



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E
ELETRÔNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

ERALDO KFOURI JÚNIOR

**DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA DE
ATERRAMENTO PARA UMA SUBESTAÇÃO
ABAIXADORA DE TENSÃO EM UMA EDIFICAÇÃO
COMERCIAL**

FLORIANÓPOLIS
2018

ERALDO KFOURI JÚNIOR

**DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA DE
ATERRAMENTO PARA UMA SUBESTAÇÃO
ABAIXADORA DE TENSÃO EM UMA EDIFICAÇÃO
COMERCIAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina para obtenção do Grau de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Professor Mauricio V. Ferreira da Luz, Dr.

FLORIANÓPOLIS
2018

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

KFOURI JÚNIOR, Eraldo
DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA DE ATERRAMENTO
PARA UMA SUBESTAÇÃO ABAIXADORA DE TENSÃO EM UMA
EDIFICAÇÃO COMERCIAL / Eraldo KFOURI JÚNIOR ;
orientador, Mauricio Valência Ferreira da Luz,
2018.

82 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro
Tecnológico, Graduação em Engenharia Elétrica,
Florianópolis, 2018.

Inclui referências.

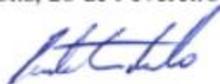
1. Engenharia Elétrica. 2. Subestação abaixadora
de energia elétrica. 3. Sistema de aterramento. 4.
Resistência de malha de terra. I. Valência Ferreira
da Luz, Mauricio . II. Universidade Federal de
Santa Catarina. Graduação em Engenharia Elétrica.
III. Título.

Eraldo Kfourí Júnior

**DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA DE ATERRAMENTO
PARA UMA SUBESTAÇÃO ABAIXADORA DE TENSÃO EM
UMA EDIFICAÇÃO COMERCIAL**

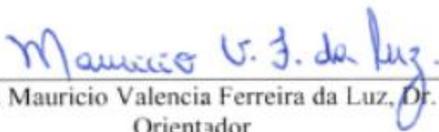
Este Trabalho foi julgado adequado para obtenção do Título de Bacharel
em Engenharia Elétrica e aprovado em sua forma final pela Banca
Examinadora

Florianópolis, 28 de Fevereiro de 2018.

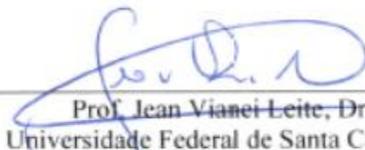


Prof. Renato Lucas Pacheco, Dr.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:



Prof. Mauricio Valencia Ferreira da Luz, Dr.
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina



Prof. Jean Vianei Leite, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina



Prof. Cristhian Marcelo Becker Cares, M.Sc.
Universidad de Santiago de Chile

Aos meus pais, aos meus avós e a minha irmã.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me dar saúde e sabedoria durante toda a minha caminhada.

Aos meus pais Eraldo e Rosilda por todo o esforço e dedicação desde a minha infância fazendo tudo que podiam para me proporcionar uma boa educação e um lar cheio de amor, por terem abdicado muitas vezes dos seus próprios sonhos para que pudessem realizar os meus, pelo exemplo de conduta, por me ensinaram o verdadeiro valor e o significado da vida, pelo apoio emocional nas horas difíceis, pelo suporte financeiro durante toda a minha vida e, sobretudo durante a graduação permitindo que eu realizasse o sonho de me tornar engenheiro.

Aos meus avós Osvaldo e Norma que sempre me incentivaram e me fizeram sonhar, acreditar e amar.

À minha irmã Marina pelo exemplo de persistência, dedicação e sucesso.

A todos os meus e amigos e familiares que participaram de alguma forma dessa construção. Sem palavras para agradecer, serei eternamente grato, amo vocês.

Ao professor Mauricio Valencia Ferreira da Luz pela confiança, dedicação, sugestões, correções e principalmente pela orientação deste trabalho.

Ao professor Denizar Cruz Martins e ao engenheiro Walbermark Marques dos Santos pela oportunidade, confiança e contribuição na minha formação como engenheiro dentro do INEP.

Aos professores com quem convivi nestes seis anos, vocês foram essenciais na minha formação.

Aos membros da banca pelas contribuições e correções, as quais enriquecerão este trabalho.

Aos engenheiros Ricardo Savas Fuhrmeister e Paulo Renato Corrêa Pinto pela oportunidade de estágio na área de projetos elétricos a qual teve uma enorme contribuição na minha formação profissional. Agradeço também por me ensinarem e compartilharem comigo o conhecimento de mais de 25 anos de experiência com a maior dedicação possível. Vocês foram responsáveis por me proporcionar um ambiente de aprendizado diferenciado e de elevada qualidade. Agradeço também por tornar este trabalho uma realidade e pela indicação profissional.

À Marcela Pereira Geller, responsável por despertar em mim as oportunidades do mundo da engenharia. Pela paciência, carinho e dedicação durante grande parte da minha graduação.

À Gabriela Winter Colla por todo o apoio, suporte e incentivo durante a confecção desse trabalho.

Aos colegas João Victor Manke e Thiago Antônio Pereira pelo raciocínio diferenciado e esforço incansável na confecção de trabalhos e no esclarecimento de dúvidas. Vocês foram fundamentais para que meu sonho se tornasse realidade.

Aos colegas de graduação pelos seis anos de convivência, parceria e amizade. Sucesso a todos e obrigado por compartilharem comigo esse momento.

Por fim, agradeço ao povo brasileiro, que com seu trabalho e pagamento de impostos, permitiu que eu estudasse numa instituição de ensino pública e de qualidade.

“Nada é impossível para aquele que persiste”

(Alexandre o Grande)

RESUMO

As subestações de energia elétrica abaixadoras são as que atendem os consumidores que precisam reduzir a tensão de fornecimento. Este trabalho trata do projeto de um sistema de aterramento para uma subestação abaixadora de tensão em uma edificação comercial. O sistema de aterramento ficou sendo composto por uma malha de aterramento de dimensões 20 m por 20 m. O comprimento total de condutores de cobre de seção de 95 mm^2 foi de 656 m. Além dos condutores horizontais, a malha contém mais 9 hastes de cobre de $\frac{3}{4}$ " de diâmetro e 3 m de comprimento dispostas a 12 m entre si. A resistência da malha de terra final ficou no valor de $7,86 \Omega$, abaixo de 10Ω que é o valor recomendado por norma para subestações de classe 15 a 38 kV. Assim, considera-se que o projeto atendeu todos os requisitos das normas de aterramento e que os objetivos propostos neste trabalho foram atingidos.

Palavras-chave: subestação abaixadora de energia elétrica, sistema de aterramento, resistência de malha de terra.

ABSTRACT

The step-down power substations are those that serve consumers who need to reduce the supply voltage. This work deals with the design of a grounding system for a step-down power substation for a commercial building. The grounding system was composed of a grounding mesh of dimensions 20 m by 20 m. The total length of copper conductor of section 95 mm^2 was 656 m. In addition to the horizontal conductors, the mesh contains 9 copper rods with $\frac{3}{4}$ " of diameter, 3m of length and separated by 12 meters. The final grounding resistance was 7.86Ω , below 10Ω which is the recommended value for class 15 to 38 kV substations. Thus, it is considered that the project met all the requirements of grounding standards and that the objectives proposed in this work were achieved.

Keywords: step-down power substations, grounding system, grounding resistance.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Seção mínima do condutor

Tabela 2 – Coeficiente A

Tabela 3 – Coeficiente B

Tabela 4 – Carga/Demanda

Tabela 5 – Parâmetros para o projeto da malha de aterramento

Tabela 6 – Dimensionamento da malha de aterramento

Tabela 7 – Resultados do projeto da malha de aterramento

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Estrutura básica de um Sistema Elétrico de Potência - SEP

Figura 2 – Esquema básico de entrada de serviço de uma unidade consumidora de energia elétrica

Figura 3 – Representação física, em corte, de um eletroduto embutido em alvenaria e de condutores elétricos

Figura 4 – Representação de uma subestação abrigada

Figura 5 – Representação de uma subestação ao tempo

Figura 6 – Representação de uma subestação de manobra

Figura 7 – Representação de uma subestação elevadora

Figura 8 – Representação de uma subestação abaixadora

Figura 9 – Representação de uma subestação de baixa tensão

Figura 10 – Representação de uma subestação de média tensão

Figura 11 – Representação de uma subestação de alta tensão

Figura 12 – Representação de uma subestação de extra-alta tensão

Figura 13 – Geometria da malha de terra

Figura 14 – Conexão exotérmica tipo derivação (T)

Figura 15 – Conexão exotérmica em X

Figura 16 – Indivíduo sob tensão de toque

Figura 17 – Planta baixa da subestação

Figura 18 – Corte A-A' da subestação

Figura 19 – Corte B-B' da subestação

Figura 20 – Diagrama unifilar da subestação

Figura 21 – Barra equipotencial da subestação

Figura 22 – Malha de terra no terreno do empreendimento

Figura 23 – Malha de terra no terreno do empreendimento

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A - Ampere

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica

BEP - Barramento de equipotencialização

CELESC - Centrais Elétricas de Santa Catarina

cm - Centímetro

C_m - Comprimento da malha de terra

CTC - Centro Tecnológico

D - Distância entre os eletrodos horizontais na direção considerada

D – Espaçamento médio entre os condutores

D_c - Distância entre os cabos correspondentes ao comprimento da malha de terra

D_{ca} – Diâmetro do condutor

D_h - Representa o diâmetro equivalente da haste de terra

D_l - Distância entre os cabos correspondentes à largura da malha de terra

E_c - Potencial elétrico da cerca

E_m - Tensão máxima de toque

E_{pa} - Tensão de passo

E_{per} - Tensão de passo na periferia da malha

E_{te} - Tensão de toque existente

H - Profundidade da malha de terra

I_a - Corrente mínima de acionamento do relé de terra

I_{cft} - Corrente de curto circuito fase-terra máxima

I_{ch} - Corrente máxima de choque

IEC - International Electrotechnical Commission

IEEE - Institute of Electrical and Electronics Engineers

I_{pmc} - Corrente de choque devido à tensão de passo com material de superfície na periferia da malha

I_{pms} - Corrente de choque devido à tensão de passo sem material de superfície na periferia da malha

I_{mmc} - Corrente de choque devido à tensão de toque com material de superfície na periferia da malha

I_{ms} - Corrente de choque devido à tensão de toque sem material de superfície na periferia da malha

K - Valores unitários das sessões mínimas dos condutores em função do tipo de junção

K_1 - Coeficiente de ajuste

K_2 - Coeficiente de ajuste

K_3 - Coeficiente de ajuste

K_h - Coeficiente de redução da resistência de um eletrodo vertical

K_{ij} - Coeficiente de irregularidade correspondente aos condutores de junção

K_{ip} - Coeficiente de irregularidade correspondente aos condutores principais

K_{mj} - Coeficiente de malha correspondente aos condutores de junção

K_{mp} - Coeficiente de malha correspondente aos condutores principais

K_{sj} - Coeficiente de superfície correspondente aos condutores de junção

K_{sp} - Coeficiente de superfície correspondente aos condutores principais

kV - Quilovolt

kVA - Quilovolt Ampere

kW – Quilowatt

L_c - Comprimento mínimo do condutor da malha

L_{cm} - Comprimento dos condutores da malha de terra

L_h - Comprimento da haste de terra

L_h - Comprimento de um eletrodo vertical

L_{th} - Comprimento de uma haste

L_m - Largura da malha de terra

ln - Logaritmo neperiano

L_{th} - Comprimento total das hastes utilizadas

m - Metro

mA - Mili Ampere

MVA - Megavolt Ampere

N - Número de condutores

NBR - Norma brasileira

N_{cj} - Condutores de junção

N_{cp} - Condutores principais

N_h - Número de hastes

N_h - Número de hastes de terra

N_h - Quantidade total de eletrodos (hastes verticais)

NT - Norma técnica

ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico

p - Resistividade do solo

p_a - Resistividade aparente do solo

p_s - Resistividade da camada superior da malha

QGBT - Quadro geral de baixa tensão

R - Raio do círculo que equivale à área destinada à malha de terra

R_{ch} - Resistência do corpo humano

R_{el} - Resistência de aterramento do eletrodo vertical

R_{mc} - Resistência da malha de terra

R_{mu} - Resistência mútua dos cabos e eletrodos verticais

R_{ne} - Resistência de aterramento do conjunto de eletrodos verticais

R_m - Resistência total da malha de terra

S - Área da malha de terra

S_c - Seção do condutor

SEP - Sistema Elétrico de Potência Brasileiro

SF₆ - Hexafluoreto de enxofre

SIN - Sistema Interligado Nacional

T_f - Tempo máximo de permanência da corrente

UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina

V - Volt

X - Distância da periferia da malha de terra ao ponto da cerca tocado pelo indivíduo

Ω - Ohm

Ω -m - Ohm-metro

SUMÁRIO

	Página
Capítulo 1 – Introdução	01
Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica	05
2.1 – Tipos de subestações de energia elétrica:	05
2.2 – Sistemas de aterramento	19
2.2.1 – Definição e objetivos do sistema de aterramento	19
2.2.2 – Componentes do sistema de aterramento	22
2.2.3 – Proteção contra contatos diretos	38
CAPÍTULO 3 – RESULTADOS	40
CAPÍTULO 4 – CONCLUSÕES	52
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54
APÊNDICE I	57

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

O acesso da população aos serviços de infraestrutura como saneamento básico, transporte, telecomunicação e energia, são algumas das variáveis que definem um país em nível de desenvolvimento. A energia é considerada como fator determinante para o crescimento econômico e social, visto que ela fornece apoio às ações e as atividades humanas (ANEEL, 2008).

Além do crescimento e do desenvolvimento econômico, outra variável que influencia o consumo de energia elétrica é o aumento em números da população. Atrelado, portanto, ao crescimento da população brasileira, o setor elétrico está em permanente evolução, fruto de mudanças em aspectos legais, normativos e do avanço tecnológico. Considera-se um desafio diário para este setor levar energia elétrica a mais de sessenta e um milhões de consumidores distribuídos em um território de dimensões continentais como é o Brasil (ANEEL, 2008).

Diante deste cenário, destaca-se nos últimos anos como aliada do aprimoramento tecnológico dos processos e da própria sociedade, a energia elétrica, que cada vez mais tem se tornado um recurso indispensável no dia-dia das pessoas, tanto em grandes centros empresariais, industriais e comerciais, como

também em pequenos e médios consumidores residenciais que necessitam desta forma de energia para desempenhar atividades cotidianas (PENTEADO, 2011).

O fluxo de energia necessário para suprir estas necessidades provém de unidades geradoras de energia e redes físicas que as conectam com unidades consumidoras. Esta rede, no Brasil, integra o chamado de Sistema Interligado Nacional – SIN. Controlado pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS, e sob a fiscalização e regulação da Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, o SIN coordena e integra todo o sistema de produção e transmissão de energia elétrica do Brasil, englobando as cinco regiões brasileiras, atendidas graças aos mais de 100 mil quilômetros de linha de transmissão e diversas subestações ao redor do país (BRASIL, 2004).

Dentre os componentes integrantes do SIN, temos as chamadas subestações, partes do sistema de potência, que compreendem os dispositivos de: manobra, controle, proteção, transformação e demais equipamentos condutores e acessórios (ABNT, 2005).

Integram, portanto, a Rede Básica do Sistema Interligado Nacional as Instalações de Transmissão, definidas conforme inciso II do artigo 2º da Resolução Normativa nº 67 da Agência de Energia Elétrica (2004), que atendam aos seguintes critérios:

I - Linhas de transmissão, barramentos, transformadores de potência e equipamentos de subestação em tensão igual ou superior a 230 kV; e

II - Transformadores de potência com tensão primária igual ou superior a 230 kV e tensões secundária e terciária inferiores a 230 kV, bem como as respectivas conexões e demais equipamentos.

Os dispositivos de transformação, subestações transformadoras de energia elétrica, são divididos, entre diversas outras classificações, conforme sua função. Para este critério tem-se como representantes as chamadas subestações elevadoras, abaixadoras, de distribuição, de manobra e conversoras.

As subestações abaixadoras por sua vez, atendem os consumidores que precisam reduzir a tensão de fornecimento, no trabalho em questão, a média tensão, compreendida em valores entre 1 kV até 36,2 kV (ABNT, 2005).

Os objetivos deste Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) são:

Objetivo geral: projetar um sistema de aterramento para uma subestação abaixadora de tensão em uma edificação comercial.

Objetivos específicos:

- a) Realizar uma revisão bibliográfica sobre os tipos de subestações de energia elétrica;
- b) Detalhar o procedimento de cálculo da malha de terra de uma subestação;
- c) Desenvolver uma rotina em MATLAB que calcule a malha de terra de uma subestação;
- d) Redigir o texto do TCC.

O texto está dividido em capítulos, sendo este Capítulo o de introdução. O Capítulo 2 apresenta os tipos de subestações e o procedimento de cálculo da malha de terra. O Capítulo 3 apresenta os resultados da malha de aterramento projetada neste TCC. O Capítulo 4 apresenta as conclusões e o Apêndice I mostra o código em MATLAB desenvolvido no TCC.

CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta a revisão bibliográfica sobre os tipos de subestações e sobre o cálculo da malha de terra.

2.1 – Tipos de subestações de energia elétrica:

O uso da energia elétrica tem se disseminado de forma muito rápida ao longo dos anos pelo mundo, e, isso se deve às descobertas e inovações nos seus módulos e processos de produção, conversão e transporte.

Quando se fala em sistema elétrico, está se fazendo referência ao Sistema Elétrico de Potência – SEP. O SEP atualmente é um conjunto de instalações, equipamentos e procedimentos, que operando de maneira coordenada são destinados à geração, transmissão de energia elétrica, distribuição e medição, com resultado final o fornecimento de energia aos consumidores, instante a instante dentro de padrões de confiabilidade, disponibilidade e segurança (BRASIL, 1978).

O processo todo inicia com a geração de energia, unidades geradoras, que em domínio de instituições públicas ou privadas, convertem força mecânica em energia elétrica e a disponibiliza

para o restante das estruturas do Sistema Elétrico de Potência Brasileiro – SEP (PENTEADO, 2011).

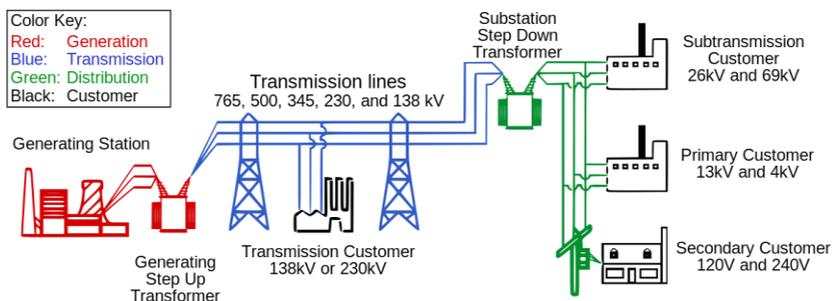
Depois de gerada, a energia elétrica é direcionada através de unidades transportadoras de energia, que dentro do SEP compõem o módulo de transmissão, através de linhas de alta tensão, aos componentes da Rede Básica com tensão superior a 230 kV. Os níveis de tensão nesta etapa são os mais altos, e isto reduz as perdas de energia durante o seu percurso de transmissão. Seguindo seu percurso, a energia passa então por transformadores, situados na Rede Básica de Fronteira, que são os responsáveis por reduzir a tensão da rede para valores inferiores a 230 kV(ANEEL, 2000).

Este setor, então, conecta a Rede Básica às concessionárias de energia, também chamadas de Instalações de Distribuição, que tem como responsabilidade, entregar a energia aos consumidores finais do sistema em níveis de tensão de subtransmissão com valores entre 13,8 kV e 34,5 kV para distribuição primária (média e alta tensão) e 380/220 e 220/127 V, em redes trifásicas; 440/220 e 254/127 V, em redes monofásicas para distribuição secundária (baixa tensão). Destas subestações originam-se alguns alimentadores que se interligam aos transformadores de distribuição da concessionária ou a de consumidores em tensão primária (PENTEADO, 2011).

Define-se Sistema de distribuição primário aquele que alimenta unidades consumidoras cuja carga instalada é superior a 75 kW (ANEEL, 2000).

Figura 1 representa todas as unidades que compõem o SEP, em vermelho a unidade de geração, em azul a unidade de transmissão, em verde a representação da distribuição e ao final em preto os consumidores finais, de acordo com a sua necessidade, divididos em: consumidores primários, secundários e sub-transmissão consumidora.

Figura 1 – Estrutura básica de um Sistema Elétrico de Potência - SEP.



FONTE: Leão (2009)

Percorrido este caminho, a energia é disponibilizada pela unidade distribuidora para a unidade consumidora. Esta situação é a chamada entrada de energia, composta por ponto de derivação ou ponto de entrega; ramal de entrada; poste;

eletrodutos; condutores; disjuntores; elementos de proteção; aterramento e outros acessórios (CELESC, 2016).

Ainda segundo Norma nº 321.0002 CELESC (2016), NBR IEC nº 50 ABNT (1997) e outros, definem-se os seguintes elementos que compõe o padrão de entrada de energia:

- Ponto de derivação: ponto final da rede elétrica antes da conexão entre distribuidor e consumidor;
- Ponto de entrega: ponto de conexão da distribuidora com as instalações elétricas da unidade consumidora, caracterizando-se como limite de responsabilidade do fornecedor;
- Ramal de entrada: conjunto de condutores e acessórios, inclusive conectores, instalados a partir do ponto de entrega de energia, até a caixa para medição e proteção, cuja instalação é de responsabilidade e propriedade do consumidor;
- Poste: estrutura cilíndrica, de madeira, cimento, ferro ou aço que sustenta as linhas de transmissão elétrica.
- Condutores: condutor de energia é o meio de transmissão de potência desde a sua origem denominado ponto fonte ou alimentação até um terminal consumidor (MAMEDE FILHO, 2005). Para atender aos padrões CELESC (2016), os condutores

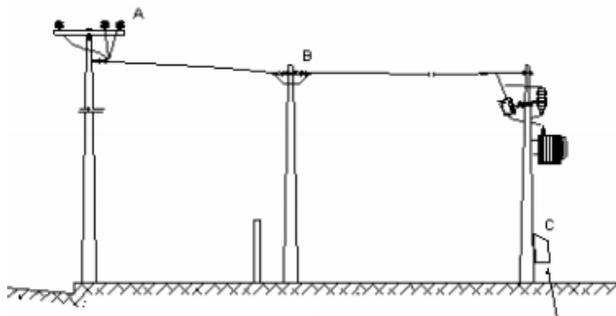
deverão ser de cobre isolados e com capa protetora ST2 para 0,6/1 kV, ou em PVC 70°C (quando não utilizado no kit postinho) e apresentar as seguintes características: não serem emendados nos ramais de entrada e saída; não conter nenhum dispositivo causador de interrupções no neutro; serem corretamente identificados por fase e cor de seu isolamento, sendo: azul claro para neutro; preto, branco/cinza e vermelho para cada uma das fases.

- Eletrodutos: elementos de linha elétrica de seção circular ou não, destinado a abrigar os condutores elétricos, com o propósito de protegê-los, abrigá-los e manter organizada a fiação. Devem ser suficientemente fechados em toda sua extensão, de modo que os condutores só possam ser instalados e/ou retirados por puxamento e não por inserção lateral.

Figura 2 mostra a representação do ponto de derivação da rede (A), ramal de ligação (AB), ponto de entrega de energia (B), ramal de entrada (BC), postes (D), além da rede elétrica da concessionária, unidade consumidora.

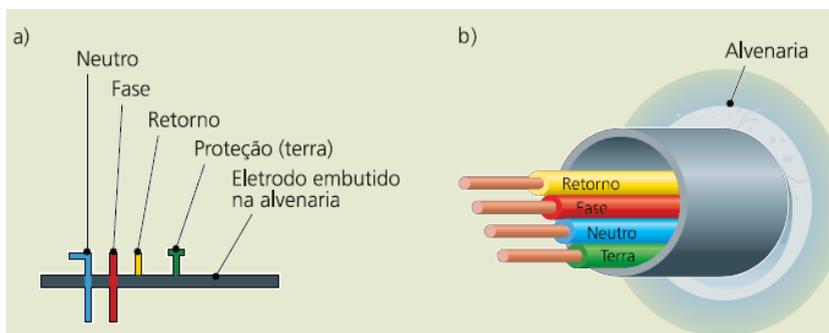
Figura 3 apresenta a representação dos condutores da rede elétrica embutidos em um eletroduto de alvenaria.

Figura 2 – Esquema básico de entrada de serviço de uma unidade consumidora de energia elétrica.



FONTE: COELBA (2014)

Figura 3 – Representação física, em corte, de um eletroduto embutido em alvenaria e de condutores elétricos.



FONTE: <http://eletercidade.blogspot.com/2012/09/padrao-de-cores-paracondutores.html#ixzz4zITqjgj>

Como elementos fundamentais e imprescindíveis dentro do Sistema Elétrico de Potência – SEP encontram-se as subestações. Situadas nos nós ou fronteiras do sistema, como

pontos de convergência, entrada e saída, elas são responsáveis por fazer a interface entre subsistemas. Compreendendo maquinário específico, instaladas em ambientes fechados ou ao ar livre, as subestações são destinadas à transformação de tensão, distribuição de energia, seccionamento de linhas de transmissão e em alguns casos a conversão de corrente e conversão de frequência.

Segundo a Norma Brasileira nº 14039 (ABNT, 2005) tem-se como atributos gerais das subestações que: deverão ter características de construção definitiva, pertencendo ou não a outras edificações; ser de materiais incombustíveis; possuir adequadas dimensões que permitam acesso facilitado às pessoas e equipamentos envolvidos com a operação e com a manutenção; possuir ventilação natural e/ou artificial; iluminação de fontes naturais e/ou artificiais compatíveis com suas demandas operacionais [Norma Brasileira nº 5413 (ABNT, 1992)]; devem atender a requisitos de segurança; serem devidamente protegidas de danos por causas externas; abrigar em seu interior um esquema geral da instalação; estarem devidamente sinalizadas com placas de perigo.

As subestações podem ser categorizadas de acordo com:

- Quanto ao tipo de instalação:
 - Abrigadas;

Figura 4 representa uma subestação, a qual a instalação é do tipo abrigada, o que significa que a mesma é parte integrante da construção principal.

- Quanto à sua posição em relação ao solo:
 - instaladas na superfície;
 - abaixo da superfície (subterrânea);
 - acima da superfície do solo (aérea).

Figura 4 – Representação de uma subestação abrigada.

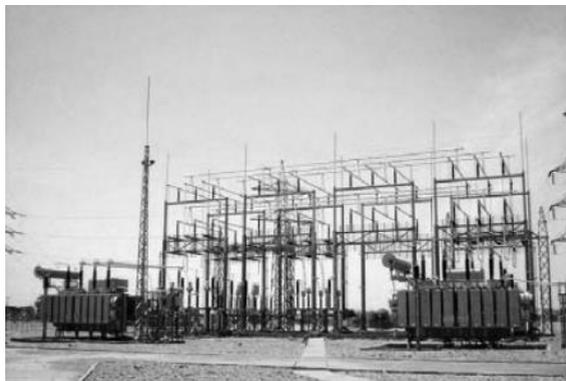


FONTE: Muzy (2012).

- Ao tempo:

Figura 5 mostra uma subestação onde a instalação é do tipo ao tempo, o que significa que a mesma não pertence à construção principal.

Figura 5 – Representação de uma subestação ao tempo.



FONTE: Muzy (2012).

- Quanto à relação entre os níveis de tensão de entrada e saída:
 - Subestação de chaveamento, manobra e seccionamento representada pela Figura 6, permitem remanejar partes do sistema, inserindo ou retirando-as de serviço em um mesmo nível de tensão, ligar ou desligar circuitos elétricos ou, ainda, prover meios de proteção para esses circuitos.
 - Subestação transformadora: instalações destinadas a transformar qualquer das grandezas da energia elétrica. Podem ser divididas ainda em subestações transformadoras elevadoras e abaixadoras. Figura 7 mostra uma subestação elevadora onde a tensão de saída é maior que a tensão de entrada e Figura 8 apresenta uma subestação abaixadora, onde a tensão de saída é menor que a tensão de entrada. As subestações elevadoras estão

geralmente localizadas próximo às unidades geradoras, recebendo a energia das mesmas e elevando a tensão de geração para tensão de transmissão.

Figura 6 – Representação de uma subestação de manobra.



FONTE: Muzy (2012).

Figura 7 – Representação de uma subestação elevadora.



FONTE: Muzy (2012).

Figura 8 – Representação de uma subestação abaixadora.



FONTE: Muzy (2012).

- Quanto à função desempenhada no setor elétrico:
 - Subestação de distribuição: responsáveis por diminuir a tensão para o nível de distribuição primária (13,8 kV – 34,5 kV). Podem pertencer às concessionárias ou a grandes consumidores;
 - Subestação de regulação de tensão: realizam a manutenção da tensão de saída de um circuito elétrico, mantendo-a constante independente da tensão de entrada. Isso é possível através do uso de equipamentos de compensação tais como reatores, capacitores, compensadores estáticos, e outros;
 - Subestação conversora: é a que possui capacidade de modificar as características originais da energia elétrica, destinam-se a modificar a frequência ou a corrente alternada para contínua e vice-versa;

- Subestação interligadora: responsável por receber energia de duas ou mais fontes e transportá-la para grandes consumidores;

- Subestação de transmissão: recebe e transmite energia para os consumidores nas tensões de transmissão e/ou subtransmissão.

- Quanto ao tipo construtivo de equipamentos:

- Convencionais: instaladas a céu aberto e têm o ar como meio isolante;

- Blindadas: compactadas em ambiente fechados e isoladas com gás hexafluoreto de enxofre (SF_6), este modelo de subestação ocupa espaço reduzido e é capaz de atender uma demanda de até 500 kV. Além disso, há baixa manutenção e a operação é segura (inteiramente contidas em invólucros metálicos), porém, para a manutenção exige a utilização de equipamentos e mão de obra treinada em função do SF_6 .

- Quanto ao nível de tensão:

- Subestação de baixa tensão, representada pela Figura 9, onde a tensão nominal é de até 1 kV.

- Subestação de média tensão, representada pela Figura 10, onde as tensões nominais estão entre 1 kV e 34,5 kV. Nesta classificação encontram-se as tensões típicas de: 6,6 kV, 13,8 kV, 23 kV e 34,5 kV.

Figura 9 – Representação de uma subestação de baixa tensão.



FONTE: Muzy (2012).

Figura 10 – Representação de uma subestação de média tensão.



FONTE: Muzy (2012).

- Subestação de alta tensão, representada na Figura 11, comportam tensões dentro do intervalo de 34,5 kV e 230 kV.

Nesta classificação encontram-se as tensões típicas de: 69 kV, 138 kV e 230 kV.

Figura 11 – Representação de uma subestação de alta tensão.



FONTE: Muzy (2012).

- Subestação de extra-alta tensão: onde as tensões encontram-se em níveis maiores que 230 kV. Figura 12 mostra um exemplo deste tipo de subestação. Nesta classificação encontram-se as tensões típicas de: 345 kV; 440 kV; 500 kV; 750 kV.

Figura 12 – Representação de uma subestação de extra-alta tensão.



FONTE: Muzy (2012).

- Quanto à modalidade de comando:
 - Com operador: utilizadas nas instalações de maior porte e necessitam de uma mão de obra com alto nível de treinamento;
 - Semiautomatizadas: possuem rede de computadores que controlam as ações do operador impedindo as ações indevidas;
 - Automatizadas: supervisionadas à distância por meio de equipamentos.

2.2 – Sistemas de aterramento:

2.2.1 – Definição e objetivos do sistema de aterramento:

As instalações elétricas e o sistema de energia de maneira geral, contam com uma série de estruturas responsáveis pelo seu

correto funcionamento. Para que este sistema e suas respectivas instalações operem com segurança e desempenho satisfatórios, é importante que o fator aterramento seja levado em consideração no momento do planejamento e desenvolvimento dos projetos elétricos, nos quais, com base em dados disponíveis e parâmetros pré-fixados, sejam consideradas todas as possíveis condições a que o sistema possa ser submetido. O aterramento elétrico quando corretamente dimensionado, é, portanto, quesito influente na segurança e bom funcionamento das instalações elétricas às quais ele pertence, dando às mesmas: qualidade continuidade e segurança para os serviços (MAMEDE FILHO, 2002).

Conceitualmente, segundo Norma Brasileira nº 15751 (ABNT, 2009), define-se por aterramento a ligação feita intencionalmente de parte eletricamente condutiva da instalação elétrica a terra, através de condutores elétricos. O ato de aterrar, ligar a terra, juntamente com os processos e componentes envolvidos constituem o chamado Sistema de Aterramento, mais especificamente, conjunto de todos os condutores e eletrodos, interligados ou não, assim como suas partes metálicas que atuam diretamente na função de aterramento (cabos, para – raios, torres, pórticos, capas metálicas, tubulações e outros).

O objetivo principal do sistema de aterramento está diretamente relacionado com a proteção das instalações elétricas

contra descargas atmosféricas, proteção dos indivíduos contra contato acidental com as partes metálicas energizada das instalações e uniformização do potencial em toda a área do projeto, protegendo-os de acidentes e lesões perigosas que possam surgir durante uma falta no circuito fase-terra. Além destes objetivos principais, os sistemas de aterramento visam obter as menores resistências nas correntes de falta, manter os potenciais das correntes de falta dentro dos limites de segurança e tornar os equipamentos de proteção sensíveis às falhas e que sejam capazes de isolá-las rapidamente (MAMEDE FILHO, 2002).

A escolha dos componentes do sistema de aterramento deve garantir que o valor da resistência do sistema não se modifique ao longo do tempo, que sejam resistentes às modificações térmicas, mecânicas e elétricas e resistentes às modificações dos influentes externos (ABNT, 2005).

Define-se por aterramento, portanto, a ligação a terra, de todas as partes metálicas não energizadas, do neutro da rede distribuidora e do neutro da instalação da unidade consumidora. Esta ligação acontece por meio dos eletrodos de aterramento que asseguram o contato elétrico com o solo e assim dispersando a corrente de defeito, de retorno ou de descarga atmosférica na terra.

2.2.2 – Componentes do sistema de aterramento:

O sistema de aterramento é composto, portanto, pela caixa de inspeção e pela malha de aterramento, (ABNT, 2005).

Caixa de inspeção é o item que se destina a inspecionar a malha de aterramento e a permitir o manuseio dos elementos acondicionados nela (ABNT 2015).

Segundo Mamede Filho (2002), define-se por **malha de aterramento** o conjunto de hastes (eletrodos) e condutores de aterramento ligados no solo, as conexões e os condutores de proteção. Deve-se considerar o planejamento e a construção da malha de terra no terreno onde se encontra e está implantada a subestação garantindo a uniformização do potencial na área em questão.

Todos os valores obtidos a partir deste momento serão fundamentais para o planejamento do sistema de aterramento que envolve o cálculo da malha de terra.

- Componentes da malha de terra:

- Hastes (eletrodos de terra): Chamados de eletrodos verticais, as hastes de aterramento são elementos condutores metálicos ou um conjunto deles que ficam em contato direto com a terra com o objetivo de garantir a ligação com a mesma. Podem ser constituídas de aço galvanizado ou aço acobreado. As hastes de aço galvanizado, após um determinado tempo de

uso sofrem danos de origem corrosiva que tem como maior consequência o aumento da resistência do dispositivo com a terra, por isso que se justifica o seu uso restrito. Por outro lado quando constituídas de aço acobreado, as hastes possuem uma determinada proteção contra a corrosão o que garante que suas características se mantenham ao longo do tempo (MAMEDE FILHO, 2002).

- Condutores de aterramento ou eletrodos de aterramento: são elementos que tem por objetivo realizar a ligação de dois ou mais eletrodos ou a ligação de um equipamento ao sistema de aterramento.

Além destas recomendações, segundo normatização que rege os sistemas de aterramento, os valores mínimos das sessões devem ser de acordo com o material que o constitui, sendo de 50 mm² para hastes de cobre e 38mm² para hastes de aço (ABNT, 2009). Ainda, dependendo da relação da grandeza de defeito fase-terra, a sessão dos condutores poderá ser superior aos valores já mencionados (MAMEDE FILHO, 2002).

A fim de utilizar condutores devidamente dimensionados para cada malha de aterramento, bem como o material que o constituirá, deverá ser considerado como critério a durabilidade do sistema durante o tempo de uso da subestação que comporá. Para atender a isso, os condutores deverão ser suficientemente resistentes e robustos para resistir aos eventos mecânicos,

eletromagnéticos, à corrosão e ao aquecimento provocado pela corrente de falta; ter alta condutividade a fim de não influenciar o aumento da resistência do aterramento e das tensões locais (IEEE, 2015).

Os cálculos apresentados a seguir foram retirados do livro (MAMEDE FILHO, 2002).

A seção mínima do condutor será determinada a partir da corrente de curto-circuito e do seu tempo de duração em cada tipo de junção dos condutores da malha. Tabela 1 apresenta a seção mínima do condutor em função do tipo de junção.

Tabela 1 – Seção mínima do condutor

Tempo (s)	Cabo simples – solda exotérmica (K)	Cabos com juntas soldadas (K)	Cabos com juntas rebitadas (K)
30	0,020268	0,025335	0,032935
4	0,007093	0,010134	0,012160
1	0,003546	0,005067	0,006080
0,5	0,002533	0,003293	0,004306

Fonte: Mamede Filho (2002).

A seção mínima do condutor da malha é então calculada por:

$$S_c = K \times I_{cfm} \quad (1)$$

onde:

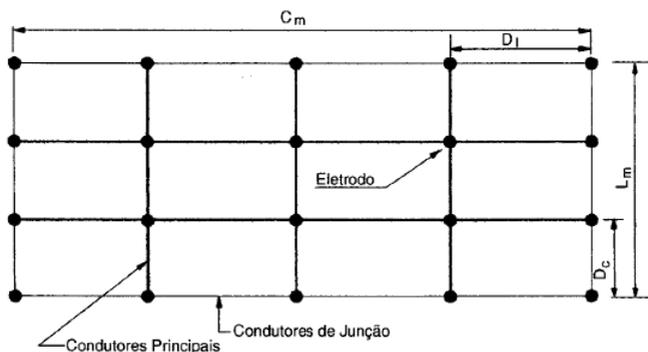
S_c - representa a seção do condutor;

K - representa os valores unitários das sessões mínimas dos condutores em função do tipo de junção;

I_{cfm} - representa a corrente de curto circuito fase-terra máxima.

Figura 13 mostra a geometria da malha de terra e seus componentes, condutores principais e condutores de junção. Define-se por condutor principal aquele que é instalado na direção que corresponde à largura da malha de terra; e por condutor de junção aquele que é instalado na direção que corresponde ao comprimento da malha de terra (MAMEDE FILHO, 2002).

Figura 13 – Geometria da malha de terra.



FONTE: Mamede Filho (2002).

Conhecer a quantidade de condutores principais e de junção é de uma importância no momento do planejamento da

malha de terra, pois serão eles que farão a estruturação da mesma (MAMEDE FILHO, 2002).

Para determinar as quantidades necessárias dos condutores principais e dos condutores de junção utilizam-se as seguintes expressões:

Condutores principais:

$$N_{cp} = \frac{C_m}{D_l} + 1 \quad (2)$$

onde:

C_m - representa o comprimento da malha de terra, em m;

D_l - representa a distância entre os cabos correspondentes à largura da malha de terra, em m.

Condutores de junção:

$$N_{cj} = \frac{L_m}{D_c} + 1 \quad (3)$$

onde:

L_m - representa a largura da malha de terra, em m;

D_c - representa a distância entre os cabos correspondentes ao comprimento da malha de terra, em m.

OBS: Os valores de D_l e D_c podem variar entre 5% a 10% do valor do comprimento e da largura da malha, respectivamente.

O comprimento dos condutores da malha de aterramento também precisa ser dimensionado e é calculado por:

$$L_{cm} = 1,05 \times [(C_m \times N_{cj}) + (L_m \times N_{cp})] \quad (4)$$

O cálculo analítico da malha de terra usa alguns coeficientes de ajuste. São eles:

- a) Coeficiente de malha (K_m): corrige a influência da profundidade da malha de terra (H), do número de condutores principais e de junção e dos espaçamentos entre eles.

$$K_{mp} = \frac{1}{2 \times \pi} \times \ln \left[\frac{Dl^2}{4 \times \pi \times (N_{cp}-1) \times H \times D_{ca}} \right] \quad (5)$$

$$K_{mj} = \frac{1}{2 \times \pi} \times \ln \left[\frac{Dc^2}{4 \times \pi \times (N_{cj}-1) \times H \times D_{ca}} \right] \quad (6)$$

onde:

\ln - representa o logaritmo neperiano;

D - espaçamento médio entre os condutores;

H - profundidade da malha, em m;

N_{cp} - número de condutores principais;

N_{cj} - número de condutores de junção;

D_{ca} - diâmetro do condutor da malha.

- b) Coeficiente de superfície (K_s): corrige a influência da profundidade da malha de terra (H), do diâmetro do condutor (D_{ca}) e do espaçamento entre os condutores

Dado pelas equações:

$$K_{sp} = \frac{1}{\pi} \times \left\{ \frac{1}{2 \times H} + \frac{1}{Dl+H} + \frac{\ln [0,655 \times (N_{cp}-1) - 0,328]}{Dl^2} \right\} \quad (7)$$

$$K_{sj} = \frac{1}{\pi} \times \left\{ \frac{1}{2 \times H} + \frac{1}{Dc+H} + \frac{\ln [0,655 \times (N_{cj}-1) - 0,328]}{Dc^2} \right\} \quad (8)$$

c) Coeficiente de irregularidade (K_i): corrige a não uniformidade do fluxo da corrente da malha para a terra. Dado pelas equações:

$$K_{ip} = 0,65 + 0,172 \times N_{cp} \quad (9)$$

$$K_{ij} = 0,65 + 0,172 \times N_{cj} \quad (10)$$

O comprimento mínimo do condutor da malha é outro fator importante que deverá ser dimensionado a fim de contribuir com o bom funcionamento de todo o sistema de aterramento.

$$L_c = \frac{K_m \times K_i \times p_a \times I_{cft} \times \sqrt{T_f}}{116 + 0,174 \times p_s} \quad (11)$$

onde:

p_a - representa a resistividade aparente do solo. Este valor pode ser medido usando o método de Wenner ou calculado usando o método de estratificação de camada (MAMEDE FILHO, 2002);

p_s - representa a resistividade da camada superior da malha (concreto ou brita);

I_{cft} - representa a corrente mínima de curto circuito fase-terra sem considerar a influência dos eletrodos de aterramento,

considerando o maior produto entre a multiplicação dos fatores K_m e K_i - numa determinada direção (principal ou de junção).

A seguinte condição precisa ser satisfeita: $L_{cm} \geq L_c$.

Na prática, quando a diferença entre os valores de L_{cm} e L_c for pequena, pode-se acrescentar ao L_{cm} o comprimento total das hastes verticais que serão utilizadas no projeto:

$$L_{cm} = 1,05 \times [(C_m \times N_{cj}) + (L_m \times N_{cp})] + (N_h \times L_h) \quad (12)$$

onde:

N_h - é a quantidade total de eletrodos (hastes verticais);

L_h - é o comprimento de um eletrodo vertical, em m.

Para dar continuidade na obtenção dos valores de todos os componentes do sistema de aterramento, seguem abaixo mais algumas dimensões que integram este sistema, sua definição e respectivas equações.

Tensão de passo (E_{pa}): definida em volts (V), como o maior valor que pode ser alcançado no nível da malha de terra, levando em consideração o tempo máximo de permanência da corrente ($T_f \leq 0,5$ s) e também a resistividade do material que compõe a superfície da malha (p_s).

$$E_{pa} = \frac{116 + 0,7 \times p_s}{\sqrt{T_f}} \quad (13)$$

Tensão de passo na periferia da malha (E_{per}): definida em volts (V), correspondente à diferença de potencial existente entre dois pontos distanciados de 1 m e localizados na periferia da malha de terra.

$$E_{per} = \frac{K_s \times K_i \times p_i \times I_{cft}}{L_{cm}} \quad (14)$$

A seguinte condição deve ser obedecida: $E_{pa} \geq E_{per}$.

Tensão máxima de toque (E_m): obtida em volts (V), essa variável representa o maior valor de tensão que pode ser alcançado na malha de terra, levando em consideração que o tempo máximo de permanência da corrente é igual à T_f ($T_f \leq 0,5$ s) e que a malha está coberta por material (concreto ou brita) de resistividade p_s . Nestas condições o operador estaria seguro ao tocar acidentalmente com qualquer parte do seu corpo as carcaças dos equipamentos que estiverem energizadas.

$$E_m = \frac{116+0,174 \times p_s}{\sqrt{T_f}} \quad (15)$$

Tensão de toque existente (E_{te}): dada em volts (V). A seguinte condição deve ser obedecida $E_{tm} \geq E_{te}$.

$$E_{te} = \frac{K_m \times K_i \times p_1 \times I_{cfit}}{L_{cm}} \quad (16)$$

Corrente máxima de choque (I_{ch}): dada em mA, é o maior valor de corrente suportável pelo corpo humano em um determinado tempo de permanência de contato (T_f).

$$I_{ch} = \frac{116}{\sqrt{T_f}} \quad (17)$$

Corrente de choque devido à tensão de passo sem material de superfície na periferia da malha (I_{pms}): dada em mA, deve obedecer a condição $I_{pms} \leq I_{ch}$.

$$I_{pms} = \frac{1000 \times E_{per}}{1000 + 6 \times p_l} \quad (18)$$

Corrente de choque devido à tensão de passo com material de superfície na periferia da malha (I_{pmc}): dada em mA, deve obedecer a condição $I_{pmc} \leq I_{ch}$.

$$I_{pmc} = \frac{1000 \times E_{per}}{1000 + 6 \times (p_l + p_s)} \quad (19)$$

Corrente de choque devido à tensão de toque sem material de superfície na periferia da malha (I_{tms}): dada em mA, deve obedecer a condição $I_{tms} \leq I_{ch}$.

$$I_{tms} = \frac{1000 \times E_{te}}{1000 + 1,5 \times p_l} \quad (20)$$

Corrente de choque devido à tensão de toque com material de superfície na periferia da malha (I_{tmc}): dada em mA, deve obedecer a condição $I_{tmc} \leq I_{ch}$.

$$I_{tmc} = \frac{1000 \times E_{te}}{1000 + 1,5 \times (p_l + p_s)} \quad (21)$$

Corrente mínima de acionamento do relé de terra (I_a): dada em mA e determinada por:

$$I_a = \frac{(R_{ch} + 1,5 \times p_s) \times 9 \times L_{cm}}{1000 \times K_m \times K_i \times p_l} \quad (22)$$

onde:

R_{ch} - representa a resistência do corpo humano em Ω .

Resistência da malha de terra (R_{mc}): representa em Ω o valor da resistência da malha de terra correspondente aos condutores horizontais, determinada por:

$$R_{mc} = \frac{p_a}{4 \times R} + \frac{p_a}{L_{cm}} \quad (23)$$

onde:

R é o raio do círculo que equivale à área destinada à malha de terra em m.

Os valores da resistência de malha de terra devem obedecer as seguintes regras:

$R_{mc} \leq 10 \Omega$ para subestações da classe 15 a 38 kV;

$R_{mc} \leq 5 \Omega$ para subestações da classe 69 kV e maiores.

Ainda assim, se os valores de R_{mc} não atenderem às condições acima, a malha de terra deve ser recalculada com alteração dos valores do comprimento dos condutores e outras dimensões, a fim de manter os valores de R_{mc} dentro da faixa estabelecida (MAMEDE FILHO, 2002).

Recomenda-se que o valor da resistência da malha de terra a fim de assegurar a dispersão da corrente de descarga atmosférica seja de aproximadamente 10Ω (ABNT, 2001).

Outra maneira de reduzir o valor da resistência R_{mc} é inserir na malha um conjunto de hastes (eletrodos) verticais. Neste caso, é necessário calcular a influência dos eletrodos verticais na resistência final da malha de terra, como segue.

Resistência de aterramento do eletrodo vertical (R_{el}): dada em Ω e determinada por:

$$R_{el} = \frac{\rho_a}{2 \times \pi \times L_h} \times \ln \left(\frac{400 \times L_h}{2,54 \times D_h} \right) \quad (24)$$

onde:

L_h - representa o comprimento da haste de terra, em m;

D_h - representa o diâmetro equivalente da haste de terra, em polegadas.

Coeficiente de redução da resistência de um eletrodo vertical (K_h): reduz a resistência de uma haste de terra conforme a expressão:

$$K_h = \frac{1+A \times B}{N_h} \quad (25)$$

onde:

N_h - representa o número de hastes de terra;

A e B - determinados conforme Tabelas 2 e 3. Estes dois valores são em função do comprimento, do diâmetro dos eletrodos e do espaçamento entre eles; e em função do número de eletrodos verticais utilizados, respectivamente.

Resistência de aterramento do conjunto de eletrodos verticais (R_{ne}): é o valor da resistência resultante de todas as hastes de terra interligadas em paralelo. Dada em Ω e calculada por:

$$R_{ne} = K_h \times R_{el} \quad (26)$$

Resistência mútua dos cabos e eletrodos verticais (R_{mu}): dada em Ω e calculada por:

$$R_{mu} = \frac{\rho_a}{\pi \times L_{cm}} \times \left[\ln \left(\frac{2 \times L_{cm}}{L_{th}} \right) + \frac{K_1 \times L_{cm}}{\sqrt{S}} - K_2 + 1 \right] \quad (27)$$

onde:

S - área da malha em m²;

L_{th} - comprimento total das hastes utilizadas, em m, definido por:

$$L_{th} = N_h \times L_h \quad (28)$$

onde:

N_h - representa o número de hastes;

L_h - o comprimento de uma haste em m.

Resistencia total da malha de terra (R_{tm}): é o valor que representa as resistências combinadas das hastes de terra e dos condutores horizontais que a interligam. Calculada pela expressão:

$$R_{tm} = \frac{R_{mc} \times R_{ne} - R_{mu}^2}{R_{mc} + R_{ne} - 2 \times R_{mu}} \quad (29)$$

Tabela 2 – Coeficiente A

Diâmetro do eletrodo	Distância entre os eletrodos					
	<u>2</u>	<u>3</u>	<u>4</u>	<u>5</u>	<u>9</u>	<u>12</u>
Para eletrodos de comprimento igual a 3m						
<u>1/2"</u>	0,2292	0,1528	0,1149	0,0917	0,0509	0,0382
<u>3/4"</u>	0,2443	0,1629	0,1222	0,0977	0,0543	0,0407
<u>1"</u>	0,2563	0,1709	0,1282	0,1025	0,0570	0,0427
Para eletrodos de comprimento igual a 2,4m						
<u>1/2"</u>	0,1898	0,1266	0,0949	0,0759	0,0422	0,0316
<u>3/4"</u>	0,2028	0,1352	0,1014	0,0811	0,0450	0,0338
<u>1"</u>	0,2132	0,1421	0,1066	0,0853	0,0474	0,0355

Fonte: Mamede Filho (2002).

Tabela 3 – Coeficiente B

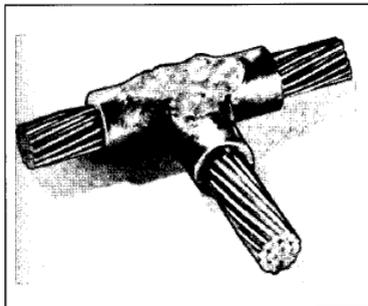
Número de eletrodos	B
<u>4</u>	2,7071
<u>9</u>	5,8917
<u>16</u>	8,5545
<u>25</u>	11,4371
<u>36</u>	14,0650
<u>49</u>	16,8933

Fonte: Mamede Filho (2002).

- Conexões: são elementos metálicos que têm como objetivo conectar os condutores em suas emendas e/ou derivações. Como conexões, portanto, estão os conectores aparafusados e as conexões exotérmicas. Os conectores aparafusados são peças metálicas utilizadas nas emendas entre condutores. Deve-se evitar o seu uso em conexões de condutores de aterramento. As conexões exotérmicas acontecem como resultado de uma fusão entre os elementos metálicos da conexão e do condutor. Esta fusão ocorre nos cadinhos, que são moldes específicos para cada tipo de conexão.

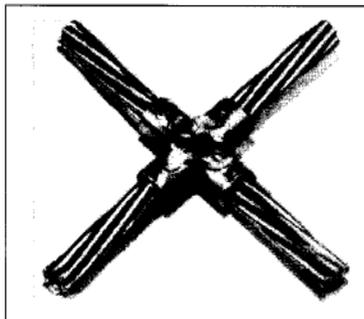
Figuras 14 e 15 representam exemplos de conexões exotérmicas, que podem ser do tipo derivação (T) ou do tipo em X.

Figura 14 – Conexão exotérmica tipo derivação (T).



FONTE: Mamede Filho (2002).

Figura 15 – Conexão exotérmica em X.



FONTE: Mamede Filho (2002).

- Condutores de proteção: são os elementos do sistema de aterramento utilizados para a ligação dos componentes aos terminais de aterramento, tanto principal quanto parcial. Sendo o principal ligado à malha de terra através do condutor de aterramento.

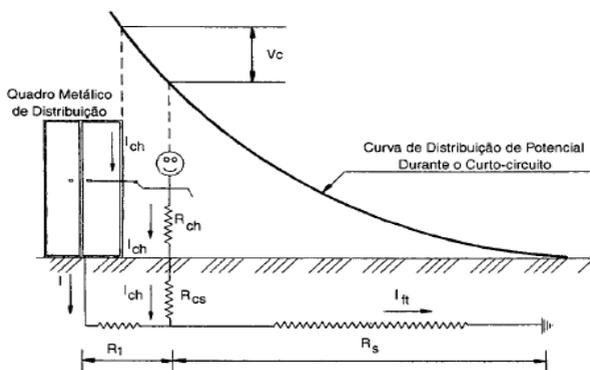
2.2.3 – Proteção contra contatos diretos:

Além da proteção realizada pelo sistema de aterramento nos elementos da subestação e da rede elétrica como um todo, este sistema também desempenha um papel fundamental na proteção dos indivíduos que operam que realizam manutenção ou que participam de alguma maneira da manipulação de qualquer elemento da rede elétrica do conhecido acidente elétrico, ou choque elétrico. Chamados de contatos indiretos, ou, circuitos acidentais, estes eventos acontecem quando o ser humano acaba sendo o caminho mais curto para a corrente elétrica a partir da diferença de potencial entre dois pontos do corpo. Há, portanto o contato do indivíduo com partes metálicas energizadas que perderam ou que não possuíam isolação o que faz com que o corpo do mesmo fique ligado eletricamente sob tensão entre fase e terra (MAMEDE FILHO, 2002).

Existe um limite de corrente elétrica alternada tolerada pelo corpo humano e este valor é de 25 mA. Na faixa dos 15 a 25 mA o indivíduo que está no contato tem dificuldade em soltar o objeto energizado; na faixa entre 15 e 80 mA, os danos já são muito mais graves, onde o corpo passa a sofrer contrações involuntárias levando à asfixia, além de graves e extensas queimaduras e necrose dos tecidos. Além do valor da corrente o tempo de exposição do indivíduo ao contato é fator determinante da gravidade do acidente e das lesões.

As situações de acidentes elétricos por contato indireto comentadas acima, acontecem devido à existência das tensões de toque e de passo. A tensão de toque, ou tensão de contato é aquela em que o corpo humano está sujeito quando entra acidentalmente em contato com massa energizada. Figura 16 apresenta uma situação onde um indivíduo está sujeito a uma tensão de toque.

Figura 16 – Indivíduo sob tensão de toque.



FONTE: Mamede Filho (2002).

E como tensão de passo define-se pela tensão gerada pela diferença de potencial entre os dois pés do indivíduo (distanciados de um metro) quando o mesmo se encontra na área da atuação da malha de terra quando sujeita a uma corrente de falta. Tem-se para a tensão de passo, um limite máximo do seu valor que o indivíduo poderá suportar durante o funcionamento do sistema de aterramento sem que ocorra fibrilação ventricular.

CAPÍTULO 3 – RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados obtidos com o projeto da malha de aterramento da subestação abaixadora de tensão.

Antes de calcular a malha de aterramento, realizou-se uma reunião com o cliente do projeto para obter o projeto arquitetônico da edificação. Em seguida, realizou-se um levantamento de todos os possíveis pontos de energia como tomadas, iluminação, ar condicionado e motores elétricos. Após a locação dos pontos e munido dos valores das respectivas cargas, obteve-se o valor total da potência instalada na edificação de aproximadamente 1,09 MVA. A partir daí utilizou-se um critério de demanda, baseado no somatório das cargas instaladas operando no mesmo intervalo de tempo, aonde se chegou a um valor de carga demandada provável de 497 kVA. A Tabela 4 traz os valores das cargas dos equipamentos que serão instalados na edificação, bem como o critério de demanda individual, a demanda provável da edificação levando em consideração cada equipamento e por fim a carga total instalada e a demanda provável total da edificação.

Sabe-se, porém, que existem valores pré-estabelecidos pelas concessionárias de energia para o fornecimento em baixa tensão, tensão entre 50 V e 1000 V em corrente alternada (entre

fases ou entre fase e terra). Edificações com potências superiores a 225 kVA de demanda e uso coletivo (mais de uma unidade consumidora), apresentam a necessidade de uma subestação para o rebaixamento da tensão, que nesse caso, é de 13,8 kV (tensão primária ou média tensão) para 380/220 V (tensão secundária ou baixa tensão).

Tabela 4 – Carga/Demanda

	Carga Total Instalada (kVA)	Critério de Demanda	Demanda Provável da Edificação (kVA)
Tomadas	64,475	35%	22,566
Iluminação	732,300	35%	256,305
Ar Condicionado	263,000	75%	197,250
Motores	28,060	Tabela 5 NT03 (CELESC, 1997)	21,050
TOTAL	1.087,835		497,171

Fonte: Do autor (2017).

No projeto em questão, o valor de 225 kVA foi ultrapassado, portanto, para que o fornecimento de energia fosse possível houve a necessidade de projetar uma subestação abaixadora de transformação de tensão. Segundo Norma Técnica nº 321.0002 (CELESC, 2016) a subestação que atenderia o valor de carga demandada provável seria de 500 kVA. A partir dessas informações, juntamente com o número de unidades consumidoras, puderam ser dimensionados alguns

componentes: transformador, cabos alimentadores, eletrodutos, dispositivos de proteção, caixas e quadros de medição.

Conforme a Norma Técnica nº 321.0002 (CELESC, 2016), em subestações com potências acima de 300 kVA deve ser instalado uma proteção geral para a subestação, que consiste em um disjuntor tripolar de média tensão com relé secundário (que realiza a proteção contra sobrecorrente de fase), onde os dados de corrente e potência da edificação são confrontados com os dados de proteção da própria rede concessionária a fim de estabelecer uma coordenação entre as proteções, ou seja, qualquer tipo de falha existente dentro da edificação deve ficar confinada dentro da mesma fazendo com que a proteção da edificação atue e a concessionária de energia não enxergue essa falha.

Além disso, conforme a Norma Técnica nº 231.003 (CELESC, 1995), um quadro de medição, compartimento destinado a acomodar medidores de energia, pode ser ocupado por no máximo 30 medidores. A edificação proposta apresentou um número de medidores superior a 30, mais precisamente 87, o que implicou na necessidade de mais de um quadro de medição e, conseqüentemente, na necessidade de um Quadro Geral de Baixa Tensão - QGBT, que acomodaria: o disjuntor geral da edificação; quatro disjuntores, um para cada quadro de medição; e os barramentos de terra e neutro, BEP - Barramento de

Equipotencialização, barramento único ao qual são ligados eletricamente os seguintes elementos (ABNT, 2004).

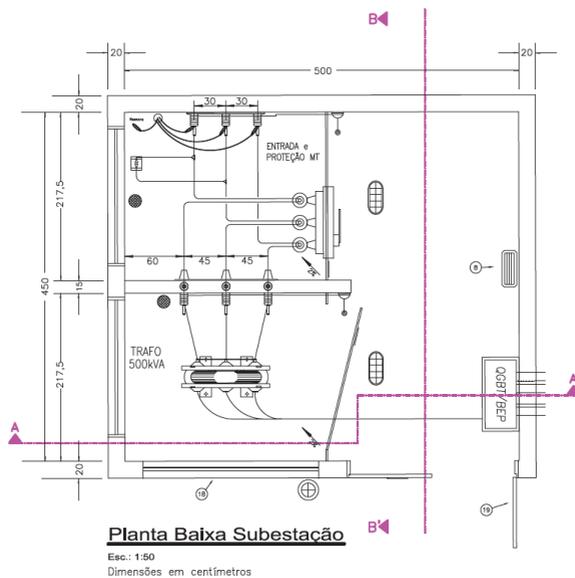
Figura 17 mostra a planta baixa (vista superior) da subestação. Figuras 18 e 19 apresentam, respectivamente, os cortes A-A' e B-B' da subestação.

Nestas figuras é possível visualizar o transformador de 500 kVA, as buchas de passagens, a chave seccionadora, o disjuntor, os isoladores de apoio, as telas que impedem a entrada na parte energizada sem a abertura da tela, as lâmpadas principais e de emergência, e o quadro geral.

Figura 20 apresenta o diagrama unifilar da subestação e a Figura 21 mostra a barra de equipotencialização projetada.

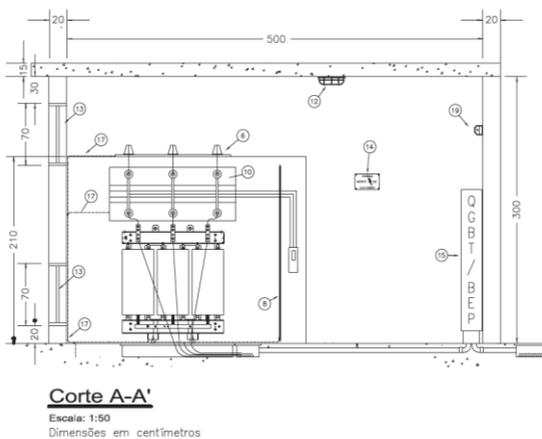
Com o projeto e o layout da subestação realizado, partiu-se para o projeto da malha de aterramento. O cálculo da malha de terra de uma subestação requer o conhecimento dos seguintes parâmetros apresentados na Tabela 5. Em seguida, definem-se as dimensões da malha de aterramento que deverá ficar dentro do terreno do empreendimento. A Tabela 6 apresenta essas dimensões e as distâncias entre os cabos correspondentes à largura e ao comprimento da malha.

Figura 17 – Planta baixa da subestação.



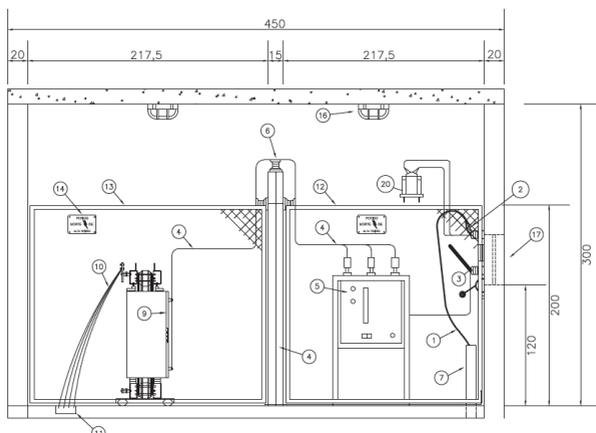
Fonte: Do autor (2018).

Figura 18 – Corte A-A' da subestação.



Fonte: Do autor (2018).

Figura 19 – Corte B-B' da subestação.



Corte B-B'

Escala: 1:50

Dimensões em centímetros

Fonte: Do autor (2018).

Figura 20 – Diagrama unifilar da subestação.

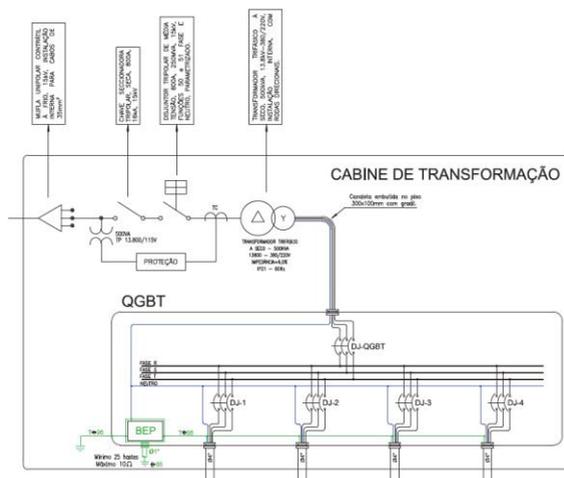
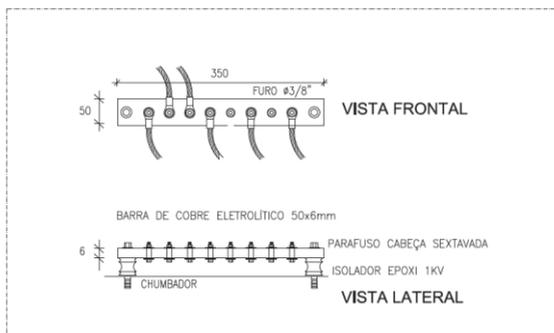


Diagrama Unifilar - Subestação

Sem Escala

Fonte: Do autor (2018).

Figura 21 – Barra equipotencial da subestação.



Barra de Equipotencial - BEP

Sem Escala

Fonte: Do autor (2018).

Tabela 5 – Parâmetros para o projeto da malha de aterramento.

Parâmetro	Valor
Resistividade aparente do solo	$\rho_a = 410 \Omega.m$
Resistividade da camada superior do solo	$\rho_l = 410 \Omega.m$
Resistividade do material de acabamento da superfície da área da subestação (concreto)	$\rho_s = 100000 \Omega.m$
Corrente mínima de curto-circuito fase-terra	$I_{cft} = 198 A$
Tempo de duração da corrente de curto-circuito fase-terra	$T_f = 0,5 s$
Resistência elétrica do corpo humano	$R_{ch} = 1000 \Omega$

Os valores de D_l e D_c foram escolhidos de maneira a se obter a menor quantidade possível de condutores de cobre. A Tabela 7 apresenta os resultados do projeto da malha de aterramento.

Tabela 6 – Dimensionamento da malha de aterramento.

Parâmetro	Valor
Comprimento da malha de terra	$C_m = 24 \text{ m}$
Largura da malha de terra	$L_m = 24 \text{ m}$
Distância entre os cabos correspondentes à largura da malha de terra	$D_l = 2,0 \text{ m}$
Distância entre os cabos correspondentes ao comprimento da malha de terra	$D_c = 2,0 \text{ m}$
Seção do condutor de cobre usado na malha de aterramento	$S_c = 90 \text{ mm}^2$
Profundidade da malha de aterramento	$H = 0,5 \text{ m}$

As dimensões do terreno de algumas indústrias, principalmente aquelas localizadas em áreas urbanas, tornam inviável a dissipação das correntes de curto-circuito. Essa dissipação é proporcional à área disponível para a construção da malha de terra, o que dificulta seu cálculo pelo método IEEE-80.

Além disso, a corrente de curto circuito adotada no cálculo da malha de terra deve ser a de planejamento no horizonte de 10 anos. No projeto da subestação foi realizado o cálculo do valor máximo da corrente de curto-circuito fase-terra e esse valor permitiu definir a seção do condutor da malha de terra. Para este projeto, obteve-se a seção do condutor de cobre de 90 mm^2 , considerando-se que a conexão entre os eletrodos de terra seja em solda exotérmica.

Tabela 7 – Resultados do projeto da malha de aterramento.

Parâmetro	Valor
Número de condutores principais	$N_{cp} = 13$
Número de condutores de junção	$N_{cj} = 13$
Comprimento do condutor	$L_c = 655,20 \text{ m}$
Comprimento mínimo do condutor da malha	$L_{cm} = 2,31 \text{ m}$
Tensão de passo	$E_{pa} = 9,92 \cdot 10^4 \text{ V}$
Tensão de passo existente na periferia da malha	$E_{per} = 216,80 \text{ V}$
Tensão máxima de toque	$E_{tm} = 2,48 \cdot 10^4 \text{ V}$
Tensão de toque existente	$E_{te} = 87,41 \text{ V}$
Corrente máxima de choque	$I_{ch} = 164,05 \text{ mA}$
Corrente de choque existente devido à tensão de passo sem a camada de brita	$I_{pmsb} = 62,66 \text{ mA}$
Corrente de choque existente devido à tensão de passo com a camada de brita	$I_{pmcb} = 0,36 \text{ mA}$
Corrente de choque devido à tensão de toque existente sem a camada de brita	$I_{tmsb} = 54,12 \text{ mA}$
Corrente de choque devido à tensão de toque existente com a camada de brita	$I_{tmcb} = 0,577 \text{ mA}$
Corrente mínima de acionamento do relé de terra	$I_a = 3,08 \cdot 10^3 \text{ A}$
Resistência da malha de terra	$R_{mc} = 8,20 \ \Omega$
Resistência de um eletrodo vertical	$R_{el} = 140,20 \ \Omega$
Coefficiente de redução da resistência de um eletrodo vertical	$K_h = 0,138$
Resistência de aterramento do conjunto de eletrodos verticais	$R_{ne} = 19,31 \ \Omega$
Resistência mútua dos cabos e eletrodos verticais	$R_{mu} = 5,88 \ \Omega$
Resistência total da malha	$R_{tm} = 7,86 \ \Omega$
Fator de redução da resistência	4,15 %

Analisando a Tabela 7, observa-se que as condições:

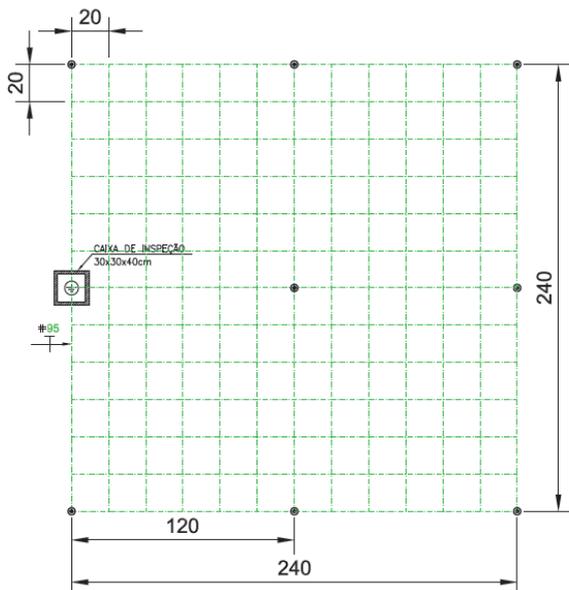
- $L_{cm} \geq L_c$ foi atendida.
- $E_{pa} \geq E_{per}$ foi atendida.
- $E_{tm} \geq E_{te}$ foi atendida.
- $I_{pmsb} \leq I_{ch}$ foi atendida.
- $I_{pmcb} \leq I_{ch}$ foi atendida.
- $I_{tmsb} \leq I_{ch}$ foi atendida.
- $I_{tmcb} \leq I_{ch}$ foi atendida.

Outra observação importante é que o valor da resistência de aterramento (R_{mc}) ficou abaixo de 10Ω que é o valor recomendado por norma para subestações de classe 15 a 38 kV. Todavia, para ilustrar o efeito das hastes (eletrodos) verticais, considerou-se a aplicação de 9 hastes verticais de $\frac{3}{4}$ " de diâmetro e 3 m de comprimento, espaçadas entre si de 12 m. Com isso, a resistência de aterramento foi reduzida para o valor de $R_{tm} = 7,86 \Omega$.

Os resultados apresentados na Tabela 7 foram obtidos com um código desenvolvido especialmente para este TCC e implementado em MATLAB. O código está apresentado no Apêndice I.

Figura 22 mostra o desenho da malha de terra resultante do projeto.

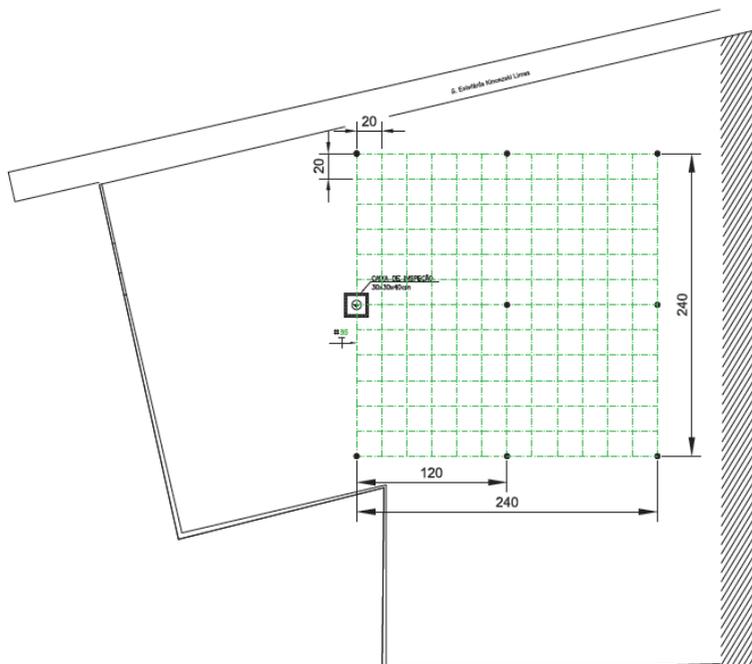
Figura 22 – Malha de terra no terreno do empreendimento.



Fonte: Do autor (2018).

Figura 23 apresenta a malha de terra no terreno do empreendimento.

Figura 23 – Malha de terra no terreno do empreendimento.



Fonte: Do autor (2018).

CAPÍTULO 4 – CONCLUSÕES

Este TCC teve como objetivo principal o projeto de um sistema de aterramento para uma subestação abaixadora de tensão em uma edificação comercial.

O sistema de aterramento ficou sendo composto por uma malha de aterramento de dimensões 20 m por 20 m. O comprimento total de condutores de cobre de seção de 95 mm^2 foi de 656 m. Além dos condutores horizontais, a malha contém mais 9 hastes de $\frac{3}{4}$ " de diâmetro e 3 m de comprimento dispostas a 12 m entre si, conforme apresentado na Figura 23. A resistência da malha de terra final ficou no valor de $R_m = 7,86 \Omega$, abaixo de 10Ω que é o valor recomendado por norma para subestações de classe 15 a 38 kV. Assim, considera-se que o projeto atendeu todos os requisitos das normas de aterramento e que os objetivos propostos no TCC foram atingidos.

Como sugestão para trabalhos futuros destaca-se o desenvolvimento de um programa de elementos finitos (ou método similar) que apresente como resultado a distribuição das equipotenciais ao longo da malha de terra e que calcule o valor da resistência de aterramento considerando a ausência ou a

presença de hastes (eletrodos) verticais. Esta ferramenta numérica permitirá que o projetista visualize as tensões de passo em toda a malha e obtenha um valor de resistência de aterramento mais preciso que o valor obtido analiticamente. O método analítico disponível na literatura científica e apresentado neste TCC utiliza algumas constantes empíricas de difícil determinação e que podem comprometer a aplicação do método para os diversos tipos de subestações de energia elétrica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. Instalações Elétricas de Média Tensão de 1.0kV a 36,2kV - NBR 14039:2005. Rio de Janeiro: 1ª Ed., 2005 241 p.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. Medição da resistividade e determinação da estratificação do solo. NBR 7117:2012. Rio de Janeiro: 2012 64 p.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. Seccionador, chaves de terra e aterramento rápido - NBR 6935:2005. Rio de Janeiro: 2ª Ed., 2005 93 p.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. Símbolos gráficos para instalações elétricas prediais - NBR 5444:1989. Rio de Janeiro: 1ª Ed., 1989 9 p.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. Instalações elétricas de baixa tensão - NBR 5410:2004. Rio de Janeiro: 2ª Ed., 2004 9 p.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. Sistemas de aterramento de subestações - Requisitos - NBR 15751:2009. Rio de Janeiro: 1ª Ed., Ago. 2009 47 p.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. Símbolos Gráficos para Instalações Elétricas Prediais- NBR 5444:1988. Rio de Janeiro: 1ª Ed., Fev. 1988 09 p.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. Proteção de estruturas contra descargas atmosféricas- NBR 5419:2015. Rio de Janeiro: 1ª Ed., Fev. 2001 32 p.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. MÓDULO 1: Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional. 1 ed. Brasília: Aneel, 2016. 61 p.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. RESOLUÇÃO NORMATIVA N° 67: Estabelece critérios para a composição da Rede Básica do Sistema Interligado Nacional, e dá outras providências. Brasília: Aneel, 2001. 6 p. Disponível em:

<<https://www legisweb.com.br/legislacao/?id=101119>>. Acesso em: 15 nov. 2017.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. RESOLUÇÃO NORMATIVA N° 456: Estabelece, de forma atualizada e consolidada, as Condições Gerais de Fornecimento de Energia Elétrica. Brasília: Aneel, 2000. 62 p. Disponível em: <<file:///C:/Users/Avell%20B154%20PLUS/Downloads/res.aneel-456-atualizado.pdf>>. Acesso em: 19 nov. 2017.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Atlas de Energia Elétrica do Brasil. 3. ed. Brasília: Aneel, 2008. 236 p. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas3ed.pdf>>. Acesso em: 15 nov. 2017.

ARAÚJO, Carlos André S. et al. Proteção de Sistemas Elétricos. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2005. 266 p.

BRASIL. Lei nº 10.848, de 15 de março de 2004. Brasília, Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/lei200410848.pdf>>. Acesso em: 15 nov. 2017.

BRASIL, Ministério do Trabalho e Emprego. Normas Regulamentadoras de Segurança e Medicina do Trabalho. NR 10 Segurança em Instalações e Serviços com Eletricidade, de 08 de junho de 1978. Brasília. Disponível em: <http://trabalho.gov.br/images/Documentos/SST/NR/NR-10-atualizada-2016.pdf>. Acesso em: 19 nov. 2017.

CAMINHA, Amadeu C.. Introdução à Proteção dos Sistemas Elétricos. São Paulo: Edgard Blucher Ltda, 1977. 211 p.

CARVALHO JÚNIOR, Roberto de. Instalações Elétricas e o Projeto de Arquitetura. 6. ed. São Paulo: Blucher, 2015. 279 p.

CENTRAIS ELÉTRICAS DE SANTA CATARINA. N 321.0002: Fornecimento de Energia Elétrica em Tensão Primária de Distribuição. Florianópolis: Celesc, 2016. 175 p. Disponível em: <<http://www.celesc.com.br/portal/images/arquivos/normas/norma-N3210002.pdf>>. Acesso em: 19 nov. 2017.

COTRIM, Ademaro A. M. B.. Instalações Elétricas. 5. ed. São Paulo: Prentice Hall, 2009. 486 p.

CREDER, Hélio. Instalações Elétricas. 16. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2016. 471 p.

DUAILIBE, P. - Subestações: Tipos, Equipamentos e Proteção – Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, 1999.

KINDERMANN, Geraldo; CAMPAGNOLO, Jorge Mário. Aterramento elétrico. 3. ed. Porto Alegre: Sagra - D.C. Luzzatto Editores, 1995. 113 p.

MAMEDE FILHO, João. Instalações Elétricas Industriais. 8. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2010. 658 p.

MAMEDE FILHO, João. Manual de Equipamentos Elétricos. 3. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2005. 784 p.

MAMEDE FILHO, João. Sistemas de aterramento. In: MAMEDE FILHO, João. Instalações elétricas industriais. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002. Cap. 11. p. 497-533.

PENTEADO, Josué Bratfich. Análise do desempenho de subestações de energia elétrica a partir de critérios de confiabilidade. 2011. 80 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica Com Ênfase em Sistemas de Energia e Automação, Engenharia Elétrica, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011. Disponível em: <file:///C:/Users/Avell PLUS/Downloads/Penteado_Josue_Bratfich (2).pdf>. Acesso em: 12 nov. 2017. B154

APÊNDICE I

Este apêndice apresenta o código em MATLAB do programa de dimensionamento da malha de aterramento.

```
% TCC Eraldo - Fev 2018

Cm = 24; % Comprimento da malha de terra
Lm = 24; % Largura da malha de terra

Rch = 1000; % Resistencia do corpo humano

Icftmax = 4888; % Corrente máxima de curto-circuito
fase-terra
Icftmin = 198; % Corrente mínima de curto-circuito
fase-terra
pm = 410; % Resistividade média do solo
Hm = 8; % Obtido a partir da curva da Fig. 31 em
função de pm
S = Cm*Lm; % Área da malha de terra

ps = 100000; % Resistividade média do concreto
armado

R = sqrt(S/pi); % Raio equivalente à área da malha
de terra da subestação
K2 = R/Hm;

K3 = 1;

pa = K3*pm; % Resistividade aparente do solo

K = 0.002533; % Seção mínima do condutor em mm2/A
Sc = K*Icftmax; % Seção mínima do condutor (Sc =
16mm2)

Sc = 95; %Seção Adotada

Dca = 0.01142; % Diâmetro do condutor
H = 0.5; % Profundidade da malha de terra
```

```

%Dc = Cm/20; % Dist. entre os cabos corresp. ao
comprimento da malha de terra
%Dl = Lm/10; % Dist. entre os cabos corresp. à
largura da malha de terra
Tf = 0.5; % Tempo de duração da falha

Dc = 2; % Dist. entre os cabos corresp. ao
comprimento da malha de terra
Dl = 2; % Dist. entre os cabos corresp. à largura
da malha de terra

Ncp = Cm/Dl+1; % Número de condutores principais
Ncj = Lm/Dc+1; % Número de condutores de junção

%Ncp = 10; % Número de condutores principais
%Ncj = 8; % Número de condutores de junção

Lcm = 1.05 * ((Cm*Ncj)+(Lm*Ncp)); % Comprimento do
condutor

Kmp = 1/(2*pi) * log(Dl^2/(4*pi*(Ncp-1)*H*Dca)); %
Coeficiente da malha para condutores principais
Kmj = 1/(2*pi) * log(Dc^2/(4*pi*(Ncj-1)*H*Dca)); %
Coeficiente da malha para condutores de junção

Ksp = 1/pi * (1/(2*H) + 1/(Dl+H) + log(0.655*(Ncp-
1)-0.328)/Dl^2); % Coeficiente de superfície para
condutores principais
Ksj = 1/pi * (1/(2*H) + 1/(Dc+H) + log(0.655*(Ncj-
1)-0.328)/Dc^2); % Coeficiente de superfície para
condutores de junção

Kip = 0.65 + 0.172*Ncp; % Coeficiente de
irregularidade para condutores principais

Kij = 0.65 + 0.172*Ncj; % Coeficiente de
irregularidade para condutores de junção
Kmi = max([Kmp*Kip,Kmj*Kij]); % Maior produto de
Kmp*Kip e Kmj*Kij

Lc = Kmi*pa*Icftmin*sqrt(Tf)/(0.116+0.174*ps); %
Comprimento mínimo do condutor

```

```

if Lcm < Lc % Caso a condição Lcm maior ou igual a
Lc não seja satisfeita
    disp('Comprimento Lc > Lcm')
    fprintf('Lc = %f , Lcm = %f\n',Lc,Lcm)
end

Epa = (116+0.7*ps)/sqrt(Tf); % Tensão de passo
Ksi = max([Ksp*Kip,Ksj*Kij]); % Máior produto de
Ksp*Kip e Ksj*Kij
Eper = Ksi*pm*Icftmin/Lcm; % Tensão de passo
existente na periferia da malha

if Eper > Epa % Caso a condição Eper menor ou igual
a Epa não seja satisfeita
    disp('Tensão de Passo Epa < Eper')
    fprintf('Epa = %f , Eper = %f\n',Epa,Eper)
end

Etm = (116+0.174*ps)/sqrt(Tf); % Tensão máxima de
toque
Ete = Kmi*pm*Icftmin/Lcm; % Tensão de toque
existente

if Ete > Etm % Caso a condição Ete menor ou igual a
Etm não seja satisfeita
    disp('Tensão de Toque Etm < Ete')
    fprintf('Etm = %f , Ete = %f\n',Etm,Ete)
end

Ich = 116/sqrt(Tf); % Corrente máxima de choque
Ipmcc = 1e3*Eper/(1e3+6*(pm+ps)); % Corrente de
choque devido à tensão de passo com concreto
Itmcc = 1e3*Ete/(1e3+1.5*(pm+ps)); % Corrente de
choque devido à tensão de toque com concreto

if Ipmcc > Ich % Caso a condição Ipmcc menor ou
igual a Ich não seja satisfeita
    disp('Corrente de Passo com Concreto Ich <
Ipmcb')
    fprintf('Ich = %f , Ipmcb = %f\n',Ich,Ipmcc)
end

```

```

if Itmcc > Ich % Caso a condição Itmcc menor ou
igual a Ich não seja satisfeita
    disp('Corrente de Toque com Concreto Ich <
Ipmsb')
    fprintf('Ich = %f , Itmcb = %f\n',Ich,Itmcc)
end

Ia = (Rch+1.5*ps)*9*Lcm/(1e3*Kmi*pm); % Corrente
mínima de acionamento do relé de terra

Rmc = pa/(4*R)+pa/Lcm; % Valor da resistência da
malha de terra correspondente aos condutores
horizontais

    disp('Resistencia da Malha de Terra sem
Hastes:')
    fprintf('Rmc = %f Ohms\n ',Rmc)

Dh = 3/4; % Diâmetro das hastes
Lh = 3; % Profundidade das hastes
Nh = 9; % Número de hastes

%A = 0.0977; % Coeficiente A
%B = 11.4371; % Coeficiente B

A = 0.0407; % Coeficiente A
B = 5.8917; % Coeficiente B

Rel = pa/(2*pi*Lh) * log(400*Lh/(2.54*Dh)); %
Resistencia de aterramento de um eletrodo vertical
Kh = (1 + A*B)/Nh; % Coeficiente de redução da
resistencia de um eletrodo vertical

Rne = Kh*Rel; % Resistencia de aterramento do
conjunto de eletrodos verticais

K = Cm/Lm;
K1 = 1.14125 - 0.0425*K;
K2 = 5.49 - 0.1443*K;
Lth = Nh*Lh;

```

```
Rmu = pa/(pi*Lcm) * (log(2*Lcm/Lth) +  
K1*Lcm/sqrt(S) - K2 + 1);  
% Resistencia mutua dos cabos e eletrodos verticais  
  
Rtm = (Rmc*Rne - Rmu^2)/(Rmc+Rne - 2*Rmu); %  
Resistencia total da malha de terra  
  
    disp('Resistencia da Malha de Terra com  
Hastes:')  
    fprintf('Rtm = %f Ohms\n',Rtm)
```

Fonte: MATLAB® (2018).