

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
ENGENHARIA ELÉTRICA**

**ESTUDO E SIMULAÇÃO DE MALHA DE ATERRAMENTO PARA SUBESTAÇÃO
DE ENERGIA ELÉTRICA**

LUCAS DUARTE RODRIGUES

**Porto Alegre
2015**

LUCAS DUARTE RODRIGUES

**ESTUDO E SIMULAÇÃO DE MALHA DE ATERRAMENTO PARA SUBESTAÇÃO
DE ENERGIA ELÉTRICA**

Monografia apresentada como exigência
para obtenção do grau de Bacharelado
em Engenharia Elétrica da Universidade
Federal do Rio Grande do Sul.

Orientador: Professor Doutor Luiz Tiarajú dos
Reis Loureiro

**Porto Alegre
2015**

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Reitor: Carlos Alexandre Netto

Vice-Reitor: Rui Vicente Oppermann

ESCOLA DE ENGENHARIA

Diretor: Luiz Carlos Pinto da Silva Filho

Vice-Diretora: Carla Schwengber Ten Caten

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

Coordenador: Ály Ferreira Flores Filho

Vice-Coordenador: Roger Pizzato Nunes

Duarte Rodrigues, Lucas

ESTUDO E SIMULAÇÃO DE MALHA DE ATERRAMENTO PARA
SUBESTAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA / Lucas Duarte
Rodrigues. -- 2015.

80 f.

Orientador: Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de
Engenharia, Curso de Engenharia Elétrica, Porto
Alegre, BR-RS, 2015.

1. Malha de aterramento. 2. Potencial de toque.
3. Potencial de passo. 4. Subestação. 5.
Resistividade. I. Tiarajú dos Reis Loureiro, Luiz,
orient. II. Título.

LUCAS DUARTE RODRIGUES

**ESTUDO E SIMULAÇÃO DE MALHA DE ATERRAMENTO PARA SUBESTAÇÃO
DE ENERGIA ELÉTRICA**

Este trabalho foi analisado e julgado adequado para fazer jus aos créditos da Disciplina “Projeto de Diplomação” do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, e aprovado em sua forma final pelo Professor Orientador e pela Banca Examinadora

Orientador: Prof. Dr. Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro

Coordenador: Prof. Dr. Ály Ferreira Flores Filho

Aprovado em: ____ / ____ / _____

BANCA EXAMINADORA

**Prof. Dr. Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro – UFRGS
Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil**

**Prof. Dr. Roberto Petry Homrich – UFRGS
Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil**

**Engenheiro Eletricista Cassiano Nicknich – PROLUX ENGENHARIA
Graduado pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil
Sócio-Proprietário da empresa Prolux Engenharia de Sistemas Ltda**

Dedico este trabalho aos meus pais, os quais me ensinaram a ser a pessoa que sou.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço aos meus pais, Carlos Roberto da Silva Rodrigues e Dulcea Duarte Rodrigues, por sempre estarem ao meu lado, oferecendo o apoio necessário em tudo o que foi preciso. Agradeço também à minha irmã, Roberta Duarte Rodrigues, pela atenção e carinho ao longo desta etapa.

À minha namorada, Luciana Paula Guisso, por ter enfrentado, nestes últimos anos, todas as dificuldades ao meu lado, sempre me incentivando a seguir em busca dos objetivos.

Ao professor Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro, pela orientação no desenvolvimento deste trabalho.

Aos colegas da Prolux Engenharia pelo apoio fundamental para elaboração do estudo em questão.

Aos familiares e amigos, por me apoiarem e compreenderem minha ausência em diversos momentos nestes últimos anos.

Por fim, agradeço a UFRGS, mais especificamente aos integrantes do Departamento de Engenharia Elétrica, pelo nível de exigência imposto, tornando-me uma pessoa melhor preparada para superar as dificuldades que virão.

*“Se, no final, você achar que Ítaca é pobre,
não pense que ela lhe enganou.*

*Porque você tornou-se sábio, e viveu uma
vida intensa, e este é o significado de Ítaca.”*

(Konstantinos Kaváfis)

RESUMO

O crescimento da demanda de energia do Sistema Elétrico Brasileiro faz com que seja necessária a construção de sistemas de geração, transmissão e distribuição, visando atender à demanda. As subestações fazem parte desta estrutura e possuem papel importante no Sistema Elétrico Brasileiro. O bom funcionamento destas subestações está relacionado com diversos fatores, entre eles o aterramento elétrico. Parâmetros como os limites de potencial toleráveis pelo ser humano, características do solo, grandezas elétricas da estrutura, entre outras, são informações indispensáveis para desenvolver um projeto de aterramento. Foram desenvolvidos softwares computacionais que permitem um estudo mais preciso do comportamento da malha de aterramento.

Palavras-chave: Aterramento, Resistividade do Solo, Potencial de Toque, Subestação.

ABSTRACT

The growth of energy demand of the Brazilian Electric System makes building generation systems is necessary, transmission and distribution to meet the demand. The substations are part of that structure and play an important role in the Brazilian Electric System. The proper functioning of these substations is related to several factors, including the electrical ground. Parameters such as the limits of tolerable potential for human beings, soil characteristics, electrical parameters of the structure, among others, are indispensable information to develop a ground project. Computer software were developed that allow a more precise study of the grounding grid behavior.

Keywords: Ground, Soil Resistivity, Touch potential, Substation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Sistema de Potência.	16
Figura 2 – Subestação de energia.	17
Figura 3 - Transformador de força.....	20
Figura 4 – Transformador de corrente.....	22
Figura 5 – Transformador de potencial	23
Figura 6 - Disjuntor.....	24
Figura 7 – Chave seccionadora.....	25
Figura 8 – Para-raio.	26
Figura 9 - Relé de proteção.....	27
Figura 10 - Banco de capacitores.....	28
Figura 11 - Resistividade x Umidade Percentual do solo.	31
Figura 12 - Resistividade x Temperatura	32
Figura 13 - Estratificação do solo em duas camadas.....	33
Figura 14 - Configuração no potencial de toque.....	35
Figura 15 – Configuração no potencial de passo.	36
Figura 16 - Aplicação do método de Wenner.	39
Figura 17 - Projeção dos potenciais nos pontos 2 e 3.....	39
Figura 18 - Instrumento Medição de resistividade.....	41
Figura 19 - Penetração na profundidade "a".	42
Figura 20 - Solo estratificado.....	43
Figura 21 - Curva $\rho \times a$ descendente e ascendente.	43
Figura 22 - - M_0 em função de $\frac{\rho_2}{\rho_1}$	44
Figura 23 - Solo estratificado em duas camadas.	44
Figura 24 - Curva de resistividade aparente para solo de duas camadas.....	47
Figura 25 - Corrente no condutor de ligação e no condutor da malha.	52
Figura 26 – Distância x.....	56
Figura 27 - Eletrodo natural.....	57
Figura 28 - Eletrodo fabricado.....	57
Figura 29 - Eletrodo encapsulado.	58
Figura 30 - Solda Exotérmica.....	60
Figura 31 - Aterramento de grades metálicas no interior da malha.....	61
Figura 32 - Aterramento de grades metálicas no exterior da malha.....	61
Figura 33 - Aterramento de equipamentos sobre suportes.	64
Figura 34 - Tela inicial para escolha do estudo a ser realizado no software	71

Figura 35 - Tela para desenho da malha.	71
Figura 36 - Tela para inserir características da malha.	72
Figura 37 - Dados do solo.	72
Figura 38 – Dados do sistema.....	73
Figura 39 - Malha desenvolvida no sistema	74
Figura 40 - Relatório com dados de entrada.	74
Figura 41 - Relatório com dados de saída para pessoa de 50 kg	75
Figura 42 - Gráfico da distribuição do potencial de passo na malha para pessoa de 50 kg.....	78
Figura 43 - Gráfico da distribuição do potencial de toque na malha para pessoa de 50 kg.....	78

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Tipos de solo e suas respectivas resistividades.....	30
Quadro 2 - Valores de resistividade do solo em função da umidade.	31
Quadro 3 - Valores de resistividade do solo em função da temperatura.....	32
Quadro 4 - Parâmetros de condutores utilizados em malhas de aterramento.	51
Quadro 5 - Dimensionamento do condutor da malha e cabo de ligação.....	52

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 OBJETIVO.....	15
3 SUBESTAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	16
3.1 TIPOS DE SUBESTAÇÕES.....	17
3.1.1 SUBESTAÇÃO TRANSFORMADORA	18
3.1.2 SUBESTAÇÃO SECCIONADORA, DE MANOBRA OU CHAVEAMENTO.....	19
3.1.3 SUBESTAÇÃO TRANSMISSORA.....	19
3.2 EQUIPAMENTOS	19
3.2.1 TRANSFORMAÇÃO	19
3.2.1.1 TRANSFORMADORES DE FORÇA	20
3.2.1.2 TRANSFORMADORES DE INSTRUMENTO.....	21
3.2.1.2.1 TRANSFORMADOR DE CORRENTE (TC)	21
3.2.1.2.2 TRANSFORMADOR DE POTENCIAL (TP).....	22
3.2.2 MANOBRA.....	23
3.2.2.1 DISJUNTORES	23
3.2.2.2 CHAVES SECCIONADORAS	24
3.2.3 PROTEÇÃO CONTRA SURTOS.....	25
3.2.4 RELÉS DE PROTEÇÃO.....	26
3.2.5 COMPENSADORES DE REATIVOS.....	27
3.2.5.1 CAPACITORES EM DERIVAÇÃO E EM SÉRIE	27
4 ATERRAMENTO ELÉTRICO	28
4.1 PARÂMETROS IMPORTANTES NO PROJETO DE ATERRAMENTO.....	29
4.1.1 CARACTERÍSTICAS DO TERRENO	30
4.1.1.1 INFLUÊNCIA DA UMIDADE.....	31
4.1.1.2 INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA	32
4.1.1.3 INFLUÊNCIA DA ESTRATIFICAÇÃO DO SOLO.....	33
4.2 O EFEITO DA CORRENTE ELÉTRICA NO SER HUMANO	33
4.2.1 POTENCIAL DE TOQUE.....	35
4.2.2 POTENCIAL DE PASSO	36
4.3 MEDIÇÃO DA RESISTIVIDADE DO SOLO.....	38
4.3.1 CONCEITO TEÓRICO DO MÉTODO DE WENNER.....	38
4.3.2 MEDIÇÃO PELO MÉTODO DE WENNER	40
4.4 ESTRATIFICAÇÃO DO SOLO.....	42
4.5 RESISTIVIDADE APARENTE DO SOLO	45
4.5.1 COEFICIENTE DE PENETRAÇÃO	45

4.5.2	COEFICIENTE DE DIVERGÊNCIA	46
4.5.3	RESISTIVIDADE APARENTE PARA SOLO EM DUAS CAMADAS.....	46
5	LIGAÇÃO À TERRA.....	48
5.1	MALHA DE ATERRAMENTO	48
5.1.1	CONDUTOR DE ATERRAMENTO.....	49
5.1.1.1	DIMENSIONAMENTO MECÂNICO.....	49
5.1.1.2	DIMENSIONAMENTO TÉRMICO	49
5.1.2	CONDUTOR DA MALHA.....	51
5.2	POTENCIAL NA MALHA	53
5.2.1	POTENCIAL NA CERCA PERIMETRAL	55
5.3	HASTE DE ATERRAMENTO.....	56
5.3.1	TIPOS DE ELETRODOS DE ATERRAMENTO.....	56
5.4	TIPOS DE CONEXÕES	59
5.5	CERCAMENTO DA SUBESTAÇÃO	60
5.6	ATERRAMENTO DOS EQUIPAMENTOS	62
6	APLICAÇÃO EM SUBESTAÇÕES.....	64
6.1	DADOS INICIAIS CONSIDERADOS	64
6.2	DIMENSIONAMENTO DO CABO DA MALHA DE ATERRAMENTO	66
6.3	CÁLCULOS DOS POTENCIAIS MÁXIMOS SUPORTÁVEIS PELO SER HUMANO NO LOCAL.....	67
6.3.1	POTENCIAL DE PASSO TOLERÁVEL MÁXIMO.....	67
6.3.2	POTENCIAL DE TOQUE TOLERÁVEL MÁXIMO	68
6.3.3	POTENCIAL NA CERCA	68
7	SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL	70
7.1	SOFTWARE.....	70
7.2	DESENHO DA MALHA	73
7.3	DADOS DE ENTRADA E DE SAÍDA DO SISTEMA	74
7.4	COMPARAÇÃO ENTRE VALORES TEÓRICOS E COMPUTACIONAIS.....	75
7.5	GRÁFICO DOS POTENCIAIS.....	77
8	CONCLUSÃO.....	80
	REFERÊNCIAS.....	81

1 INTRODUÇÃO

A estrutura atual do Sistema Elétrico Brasileiro depende diretamente das subestações de energia. Estas instalações desempenham funções nas quais adequam os níveis de energia de forma a possibilitar o seu consumo. O projeto de uma subestação possui diversas partes, sendo o aterramento elétrico uma parte fundamental.

O projeto de aterramento tem por objetivos principais aperfeiçoar o sistema de proteção da subestação, protegendo os equipamentos instalados, bem como as pessoas que trabalham no local.

Dentre as estruturas empregadas para realizar este projeto, a malha de aterramento é a mais utilizada, devido a sua simplicidade e ótimos resultados. O dimensionamento desta malha depende de diversas variáveis, entre elas o tipo de solo, resistividade do solo, fatores climáticos, valores das grandezas elétricas da subestação, entre outras.

O projeto de aterramento é um assunto complexo, sendo foco de diversos estudos ao longo dos anos. O aterramento é possui características distintas para sistemas de potência, de comunicação, para grandezas de baixas e altas frequências, entre outras variações. Foram desenvolvidos diversos softwares com o intuito de facilitar o projeto de malhas de aterramento, porém, obviamente, todos estes se baseiam nos conceitos teóricos existentes.

Este trabalho aborda os aspectos importantes de um sistema de aterramento, bem como a teoria empregada para o seu dimensionamento. Por fim, foi realizada a comparação de resultados obtidos de forma teórica com os resultados obtidos através de um software computacional.

2 OBJETIVO

O presente estudo tem por objetivo desenvolver o projeto da malha de aterramento de uma subestação de energia com base nos conceitos de engenharia utilizados atualmente e comparar os resultados obtidos de maneira teórica com aqueles encontrados através de softwares para dimensionamento de malha de aterramento.

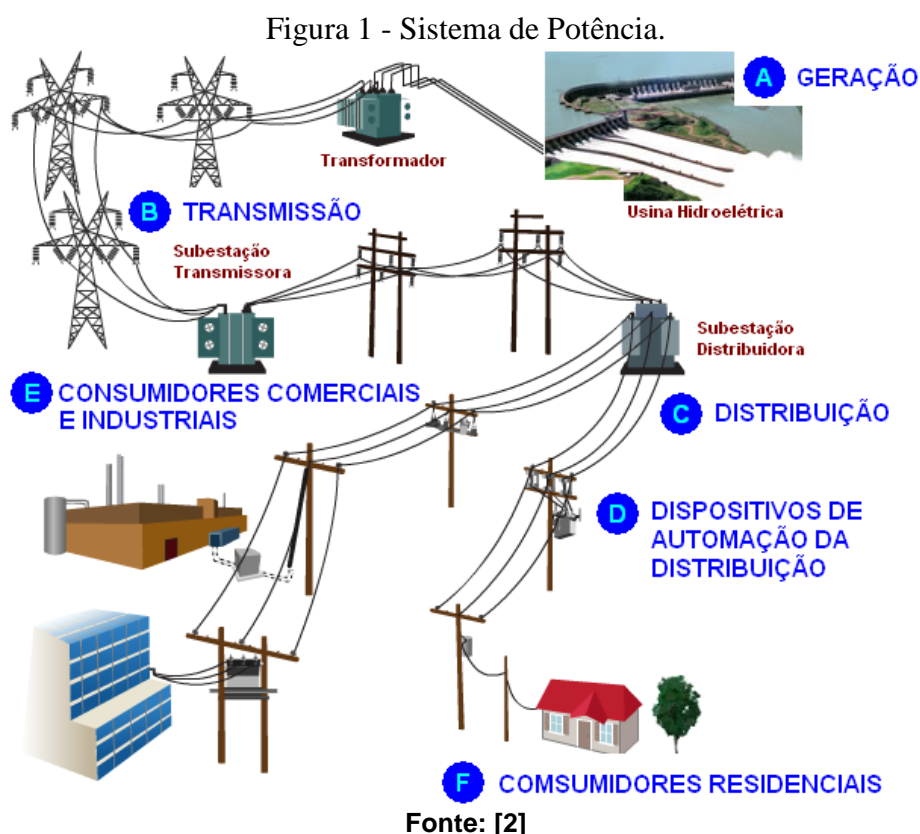
A motivação para este trabalho deve-se ao assunto estar diretamente ligado com a integridade física tanto dos equipamentos que compõem a subestação quanto das pessoas que circulam neste local.

Durante o curso de Engenharia Elétrica, foram poucas às vezes em que este assunto foi abordado. Por este motivo é interessante desenvolver o trabalho de conclusão de curso com base num assunto que não foi abordado de forma aprofundada.

3 SUBESTAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Em geral, as usinas geradoras de energia elétrica localizam-se a grandes distâncias dos locais onde estão as instalações que consomem esta energia. Desta forma, é necessário transportar a energia gerada, através de linhas de transmissão. Para que este transporte ocorra de forma eficiente, as subestações de energia realizam a função de controlar o fluxo de potência, modificar as tensões e alterar a natureza da corrente elétrica, bem como garantir a proteção do sistema elétrico.

A Figura 1 ilustra a estrutura de distribuição de um sistema elétrico baseado na geração de energia através de uma usina hidroelétrica.



Após a geração de energia na usina, a tensão elétrica é elevada na subestação elevadora, com o intuito de diminuir a magnitude da corrente elétrica e garantir uma transmissão por longas distâncias com menores perdas ôhmicas, uma vez que estas são diretamente ligadas à corrente elétrica através do efeito Joule ($P = R \times I^2$). As subestações distribuidoras rebaixam os níveis de tensão elétrica a fim de adequar os valores aos consumidores em questão. Com níveis menores de tensão, ocorre uma

economia nos equipamentos de distribuição e cabeamento utilizados.

Nos próximos capítulos serão descritas maiores informações acerca das subestações de energia, bem como os equipamentos presentes nestas instalações e suas respectivas funções.

Figura 2 – Subestação de energia.



Fonte: [2]

3.1 TIPOS DE SUBESTAÇÕES

Uma subestação pode ser classificada de acordo com sua função ou sua forma de instalação.

Exemplos de subestações de acordo com sua função são:

- transformadora (elevadora ou rebaixadora);
- seccionadora, de manobra ou de chaveamento;
- de transmissão;

Já no que diz respeito ao tipo de instalação, pode-se citar:

- subestações externas ou ao tempo;
- subestação interna ou abrigada.

Dependendo da instalação, deve-se tomar alguns cuidados no projeto, uma vez que as condições climáticas de operação de ambas as subestações serão distintas.

3.1.1 SUBESTAÇÃO TRANSFORMADORA

É aquela que converte a tensão de suprimento para um nível diferente, maior ou menor, sendo designada, respectivamente, SE transformadora elevadora e SE transformadora abaixadora.

Geralmente, uma subestação transformadora próxima aos centros de geração é uma SE elevadora, que elevam a tensão de geração (até 30 kV), para níveis de transmissão e subtransmissão proporcionando um transporte econômico da energia. Subestações no final de um sistema de transmissão, próximas aos centros de carga, ou de suprimento a uma indústria são SE transformadoras abaixadoras (diminuem os níveis de tensão evitando inconvenientes para a população como rádio-interferência, campos magnéticos intensos e faixas de passagem muito largas).

A energia que propaga através dos cabos das linhas de transmissão emite radiação eletromagnética que pode interferir no desempenho dos equipamentos eletroeletrônicos e de comunicação. Quanto mais elevado for o nível de energia nas linhas de transmissão, maior será a intensidade e o alcance da radiação emitida. Estes níveis de radiação são controlados por normas, visando evitar danos ao ser humano, sendo que se faz necessária a leitura de campo magnético nos trechos onde há linhas de transmissão, ou antenas de telefonia, por exemplo.

3.1.2 SUBESTAÇÃO SECCIONADORA, DE MANOBRA OU CHAVEAMENTO

É aquela que interliga circuitos de suprimento sob o mesmo nível de tensão, possibilitando a sua multiplicação. É também adotada para possibilitar o seccionamento de circuitos, permitindo sua energização em trechos sucessivos de menor comprimento.

3.1.3 SUBESTAÇÃO TRANSMISSORA

A energia trifásica (sinais de tensão e corrente CA) sai do gerador e segue para a subestação de transmissão na usina elétrica. Essa subestação utiliza grandes transformadores para elevar a tensão do gerador (que está em um nível de milhares de volts) até tensões extremamente altas, para a transmissão de longa distância através da rede de transmissão. Este tipo de subestação é composto por uma SE elevadora, citada no subitem 3.1.1.

3.2 EQUIPAMENTOS

A seguir uma descrição breve dos equipamentos que compõem a subestação.

3.2.1 TRANSFORMAÇÃO

Fazem parte da subestação os equipamentos destinados à transformação da energia. Dentre estes, diferem-se em transformadores de força e transformadores de instrumento.

3.2.1.1 TRANSFORMADORES DE FORÇA

Os transformadores de força destinam-se a modificar a amplitude da tensão elétrica gerada, seja por necessidade técnica ou econômica. Tal capacidade possibilitou o aproveitamento maior da energia elétrica, uma vez que foi possível gerar tensões cada vez mais altas, favorecendo a transmissão de energia por longas distâncias.

Estes equipamentos podem ser classificados de acordo com o seu meio isolante, número de fases e tipos de enrolamento [5].

- Meio isolante: Podem ser a óleo mineral ou a seco.
- Número de fases: Podem ser monofásicos ou trifásicos.

Quanto ao enrolamento: Podem ser de dois ou mais enrolamentos, isolados eletricamente um dos outro (primário, secundário e terciário) ou podem ser com um enrolamento com ramificações para obter diferentes níveis de tensões (autotransformador).

A definição do transformador a ser utilizado depende diretamente das características da subestação. Os parâmetros de interesse para o dimensionamento do transformador são potências nominais, tensão de operação e relação de transformação entre a tensão nominal do primário e do secundário. [6]

Figura 3 - Transformador de força



Fonte: <http://cgcnascimento.com.br/index.php?id=produtos-weg&produto=energia-transformadores>.

3.2.1.2 TRANSFORMADORES DE INSTRUMENTOS

Os transformadores de instrumento tem a finalidade de reduzir a tensão ou corrente a valores compatíveis com equipamentos eletrônicos que compõem a estrutura de operação e controle da subestação. Equipamentos como o transformador de potencial (TP) e o transformador de corrente (TC), alteram a magnitude da grandeza em questão, mas não alteram sua frequência e apresentam um erro de fase limitado.

3.2.1.2.1 TRANSFORMADORES DE CORRENTE (TC)

Estes são utilizados para adequar os níveis de corrente de modo a fornecer sinais adequados para equipamentos de medição e proteção. O secundário do TC apresenta um número de espiras tal que a corrente de saída seja 5 A, que é a corrente padronizada pela ABNT.

Os transformadores de corrente podem ser classificados quanto a sua utilização ou sua construção. Com relação a sua utilização, podem ser classificados como TC's de medição ou TC's de proteção.

Como TC's de medição, possuem maior precisão no sinal, aceitando erros de 0,3%, 0,6%, 1,2% e 3%, conforme padrão da ABNT. Este tipo de TC não permite que a corrente de saída ultrapasse o valor nominal.

Como TC's de proteção, possuem sinal de saída não tão preciso, aceitando erros de 5% a 10%, conforme padrão da ABNT. Este tipo de TC permite que o sinal de saída ultrapasse o valor nominal, fazendo com que os equipamentos de proteção atuem.

Quanto a sua construção, podem ser classificados como Tipo primário enrolado, Tipo bucha, Tipo janela, Tipo barra, Tipo com núcleo dividido e Tipo com vários enrolamentos divididos. Cada tipo difere basicamente a forma que os enrolamentos e núcleo estão construídos.

Segundo a ABNT, os valores nominais que caracterizam os TC's são: corrente nominal e relação nominal, classe de tensão de isolamento, frequência nominal, carga nominal, fator de sobrecorrente, classe de exatidão, fator térmico e limites de corrente de curta duração para efeitos térmicos e dinâmicos. A Figura 4 ilustra um TC.

Figura 4 - Transformador de Corrente.



Fonte: https://pt.wikipedia.org/wiki/Transformador_de_corrente.

3.2.1.2.2 TRANSFORMADOR DE POTENCIAL (TP)

Estes dispositivos são aplicados em redes de alta tensão, visando adequar a tensão elétrica a níveis que possibilitem a medição destes sinais. O sinal produzido no secundário dos TP's reproduz as características dos sinais do lado de alta, mantendo o comportamento transitório e de regime permanente. A tensão de saída padronizada nestes equipamentos é de 115V.

Segundo a ABNT, os valores que caracterizam os TP's são: tensão primária nominal e relação nominal, carga nominal, classe de exatidão e potência térmica nominal. A Figura 5 ilustra um TP.

Figura 5 - Transformador de Potencial.



Fonte: <http://www.solucoesindustriais.com.br/empresa/eletricidade-e-eletronica/a-cabine-materiais-eletricos/produtos/eletroeletronica/transformadores-de-corrente-e-potencial>.

3.2.2 MANOBRA

Pode-se citar os disjuntores e as chaves seccionadoras como os dois equipamentos disponíveis para manobra dentro de uma subestação.

3.2.2.1 DISJUNTORES

Os disjuntores visam realizar a manobra na rede elétrica quando esta opera com carga, podendo ser a sua atuação efetuada manual ou automaticamente, de acordo com parâmetros definidos no projeto da subestação. A principal função dos disjuntores é interromper a corrente no circuito quando esta é proveniente de condições anormais do sistema, tais como curto-circuito.

Os disjuntores podem ser classificados quanto à sua construção, meios de interrupção do arco e mecanismo de acionamento. Quanto a sua construção, podem ser de polos juntos ou polos separados. Quanto ao meio de interrupção do arco, podem ser de disjuntores à óleo, disjuntores a ar comprimido, disjuntores a gás SF₆,

disjuntores à vácuo e disjuntor a seco. Já quanto ao mecanismo de acionamento, podem ser por mecanismo manual, ou acionamento à distância, que pode ser por solenoide, motor e mola, pneumático ou hidráulico.

Os parâmetros para dimensionamento dos disjuntores são: tensão nominal, corrente nominal, capacidade de interrupção nominal de curto circuito, capacidade de estabelecimento nominal em curto circuito, duração nominal da corrente de curto-circuito e sequência nominal de operações. [6]

Figura 6 - Disjuntor.



Fonte: Inserir fonte.

3.2.2.2 CHAVES SECCIONADORAS

As chaves seccionadoras são utilizadas para isolar equipamentos ou zonas de barramento, sendo a sua operação efetuada em geral sem carga já que não interrompem arcos voltaicos. Estas chaves podem possuir lâmina de terra, que serve para aterrar o circuito elétrico que está isolado, quando da abertura desta chave.

As chaves seccionadoras são classificadas quanto ao modo de operação e tipo de abertura. Quanto ao modo de operação, podem ser manuais ou motorizadas. Quanto à abertura, podem ser lateral, central, pantográfica, semipantográfica e vertical.

Para a escolha do tipo de seccionadora, são considerados alguns fatores como nível de tensão, esquema de manobra da subestação e limitação da área ou afastamento elétrico.

Para o dimensionamento das chaves seccionadoras são levados em consideração alguns fatores como: tensão nominal, nível de isolamento, tensão

suportável nominal de frequência industrial, tensão nominal suportável de impulso atmosférico, tensão nominal suportável de impulso de manobra, frequência nominal, corrente nominal, sobrecarga contínua, sobre carga de curta duração, corrente nominais de curto-circuito, corrente suportável nominal de curta duração, valor de crista nominal da corrente suportável de curta duração, desempenho dos seccionadores e chaves de terra durante curto-circuito, esforços mecânicos nominais sobre os terminais e capacidade de interrupção e de estabelecimento de corrente dos seccionadores e chaves de terra. [6]

Figura 7 - Chave Seccionadora.



Fonte: <http://pt.sandc.com/products/switching-outdoor-transmission/trans-rupter-transformer-protector.asp..>

3.2.3 PROTEÇÃO CONTRA SURTO

O para-raio tem a finalidade de proteger a instalação contra surtos de tensão oriundos de descargas atmosféricas ou transitórios de sistemas de potência. Este, quando acompanhado de um projeto de aterramento adequado, limita os picos de tensão que poderiam danificar os equipamentos da subestação.

Este equipamento é constituído por um elemento resistivo não linear associado ou não a um centelhador em série. Em operação normal, o para-raios é semelhante a um circuito aberto. Quando ocorre uma sobretensão, o centelhador dispara e uma corrente circula pelo resistor não linear impedindo que a tensão nos seus terminais ultrapasse um determinado valor.

Para dimensionamento do para-raios são considerados os seguintes fatores: tensão nominal, tensão de ruptura sob impulso atmosférico e manobra, corrente de

descarga, corrente subsequente, tensão residual, classe de descarga e frequência nominal [6].

Figura 8 - Para-raio.



Fonte: <http://www.delmar.com.br/rd.asp>.

3.2.4 RELÉS DE PROTEÇÃO

Os relés de proteção detectam anormalidades na rede elétrica e atuar as proteções adequadas para o tipo de anormalidade e dependendo da anormalidade podem promover o desligamento de equipamentos.

Inicialmente o sistema de proteção era composto por relés eletromecânicos, circuitos elétricos e magnéticos. Estes relés ainda são utilizados em subestações mais antigas. Atualmente existem relés digitais que podem efetuar esta função de forma integrada, diminuindo o número de equipamentos destinados à proteção.

Figura 9 - Relé de proteção.



Fonte: <http://www.selinc.com.br/produtos/SEL-311C.aspx>.

As principais funções utilizadas na proteção de uma subestação são:

- Sobrecorrente instantâneo (50)
- Sobrecorrente temporizada (51)
- Sobretensão (59)
- Subtensão (27)
- Diferencial de transformador, gerador e barra (87)
- Direcional (67)
- Relé de religamento (79)
- Relé de Pressão (63)
- Relé de distância (21)
- Relé de Subfrequência (81)
- Relé de sincronismo (25)

A numeração indicada é normalizada pela ANSI (American National Standards Institute).

3.2.5 COMPENSADORES DE REATIVOS

São utilizados bancos de capacitores e reatores com o objetivo de compensação reativa capacitiva gerada no sistema. Com isto, obtém-se uma diminuição nos custos de operação da subestação e uma otimização do sistema, uma vez que o fator de potência da instalação se enquadra em limites adequados.

3.2.5.1 CAPACITORES EM DERIVAÇÃO E EM SÉRIE

Estes capacitores são utilizados para diminuir a reatância série das linhas e a distância elétricas entre as barras terminais. As vantagens desta instalação são o aumento da capacidade de transmissão de potência da linha, aumento da estabilidade do sistema, melhor divisão de potência entre as linhas e economia de custos.

Figura 10 - Banco de capacitores



Fonte: <http://www.ebah.com.br/content/ABAAA5QcAG/banco-capacitores>

4 ATERRAMENTO ELÉTRICO

O termo aterramento se refere à terra propriamente dita ou a uma grande massa que se utiliza em seu lugar. O termo “aterrado”, significa que um dos elementos de algum objeto está ligado à terra.

O condutor de aterramento é o responsável por escoar a corrente elétrica de equipamentos e sistemas, pois toda a corrente que por ele circula é descarregada para a terra e tem por objetivo manter a tensão em relação a terra dentro de limites previsíveis.

Para os sistemas de energia funcionarem, não é obrigatória a presença de sistemas de aterramento, mas são fundamentais para garantir condições de operação contínua, atuação correta do sistema de proteção e níveis de segurança pessoal.

Os objetivos principais do aterramento elétrico são [1]:

- Obter uma resistência de aterramento a mais baixa possível, a fim de fornecer um caminho definido para correntes de falta à terra;
- Manter os potenciais elétricos produzidos por correntes de falta a terra dentro de padrões pré-estabelecidos para garantir a segurança do ser humano;

- Otimizar o funcionamento dos equipamentos de proteção, tornando-os mais sensíveis aos distúrbios no sistema de energia elétrico;
- Proporcionar um caminho de escoamento à terra para descargas atmosféricas;
- Evitar acidentes devido às correntes estáticas armazenadas nas carcaças dos equipamentos.

4.1 PARÂMETROS IMPORTANTES NO PROJETO DE ATERRAMENTO

Ao desenvolver um estudo sobre determinado assunto, deve-se entender quais são os parâmetros de interesse, tanto aqueles que fornecerão os dados necessários para elaboração do estudo quanto aqueles que representarão a solução do problema em questão. Com o projeto de uma malha de aterramento não é diferente, sendo alguns destes parâmetros listados a seguir [1] [8]:

- Corrente elétrica tolerável pelo ser humano;
- Resistividade do solo;
- Resistividade aparente do solo;
- Corrente de curto-circuito máxima entre a fase e a terra;
- Potenciais de passo e toque;
- Tempo de defeito para a máxima corrente de curto-circuito;
- Área da malha.

4.1.1 CARACTERÍSTICAS DO TERRENO

As características do terreno onde se encontra o sistema elétrico a ser aterrado são importantes para o desenvolvimento do projeto, pois definem valores utilizados diretamente nos cálculos da malha de terra. A principal característica é a resistividade elétrica do solo, uma vez que este pode ser considerado um condutor por onde a corrente elétrica pode dissipar-se.

A resistividade do solo pode variar muito de acordo com as características principais de cada solo. Entre os fatores destacam-se:

- Tipo de solo;
- Composição
- Estratificação;
- Teor de umidade;
- Temperatura;
- Composição química e concentração de sais dissolvidos na água.

O Quadro 1 exemplifica alguns tipos de solo e suas respectivas resistividades.

Quadro 1 - Tipos de solo e suas respectivas resistividades

TIPO DE SOLO	RESISTIVIDADE ($\Omega.m$)
Lama	5 a 100
Terra de jardim com 50% de umidade	140
Terra de jardim com 20% de umidade	480
Argila seca	1500 a 5000
Argila com 40% de umidade	80
Argila com 20% de umidade	330
Areia molhada	1300
Areia seca	3000 a 8000
Calcário Compacto	1000 a 5000
Granito	1500 a 10000

Fonte: [8].

4.1.1.1 INFLUÊNCIA DA UMIDADE

A condução de cargas elétricas no solo é predominantemente iônica. Com o aumento da umidade, os sais presentes no solo se dissolvem, formando um meio eletrolítico favorável à condução da corrente iônica. Desta forma, em um solo específico, a alteração da umidade influencia diretamente na resistividade. O Quadro 2 a seguir ilustra este comportamento em solo arenoso.

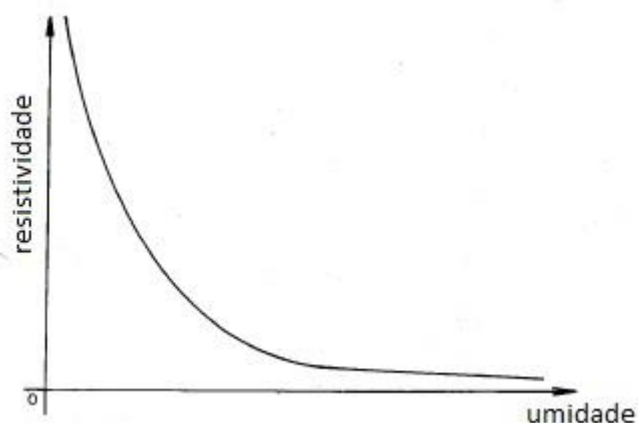
Quadro 2 - Valores de resistividade do solo em função da umidade.

Índice de Umidade (% por peso)	Resistividade ($\Omega.m$)
0,0	10000000,0
2,5	1500,0
5,0	430,0
10,0	185,0
15,0	105,0
20,0	63,0
30,0	42,0

Fonte: [8].

Percebe-se que em função da umidade a resistividade do solo varia significativamente. Desta forma, é importante levar em consideração esta variação no momento de dimensionar o projeto de aterramento.

Figura 11 - Resistividade x Umidade Percentual do solo.



Fonte: [8].

4.1.1.2 INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA

Considerando um solo arenoso em questão, mantendo todos os parâmetros constantes e alterando somente a temperatura do solo, a resistividade varia conforme o Quadro 3.

Quadro 3 - Valores de resistividade do solo em função da temperatura.

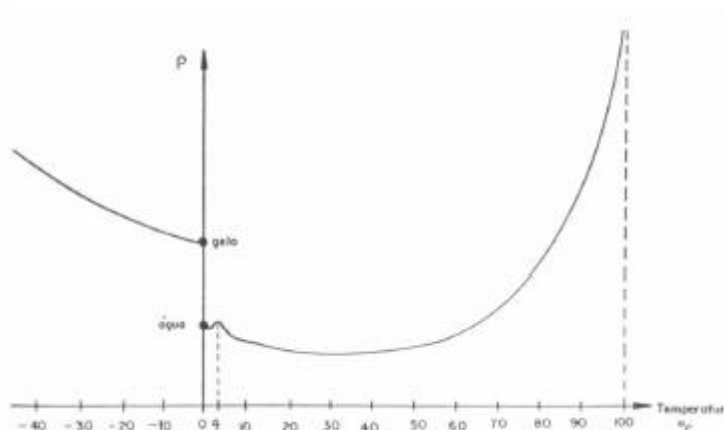
Temperatura (°C)	Resistividade ($\Omega.m$)
20	72
0 (água)	138
0 (gelo)	300
-5	790
-15	3300

Fonte: [8].

Para temperaturas mais baixas, ocorre uma contração e aglutinação da água, o que dispersa as ligações iônicas entres os grânulos de terra, aumentando a sua resistividade. No ponto de mudança do estado da água entre o líquido e o sólido (0°C), ocorre uma descontinuidade na resistividade do solo devido a mudança brusca nas ligações eletrolíticas do solo. Para temperaturas inferiores a 0°C, o solo se torna mais seco, o que aumenta sua resistividade.

Considerando temperaturas elevadas, a resistividade do solo tende a aumentar devido a vaporização da água, deixando o solo mais seco e dificultando a condução de corrente. A Figura 12 ilustra este comportamento.

Figura 12 - Resistividade x Temperatura



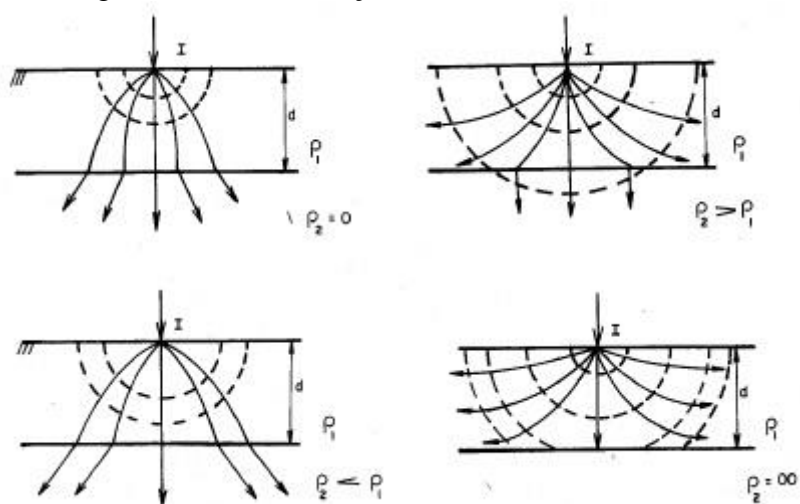
Fonte: [8]

4.1.1.3 INFLUÊNCIA DA ESTRATIFICAÇÃO DO SOLO

Os solos, na sua grande maioria, não são homogêneos, mas formados por diversas camadas de resistividade e profundidade diferentes. Devido à formação geológica, estas camadas são geralmente horizontais e paralelas ao solo.

A estratificação do solo visa criar um meio homogêneo em torno do aterramento, de modo a prever o comportamento dos fluxos de dispersão na área de interesse. A Figura 13 ilustra o fluxo de dispersão num solo heterogêneo. As linhas pontilhadas são as superfícies equipotenciais, e as linhas cheias representam as correntes elétricas fluindo do solo.

Figura 13 - Estratificação do solo em duas camadas.



Fonte: [8].

4.2 O EFEITO DA CORRENTE ELÉTRICA NO SER HUMANO

A corrente elétrica, através do corpo humano, tem seus efeitos relacionados à duração, à magnitude e à frequência associados a esta corrente [3]. Quando se estabelece uma diferença de potencial entre dois pontos do corpo humano, flui uma corrente elétrica entre estes pontos e a intensidade desta corrente depende da diferença de potencial e da resistência elétrica entre os pontos pelo qual se aplica a tensão elétrica.

O ser humano percebe a corrente elétrica em seu corpo a partir de 1mA. Com correntes superiores a 10mA os músculos se contraem, o que dificulta, por exemplo, a movimentação para se liberar da fonte de energia que ocasionou o choque. Correntes próximas de 20mA tornam difícil a respiração, que pode cessar com correntes que chegam a 80mA. As correntes elétricas que chegam a matar são aquelas compreendidas entre 100 e 200 mA, devido ao fato destas causarem o movimento descoordenado do coração, efeito chamado de fibrilação. Um fato curioso é que as correntes acima de 200 mA possuem menor probabilidade de matar, pois correntes desta magnitude tendem a paralisar o coração, o que aumenta a chance de sobrevivência.

Estudos realizado por Charles Dalziel concluem que, 99,5% das pessoas suportam a passagem da corrente elétrica, sem fibrilação ventricular, para correntes com magnitude e duração dadas pela Equação 1 [3]:

$$I_B = \frac{k}{\sqrt{t_s}} \quad (1)$$

Onde,

I_b = Valor eficaz da corrente elétrica do corpo, [A]

t_s = Tempo da passagem da corrente elétrica através do corpo, [s], sendo que

$$0,03 \text{ s} \leq t_s \leq 3,0 \text{ s}$$

k = Constante empírica, relacionada à massa do ser humano, tal que:

$$k = 0,116 \left[\text{As}^{\frac{1}{2}} \right] \text{ para pessoas com massa de } 50 \text{ kg}$$

$$k = 0,157 \left[\text{As}^{\frac{1}{2}} \right] \text{ para pessoas com massa de } 70 \text{ kg}$$

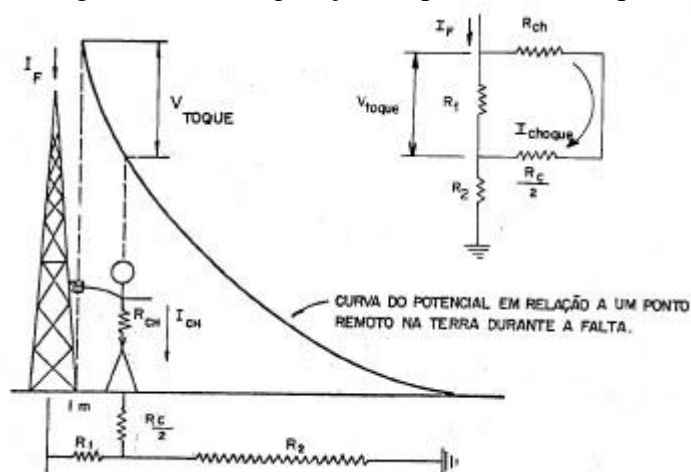
Para manter os níveis de segurança para os equipamentos e principalmente para as pessoas, são calculados o Potencial de Toque e Potencial de Passo, com base nas informações de corrente elétrica tolerável mencionada anteriormente.

4.2.1 POTENCIAL DE TOQUE

É a diferença de potencial entre o ponto da estrutura metálica, situado ao alcance da mão de uma pessoa, e um ponto no chão situado a 1m da base da estrutura. Para manter a integridade da pessoa, o potencial máximo gerado por um aterramento durante o período de defeito, não deve exceder aquele limitado por Dalziel [8].

Com base na Figura 14, pode-se obter a expressão que descreve o potencial de toque com relação à corrente elétrica de choque.

Figura 14 - Configuração no potencial de toque.



Fonte: [8].

A expressão do potencial de toque pode ser escrita como:

$$V_{toque} = (1000 + 1,5 \times \rho_s \times C) \times I_{choque} \quad (2)$$

Onde:

R_{ch} = Resistência do corpo humano considerada 1000 Ω .

R_c = Resistência de contato que pode ser considerada igual a $3\rho_s$ (resistividade superficial do solo), de acordo com a recomendação da IEEE – 80 [4].

I_{choque} = Corrente de choque pelo corpo humano.

R_1 e R_2 = Resistências dos trechos de terra considerados.

ρ_s = Resistividade da solo [Ωm]

C = Fator de redução que depende da camada de recobrimento

Considerando a Equação 1, que define a corrente limite de Dalziel, a expressão em função do potencial de toque máximo é:

$$V_{\text{toque máximo}} = (1000 + 1,5 \times \rho_s \times C) \times \frac{0,116}{\sqrt{t}} \quad (3)$$

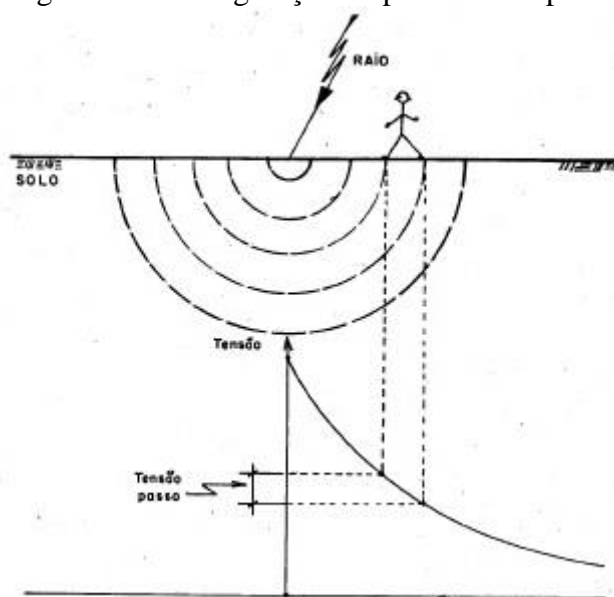
4.2.2 POTENCIAL DE PASSO

O Potencial de Passo é a diferença de potencial entre os dois pés do indivíduo, distanciados 1 m. Esta diferença de potencial aparece quando os membros de apoio (pés) estiverem sobre linhas equipotenciais distintas.

Estas linhas equipotenciais se formam quando do escoamento no solo da corrente de curto circuito. Se por algum motivo, no momento do escoamento da corrente de curto circuito, o indivíduo estiver com ambos os pés no mesmo ponto, ou apoiado por somente um membro, este não estará sujeito ao Potencial de Passo [8].

A Figura 15 mostra o potencial de passo devido a queda de um raio.

Figura 15 - Configuração no potencial de passo.



Fonte: [8].

Visando aumentar a segurança na área da subestação, geralmente recobre-se o solo com uma camada de brita, devido a sua alta resistividade. Para o cálculo dos

potenciais é usado o valor da resistividade da brita (ρ_s) úmida.

$$\rho_s = 3000 \Omega m$$

Esta camada de brita representa uma estratificação adicional com a camada superficial do solo. Portanto, deve-se fazer uma correção, utilizando o fator de redução, que é dado, de forma simplificada, por [8]:

$$C \cong 1 - a \times \left[\frac{1 - \frac{\rho_1}{\rho_s}}{2 \times h_s + a} \right] \quad (4)$$

Onde:

$$a = 0,106 \text{ m}$$

ρ_1 = Resistividade da primeira camada (Ωm)

ρ_s = Resistividade do recobrimento da camada superficial (Ωm)

h_s = Espessura da camada de recobrimento superficial (m)

O potencial de passo é definido pela Equação 5:

$$V_{passo} = (1000 + 6 \times \rho_s \times C) \times I_{choque} \quad (5)$$

Da mesma forma que para o potencial de toque, considerando os resultados das pesquisas de Charles Dalziel, o potencial de passo máximo é:

$$V_{passo \text{ máximo}} = (1000 + 6 \times \rho_s \times C) \times \frac{0,116}{\sqrt{t}} \quad (6)$$

Onde,

ρ_s = Resistividade da solo [Ωm]

I_{choque} = Corrente de choque pelo corpo humano

C = Fator de redução que depende da camada de recobrimento

4.3 MEDIÇÃO DA RESISTIVIDADE DO SOLO

Os métodos de medição da resistividade do solo são resultados da análise de características práticas das equações de Maxwell do eletromagnetismo, aplicadas no solo. Um solo apresenta uma resistividade que depende do tamanho do sistema de aterramento. A dispersão de correntes elétricas atinge camadas profundas com o aumento da área envolvida pelo aterramento.

Para se efetuar o projeto do sistema de aterramento, deve-se conhecer a resistividade aparente que o solo apresenta. O levantamento dos valores de resistividade é feito através de medições em campo, utilizando-se métodos de prospecção geoeletricos.

Existem diversos métodos para levantar a curva de resistividade do solo no local do aterramento, dentre quais:

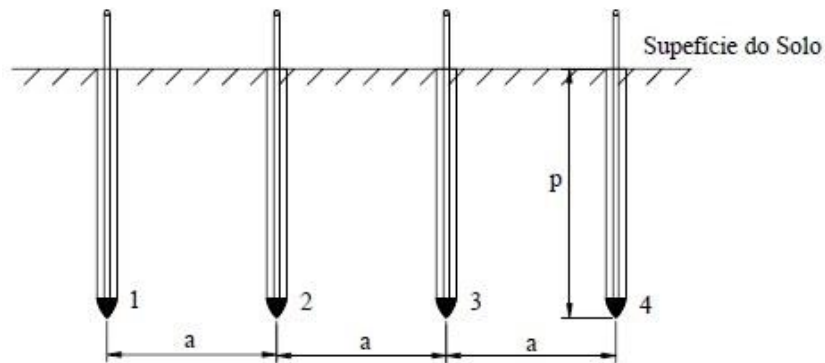
- Método de Wenner;
- Método de Lee;
- Método de Schlumberger – Palmer

Será tomado como base neste estudo o método de Wenner.

4.3.1 CONCEITO TEÓRICO DO MÉTODO DE WENNER

Este método consiste em utilizar quatro pontos alinhados, igualmente espaçados, cravados a uma mesma profundidade. A Figura 16 ilustra o procedimento.

Figura 16 - Aplicação do método de Wenner.

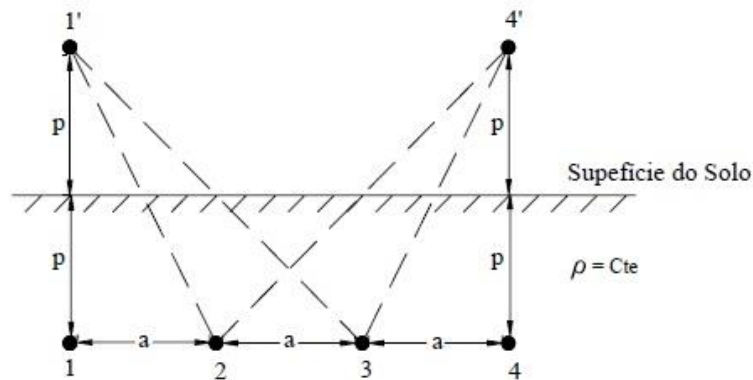


Fonte: [8].

Uma corrente I é injetada no ponto 1 pela primeira haste e coletada no ponto 4 pela última haste. Esta corrente gera potenciais nos pontos 2 e 3, que são obtidos utilizando o método das imagens. A seguir as equações que definem os potenciais nos pontos 2 e 3 [11].

$$V_2 = \frac{\rho I}{4\pi} \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{\sqrt{a^2 + (2p)^2}} - \frac{1}{2a} - \frac{1}{\sqrt{(a^2)^2 + (2p)^2}} \right) \quad (7)$$

Figura 17 - Projeção dos potenciais nos pontos 2 e 3.



Fonte: [11].

O potencial no ponto 3 é dado por:

$$V_3 = \frac{\rho I}{4\pi} \left(\frac{1}{2a} + \frac{1}{\sqrt{2a^2 + (2p)^2}} - \frac{1}{a} - \frac{1}{\sqrt{a^2 + (2p)^2}} \right) \quad (8)$$

Com isto, a diferença de potencial entre os pontos 2 e 3 é:

$$V_{23} = V_2 - V_3 = \frac{\rho I}{4\pi} \left(\frac{1}{a} + \frac{2}{\sqrt{a^2 + (2p)^2}} - \frac{2}{\sqrt{(2a)^2 + (2p)^2}} \right) \quad (9)$$

Desta forma, dividindo a diferença de potencial nos pontos 2 e 3 pela corrente I

aplicada na primeira haste, obtém-se o valor da resistência elétrica R no solo a uma profundidade aceitável de penetração da corrente I [11].

$$R = \frac{V_{23}}{I} = \frac{\rho}{4\pi} \left(\frac{1}{a} + \frac{2}{\sqrt{a^2+(2p)^2}} - \frac{2}{\sqrt{(2a)^2+(2p)^2}} \right) \quad (10)$$

Isolando a resistividade elétrica ρ obtém-se:

$$\rho = \frac{4\pi a R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2+(2p)^2}} - \frac{2a}{\sqrt{(2a)^2+(2p)^2}}} \quad [\Omega \cdot m] \quad (11)$$

A Equação 11 é conhecida como método de Palmer, e é usada no método de Wenner. Recomenda-se que [11]:

$$\text{Diâmetro da haste} \leq 0,1a$$

Para um afastamento entre as hastes relativamente grande, isto é, $a > 20p$, a fórmula de Palmer se reduz a:

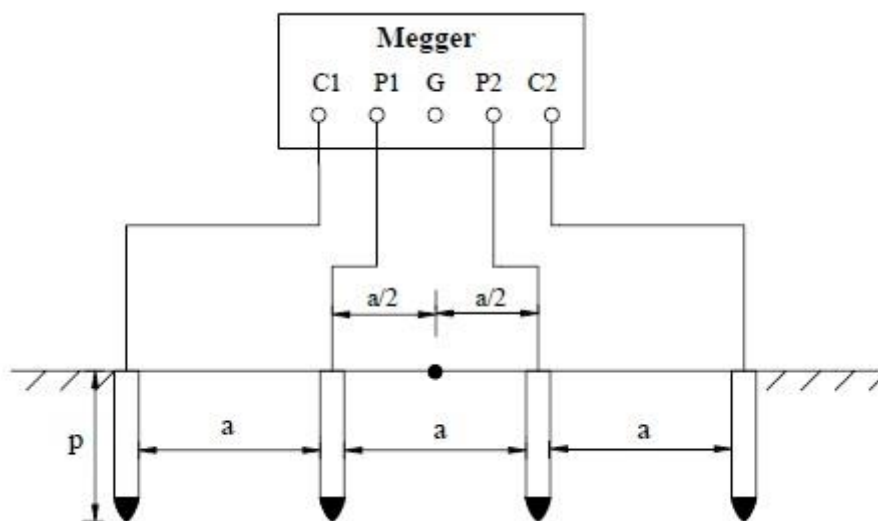
$$\rho = 2\pi a R \quad [\Omega \cdot m] \quad (12)$$

4.3.2 MEDIÇÃO PELO MÉTODO DE WENNER

O método utiliza um instrumento de medida de resistividade que possui quatro terminais, dois de tensão e dois de corrente.

O aparelho utiliza uma fonte interna para fazer circular uma corrente I entre seus terminais externos C_1 e C_2 .

Figura 18 - Instrumento de medição de resistividade.



Fonte: [11].

C_1 = Conector 1 de corrente elétrica;

C_2 = Conector 2 de corrente elétrica;

P_1 = Conector 1 de potencial elétrico;

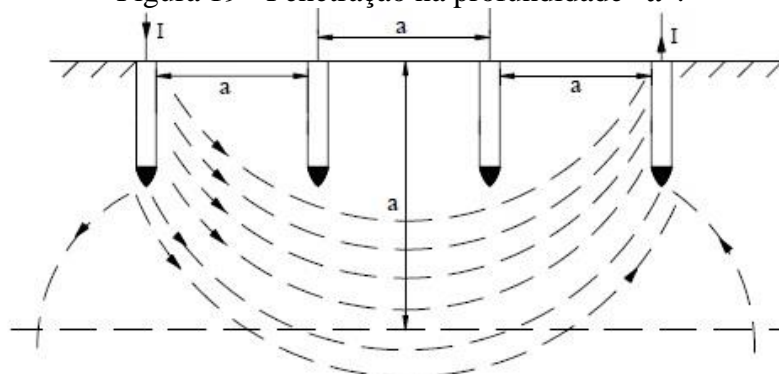
P_2 = Conector 2 de potencial elétrico;

a = Espaçamento das hastes cravadas no solo;

p = Profundidade da haste cravada no solo.

O método considera que praticamente 58% da distribuição de corrente que passa pelas hastes externas ocorre a uma profundidade igual ao espaçamento das hastes.

Figura 19 - Penetração na profundidade "a".



Fonte: [11].

As correntes que atingem uma profundidade maior que a especificada pelo método de Wenner, tem por consequência uma grande área de dispersão, e desta forma seu efeito pode ser desconsiderado. Portanto, para o método de Wenner o valor de resistência considerado é o medido a uma profundidade "a" do solo.

As hastes usadas no método devem ter aproximadamente 50cm de comprimento com diâmetro entre 10 a 15mm. Devem ser feitas diversas leituras para vários espaçamentos, com hastes sempre alinhadas.

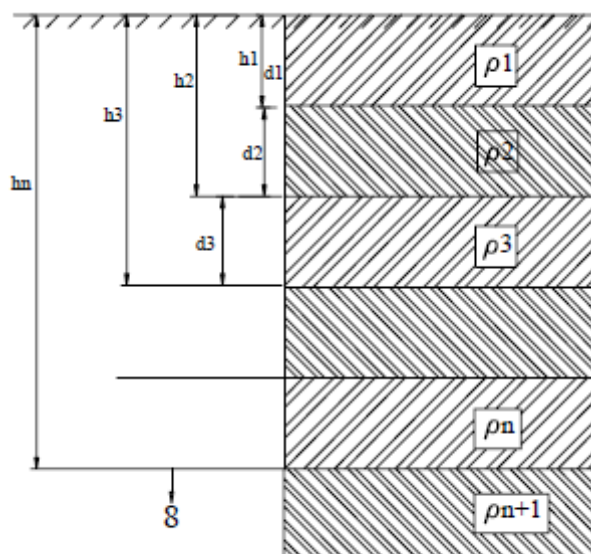
4.4 ESTRATIFICAÇÃO DO SOLO

Com base na curva $\rho \times a$ obtida pelo método de Wenner é possível aplicar métodos de estratificação do solo, entre os quais:

- Método de Estratificação de Duas Camadas;
- Método de Pirson;
- Método Gráfico.

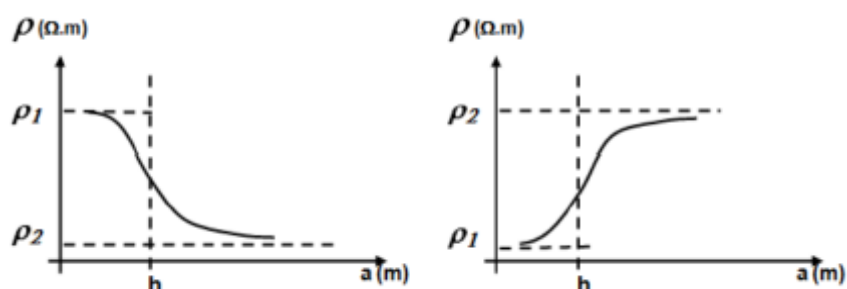
A Figura 20 apresenta um solo estratificado em n camadas.

Figura 20 - Solo estratificado



Fonte: [11].

O método da Estratificação em Duas Camadas é comumente utilizado e será analisado neste estudo. Para tal, o solo deve permitir a estratificação em duas camadas, bem como a curva $\rho \times a$ seja descendente ou ascendente, conforme Figura 21.

Figura 21 - Curva $\rho \times a$ descendente e ascendente.

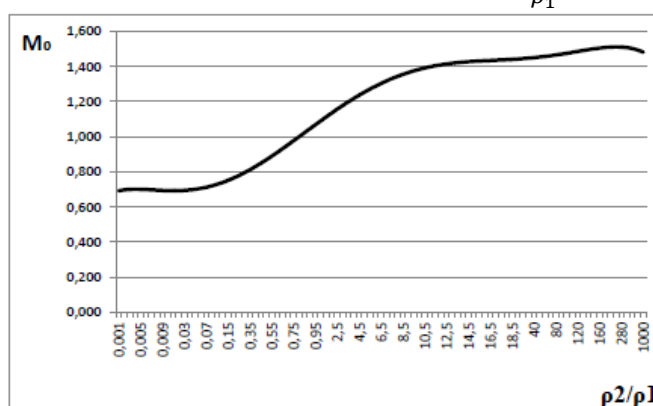
Fonte: [8].

A estratificação do solo pode ser obtida seguindo as etapas a seguir [4], [8], [11] e [12].

- Passo 1: Traçar em um gráfico a curva $\rho \times a$ obtida pelo método de Wenner;
- Passo 2: Prolongar a curva $\rho \times a$ até cortar o eixo das ordenadas, obtendo diretamente o valor de ρ_1 , que é a resistividade da primeira camada;

- Passo 3: Traçar uma assíntota no final da curva $\rho \times a$ até o eixo das ordenadas, obtendo diretamente o valor de ρ_2 , que é a resistividade da segunda camada;
- Passo 4: Com a relação $\frac{\rho_2}{\rho_1}$, determinar o valor de M_0 na Figura xx;
- Passo 5: Calcular $\rho(a = h) = \rho_1 \times M_0$;
- Passo 6: Com o valor de $\rho(a = h)$ verificar a curva de resistividade e determinar a profundidade h .

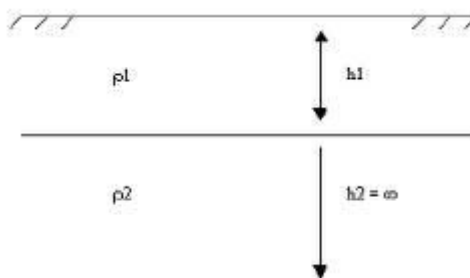
Figura 22 - M_0 em função de $\frac{\rho_2}{\rho_1}$



Fonte: [6].

Sendo conhecida a resistividade da primeira e segunda camada, representadas por ρ_1 e ρ_2 , respectivamente, bem como a profundidade h da primeira camada, define-se a estratificação do solo pelo Método da Estratificação em Duas Camadas.

Figura 23 - Solo estratificado em duas camadas.



Fonte: [8].

4.5 RESISTIVIDADE APARENTE DO SOLO

Um solo com várias camadas apresenta resistividade diferente para cada tipo de sistema de aterramento. A passagem da corrente elétrica do sistema de aterramento para o solo depende: [8]

Da composição do solo com suas respectivas camadas;

Da geometria do sistema de aterramento;

Do tamanho do sistema de aterramento.

Desta forma, a resistividade aparente representa a integração dos fatores listados acima no que diz respeito à resistividade do solo no local.

A resistência elétrica de um sistema de aterramento pode ser definida pela Equação 13:

$$R_{aterramento} = \rho_a \times f(g) \quad (13)$$

Onde:

$R_{aterramento}$ = Resistência elétrica do sistema de aterramento

ρ_a = Resistividade aparente

$f(g)$ = Função que depende da geometria do sistema e da forma de colocação no solo

Dito isto, a seguir são obtidos os coeficientes que permitem obter a resistividade aparente do solo.

4.5.1 COEFICIENTE DE PENETRAÇÃO

O coeficiente de penetração (α) indica o grau de penetração das correntes escoadas pelo aterramento no solo equivalente. É dado por [8]:

$$\alpha = \frac{r}{h} \quad (14)$$

Onde:

r = Raio do anel equivalente do sistema de aterramento considerado.

h = Profundidade da primeira camada.

4.5.2 COEFICIENTE DE DIVERGÊNCIA

O coeficiente de divergência (β), para solo de duas camadas, é definido pela relação entre a resistividade da última camada e a resistividade da primeira camada equivalente. É dado por [8]:

$$\beta = \frac{\rho_2}{\rho_1} \quad (15)$$

Onde:

ρ_1 = Resistividade da primeira camada equivalente.

ρ_2 = Resistividade da última camada.

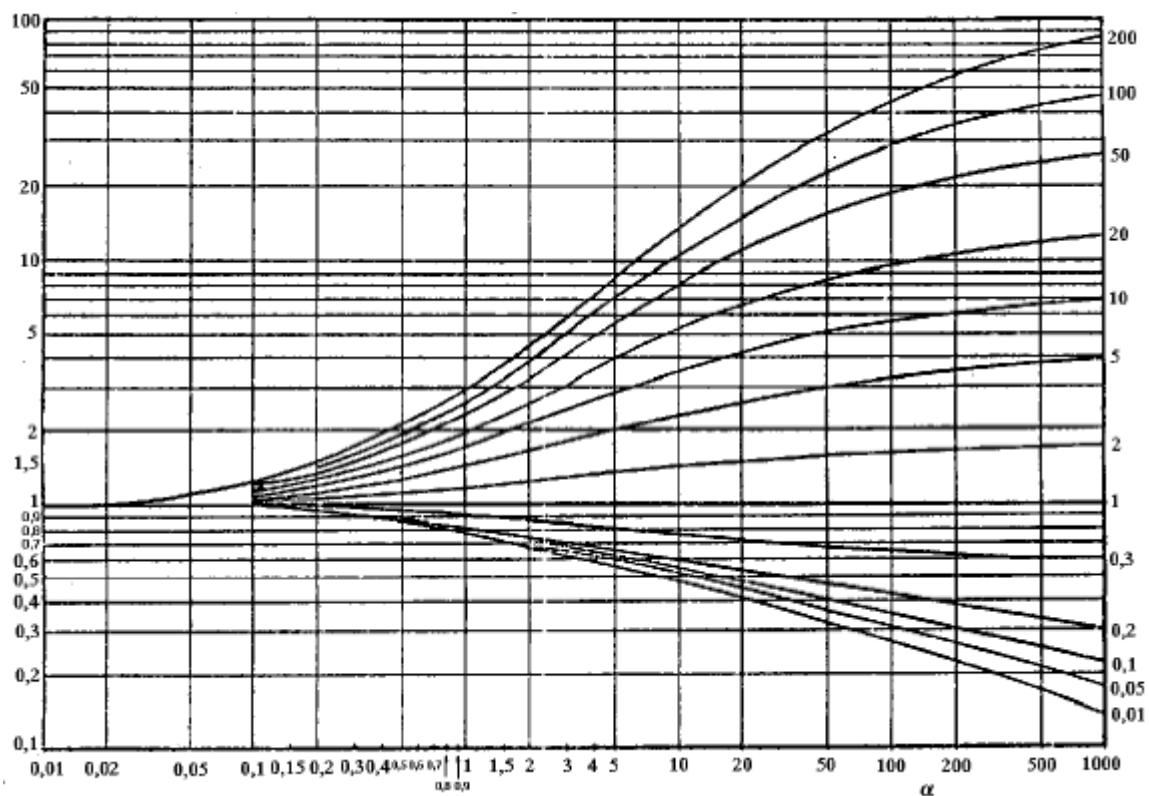
4.5.3 RESISTIVIDADE APARENTE PARA SOLO EM DUAS CAMADAS

Com os parâmetros obtidos, pode-se determinar a resistividade aparente do solo em duas camadas, definido pela Equação 16:

$$N = \frac{\rho_a}{\rho_1} \quad (16)$$

O valor de N é obtido utilizando a curva de resistividade aparente da Figura 24, onde o coeficiente de penetração α será o ponto no eixo das abscissas e o coeficiente de divergência β será o ponto no eixo das ordenadas.

Figura 24 - Curva de resistividade aparente para solo de duas camadas.



Fonte: Inserir fonte.

Desta forma, tem-se:

$$\rho_a = \rho_1 \times N \quad (17)$$

Onde:

ρ_a = Resistividade aparente do solo [$\Omega \cdot m$]

ρ_1 = Resistividade da primeira camada equivalente [$\Omega \cdot m$]

5 LIGAÇÃO À TERRA

A ligação a terra visa conectar os equipamentos presentes na instalação à malha de aterramento, propiciando um caminho adequado para o escoamento de correntes elétricas provenientes de curto-circuito. Quando da ocorrência de faltas no sistema, a proteção deve atuar rapidamente, evitando acidentes e demais perturbações.

Porém, enquanto a proteção não atua, a corrente que circula pelo solo gera potenciais de toque e passo, mencionados no capítulo 4. Desta forma, a ligação à terra dos equipamentos deve ser efetuada da maneira mais adequada possível, a fim de sensibilizar a proteção e de manter os potenciais de toque e passo dentro de limites adequados.

Fatores como a importância do sistema de energia, local e custo influenciam na escolha do sistema. O sistema mais eficiente, e que será utilizado neste estudo, é a malha de aterramento.

5.1 MALHA DE ATERRAMENTO

O primeiro ponto no dimensionamento da malha de aterramento consiste em definir uma geometria adequada para a malha, de tal modo a abranger no mínimo a área da SE. Uma vez escolhida a área a ser abrangida pela malha, cumpre determinar uma configuração inicial para o lançamento dos eletrodos que a constituirão. O critério de definição da geometria inicial da malha deve considerar a distribuição dos equipamentos e edificações existentes no interior da área em questão. [9]

Dentre as características de geometria básica de uma malha de aterramento de subestação, cabe citar:

- Profundidade de enterramento mínima de 0,5m, recomendado por razões mecânicas, sendo admitida uma profundidade mínima de 0,25m em área de piso concretado ou devido a um substrato rochoso muito superficial;

- Condutor periférico no entorno das edificações.

5.1.1 CONDUTOR DE ATERRAMENTO

O dimensionamento do condutor de aterramento leva em consideração os esforços mecânicos, térmicos, de compressão e cisalhamento ao qual este será submetido.

5.1.1.1 DIMENSIONAMENTO MECÂNICO

Uma fonte de esforço mecânico que pode danificar o cabo de aterramento é a movimentação do solo e dos veículos que transportam os equipamentos durante a montagem da subestação [8]. Há uma definição de bitolas mínimas de acordo com o material empregado.

- Cobre: Bitola mínima 50mm²;
- Aço (protegido contra corrosão de acordo com as normas aplicáveis: 38mm² (5/16”).

5.1.1.2 DIMENSIONAMENTO TÉRMICO

Os esforços térmicos aos quais o condutor de aterramento é submetido são provenientes da passagem da corrente de defeito no condutor. Como esta corrente é da magnitude de milhares de Amperes, o aquecimento gerado no condutor é um ponto fundamental no dimensionamento do sistema de aterramento, visando prever uma estrutura capaz de suportar estas condições.

Segundo a Norma IEEE 80-2013 [4], o dimensionamento do condutor de aterramento com base nos esforços térmicos pode ser definido pela Equação 18.

$$S = I_{cc} \cdot \frac{1}{\sqrt{\frac{TCAP \cdot 10^{-4}}{t_c \times \alpha_r \times \rho_r} \times \ln\left(\frac{K_0 + T_m}{K_0 + T_a}\right)}} \quad (18)$$

Onde:

S = Seção do condutor de aterramento [mm²]

I_{cc} = Corrente de curto circuito [kA]

T_m = Temperatura máxima [°C]

T_a = Temperatura ambiente [°C]

t_c = tempo de duração da corrente de falta [s]

$TCAP$ = Capacidade térmica por volume unitário [$\frac{J}{cm^3 \cdot ^\circ C}$]

α_r = Coeficiente térmico de resistividade para temperatura de referência [$\frac{1}{^\circ C}$]

ρ_r = Resistividade do solo para temperatura de referência [$\mu\Omega \cdot cm$]

$K_0 = \frac{1}{\alpha_0}$ [°C]

A Equação 18 contempla fatores relacionados à corrente, temperatura, resistividade e características do material do condutor. Este último é representado pelo TCAP, que é obtido em tabelas com características do material condutor.

O Quadro 4 apresenta parâmetros dos tipos de condutores mais utilizados em malhas de aterramento.

Quadro 4 - Parâmetros de condutores utilizados em malhas de aterramento.

Tipo do condutor	Condutância %	Coeficiente térmico de resistividade		Temperatura de fusão ^a (°C)	Resistividade ρ_r (20 °C)	TCAP [J/(cm ³ ×°C)]
		α_0 (0 °C)	α_r (20 °C)			
Cobre (macio)	100,0	0,004 27	0,003 93	1 083	1,724	3,422
Cobre (duro)	97,0	0,004 13	0,003 81	1 084	1,777	3,422
Aço cobreado 40%	40,0	0,004 08	0,003 78	1 084	4,397	3,846
Aço cobreado 30%	30,0	0,004 08	0,003 78	1 084	5,862	3,846
Haste de aço cobreado ^a	20,0	0,004 08	0,003 78	1 084	8,62	3,846
Fio de alumínio	61,0	0,004 39	0,004 03	657	2,862	2,556
Liga de alumínio 5005	53,5	0,003 80	0,003 53	660	3,222	2,598
Liga de alumínio 6201	52,5	0,003 73	0,003 47	660	3,284	2,598
Aço-alumínio	20,3	0,003 88	0,003 60	660	8,480	2,670
Aço 1020	10,8	0,001 65	0,001 60	1 510	15,90	3,28
Haste de aço ^b	9,8	0,001 65	0,001 60	1 400	17,50	4,44
Aço zincado	8,5	0,003 41	0,003 20	419	20,1	3,931
Aço inoxidável 304	2,4	0,001 34	0,001 30	1 400	72,0	4,032

^a Aço cobreado baseado em uma espessura de 254 μm de cobre.

^b Aço inoxidável baseado em 508 μm n° 304 de espessura sobre o aço 1020.

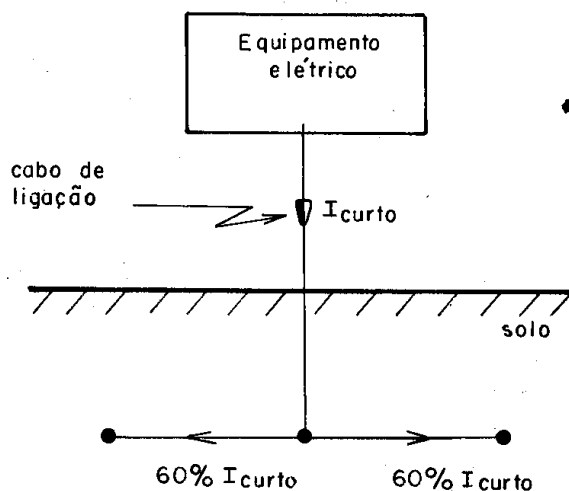
Fonte: [9].

Segundo as normas técnicas brasileiras, o diâmetro mínimo de um cabo de aterramento de uma subestação deve ser 50mm², mesmo que os cálculos indiquem um diâmetro menor. Mesmo assim, algumas concessionárias possuem normas mais rígidas visando a segurando, como por exemplo, a CEEE (Concessionária Estadual de Energia elétrica), que utiliza um diâmetro mínimo de 70mm².

5.1.2 CONDUTOR DA MALHA

A corrente que percorre o cabo de ligação é a corrente máxima de curto circuito. Porém, esta corrente se dividirá na malha proporcionalmente às resistências equivalentes no ponto de injeção de corrente. Com isto, é possível dimensionar condutores de malha menores que o condutor de ligação. A Figura 25 ilustra esta situação.

Figura 25 - Corrente no condutor de ligação e no condutor da malha.



Fonte: [8].

Considerando a situação ideal em que a resistência da malha é a mesma em todos os pontos, pode-se pensar que a corrente de curto que chega pelo cabo de ligação se dividirá em 50% para cada lado. Para fins de dimensionamento, considera-se um acréscimo de 10%, isto é:

$$I_{cc \text{ malha de aterramento}} = 60\% \times I_{cc \text{ máxima}} \quad (19)$$

O Quadro 5 apresenta a secção do condutor adequada para variados níveis de corrente de curto, em função do tempo de defeito e do tipo de emenda.

Quadro 5 - Dimensionamento do condutor da malha e cabo de ligação.

Capacidade do Condutor de Cobre em $\frac{mm^2}{kA}$			
Tempo de Defeito (Segundos)	Condutor 97% Cu		
	Solda Exotérmica	Solda Convencional	Juntas Cavilhadas
0,5	2,44	3,20	4,05
1	3,45	4,51	5,78
4	6,84	9,07	11,50
30	18,74	24,83	31,52

Fonte: [8].

5.2 POTENCIAL NA MALHA

Devido à interação entre os condutores no interior da malha, a corrente de defeito é forçada a escoar para os cantos da malha, sendo encontrados nesta região os potenciais máximos.

O Potencial de toque máximo na malha é obtido através da Equação 20 [8].

$$V_{\text{toque na malha}} = \frac{\rho_a \times k_m \times k_i \times I_{\text{malha}}}{L_{\text{total}}} \quad (20)$$

Onde,

k_m = coeficiente de malha, que considera a profundidade da malha, diâmetro do condutor e do espaçamento entre os condutores.

Este parâmetro pode ser obtido através de Equação 21 [8]

$$k_m = \frac{1}{2\pi} \left\{ \ln \left[\frac{e^2}{16hd} + \frac{(e+2h)^2}{8ed} - \frac{h}{4d} \right] + \frac{k_{ii}}{k_h} \ln \frac{8}{\pi(2N-1)} \right\} \quad (21)$$

h = Profundidade da malha [m]

e = Espaçamento entre os condutores paralelos [m]

d = Diâmetro do condutor da malha [m]

$N = \sqrt{N_a N_b}$ = Transforma a malha retangular numa malha quadrada com N condutores paralelo

$k_{ii} = 1$ = Para malha com hastes cravadas ao longo do perímetro

k_h = Correção de profundidade

$$k_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_0}}$$

Onde,

$$h_0 = 1 \text{ m}$$

O parâmetro k_i é o coeficiente de irregularidade da malha, que considera os efeitos da não uniformidade da distribuição de corrente da malha. É representada pela Equação 22. [8]

$$k_i = 0,656 + 0,172N \quad (22)$$

Os demais termos da Equação 20 são:

ρa = resistividade aparente do solo

I_{malha} = Parcela da corrente de falta que circula pela malha

L_{total} = Comprimento total dos condutores da malha

Hastes colocadas na extremidade da malha auxiliam no escoamento da corrente. Neste caso, faz-se uma correção no comprimento da malha, em torno de 15%. A Equação 23 leva em consideração esta correção.

$$L_{total} = L_{cabo} + 1,15 L_{hastes} \quad (23)$$

O potencial de passo na malha é obtido através da Equação 24.

$$V_{passo \text{ na malha}} = \frac{\rho a \times k_p \times k_i \times I_{malha}}{L_{total}} \quad (24)$$

Onde,

k_p = coeficiente que introduz a maior diferença de potencial entre dois pontos distanciados de 1m.

Este parâmetro pode ser obtido através de Equação 25 [8]

$$k_p = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2h} + \frac{1}{e+h} + \frac{1}{e} (1 - 0,5^{N-2}) \right] \quad (25)$$

Os demais parâmetros seguem os especificados para a tensão de toque na

malha.

5.2.1 POTENCIAL NA CERCA PERIMETRAL

O cercamento da subestação é um ponto a ser analisado. Dependendo do grau de risco, localização e característica da malha define-se o tipo de cercamento. Usualmente utiliza-se: [8]

- Muro de alvenaria
- Cerca metálica

A cerca metálica é economicamente mais atrativa, porém, por ser condutora, gera potenciais de toque que podem estar acima dos limites toleráveis. O potencial de toque máximo na cerca é definido pela Equação 26.

$$V_{cerca} = \frac{\rho a \times k_c \times k_i \times I_{malha}}{L_{total}} \quad (26)$$

Onde

k_c = coeficiente que relaciona os parâmetros da malha com a posição da pessoa que está tocando a cerca.

A Equação 227 define este coeficiente.

$$k_c = \frac{1}{2\pi} \left\{ \ln \left[\frac{(h^2+x^2) \times [h^2+(e+x)^2]}{h \times d \times (h^2+e^2)} \right] + 2 \ln \left\{ \left[\frac{2e+x}{2e} \right] \times \left[\frac{3e+x}{3e} \right] \times \left[\frac{(N-1)e+x}{(N-1)e} \right] \right\} \right\} \quad (27)$$

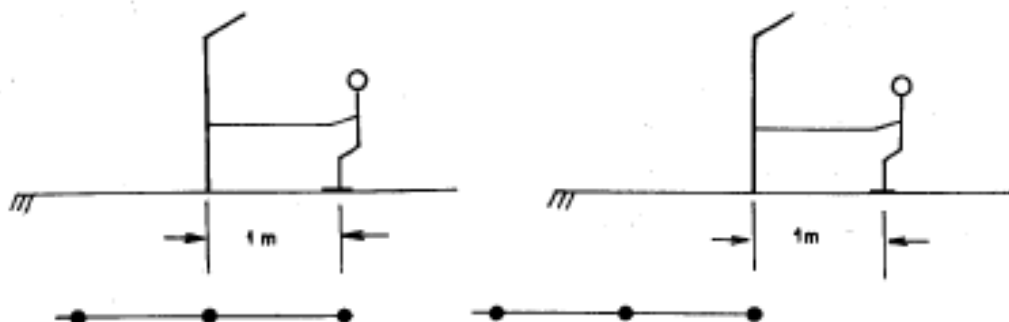
Onde

x = Distância [m] da periferia da malha ao ponto onde está a pessoa

$N = (N_a, N_b)$ = Máximo

A Figura 26 ilustra a distância x

Figura 26 – Distância x.



As demais variáveis da Equação 26 são definidos conforme mencionado no item 5.2.

5.3 HASTE DE ATERRAMENTO

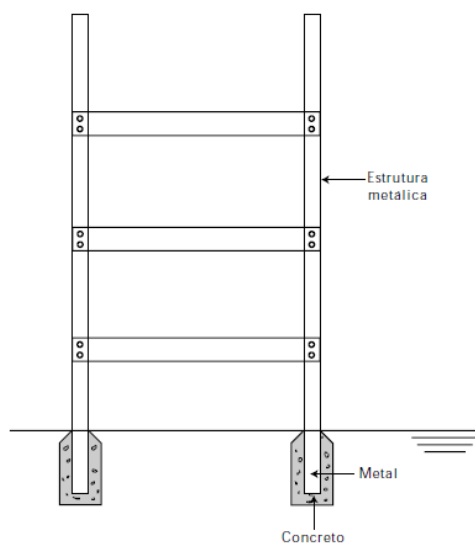
As hastes de aterramento são utilizadas para auxiliar no escoamento da corrente elétrica que flui pela malha de aterramento. Geralmente são utilizadas em locais onde o escoamento de corrente é mais crítico, em geral na periferia da malha, e junto aos equipamentos da subestação como transformadores de força, para-raios e transformadores de corrente, que necessitam de proteção extra devido a sua importância na instalação.

5.3.1 TIPOS DE ELETRODOS DE ATERRAMENTO

Pode-se dividir os eletrodos em alguns tipos [1]:

- Eletrodos existentes (naturais): Prédios com estruturas metálicas são fixados por meio de longos parafusos nas fundações de concreto. Esses parafusos engastados no concreto servem como haste, enquanto a estrutura metálica do prédio funciona como condutor de aterramento.

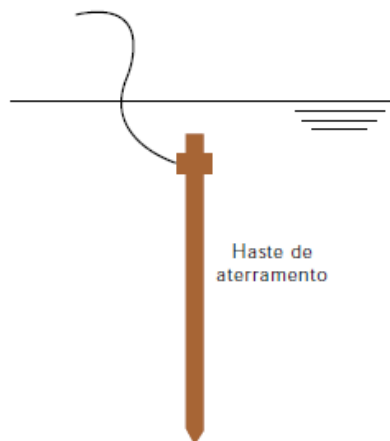
Figura 27 - Eletrodo natural.



Fonte: [1].

- Eletrodos fabricados: São geralmente as hastes de aterramento. Podem ser fabricadas com variados diâmetros e comprimentos, de acordo com o projeto de aterramento.

Figura 28 - Eletrodo fabricado.



Fonte: [1].

- Eletrodo encapsulado no concreto: O concreto em contato com o solo é um meio semicondutor com resistividade da ordem de $3000 \Omega \cdot \text{cm}$ a 20°C , muito melhor do que o solo propriamente dito.

Dessa forma, a utilização dos próprios vergalhões da armação da edificação, colocados no interior das fundações, representa uma solução pronta e de ótimos resultados.

- Tipo Cadweld: O cobre é, depositado eletroliticamente sobre a alma de aço.

5.4 TIPOS DE CONEXÕES

O tipo de conexão define a temperatura máxima T_m , utilizada na equação 18 para dimensionar o condutor de aterramento. As conexões podem ser do tipo [8]:

Conexão cavilhada com juntas de bronze que é uma conexão tradicional aparafusada, cuja temperatura máxima é de 250°C.

Solda convencional feita com elétrodo revestido, cuja fusão se dá através do arco elétrico produzido pela máquina de solda, sua temperatura máxima é de 450°C.

Brasagem com liga Foscooper que é uma união feita usando o maçarico (Oxi-Acetileno), cuja temperatura máxima é de 550°C. Foscooper é uma liga de cobre e fósforo, cuja união é feita por brasagem, vulgarmente conhecida como solda heterógena.

Solda exotérmica, conhecida como aluminotermia, cuja conexão feita pela fusão obtida pela ignição e combustão dos ingredientes do cadinho. Neste caso a temperatura máxima é 850°C.

As conexões entre as hastes e os cabos que fazem a ligação dos equipamentos com a conexão de aterramento são pontos críticos no sistema de aterramento. Uma conexão de má qualidade pode comprometer a circulação de corrente, alterando os parâmetros de tensão de toque e passo.

A principal característica da solda é a temperatura máxima que ela suporta durante um surto de corrente. Por este motivo, geralmente utiliza-se a solda exotérmica, que resiste a temperaturas de até 850°C.

A soldagem exotérmica é uma técnica usada para criar uma conexão permanente entre dois componentes metálicos. Trata-se de uma reação química exotérmica. Este processo é particularmente notável para a durabilidade do vínculo produzido e para a preservação da boa condutividade elétrica entre os componentes unidos [10].

A Figura 30 ilustra uma solda exotérmica.

Figura 30 - Solda Exotérmica.



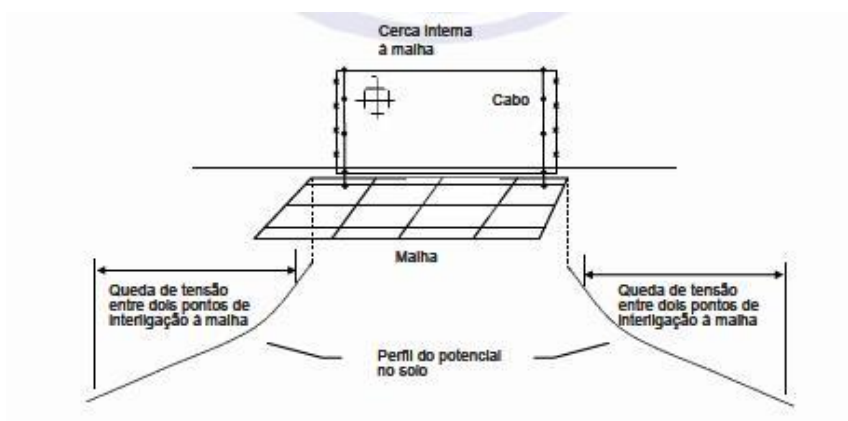
Fonte: [10].

5.5 CERCAMENTO DA SUBESTAÇÃO

As subestações em geral são cercadas por grades metálicas, por ser uma maneira eficiente e barata de delimitar a área da instalação. Porém, a presença de material condutor neste cercamento pode acarretar em riscos para pessoas que estejam próximas a estes pontos. Desta forma, foram definidas medidas para aterramento destas cercas.

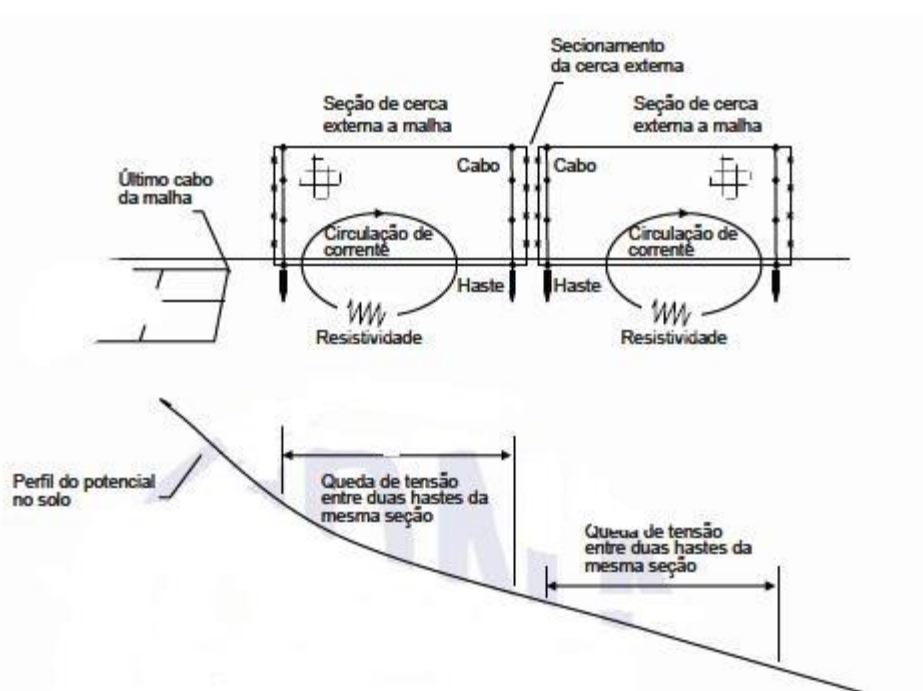
Cercas metálicas localizadas no interior da malha da subestação devem ser interligadas a esta em vários pontos (multiaterramento). Cercas metálicas localizadas fora do plano coberto da malha devem ser seccionadas e essas secções multiaterradas, porém, em quadrículas distintas da malha. Essas medidas devem ser tomadas considerando-se uma condição local que garanta os níveis de potenciais de toque toleráveis conforme figuras 31 e 32 [9].

Figura 31 - Aterramento de grades metálicas no interior da malha.



Fonte: [9].

Figura 32 - Aterramento de grades metálicas no exterior da malha.



Fonte: [9].

Trechos de cerca que saem da área ocupada pela malha devem ser seccionados e cada seção deve ser aterrada por duas hastes, de modo a evitar a transferência de potencial perigoso para pontos distantes. O aterramento feito dessa forma faz com que os potenciais de toque produzidos nessas seções fiquem reduzidos, pois praticamente acompanham o perfil de potencial de solo da região. Trechos de cercas externas embaixo de linhas de AT e BT devem ser tratados da mesma forma [9].

5.6 ATERRAMENTO DOS EQUIPAMENTOS

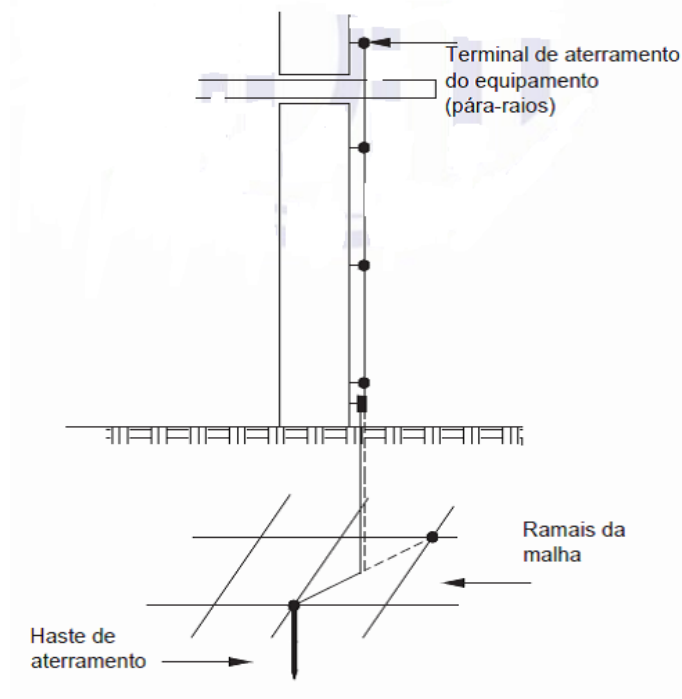
Existem métodos para aterramento dos diversos equipamentos e estruturas que compõem a subestação de energia. Estes métodos foram definidos com base em estudos e testes desenvolvidos com o passar dos anos, sempre visando proteção de pessoas e da estrutura.

Isto demonstra a importância em verificar todas as possibilidades de problemas ocasionados por correntes de falta. A seguir estão listados alguns dos equipamentos que devem ser aterrados e que possuem métodos listados na norma [9].

- para-raios;
- disjuntores;
- transformadores de potencial;
- transformadores de corrente;
- isoladores de pedestal;
- chaves seccionadoras;
- transformadores de potência;
- reatores de potência;
- transformadores de serviços auxiliares;
- bancos de capacitores;
- postes de iluminação;
- luminárias e projetores instalados em colunas de concreto ou metálicas;

- tomadas de força e telefônicas do pátio da subestação;
- torres de telecomunicação;
- ferragens de cadeias de isoladores;
- cabos e hastes para-raios;
- blindagem de cabos isolados;
- canaletas e eletrodutos de pátio da subestação;
- caixas de passagem;
- equipamentos eletrônicos no interior da casa de comando;
- painéis de serviços auxiliares c.a.
- painéis de serviços auxiliares c.c.
- retificadores;

Figura 33 - : Aterramento de equipamentos sobre suportes.



Fonte:[9].

6 APLICAÇÃO EM SUBESTAÇÃO

Com base nos conceitos teóricos apresentados nos capítulos anteriores, foi dimensionada a malha de aterramento para uma subestação que conta com três geradores e está conectada na rede de 13,8kV da concessionária local. As simulações foram realizadas no software ETAP, versão 12.0.6.

6.1 DADOS INICIAIS CONSIDERADOS

A seguir estão as variáveis de entrada para cálculo da malha.

Corrente de Curto Circuito

- A corrente de curto circuito fase-fase-terra no gerador é de 23,26kA.

Resistividade do solo no local

- O solo no local foi estratificado em duas camadas. As resistividades das

camadas são:

- ρ_1 = Resistividade da primeira camada = 450 Ω .m
- ρ_2 = Resistividade da segunda camada = 400 Ω .m
- h_1 = Profundidade da primeira camada = 0,6 m
- h_2 = Profundidade da segunda camada = infinita

Tempo de eliminação de falta

Foram considerados os seguintes valores de tempo:

- 0,5s para cálculo de potenciais perigosos.
- 1s para dimensionamento dos cabos de aterramento.

O tempo de 0,5s foi adotado baseando-se no caso de que, quando ocorrer um curto-circuito na subestação, normalmente quem atua é a proteção instantânea de sobrecorrente com tempo menor que 0,15s.

Outros dados

Resistividade média da manta asfáltica utilizada para recobrimento do pátio da subestação [4]:

- $\rho_s = 20000 \Omega$.m

Espessura mínima da camada de recobrimento de brita:

- $h = 0,05$ m

Profundidade dos cabos da malha:

- $h = 0,6$ m.

Hastes de aterramento:

- 47 hastes de 3m tipo Copperweld de 250 μ m de camada de cobre, diâmetro da haste 5/8" (15,9 mm).

Espaçamento entre condutores:

- 3 m

6.2 DIMENSIONAMENTO DO CABO DA MALHA DE ATERRAMENTO

Foi utilizada a Equação 18 para este dimensionamento.

$$I = 226,53 \times S_{cobre} \times \sqrt{\frac{1}{t_{defeito}} \times \ln\left(\frac{T_m - T_a}{234 + T_a} + 1\right)}$$

Considerou-se o uso de solda exotérmica e temperatura ambiente de 40°C, desta forma:

- T_m = Temperatura máxima [°C] = 850 °C
- T_a = Temperatura ambiente [°C] = 40 °C
- $t_{defeito} = 1s$

O tipo do cabo utilizado na malha será de cobre e para suportar os esforços mecânicos e eletromagnéticos foi utilizada a seção será de 120 mm². Sendo assim, fez-se uso da equação 18 para verificar se esta seção de cabo suportará a corrente máxima de curto-circuito no gerador.

- $S_{cobre} = 120mm^2$
-

Com base nas informações, foi calculada a corrente máxima suportada pelo cabo.

$$I_{calculado} = 31,878 \text{ kA}$$

O valor de corrente de curto-circuito no gerador é de 23,26kA. De acordo com o cálculo acima, a corrente máxima suportada pela malha de terra é de 31,8kA. Sendo assim, o cabo de secção de 120mm² atende as especificações do projeto.

6.3 CÁLCULOS DOS POTENCIAIS MÁXIMOS SUPORTÁVEIS PELO SER HUMANO, NA MALHA E NA CERCA

Foram calculados os potenciais toleráveis com base nas informações do local. Considerou-se uma pessoa com massa de 50 kg.

6.3.1 POTENCIAL DE PASSO TOLERÁVEL MÁXIMO

Primeiramente foi obtido o valor do fator de redução.

$$C \cong 1 - a \times \left[\frac{1 - \frac{\rho_1}{\rho_s}}{2 \times h_s + a} \right]$$

Onde:

$$a = 0,106 \text{ m}$$

$$\rho_1 = 450 \Omega \cdot \text{m}$$

$$\rho_s = 20000 \Omega \cdot \text{m}$$

$$h_s = 0,05 \text{ m}$$

Aplicando os valores listados obteve-se:

$$C = 0,497$$

Utilizou-se a Equação 6 para obter o potencial máximo suportável, considerando uma pessoa de 50 kg.

$$V_{\text{passo máximo calculado}} = (1000 + 6 \times \rho_s \times C) \times \frac{0,116}{\sqrt{t}}$$

$$V_{\text{passo máximo calculado}} = (1000 + 6 \times 20000 \times 0,497) \times \frac{0,116}{\sqrt{0,5}}$$

$$V_{\text{passo máximo calculado}} = 9,947 \text{ kV}$$

6.3.2 POTENCIAL DE TOQUE TOLERÁVEL MÁXIMO

Utilizou-se a Equação 3 para obter o potencial de toque máximo, considerando uma pessoa de 50 kg.

$$V_{\text{toque máximo calculado}} = (1000 + 1,5 \times \rho_s \times C) \times \frac{0,116}{\sqrt{t}}$$

Considerando o fator de redução utilizado para cálculo do potencial de passo.

$$V_{\text{toque máximo calculado}} = (1000 + 1,5 \times 20000 \times 0,497) \times \frac{0,116}{\sqrt{0,5}}$$

$$V_{\text{toque máximo calculado}} = 2,610 \text{ kV}$$

6.3.3 POTENCIAL DE TOQUE NA MALHA

Com os dados iniciais fornecidos e utilizando as Equações 14, 15 e 16, tem-se que:

$$r = \frac{A}{D} = \frac{65 \times 15}{\sqrt{65^2 + 15^2}} = 14,6 \text{ m}$$

$$\alpha = \frac{r}{h} = \frac{14,6}{0,6} = 24,36$$

$$\beta = \frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{400}{450} = 0,89$$

Com base nos coeficientes, obteve-se o valor de N analisando a Figura 24.

$$N = 0,82$$

Com isso, foi encontrada a resistividade aparente.

$$\rho_a = N \times \rho_1 = 0,82 \times 450 = 369 \Omega \cdot m$$

Foi utilizado o espaçamento dos condutores igual a 3 m, desta forma, o número de condutores é obtido através de:

$$N_a = \frac{65}{3} \cong 22$$

$$N_b = \frac{15}{3} = 5$$

$$L_{cabo} = (22 \times 15) + (5 \times 65) = 655$$

Considerando o uso de 47 hastes de 3 m cada, tem que:

$$L_{total} = L_{cabo} + (1,15 \times L_{hastes}) = 655 + 162,15 = 817,15 \text{ m}$$

Utilizando a Equação 21 e 21, obteve-se:

$$k_m = 0,473$$

$$k_i = 2,46$$

Desta forma, utilizando a Equação 20 o valor calculado para o potencial de toque na malha foi de:

$$\begin{aligned} V_{\text{toque na malha calculado}} &= \frac{\rho a \times k_m \times k_i \times I_{\text{malha}}}{L_{\text{total}}} = \frac{369 \times 0,473 \times 2,46 \times 23,26 \cdot 10^3}{817,15} \\ &= 12,22 \text{ kV} \end{aligned}$$

Para o potencial de passo na malha, fez-se uso da Equação 24 para a obtenção do parâmetro k_p , desta forma:

$$k_p = 0,458$$

De acordo com a Equação 23, o potencial de passo na malha é:

$$\begin{aligned} V_{\text{passo na malha calculado}} &= \frac{\rho a \times k_p \times k_i \times I_{\text{malha}}}{L_{\text{total}}} = \frac{369 \times 0,458 \times 2,46 \times 23,26 \cdot 10^3}{817,15} \\ &= 11,83 \text{ kV} \end{aligned}$$

Com base na Equação 20, e considerando os parâmetros utilizados para o potencial na malha, obteve-se k_c .

$$k_c = 0,5842$$

O valor do potencial da cerca encontrado foi:

$$V_{\text{toque na cerca calculado}} = \frac{\rho a \times k_c \times k_i \times I_{\text{malha}}}{L_{\text{total}}} = \frac{369 \times 0,5842 \times 2,46 \times 23,26 \cdot 10^3}{817,15}$$

$$= 15,09 \text{ kV}$$

O valor do potencial na cerca excede o valor do potencial de toque tolerável. Nesta situação deve-se efetuar melhorias na malha, com o intuito de reduzir os potenciais presentes, ou optar pela construção de um muro de alvenaria.

7 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Para a simulação foi desenvolvida uma estrutura retangular genérica, com dimensões de 65m x 15m. Os valores dos parâmetros do solo e das grandezas elétricas seguem as adotadas no capítulo 6. A simulação realizada no software ETAP 12.0.6 apresentou resultados que foram a comparados com os obtidos anteriormente.

7.1 SOFTWARE

O software ETAP 12.0.6 apresenta uma série de possibilidades de estudos na área da engenharia elétrica, entre eles estudos de fluxo de potência, proteção e seletividade, cálculo de curto-circuito, entre outros. Para o estudo em questão utilizou-se o módulo de sistema de aterramento, cujas principais telas de configuração estão descritas a seguir.

Figura 34: Tela inicial para escolha do estudo a ser realizado no software

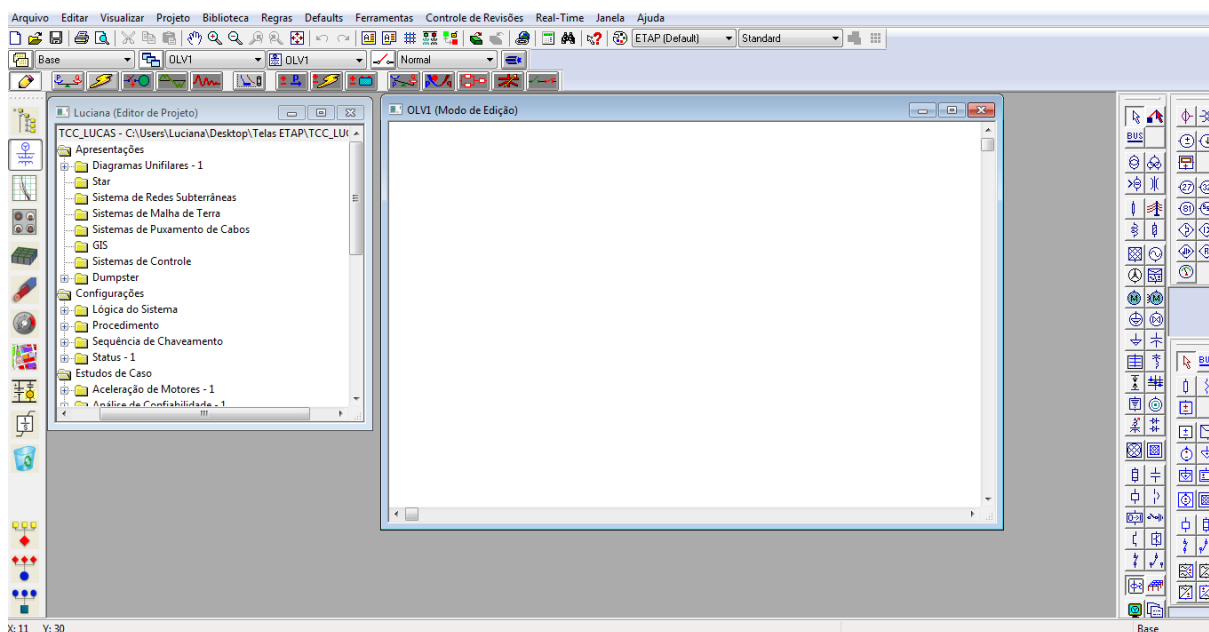
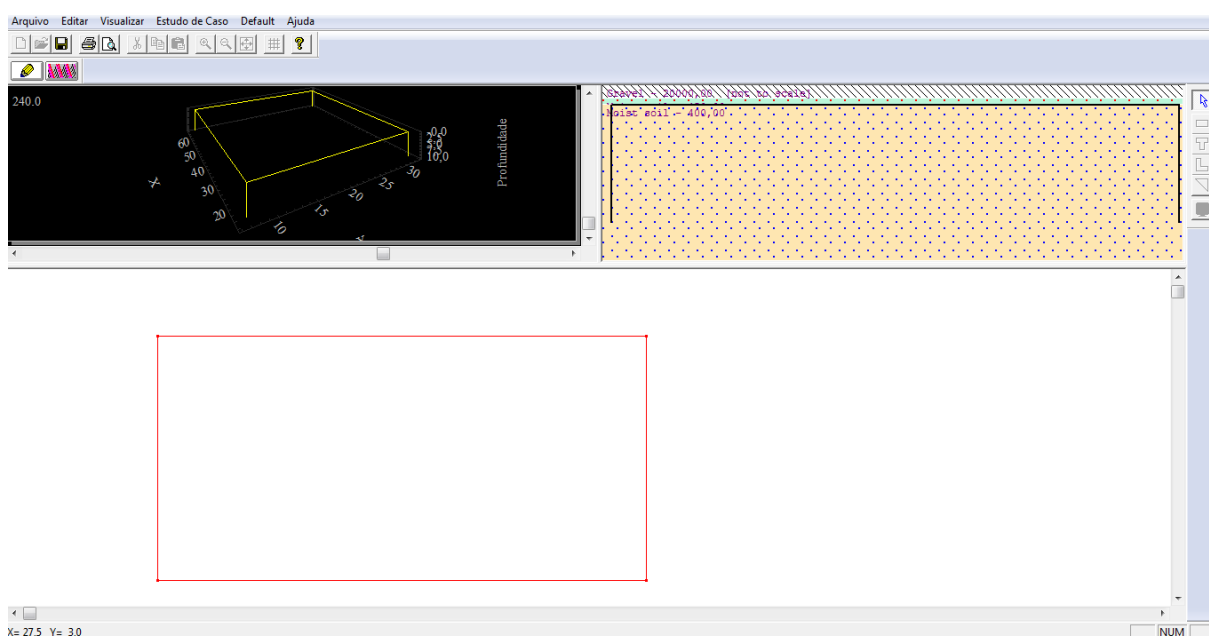
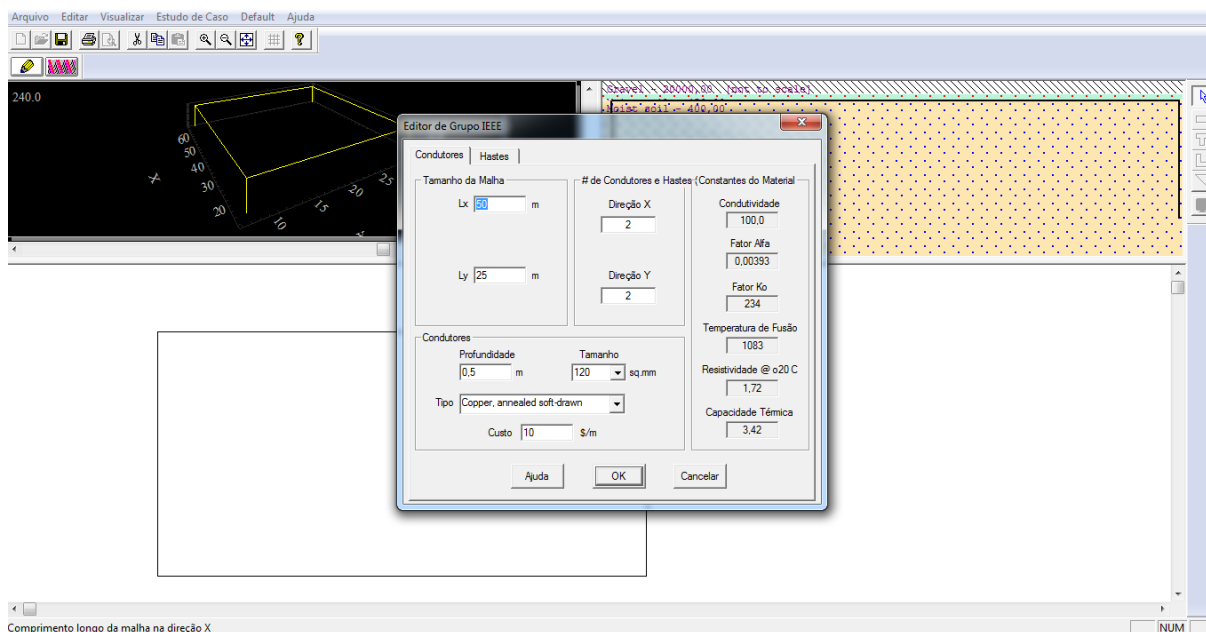


Figura 35: Tela para desenho da malha



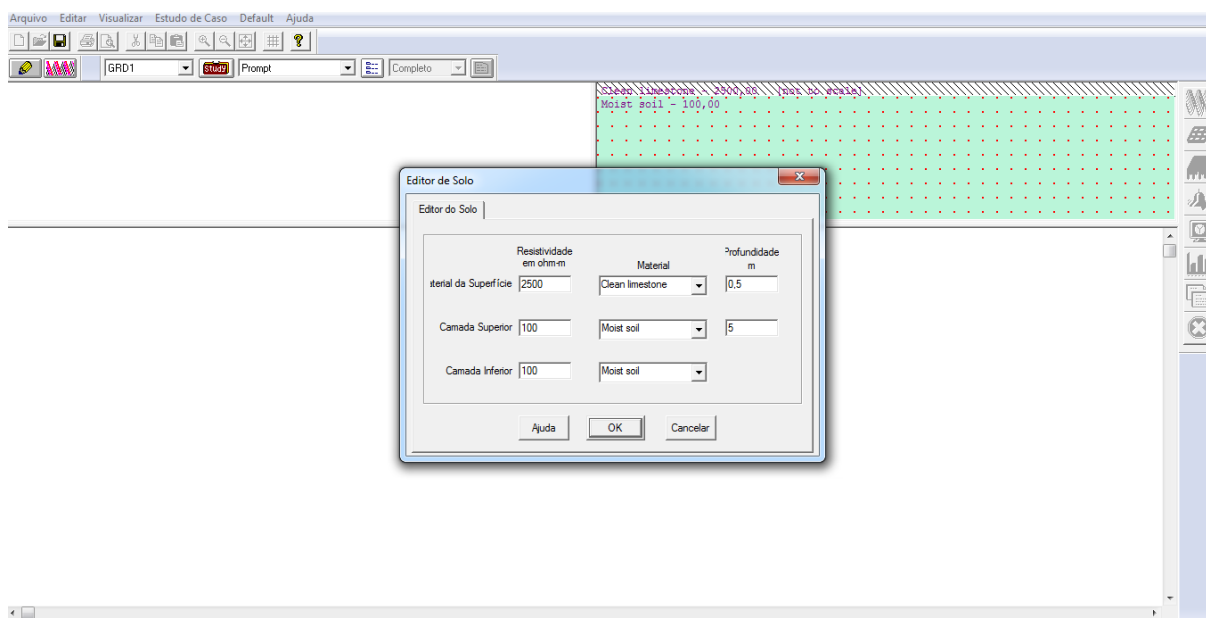
Nesta tela é permitido definir a geometria da malha, escolhida dentre as opções disponíveis, retangular, formato em “T”, formato “L” e triangular.

Figura 36: Tela para inserir características da malha



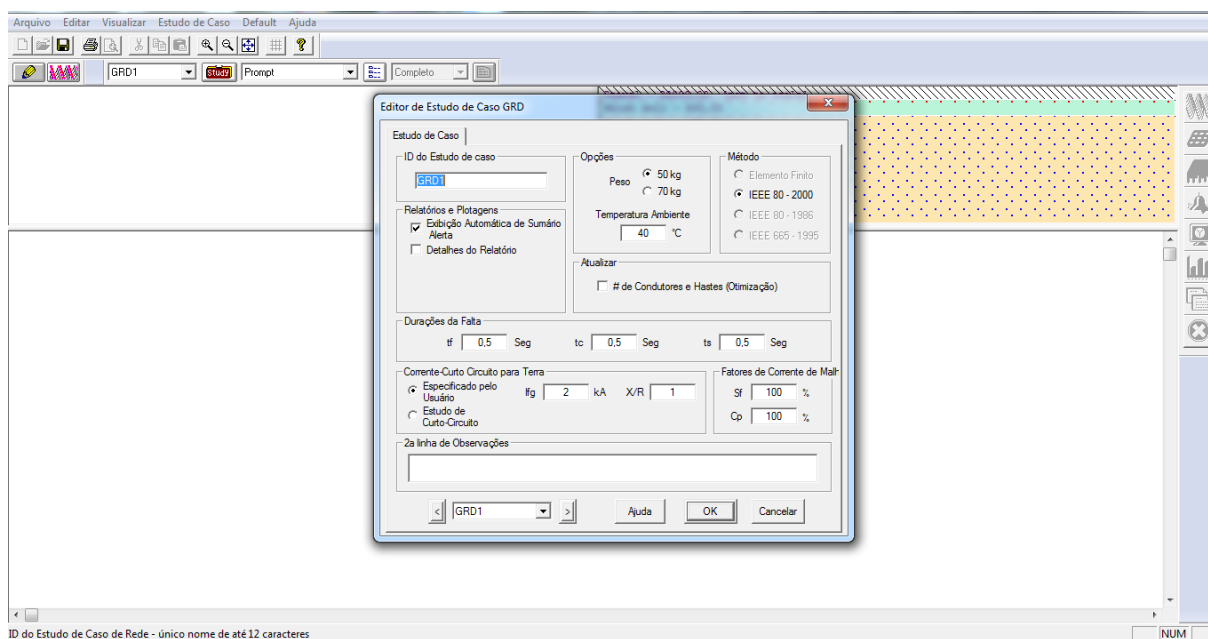
A tela a seguir possibilita inserir as informações da malha, como dimensões, condutores e suas características, hastes de aterramento, etc.

Figura 37: Dados do solo



Esta tela permite inserir as características do solo, como o tipo de solo, sua profundidade e resistividade, além de permitir definir a camada de recobrimento.

Figura 38: Dados do sistema



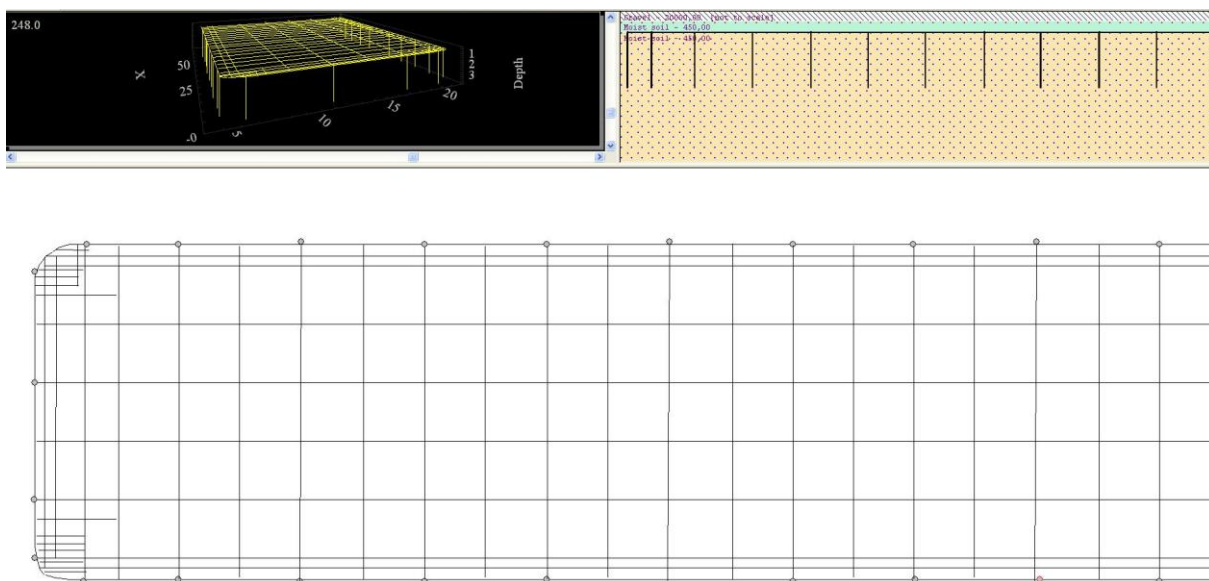
Esta tela permite inserir as informações do sistema, como grandezas elétricas, temperatura ambiente, entre outros.

Após inserir as informações pertinentes nas telas citadas, foram realizadas as simulações através do software.

7.2 DESENHO DA MALHA

A malha desenvolvida no software possui dimensões de 65m x 15m, sendo composta por quadriculos de 3m x 3m e 47 hastes de aterramento de 3m cada.

Figura 39: Malha desenvolvida no sistema



7.3 DADOS DE ENTRADA E DE SAÍDA DO SISTEMA

O software apresenta os parâmetros de entrada e os resultados do estudo em forma de relatório, conforme visto nas Figuras 40 e 41.

Figura 40: Relatório com dos de entrada

Dados de Entrada da Malha de Tgerra

Dados do Sistema:

Freq. Hz	Peso kg	Ambiente Temp. °C	Corrente de Curto-Circuito				Duração da Falta (Segundos)			Plotagem Passo de m	Extendidos Limites Compr. m
			Total de Falta Corrente kA	X/R	Sf Divisão Fator de %	Cp Projeção Fator de %	Tf para Total de Falta Duração	Tc p/ Dimens. Terra Condutores	Ts para Admissível Corrente no Cor		
60.0	70	40.00	23.260	1.00	100.0	100.0	0.50	1.0	0.50	1.0	1.00

Dados do Solo:

Material da Superfície			Camada Superior do Solo			Camada Inferior do Solo	
Tipo de Material	Resistividade Ohm.m	Profund. m	Tipo de Material	Resistividade Ohm.m	Profund. m	Tipo de Material	Resistividade Ohm.m
Gravel	20000.0	0.050	Moist soil	450.0	0.60	Moist soil	450.0

Figura 41: Relatório com dados de saída para pessoa de 50 kg

Relatório Resumo da Malha de Terra

Rg Terra Resistência ohm	GPR Terra Elev.Pot. De Volts	Tensão Máxima de Toque					Potencial de Passo Máximo				
		Tolerável Volts	Calculado Volts	Calculado %	Coordenadas (m)		Tolerável Volts	Calculado Volts	Calculado %	Coordenadas (m)	
					X	Y				X	Y
4.002	65374.5	2806.7	10877.8	387.6	26.5	9.0	10734.8	9090.5	84.7	97.14	29.38

Corrente de Falta Total	23.260 kA	Fator de Reflexão (K):	-0.956
Corrente Máxima na Malha:	16.334 kA	Fator de Correção da Camada de Superfície (Cs):	0.537
		Fator de Amortecimento (Df):	1.003

Advertências:
A Tensão de Toque máxima excede os limites toleráveis

A Figura 41 mostra os resultados para potenciais máximos toleráveis para potencial de passo e toque, para pessoas de 50 kg, bem como o fator de redução referente à camada superficial.

Os valores obtidos foram:

➤ 50 kg

- $V_{\text{passo máximo tolerável software}} = 10,734 \text{ kV}$
- $V_{\text{toque máximo tolerável software}} = 2,806 \text{ kV}$
- $\text{Fator de redução software} = 0,531$
- $V_{\text{passo máximo na malha software}} = 9,090 \text{ kV}$
- $V_{\text{toque máximo na malha software}} = 10,877 \text{ kV}$

7.4 COMPARAÇÃO ENTRE VALORES CALCULADOS E COMPUTACIONAIS

A comparação entre os valores foi realizada para avaliar a correspondência entre os conceitos teóricos e o software.

Para uma pessoa com massa de 50 kg obteve-se:

- Diferença entre o valor calculado e o computacional para potencial de passo tolerável máximo.

$$\begin{aligned}\Delta V_{\text{passo tolerável}} &= \left| \frac{V_{\text{passo tolerável máximo calculado}} - V_{\text{passo tolerável máximo software}}}{V_{\text{passo tolerável máximo calculado}}} \right| \times 100 \\ &= \frac{9,947 - 10,734}{9,947} \times 100 = 7,91\%\end{aligned}$$

- Diferença entre o valor calculado e o computacional para potencial de toque tolerável máximo.

$$\begin{aligned}\Delta V_{\text{toque tolerável}} &= \left| \frac{V_{\text{toque tolerável máximo calculado}} - V_{\text{toque tolerável máximo software}}}{V_{\text{toque tolerável máximo calculado}}} \right| \times 100 \\ &= \frac{2,610 - 2,806}{2,610} \times 100 = 7,51\%\end{aligned}$$

- Diferença entre o fator de redução calculado e o valor computacional.

$$\begin{aligned}\Delta \text{Fator de redução} &= \left| \frac{\text{Fator de redução}_{\text{calculado}} - \text{Fator de redução}_{\text{software}}}{\text{Fator de redução}_{\text{calculado}}} \right| \times 100 \\ &= \frac{0,497 - 0,531}{0,497} \times 100 = 6,84\%\end{aligned}$$

- Diferença entre o valor calculado e o computacional para potencial de toque máximo encontrado na malha.

$$\begin{aligned}\Delta V_{\text{passo malha}} &= \left| \frac{V_{\text{passo máximo na malha calculado}} - V_{\text{passo máximo na malha software}}}{V_{\text{passo máximo na malha calculado}}} \right| \times 100 \\ &= \frac{11,831 - 9,090}{11,831} \times 100 = 23,16\%\end{aligned}$$

- Diferença entre o valor calculado e o computacional para potencial de passo máximo encontrado na malha.

$$\Delta V_{\text{toque malha}} = \left| \frac{V_{\text{toque máximo na malha calculado}} - V_{\text{toque máximo na malha software}}}{V_{\text{toque máximo na malha calculado}}} \right| \times 100$$

$$= \frac{12,22 - 10,87}{12,22} \times 100 = 11,04\%$$

Verificou-se que a diferença entre os valores calculados e computacionais para os potenciais toleráveis é de aproximadamente 7%. Tal erro pode ser associado ao arredondamento de valores envolvidos nos cálculos. Já para os potenciais na malha, a diferença é de aproximadamente 11% para o potencial de toque e de 23% para o potencial de passo. Tal erro deve-se, além do arredondamento numérico, aos valores atribuídos para os coeficientes k_m e k_p . No desenvolvimento da malha no software, foram realizadas algumas mudanças no layout da mesma visando ajustar os potenciais. Estas mudanças não foram consideradas no cálculo dos coeficientes mencionados, o que explica esta diferença.

7.5 GRÁFICO DOS POTENCIAIS

O software fornece uma análise gráfica dos potenciais de passo e toque, indicando através de cores a distribuição destes valores por toda a malha. As Figuras 42 e 43 ilustram estes gráficos.

Figura 42: Gráfico da distribuição do potencial de passo na malha para pessoa de 50 kg.

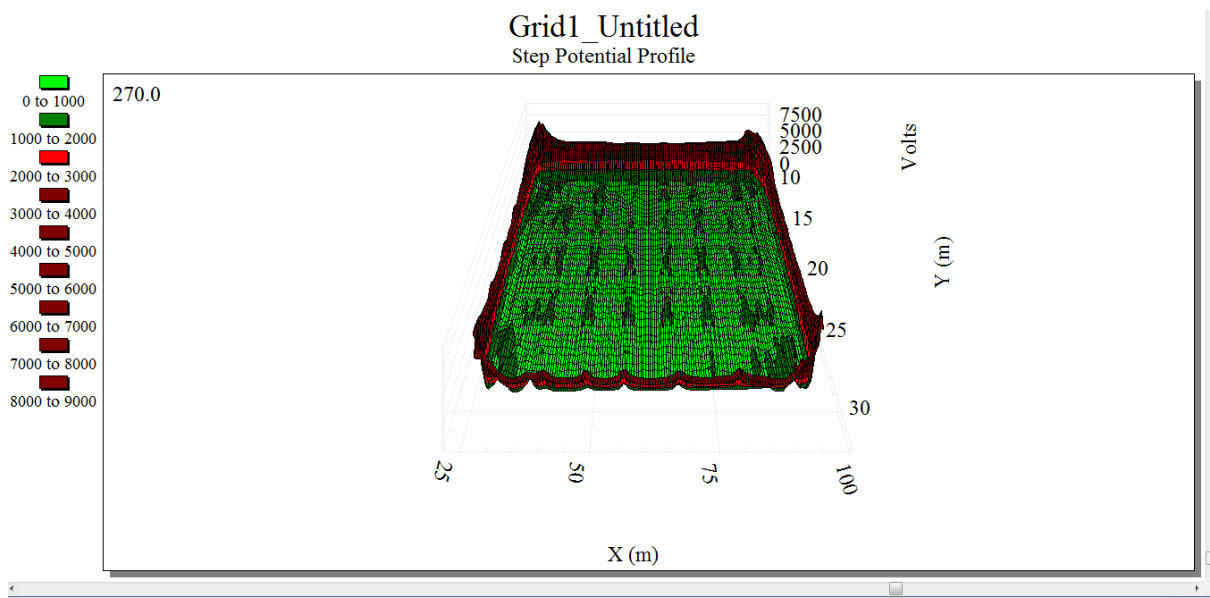
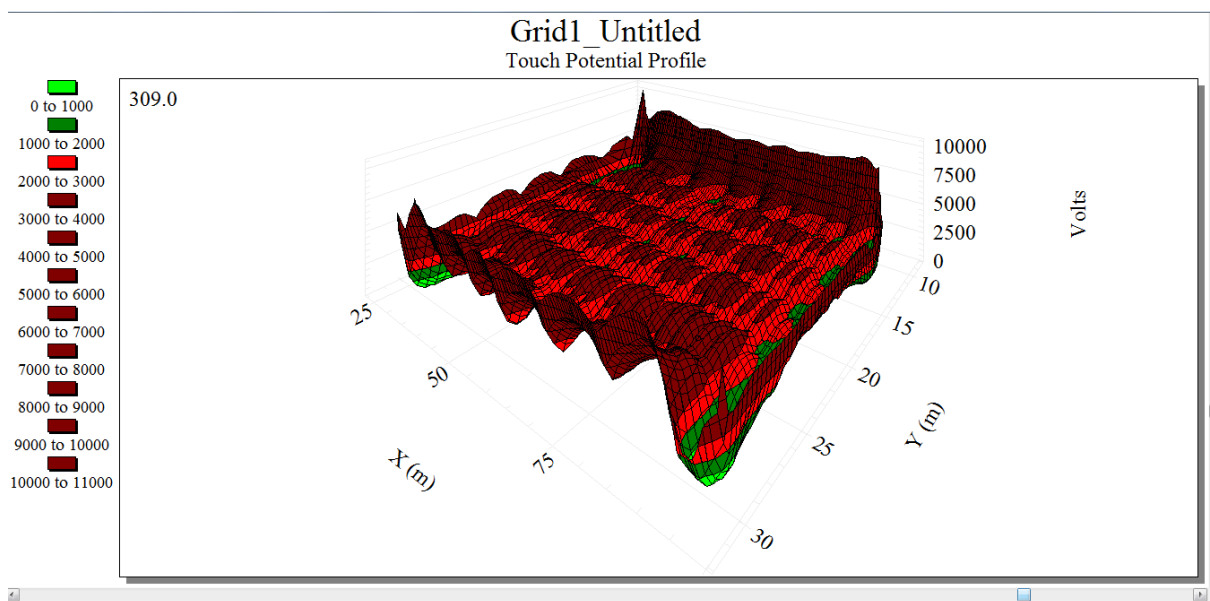


Figura 43: Gráfico da distribuição do potencial de toque na malha para pessoa de 50kg.



A escala de cores ao lado de cada gráfico indica os níveis de tensão na malha. É visível que na área delimitada pela malha, os potenciais estão dentro do limite tolerável para o potencial de passo. Já para o potencial de toque, para uma pessoa de 50 kg os níveis estão acima do permitido.

Esta análise é verificada pelos resultados numéricos da Figura 40, onde estão

indicados os valores máximos de potencial de passo e toque encontrados na malha.

➤ 50 kg

- $V_{\text{passo máximo na malha software}} = 9,090kV$
- $V_{\text{toque máximo na malha software}} = 10,877 kV$

Neste caso, os potenciais de passo máximo na malha e de toque máximo na malha equivalem à, respectivamente, 84,7% e 387,6% do tolerável.

8 CONCLUSÃO

O projeto de aterramento elétrico envolve um grande número de variáveis, tornando o desenvolvimento desta atividade algo complexo. Parâmetros referentes ao terreno, equipamentos, materiais e físicos devem ser levado em consideração, e o resultado do projeto deve atender às limitações impostas por estes parâmetros.

As literaturas sobre o assunto abordam diversos pontos de interesse, e exemplificam as etapas necessárias para elaboração de um projeto adequado. Porém, percebe-se que o conhecimento prático dos equipamentos e ferramentas utilizadas é importante para desenvolver o projeto de forma a viabilizar a sua execução.

A medição da resistividade do solo é um ponto importante e que exige do profissional um conhecimento mais profundo, a fim de adequar o local onde a malha será colocada de forma a obter um resultado esperado. Este ponto exige conhecimento teórico e prático.

As ferramentas computacionais auxiliam de forma significativa na simulação do comportamento dos potenciais gerados na malha. Estes potenciais devem atender à especificações de normas internacionais que visam manter os níveis de segurança na instalação em questão. Tais softwares realizam cálculos considerando métodos matemáticos avançados, como o método dos Elementos Finitos. Desta forma, torna-se possível o cálculo do valor dos potenciais em pequenas áreas dentro da área total da malha, fornecendo representações precisas, e, além disto, a geração de gráficos da distribuição dos potenciais facilita o entendimento do comportamento da malha.

No presente estudo, foram obtidos valores calculados e computacionais que divergem em sua grande maioria entre 7% e 11%, sendo que no pior caso houve uma diferença de 23%. Tal diferença deve-se a erros por arredondamento dos valores utilizados e por pequenas diferenças na geometria entre a malha considerada no cálculo e a malha considerada no software. Mesmo assim, percebe-se a correspondência entre as informações.

Após estudos de simulação, foi verificado que os pontos críticos no que diz respeito aos potenciais gerados na malha geralmente estão nos limites periféricos da

malha. Algumas técnicas como arredondamento dos cantos da malha, bem como a colocação de um maior número de hastes de aterramento são tomadas na prática visando ajustar os potenciais nestes locais aos limites toleráveis.

O conteúdo apresentado no Curso de Engenharia Elétrica possibilita ao aluno optar entre diversas áreas de atuação, como o estudo de sistemas de aterramento, foco do trabalho desenvolvido. Buscou-se apresentar as etapas e parâmetros importantes para o desenvolvimento de um projeto de aterramento. Além disto, uma comparação entre valores calculados e simulados se fez interessante para analisar a correspondência dos valores obtidos.

REFERÊNCIAS

- [1] PROCOBRE. **Aterramento Elétrico**. Disponível em: <www.procobrebrasil.org>. Acesso em: 25. Ago. 2015.
- [2] PORTAL DO ELETRICISTA. **A importância do aterramento elétrico nas instalações elétricas**. Disponível em: <<http://www.portaleletricista.com.br/aterramento-eletrico>>. Acesso em: 17 set. 2015.
- [3] TELLÓ, Marcos. **Aterramento Elétrico Impulsivo, em Baixa e Alta Frequências**. Porto Alegre: EdiPUCRS, 2007.
- [4] IEEE, T. I. O. E. A. E. E.-. **IEEE Std 80: IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding**. [S.I.], 2000.
- [5] SOARES, Carlos Alberto Mattos. **Apostila de transformadores, Eletrotécnica e Eletromecânica**. Pelotas: Escola Técnica Federal de Pelotas, 2001.
- [6] DIAS, G. A. D. **Aspectos a Considerar no Dimensionamento e Seleção de Equipamentos e Sistemas em Subestações de Alta Tensão, Buscando a Eficiência Energética**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, PROMEC. Porto Alegre: Abril, 1996.
- [7] PAULINO, Jorge. **Desenvolvimento dos sistemas de potência**. Disponível em: <<http://engenharianodiaadia.blogspot.com/2012/02/o-desenvolvimento-dos-sistemas.html>> Acesso em 05 Out. 2015.
- [8] KINDERMANN, G.; CAMPAGNOLO, J. M. **Aterramento Elétrico**. Porto Alegre: Sagra Luzzatto, 1988.
- [9] ABNT, A. B. D. N. T.-. **NBR 15751: Sistemas de aterramento de subestações – Requisitos** [S.I.], 2009.
- [10] PORTAL MET@LICA. **Soldagem exotérmica**. Disponível em:<<http://www.metlica.com.br/soldagem-exotermica>>. Acesso em 18 Out. 2015
- [11] CENTRALMAT. **Medição da resistividade do solo**. Disponível em: <http://www.centralmat.com.br/Links/Mais/Resumo_Resist_Estratif.pdf>. Acesso em: 24 Out. 2015.
- [12] ABNT, A. B. D. N. T.-. **NBR 7117: Medição da resistividade do solo pelo método dos quatro pontos (Wenner)** [S.I.], 1981
- [13] DAWALIB, F. .B. N. **Measurements and computations os the performance of grouding system buried in multilayers soil**. IEEE Transactions on Power Delivery. [S.I.]. 1991.
- [14] CARSON, J. R. **Wave Propagation in Overhed Wires Ground Return**. [S.I.]: Bell Syst, 1926

[15] FILIPPON, D. G. **Cálculo de Potenciais em Malhas de Aterramento Utilizando o Autocad**. Pontífica Universidade Católica do Rio Grande do Sul – PUCRS. Porto Alegre. 2003.

[16] MAMEDE FILHO, J. **Proteção de equipamentos eletrônicos sensíveis: aterramento**. São Paulo: Érica, 1997.