005.

MAMEDE FILHO, J.; MAMEDE, D. R. **Proteção de sistemas elétricos de potência.** Reimpressão. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

KAGAN, N.; OLIVEIRA, C. C. B.; ROBBA, E. J. **Introdução aos sistemas de distribuição de energia elétrica.** 1 ed. São Paulo: Blucher, 2005.

ALEXANDER, CHARLES K.; MATTHEW N. O. SADIKU. **Fundamentos de circuitos elétricos.** 5 ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

NDEE 01. Eletrobras Amazonas Energia. **Fornecimento de Energia Elétrica em Média tensão (13,8 kV e 34,5 kV).** 2014.

ET-03. Eletrobras Amazonas Energia. **Sistema de proteção com relé microprocessado com função 50/51 para fase e neutro.** 2014.

NTU – 005.2. Energisa. **Critérios para Elaboração de Projetos de Subestação Tipo Urbana B.** 2017

CARLETO, NIVALDO. **Subestações Elétricas.** Brasília: NT, 2017

MONTENEGRO, Renan. **O que são subestações?** 2016. Universo Elétrico. Disponível em: <<https://universoeletrico.wordpress.com/2016/08/02/o-que-sao-subestacoes/>>. Acesso em: 02/10/2020.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Anuário Interativo.** 2020. Disponível em: <<http://shinyepe.brazilsouth.cloudapp.azure.com:3838/anuario/>>. Acesso em: 17/12/2020.

ELEKTRO. **Elektro inicia obra de alimentador em Nova Independência.** 2019. Elektro Disponível em: <<https://www.elektro.com.br/noticias/10/25/2019/elektro-inicia-obra-de-alimentador-em-nova-independencia#:~:text=Os%20alimentadores%20s%C3%A3o%20circuitos%20de,das%20redes%20de%20baixa%20tens%C3%A3o.>>. Acesso em: 02/10/2020.

ENGELCO. **Subestações blindadas.** 2015. Disponível em: <<http://engelco.com.br/subestacoes-blindadas/>>. Acesso em: 03/10/2020.

ELETROSÁ. **Subestações.** 2019. Disponível em: <<https://www.eletrosa.com.br/subestacoes.html>>. Acesso em: 03/10/2020.

PROFESSOR CIDE. **Como funcionam os pára-raios utilizados nas redes de distribuição de energia elétrica.** 2011. Disponível em: <<http://profcide.blogspot.com/2011/10/como-funcionam-os-para-raios-utilizados.html>>. Acesso em: 02/10/2020.

BRUM. **Quais são os principais barramentos elétricos de cobre?** 2020. Disponível em: <<http://www.brum.com.br/blog/2020/4/20/221qfz02gkn8yndge77nu0fg27rkgi#:~:text=O%20barramento%20el%C3%A9trico%20%C3%A9%20respons%C3%A1vel,pe%C3%A7a%20essencial%20para%20a%20instala%C3%A7%C3%A3o.&text=Os%20barramentos%20el%C3%A9tricos%20s%C3%A3o%2C%20geralmente,excelente%20para%20condu%C3%A7%C3%A3o%20de%20eletricidade.>>. Acesso em: 02/10/2020.

EHE INDÚSTRIA & COMÉRCIO. **Barramento trifásico 150 A P/08-60 Disjuntores.** 2020. Disponível em: <<https://www.shopehe.com.br/Barramento-Trifasico-150A-p-08-60-disjuntores>>. Acessado em 05/10/2020.

COPPERMETAL. **Barra de cobre conduzindo sua indústria ao sucesso!** 2020. Disponível em: <<https://www.coppermetal.com.br/cobre/barra-de-cobre>>. Acessado em 05/10/2020.

SAREL. **Seccionadora Tripolar Abertura Sem Carga, Com Base Para Fusíveis Limitadores De Corrente Tipo HH.** 2013. Disponível em: <<http://www.sarel.com.br/produtos/sec/saf/>>. Acessado em 06/10/2020.

DOCPLAYER. **Definições. Entrada de Energia. Entrada de Serviço.** 2020. Disponível em: <https://docplayer.com.br/5203706-Definicoes-entrada-de-energia-entrada-de-servico.html>. Acessado em 26/10/2020.

GBL COMERCIAL. **Bucha de Passagem Interna/Externa.** 2014. Disponível em: <<http://www.gblcomercial.com.br/produtos/para-raios-e-chaves-fusiveis/bucha-de-passagem-interna-externa/>>. Acessado em 30/10/2020.

JBV AUTOMAÇÃO. **Instalações Industriais.** 2020. Disponível em: <<http://www.jbv.com.br/servico/instalacoes-de-subestacoes-13800v-138>>. Acessado em 30/10/2020.

WEG. **Disjuntor a Vácuo de Média Tensão VBW.** 2020. Disponível em: <https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Automa%C3%A7%C3%A3o-e-Control-Industrial/Controls/Prote%C3%A7%C3%A3o-de-Circuitos-El%C3%A9tricos/Disjuntores-a-V%C3%A1cuo/Disjuntor-a-V%C3%A1cuo-de-M%C3%A9dia-Tens%C3%A3o-VBW/Disjuntor-a-V%C3%A1cuo-de-M%C3%A9dia-Tens%C3%A3o-VBW/p/MKT_WDC_BRAZIL_MEDIUM_VOLTAGE_VACUUM_CIRCUIT_BREAKER_VBW>. Acessado em 01/11/2020.

VETTEL. **Estudo de Energia de Arco Elétrico Incidente.** 2020. Disponível em: <<http://www.vetel.com.br/ESTUDO-DE-ENERGIA-DE-ARCO-EL%C3%89TRICO-INCIDENTE.php>>. Acessado em 01/11/2020.

ELETROTRAFO. **Rele Prot URPE 7104T 50/51 (3F+1neutro) com fonte 72/250vca vcc – Pextron.** 2020. Disponível em: <<https://www.eletrafo.com.br/rele>>

prot--urpe-7104t-50-51--3f-1neutro--c-fonte-72-250vca-vcc--pext-22580017/p>. Acessado em 02/11/2020.

LEÃO, RUTH. **Capítulo 4 - Distribuição de Energia Elétrica**. 2020. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/130060/mod_resource/content/1/Subestacoes-texto.pdf> Acessado em 02/11/2020.

ANEXOS

ANEXO 1

Especificação técnica de um transformador seco de 300 kVA.

FOLHA DE DADOS				
Transformador Seco				
Identificação				
Código do produto:	14908998			
Tipo:	Transformador abaixador			
Norma / Especificação:	NBR 5356-11			
Características do ambiente				
Instalação:	Abrigado			
Altitude máxima de instalação (m.s.n.m):	1000.0			
Atmosfera:	Não agressiva			
Temperatura máxima do ambiente (°C):	40.0			
Características elétricas				
Frequência (Hz):	60.0	Fases:	Trifásico	
		Grupo de ligação:	Dyn1	
Enrolamento	Potência (kVA)	Tensão (kV)	Ligação	
Alta tensão	300.0	13.8 -4x0.6 kV	Triângulo	
Baixa tensão		0.38	Estrela	
Elevação de temperatura dos enrolamentos média (°C)		100.0		
Elevação de temperatura dos enrolamentos ponto mais quente (°C)		115.0		
Classe do material isolante		F (155 °C)		
Ensaio dielétrico	Alta tensão		Baixa Tensão	
	Fase	Neutro	Fase Neutro	
Nível de isolamento (kV)	15.0		1.1 1.1	
Tensão de impulso (pleno) (kV)	95.0		0.0 0.0	
Tensão de impulso (cortado) (kV)	105.0		0.0 0.0	
Tensão aplicada (kV)	34.0		3.0 3.0	
Tensão induzida (kV)	2 x Vn		2xVn 2xVn	
Temperatura de Referência @ 120.0 °C - AN			100%	
Perdas a vazio (kW)			1.3	
Perdas em carga (kW)				
Perda Total (kW)			5.8	
Corrente de exotização (%)			2.0	
Alta/Baixa tensão	Base		Impedância @ 120.0 °C - AN (%)	
	Posição (kV)	Potência (kVA)	5.5	
	13.8 / 0.38	300.0		
Refrigeração			AN	
Nível de ruído (dB)			58.0	
Descargas parciais (pC)			10.0	
Corrente de inrush (Apk)				
Fator K			K1	
Fator de Carga [%]	Regulação (100% de carga)			
	AN (Φ = 0.8)	AN (Φ = 0.9)	AN (Φ = 1)	
100	4.43	3.74	1.84	
Rev.	Resumo das modificações	Executado	Verificado	Data
Executor				
Verificador			Página	Revisão
Data	08/11/2020		1 / 2	

FOLHA DE DADOS				
Transformador Seco				
Rendimento				
Fator de Carga [%]	AN (Φ = 0.8)	AN (Φ = 0.9)	AN (Φ = 1)	
25	97.43	97.71	97.94	
50	98.02	98.24	98.41	
75	97.92	98.14	98.33	
100	97.84	97.9	98.1	
Características construtivas				
Grau de proteção:			IP-00	
Classe do transformador:			EC-C1-F1	
Material dos condutores AT/BT:			AW/Al	
Acessórios				
Monitor de temperatura com indicador				
Sensor de temperatura				
Sistema de comutação a vazio (Enk)				
Orais para tração				
Orais para suspensão				
Placa de identificação (alumínio)				
Rodas				
Base de apoio				
Conector de aterramento				
Ensaio				
Rotina: Sim				
Tipo: Conforme ordem de compra				
Especial: Conforme ordem de compra				
Descargas parciais: Sim				
Notas				
As informações contidas são valores de referência. Sujeito a alterações sem aviso prévio.				
Rev.	Resumo das modificações	Executado	Verificado	Data
Executor				
Verificador			Página	Revisão
Data	08/11/2020		2 / 2	

ANEXO 2

Potências mais encontradas em transformadores comerciais.

Potência transformadores (kVA)
15
30
45
75
112,5
150
225
300
500
750
1000

ANEXO 3

Especificação técnica de um relé de sobrecorrente

URPE 6104

Relé de proteção de Sobrecorrente

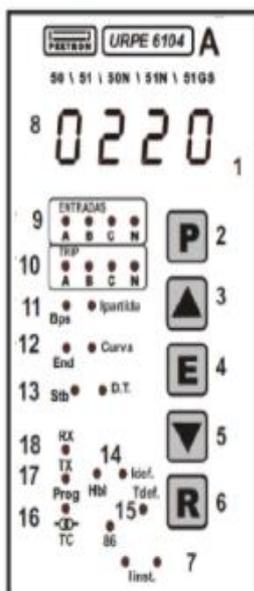
Características do Produto

- Proteção de sobrecorrente nas condições de trifásico + neutro, trifásico, monofásico, bifásico ou neutro.
- Com fonte capacitiva incorporada (alimentação do relé).
- Painel frontal em policarbonato com microchaves e sinalizações por curva de proteção.
- Display de LEDs para medição, programação e monitoramento.
- LEDs de sinalização e regísto.
- Tampa frontal em policarbonato cristal com dispositivo para lacre.
- Puxador, presilhas e dispositivos de fixação em aço inox 304
- Porta serial traseira RS485 para conexão em rede / supervisão remota (SCADA).
- Protocolo de comunicação MODBUS[®] RTU.
- Circuitos eletrônicos protegidos por resina contra umidade e atmosfera agressiva (conformal coating), permite a instalação do produto em cubículos (painéis) ao tempo ou abrigados.



Aplicação

- Proteção de sobrecorrente trifásica para sistemas elétricos.
- Solução para cabines primárias (subestações primárias).



1	Ponto decimal do display. Pisca para sinalizar que o relé está no modo de programação dos parâmetros do canal de comunicação serial.
2	Tecla para seleção de parâmetro.
3	Tecla para incremento do valor do parâmetro a ser programado.
4	Tecla para confirmação do valor programado para o parâmetro selecionado.
5	Tecla para decremento do valor do parâmetro a ser programado.
6	Tecla para reset local da sinalização do relé.
7	Sinaliza a programação do parâmetro I Inst. para fase e neutro. Na atuação sinaliza a região da curva que o URPE6104 operou.
8	Display para indicação de corrente (amperímetro) e valor do parâmetro selecionado.
9	Sinalização da fase exibida no display através de varredura: A → B → C → N → A
10	Indica a fase que atuou (TRIP): A – B – C – N
11	Sinaliza a programação do parâmetro I partida para fase e neutro. O led de sinalização da curva de NEUTRO atua em conjunto com o led PROG para sinalizar programação do parâmetro BPS da comunicação serial.
12	Sinaliza a programação da curva de operação Curva para fase e neutro. Na atuação sinaliza a região da curva que o URPE6104 operou. O led de sinalização da curva de NEUTRO atua em conjunto com o led PROG para sinalizar programação do parâmetro END da comunicação serial.
13	Sinaliza a programação do parâmetro D.T. para fase e neutro. Na atuação sinaliza a região da curva que o URPE6104 operou. O led de sinalização da curva de NEUTRO atua em conjunto com o led PROG para sinalizar programação do parâmetro STB da comunicação serial.
14	Sinaliza a programação do parâmetro I def. para fase e neutro. Na atuação sinaliza a região da curva que o URPE6104 operou. O led de sinalização da curva de NEUTRO atua em conjunto com o led PROG para sinalizar programação do parâmetro HABL da comunicação serial.
15	Sinaliza a programação do parâmetro T def. para fase e neutro. Na atuação sinaliza a região da curva que o URPE6104 operou. O led de sinalização da curva verde Tdef. atua em conjunto com o led PROG para sinalizar programação do parâmetro 86 .
16	Sinaliza a programação do parâmetro TC relação do transformador de corrente para fase e neutro ou a programação PROGR dos parâmetros da comunicação serial ou falha no teste de BA (piscante).
17	Sinaliza fluxo de transmissão de dados do canal serial – TX .
18	Sinaliza fluxo de recepção de dados do canal serial – RX .
19	Funções ANSI do URPE6104 50-60Hz.

1. FUNÇÕES DE PROTEÇÃO:

- **50/51** – Sobrecorrente instantânea e temporizada (NI, MI, EI, LONG, IT, I2T) de fase
- **50N/51N** – Sobrecorrente instantânea e temporizada (NI, MI, EI, LONG, IT, I2T) de neutro
- **51GS** – Sobrecorrente temporizada de fuga à terra

2. FUNÇÕES DE MEDIÇÃO:

- Correntes de fase (IA, IB, IC) e neutro (ID)
- Correntes máximas e da última falta

3. FUNÇÕES DE MONITORAMENTO:

- Correntes e sinalizações

4. HARDWARE:

- Relé extraível a quente (curto circuita os TC's)
- 4 entradas de corrente (GS calculado)
- 5 entradas lógicas isoladas (binárias)
- 3 saídas relés (2 TRIP + auto-check)
- Fonte de alimentação chaveada (72...250Vca/Vcc ou 20...80Vca/Vcc) tolerante a interrupções de energia de curta duração
- Painel de comando frontal em policarbonato com microchaves
- 4 Displays e 23 LEDs de sinalização de alta eficiência
- Bandeirolas individuais para cada proteção
- Borneira traseira em policarbonato com fibra de vidro
- Entradas de medição de corrente com baixo consumo (típico 7mΩ)
- Contatos com parafusos e arruelas tipo "unha" com tratamento em níquel químico
- Lâminas de contato de corrente com alta suportabilidade térmica com estrutura mecânica em material termofixo
- Terminais e lâminas de contato elétrico em bronze fosforoso com tratamento em níquel químico
- Caixa em ABS preto V0 – DIN 72 x 144mm
- Capa de proteção frontal em policarbonato cristal com prisioneiro de fixação com orifício para lacre
- Puxador, presilhas e dispositivos de fixação em aço inox 304
- Circuitos eletrônicos "tropicalizados", protegidos por verniz especial (Conformal Coating)

5. FUNÇÕES LÓGICAS PROGRAMÁVEIS:

- Partida de carga fria (cold load pick-up)
- Memória de bandeirolas e registros

6. INTERFACES DE COMUNICAÇÃO:

- Porta traseira de comunicação serial RS485 ou RS232 para conexão em rede/supervisão remota (SCADA)
- Protocolos de comunicação DNP3 e MODBUS® RTU
- Software gratuito para parametrização e medições

ANEXO 4

Especificação técnica de um disjuntor

Folha de dados do produto Características

EXE172012K1B

Basic Function Vacuum Circuit Breaker 0-17.5kV
95kVp 20kA 3s 1250A 150 IEC



Principal

Linha de produto	EasyPact EXE
Nome abreviado do dispositivo	VCB base
Tipo de produto ou componente	Vacuum circuit-breaker
Variante	Básico
Frequência da rede	50/60 Hz
Normas	IEC 62271-100
Tensão de teste dielétrica	17,5 kV
[Uimp] tensão suportável de impulso nominal	38 kV 50 Hz for 1 min
[Icw] corrente nominal de curta duração admissível	95 kV peak
[In] corrente nominal	1250 A
Phase distance	150 mm
Número de polos	3
Tipo de rede	CA
Distância entre polos	270 mm
[Icw] corrente nominal de curta duração admissível	50 kA 50 Hz 52 kA 60 Hz
[Icw] corrente nominal de curta duração admissível	of 3 s
[Icw] corrente nominal de curta duração admissível	20 kA
Tipo de controle	Botão
Modo de montagem	Extraível Fixo
Tipo de proteção	Sem proteção

Complementar

Rated operating sequence	O - 0.3 sec - CO - 15 sec - CO O - 3 min - CO - 3 min - CO O - 0.3 sec - CO - 3 min - CO
Opening time	< 51 ms
Tempo máximo de abertura	66 ms

Maximum closing time	71 ms
Mechanical endurance	10000 cycles M2
Electrical endurance classification	E2 list 1
Rated line-charging breaking current (II)	10 A C1 line charging: 31.5 A C1 cable charging: 400 A C1 single capacitor bank: a <15 kV

Meio ambiente

Weight	50 kg
Altura	527 mm
Largura	477 mm
Profundidade	429 mm
Ambient air temperature for operation	-25...40 °C
Ambient air temperature for storage	-40...70 °C
Certificações do produto	ASEFA

Unidades de embalagem

Unidade de pacote tipo 1	PCE
Número de unidades no pacote 1	1
Peso do pacote 1	65 kg
Pacote 1 Altura	58,7 cm
Pacote 1 largura	80 cm
Pacote 1 Comprimento	60 cm

Operações e descrições

Operation	100
Duration of operation	3 min
Descrição da operação	Preparation

Garantia contratual

Garantia	18 meses
----------	----------

ANEXO 5

Especificação técnica de um transformador de corrente

Folha de dados do produto

Características

METSECT5CC005

TRANSFORMADOR DE CORRENTE 50/5A
DIAMETRO 21MM



Principal

Gama	PowerLogic
Nome do produto	CT
Tipo de produto ou componente	Transformador de corrente
Corrente secundária	5 A
Classe de precisão	Classe 1 a 1,25 VA Classe B a 1,5 VA
[In] corrente nominal	50 A

Complementar

Tipo de transformador de corrente	Tropicalizados para o cabo
Relação do transformador de corrente	50/5
[Ith] corrente térmica ao ar livre convencional	3 kA
Atual suportar dinâmica	2,5 Ith
Fator de segurança	5
[Ue] tensão de operação nominal	< 720 V CA 50/60 Hz
[Ui] tensão de isolamento nominal	3 kV
Modo de montagem	De encaixe Por parafusos
Suporte de montagem	Placa de montagem Calha DIN
Largura	Fora: 44 mm
Altura	Fora: 65 mm
Profundidade	Frame: 30 mm Total: 37 mm
Diâmetro	21 mm
Peso	0,19 kg
[Uimp] tensão suportável de impulso nominal	3 kV
Classe de isolamento elétrico	Classe B
Diâmetro externo do cabo	21 mm
Selagem	Com

Meio ambiente

Padrões	VDE 0414 IEC 61869-2
Certificações do produto	CE
Grau de proteção IP	IP20
Umidade relativa	0...95 %
Temperatura ambiente do ar para funcionamento	-25...60 °C

Unidades de embalagem

Peso do pacote 1	188 g
Peso do pacote 2	17,572 kg

Oferta sustentável

Diretiva RoHS da UE	Conforme Declaração RoHS da EU
Regulamento RoHS China	Declaração RoHS China Produto fora do âmbito da RoHS China. Declaração de substâncias para sua informação.
Divulgação Ambiental	Perfil ambiental do produto
Perfil de Circularidade	Informação sobre o fim da vida útil
WEEE	No mercado da União Europeia, o produto tem de ser eliminado de acordo com um sistema de recolha de resíduos específico e nunca terminar num contentor de lixo.

Garantia contratual

Garantia	18 meses
----------	----------

ANEXO 6

Especificação técnica de um transformador de potencial



Série BPS

Especificações Técnicas

MODELOS	MODEL	UNID.	BPS 10		BPS 10 I		BPS 11		BPS 11 I		BPS 12 / 13 / 13 MT		BPS 12 I / 13 I	
			NBR	IEC	NBR	IEC	NBR	IEC	NBR	IEC	NBR	IEC	NBR	IEC
Tensão Máxima	Max. Voltage	kV	7,2	7,2	15	12	15	17,5	15	17,5	15	17,5	15	17,5
Up - Tensão Primária Máx.	Max. Primary Voltage	kV	7,2	7,2	13,8/√3	12/√3	13,8	13,8	13,8/√3	13,8/√3	13,8	13,8	13,8/√3	13,8/√3
Us - Tensão Secundária	Sec. Voltage	V	440	440	440	440	660	660	660	660	660	660	660	660
Pot. Térmica - Pth Máx.	Thermal Burden	VA	400	400	400	400	500	500	500	500	1000	1000	1000	1000
Derivação no Secundário	Tap in Secondary	VA	400-200	400-200	400-200	400-200	500/250	500/250	500/250	500/250	1000/500	1000/500	1000/500	1000/500
Religação no Secundário	Sec. Connection	VA	400	400	400	400	500	500	500	500	1000	1000	1000	1000
Grupo de Ligação	GL		1	1,2(30s)1,2(cont.)	-	-	1	1,2(30s)1,2(cont.)	-	-	1	1,2(30s)1,2(cont.)	-	-
			2	1,5(30s)1,2(cont.)	2	1,5(30s)1,2(cont.)	2	1,5(30s)1,2(cont.)	2	1,5(30s)1,2(cont.)	2	1,5(30s)1,2(cont.)	2	1,5(30s)1,2(cont.)
			-	-	-	-	3a	1,9(30s)1,2(cont.)	3a	1,9(30s)1,2(cont.)	3a	1,9(30s)1,2(cont.)	3a	1,9(30s)1,2(cont.)
		-	-	-	-	3b	1,9(30s)1,9(cont.)	3b	1,9(30s)1,9(cont.)	3b	1,9(30s)1,9(cont.)	3b	1,9(30s)1,9(cont.)	
Frequência		Hz	60	50	60	50	60	50	60	50	60	50	60	50
Tensão Freq. Industrial	Power Freq. Voltage	KV	20	20	34	28	34	38	34	38	34	38	34	38
NI	BIL		60	60	95	75	110	95	110	95	110	95	110	95
Qt. de Secundários Máx.	Sec.Qt	QT.	2	2	2	2	2	2	2	2	2-3*	2-3*	2-3*	2-3*