


**unesp**  **UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**  
**“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”**  
**CAMPUS DE GUARATINGUETÁ**

**RODRIGO GENNARI**

**MALHA DE ATERRAMENTO DE SUBESTAÇÕES**

Guaratinguetá

2017

RODRIGO GENNARI

**Malha de aterramento de subestações**

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

Orientador: Prof. Rubens Alves Dias

Guaratinguetá

2017

G333m Gennari, Rodrigo  
Malha de aterramento de subestações / Rodrigo Gennari –  
Guaratinguetá, 2017.  
62 f : il.  
Bibliografia: f. 61-62

Trabalho de Graduação em Engenharia Elétrica – Universidade Estadual  
Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2017.  
Orientador: Prof. Dr. Rubens Alves Dias

1. Subestações elétricas. 2. Correntes elétricas – aterramento.
- I. Título

CDU 621.3.026


**RODRIGO GENNARI**

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

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

Prof. Leonardo Mesquita  
Coordenador

**BANCA EXAMINADORA:**

  
Prof. RUBENS ALVES DIAS

Orientador/UNESP-FEG

  
Prof. TEÓFILO MIGUEL DE SOUZA

UNESP-FEG

  
Prof. JOSÉ FELICIANO ADAMI

UNESP-FEG

Novembro de 2017

Dedico esse trabalho geral a todos os professores da engenharia elétrica em especial ao Rubens Alves Dias pela paciência e toda ajuda que me deu durante todo o processo da realização desse trabalho, aos meus amigos que fizeram parte durante toda minha formação e também a minha família e namorada que me deram muito apoio e força quando mais precisei.

## **AGRADECIMENTOS**

A saúde que graças a Deus durante toda a minha vida tive força para superar todos os meus problemas.

Imensamente a essa universidade que me abriu portas inimagináveis para minha vida profissional e pessoal também, agradeço do fundo do coração a todos os professores, que mesmo na época achava que era cobrança demais, hoje vejo que valeu muito a pena e vou colher frutos para o resto da minha vida graças a vocês

Em especial para o meu orientador Rubens Alves Dias, que mesmo com todos os problemas me ajudou com muita agilidade, precisão e muito incentivo.

E um agradecimento muito grande a toda a minha família que me trouxe muita força, carinho e amor, além de me dar todas as condições para eu conseguir alcançar aquilo que conquistei até hoje.

A todos um muito obrigado.

“A persistência é o caminho do êxito.”

Charles Chaplin

GENNARI, R. **Malha de aterramento de subestações**. 2017. 63 f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2017

## RESUMO

Esta pesquisa apresenta os pontos necessários para se realizar um projeto de aterramento de subestação, com foco na parte teórica e principalmente na segurança dos trabalhadores e equipamentos eletrônicos instalados nesses locais. Motivado pela afinidade com a área de eletrotécnica, transformadores e principalmente pela falta de aprofundamento nos estudos sobre aterramento verificou-se a necessidade da produção dessa pesquisa. Apesar de existirem amplos métodos para se realizar um aterramento, o escolhido para medir a resistividade do solo e por sua vez a resistência da malha de aterramento foi o método de Wenner, devido a facilidade de ser utilizado, pela sua confiabilidade e por ser um dos mais utilizados hoje na construção das malhas de aterramento em subestações pelo mundo todo. Essa pesquisa teve um resultado muito positivo abrangendo todo o conhecimento para realizar um aterramento de qualidade e confiabilidade, desde o processo de medição da resistividade do solo, passando por tratamento químico do solo, segurança das pessoas e equipamentos eletrônicos e todo o cálculo de malha de aterramento. Por fim foi possível melhorar o conhecimento na área de aterramento, e apesar de não existir uma parte prática, foi apontado todas as partes importantes quando se realiza um projeto de aterramento de subestação.

**PALAVRAS-CHAVE:** Aterramento. Subestação. Malhas de aterramento. Segurança em subestação.



GENNARI, R. **Substation Grounding Meshes**. 2017. 63 p. Undergraduate Final Work (Graduate in Electrical Engineering) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2016.

### **ABSTRACT**

This research presents the necessary points to carry out a substation grounding project, focusing on the theoretical part and mainly on the safety of the workers and electronic equipment installed in these locations. Motivated by the affinity with the subject of electrotechnics, transformers and mainly due to the lack of deepening in the studies on grounding, it was verified the necessity of writing of this research. Although there are extensive methods for performing a substation grounding, the chosen to measure the resistivity of the soil and after to know the ground resistance was the Wenner method, due to be ease to use, its reliability and being one of most used today in the construction of grounding meshes in substations all over the world. This research had a very positive result covering all the knowledge to realize a ground with quality and reliability, from the process of measurement of the resistivity of the soil, to chemical treatment of the soil, security of the people and electronic equipment and all the calculation of the grounding mesh. Finally, it was possible to deepen the knowledge in the field of grounding, and although there is almost no practical development, it was pointed out all the important parts when carrying out a substation grounding project.

**KEYWORDS:** Grounding. Substation. Grounding meshes. Safety in substations.

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                             |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 - Esquema TN-C.....                                                                                | 19 |
| Figura 2 - Esquema TN-S.....                                                                                | 20 |
| Figura 3 - Esquema TT.....                                                                                  | 21 |
| Figura 4 - Aterramento em ponto único.....                                                                  | 23 |
| Figura 5 - Aterramento em pontos múltiplos.....                                                             | 23 |
| Figura 6 - Aterramento em serie.....                                                                        | 24 |
| Figura 7- Aterramento em paralelo.....                                                                      | 25 |
| Figura 8 - Exemplo de tensão de passo.....                                                                  | 28 |
| Figura 9 - Esquema elétrico da tensão de passo.....                                                         | 29 |
| Figura 10 – Exemplo de tensão de toque.....                                                                 | 30 |
| Figura 11 – Esquema elétrico da tensão de toque.....                                                        | 31 |
| Figura 12 - Curvas de resistividade em função da umidade, salinidade e temperatura.....                     | 33 |
| Figura 13 – Estratificação do (a) Solo real e (b) Solo modelado para análise.....                           | 34 |
| Figura 14 – Método dos quatros eletrodos.....                                                               | 36 |
| Figura 15 - Método do eletrodo central.....                                                                 | 37 |
| Figura 16 - Arranjo de Lee.....                                                                             | 38 |
| Figura 17 – Solo com camadas sem variação de espessura.....                                                 | 39 |
| Figura 18 – Solo com camadas de espessuras variáveis.....                                                   | 39 |
| Figura 19 - Arranjo de Wenner.....                                                                          | 40 |
| Figura 20 - Estratificação do solo em duas camadas.....                                                     | 42 |
| Figura 21 – Exemplo de redução da resistência de um solo com tratamento químico.....                        | 43 |
| Figura 22 – Diferença de um solo tratado e não tratado.....                                                 | 44 |
| Figura 23 - Variação da resistência de aterramento de acordo com o tempo em solo tratado e não tratado..... | 45 |
| Figura 24 – Solda Exotérmica.....                                                                           | 46 |
| Figura 25 – Aterramento da cerca da subestação.....                                                         | 47 |
| Figura 26 – Outras formas de malhas.....                                                                    | 49 |
| Figura 27 - Limites e área da subestação.....                                                               | 50 |
| Figura 28 - Gráfico Resistência x Distância.....                                                            | 55 |
| Figura 29 – Subestação com os equipamentos aterrados.....                                                   | 57 |

## **LISTA DE TABELAS**

|                                                      |    |
|------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 - Resistividade do solo.....                | 18 |
| Tabela 2 - Constantes dos materiais.....             | 40 |
| Tabela 3 – Resumo dos cálculos.....                  | 44 |
| Tabela 4 - Área mínima aproximada da subestação..... | 46 |

## SUMÁRIO

|        |                                                           |    |
|--------|-----------------------------------------------------------|----|
| 1.     | <b>INTRODUÇÃO</b> .....                                   | 13 |
| 2.     | <b>PRINCÍPIOS E TÉCNICAS BÁSICAS DE ATERRAMENTO</b> ..... | 16 |
| 2.1.   | INTRODUÇÃO .....                                          | 16 |
| 2.1.1. | <b>Conceito de Zona</b> .....                             | 16 |
| 2.2.   | ASPECTOS DO ATERRAMENTO NO ÂMBITO MUNDIAL.....            | 17 |
| 2.3.   | ATERRAMENTOS NO BRASIL.....                               | 18 |
| 2.4.   | O SOLO .....                                              | 21 |
| 2.5.   | TIPOS DE ATERRAMENTOS .....                               | 21 |
| 2.5.1. | <b>Exemplo de aplicação</b> .....                         | 22 |
| 2.5.2. | <b>Segurança</b> .....                                    | 23 |
| 2.6.   | ATERRAMENTO EM TELECOMUNICAÇÕES.....                      | 24 |
| 2.6.1. | <b>Conexões em Série</b> .....                            | 24 |
| 2.6.2. | <b>Conexões em Paralelo</b> .....                         | 25 |
| 2.7.   | LOCALIZAÇÃO DO SISTEMA .....                              | 25 |
| 3.     | <b>ATERRAMENTO E SEUS MÉTODOS</b> .....                   | 26 |
| 3.1.   | INTRODUÇÃO .....                                          | 26 |
| 3.2.   | MATERIAIS DOS CONDUTORES.....                             | 26 |
| 3.2.1. | <b>Cobre</b> .....                                        | 26 |
| 3.2.2. | <b>Aço Cobreado</b> .....                                 | 26 |
| 3.2.3. | <b>Alumínio</b> .....                                     | 27 |
| 3.2.4. | <b>Aço</b> .....                                          | 27 |
| 3.3.   | SEGURANÇA EM ATERRAMENTO.....                             | 27 |
| 3.3.1. | <b>Tensão de passo</b> .....                              | 27 |
| 3.3.2. | <b>Tensão de passo máxima suportável</b> .....            | 29 |
| 3.3.3. | <b>Tensão de toque</b> .....                              | 30 |
| 3.3.4. | <b>Tensão máxima de toque suportável</b> .....            | 32 |
| 3.4.   | ANÁLISE DO SOLO .....                                     | 32 |
| 3.5.   | MÉTODOS DE MEDIÇÃO DA RESISTIVIDADE DO SOLO.....          | 34 |
| 3.5.1. | <b>Amostragem física do solo</b> .....                    | 34 |
| 3.5.2. | <b>Método da variação de profundidade</b> .....           | 35 |
| 3.5.3. | <b>Método dos dois pontos</b> .....                       | 35 |

|                                                                            |    |
|----------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.5.4. Método dos quatro eletrodos .....                                   | 36 |
| 3.5.5. Arranjo do eletrodo central .....                                   | 37 |
| 3.5.6. Arranjo de Lee .....                                                | 38 |
| 3.5.7. Arranjo de Wenner .....                                             | 40 |
| 3.6. DIMENSIONAMENTO DO CABO A SER UTILIZADO NA MALHA DE ATERRAMENTO ..... | 41 |
| 3.7. ESTRATIFICAÇÃO DO SOLO .....                                          | 41 |
| 3.8. TRATAMENTO QUÍMICO DO SOLO .....                                      | 42 |
| 4. ENSAIO DE TIPO .....                                                    | 46 |
| 4.1. INTRODUÇÃO .....                                                      | 46 |
| 4.2. SOLDA UTILIZADA .....                                                 | 46 |
| 4.3. LIMITES DE UMA SUBESTAÇÃO .....                                       | 47 |
| 4.4. FORMATOS DE MALHAS .....                                              | 48 |
| 4.6. CÁLCULO DA TENSÃO MÁXIMA DE PASSO SUPORTÁVEL .....                    | 50 |
| 4.7. CÁLCULO DA TENSÃO MÁXIMA DE TOQUE SUPORTÁVEL .....                    | 51 |
| 4.8. DIMENSIONAMENTO DO CABO A SER UTILIZADO NA MALHA DE ATERRAMENTO ..... | 52 |
| 4.9. CÁLCULO DA RESISTÊNCIA .....                                          | 53 |
| 5. CONCLUSÃO .....                                                         | 59 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....                                           | 61 |

## 1. INTRODUÇÃO

A importância desse trabalho está em retratar as diferentes maneiras de realizar uma malha de aterramento, apresentando as formas de se calcular a resistência e a resistividade do solo, apontando quais são as melhores maneiras de se aterrar os equipamentos de uma subestação, mostrando ainda os principais métodos utilizados hoje para os cálculos de resistividade do solo, os tipos de materiais usados para hastes de aterramento e também os diferentes tipos de solos e suas respectivas resistividades.

Apesar de mostrar os métodos, os cálculos e as condições necessárias para se calcular a resistência de uma malha de aterramento, garantindo a menor resistência possível, um ponto muito importante é a garantia da segurança de pessoas que possam vir a ter contato com um equipamento na subestação, seja por invasão de pessoas curiosas no local da subestação ou até mesmo pelos funcionários que trabalham na própria subestação, a importância de garantir um aterramento seguro para evitar acidentes que podem causar até a morte dessas pessoas.

Ao decorrer dos estudos apontados é possível perceber como é muito vantajoso realizar estudos de um aterramento antes do início do projeto, pois dessa maneira é possível aproveitar ao máximo toda a área da subestação, reduzindo custos, garantindo a confiabilidade do projeto e principalmente garantindo a segurança das pessoas em torno do local.

O aterramento não é utilizado somente em linhas de alta tensão ou em subestações onde os equipamentos sofrem grande indução eletromagnética, ele é usado, por exemplo, em residências. O aterramento residencial é mais utilizado para proteger contra descargas atmosféricas e possíveis surtos evitando a queima de equipamentos que estiverem devidamente ligados a esse aterramento. Existe também o aterramento em telecomunicações, onde o intuito é o processamento de dados e ele deve proteger a comunicação entre os equipamentos, não permitindo que algum surto altere um dado enviado ou até danificar os equipamentos envolvido. Em geral, independente da aplicação, a utilização de um aterramento de qualidade aumenta a vida útil e protege os equipamentos que estão conectados a esse aterramento.

Todos os projetos de aterramento devem seguir suas devidas normas, que são criadas por estudiosos das áreas de suas aplicações e, com o seu cumprimento, asseguram a boa qualidade da instalação e do projeto. Cada país segue normas específicas, para se desenvolver um projeto devem ser respeitadas as normas que correspondem aos locais que serão realizadas as instalações, sendo que a grande maioria dos países utilizam as normas internacionais por serem extremamente reconhecidas.

A padronização do aterramento é um dos vários problemas encontrados, muitas vezes não existem estudos de como seria a maneira mais proveitosa para reduzir custos e aumentar a confiabilidade do projeto e da construção da malha de aterramento, com estudos aprofundados é possível construir malhas de aterramento mais seguras e até mesmo mais funcionais, a falta de conhecimento muitas vezes faz com que muitas subestações tenham um aterramento que não garantem a devida proteção dos equipamentos, estruturas e das pessoas no local.

Outro problema causado pelo aterramento não funcional são os acidentes, os quais podem causar até a morte de pessoas que trabalham nas áreas da subestação, para isso não acontecer é necessário garantir que os equipamentos e as partes condutoras da subestação estejam devidamente aterrados e que qualquer pessoa possa, mesmo que acidentalmente, tocar uma dessas partes condutoras sem sofrer o risco de choque ou acidentes mais graves, somando a isso a malha de aterramento deve também proteger contra a tensão de passo, que se dá apenas por estar nas proximidades dos equipamentos da subestação. Sabendo dessa preocupação, através de normas é possível calcular qual é a máxima tensão, tanto tensão de toque quanto tensão de passo, suportável por uma pessoa.

O objetivo deste trabalho é mostrar que existem diferentes tipos de solos, fazendo com que o estudo da resistividade do solo e da necessidade de um o tratamento químico devam sempre ser realizados antes de qualquer tipo de projeto de aterramento. Mostrar também que as formas das malhas não afetam a qualidade do aterramento e podem ser variados de acordo com a estrutura e área da subestação, isso tudo enquanto garante a segurança das pessoas e a proteção dos equipamentos.

O método adotado para os cálculos de aterramento foi o método de Wenner, o qual é o mais utilizado devido a sua confiabilidade e praticidade. Os cálculos realizados foram teóricos e com valores próximos aos encontrados em diversas subestações e em projetos de malha de aterramento.

Com o método escolhido é possível mostrar todos os cálculos teóricos de resistências do solo, não esquecendo que os cálculos variam de acordo com cada tipo de solo, e calcular qual a área aproximada que uma subestação deve ter para garantir a baixa resistência de toda a malha de aterramento.

Este trabalho está dividido em 5 capítulos, o primeiro capítulo trata da introdução do tema, onde se apresenta os objetivos, os métodos utilizados e a ideia geral do trabalho; o segundo capítulo inicia o embasamento teórico de aterramento e solo, apresentando diferentes usos do

aterramento e apresentando o aterramento no mundo e no Brasil; o terceiro capítulo apresenta os métodos utilizados para cálculos da resistividade do solo, mostrando todo o embasamento de normas para apresentar as equações necessárias para se realizar um projeto de aterramento, onde tem a apresentação dos diferentes tipos de solo e do tratamento químico do solo, que é necessário em muitas ocasiões, e onde se apresenta as medidas de segurança de pessoas (tensão de toque e tensão de passo); o quarto capítulo utiliza o método de Wenner para determinar várias possibilidades de realizar a malha de aterramento, mostrando as áreas necessárias para se garantir a resistência baixa da malha de aterramento, levando em consideração as distâncias entre as hastes e os diferentes tipos de solo encontrados nas subestações; o último capítulo apresenta a conclusão do trabalho, que tem os objetivos esperados se foram alcançados e também o conhecimento obtido durante toda a preparação do trabalho.



## **2. PRINCÍPIOS E TÉCNICAS BÁSICOS DE ATERRAMENTO**

### **2.1. INTRODUÇÃO**

O aterramento tem diferentes visões pelo mundo, todos os países possuem normas a serem seguidas, no caso do Brasil as técnicas de aterramento seguem a norma, NBR 5410 (ABNT, 2004), que obviamente não são necessariamente iguais, por exemplo, as dos Estados Unidos, desta maneira não há como falar de aterramento sem antes comentar sobre suas técnicas no mundo e no próprio Brasil, assim como não seria possível comentar do aterramento sem falar das diferentes áreas e da importância do aterramento para essas áreas em específico.

#### **2.1.1. Conceito de Zona**

O conceito de zona, segundo a norma internacional, é o nome dado para designar o grau de risco encontrado no local, são algumas delas:

- Zona 0 - Local onde a ocorrência de mistura inflamável e explosiva é contínua ou existe por longos períodos;
- Zona 1 - local onde a ocorrência de mistura inflamável e explosiva é provável de acontecer em condições normais e operação do equipamento de processo;
- Zona 2 - local onde a ocorrência de mistura inflamável explosiva é pouco provável de acontecer e se acontecer é por curtos períodos.

A zona influencia em diferentes aspectos em relação aterramento, utilizando aterramentos específicos para zonas mais importantes e podendo ser um aterramento mais genérico para zonas onde não há risco de explosão.

Em áreas classificadas como zona 1 não pode existir poços de inspeção e todas as conexões nestas áreas entre os condutores e as hastes verticais devem ser completamente enterradas e soldadas com solda exotérmica.

Em áreas classificadas como zona 2 pode, caso seja necessário, possuir poços de inspeção das hastes de aterramento e as conexões entre as hastes, condutores e eletrodos são feitas com conectores mecânicos de alta pressão.

## 2.2. ASPECTOS DO ATERRAMENTO NO ÂMBITO MUNDIAL

O National Electrical Code ou Código Elétrico Nacional (NEC), abrange muitos países, inclusive o Brasil, também adotada em todos os cinquenta estados dos Estados Unidos, está disponível em um livro e serve como referência para a implantação de um projeto eletricamente seguro, que proteja pessoas e bens dos riscos elétricos. É publicado pela National Fire Protection Association (NFPA) e atualizado a cada três anos, sendo a NEC 2011 a última versão desenvolvida.

Ela abrange assuntos como a instalação de condutores elétricos, de equipamentos e de eletrodutos. A NEC exige que todos os equipamentos e circuitos fotovoltaicos (FV), expostos ou acessíveis sejam devidamente aterrados, utilizando ferramentas e métodos específicos.

Segundo Telló (2007), é importante comentar que o aterramento elétrico tem diferentes visões de acordo com a área da Engenharia Elétrica que se atua, para um profissional de Sistema de Potência o aterramento elétrico implica na necessidade de ter um caminho de baixa impedância, utilizado como ‘referencia’ do sistema em corrente alternada, e que possa garantir uma rápida atuação das proteções. Para profissionais de Telecomunicações, também em caráter genérico, aterramento elétrico significa ter um baixo valor de impedância entre equipamentos, bem como entre equipamentos e a terra. Já no caso de quem trabalha na parte de Rádio Frequência eles precisam de aterramento como um caminho de baixa impedância para altas frequências, além de ser um dos componentes no processo de propagação de sinais.

Desta forma as distintas áreas permitem que ao longo do mundo existem muitas variações tanto de projetos como de execuções dos aterramentos, abrindo margem para normas diferentes em países diferentes.

Segundo Cabral (2010), por volta dos anos 1960, nos Estados Unidos, com início do aumento do uso de equipamentos eletrônicos sensíveis, havia desconfianças fundamentadas quanto à possibilidade de uso do aterramento geral da instalação para aterrar a massa ou a carcaça desses equipamentos, afinal, o aterramento geral estava (e ainda está hoje) sujeito a diversas incidências de surtos, de manobra e atmosféricos, e de ruídos de equipamentos cada vez mais potentes.

Assim, os equipamentos sensíveis deveriam ter a massa ou a carcaça ligada a um aterramento exclusivo, isolado, e não mais no aterramento geral, em que também estaria ligado ao neutro da rede, tido como ruidoso. Seguiu-se um período de um sem-número de defeitos nos equipamentos ligados em aterramento em separado, principalmente devido a trovoadas. Em

significativo número, houve também relatos de choques elétricos e de existências de perdas (fuga de corrente) nas instalações. Após uma série de análises cuidadosas a respeito do problema, nos Estados Unidos, verificou-se a necessidade de correções do uso de todos os esquemas de aterramento, culminando com a proibição de aterramentos eminentemente isolados (TT) e de uso do neutro para aterramento de massas (TN-C) naquele país. Portanto, o Esquema TN-S é o recomendado, os esquemas TT, TN-C, TN-S serão apresentados em aterramentos no Brasil.

No Brasil, por sua vez, embora a norma NBR 5410 (ABNT, 2004) tenha restrito o uso de esquemas que não sejam o TN-S, muitas instalações ainda não atendem aos mínimos requisitos de segurança. Ou seja, vivem-se ainda na época de queima de equipamentos, representando significativos custos de manutenção, exposição de usuários a choques elétricos e, também, possibilitando a existência de perdas significativas na instalação, com eminente prejuízo. Para piorar esse quadro, não é difícil encontrar instalações que apresentem diversos dos esquemas de aterramento em convívio, ainda que sejam incompatíveis. Dessa forma, pretende-se que este trabalho contribua para uma cultura de utilização correta de esquemas elétricos, que, por consequência, garante maior segurança às pessoas que precisam operar equipamentos elétricos.

### 2.3. ATERRAMENTOS NO BRASIL

A NBR 5410 (ABNT, 2004) prevê o uso de diversos tipos de aterramento, gerando possibilidade de confusão por parte dos projetistas, como por exemplo, alguns dos esquemas previstos pela norma são proibidos nos Estados Unidos. Há, portanto, um longo caminho até que se consiga esclarecer quais problemas esse tipo de esquema representa.

Segundo a norma brasileira de instalações elétricas de baixa tensão, a NBR 5410 (ABNT, 2004), na classificação dos esquemas de aterramento é utilizada a seguinte simbologia:

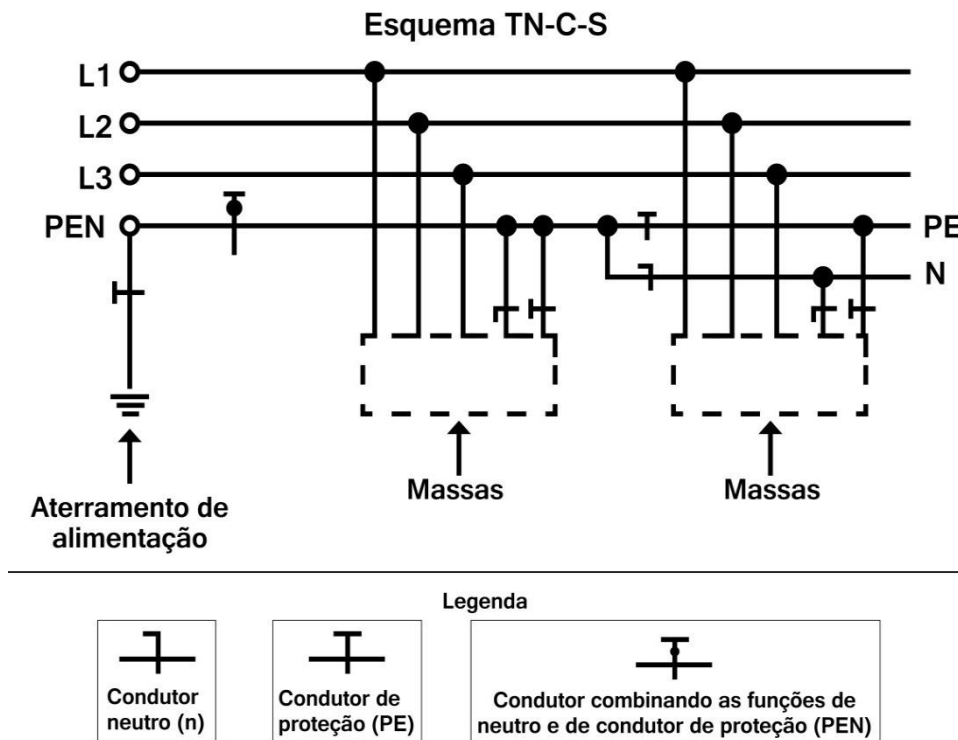
- Primeira letra representa a situação da alimentação em relação à terra, sendo 'T' um ponto diretamente aterrado e 'I' isolada da terra.
- Segunda letra representa a situação das massas da instalação elétrica em relação à terra, sendo 'T' massas aterradas com terra própria, 'N' massas ligadas diretamente ao ponto aterrado da fonte (no caso de corrente alternada, o ponto aterrado é normalmente o ponto neutro) e 'I' Isolada da terra.

- Outras letras (eventuais) representa a disposição do condutor neutro e do condutor de proteção, sendo ‘S’ funções de neutro e de proteção asseguradas por condutores distintos e ‘C’ funções de neutro e de proteção comuns.

De acordo com essa nomenclatura apresentada, os esquemas TN, sendo TN-C e TN-S são os principais, possuem um ponto de alimentação diretamente aterrado, sendo as massas ligadas a esse ponto por meio de condutores de proteção. Neste esquema, toda corrente de falta direta “fase-massa” é uma corrente de curto-circuito.

Ainda de acordo com Cabral (2010), o esquema mais comum hoje em dia é o TN-C, como mostra na Figura 1, em que o condutor de neutro tem a função adicional de propiciar potencial de terra aos equipamentos. Além dessa, sua principal função é o retorno de corrente das cargas. Embora seja um esquema que tende a ser substituído em longo prazo pelo TN-S, ainda é comum de ser encontrado, tornando-se uma referência para a comparação com os demais esquemas.

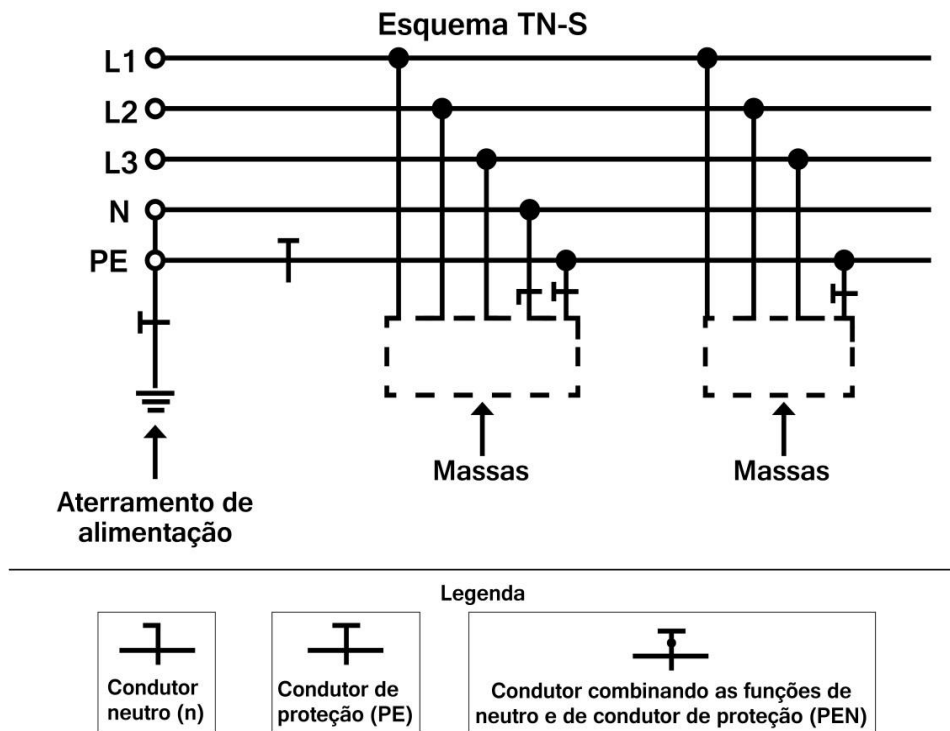
Figura 1 - Esquema TN-C.



Fonte: Cabral (2010)

Por sua vez, um esquema mais recomendado, no qual os condutores de proteção e neutro são separados, é o TN-S, conforme mostrado na Figura 2.

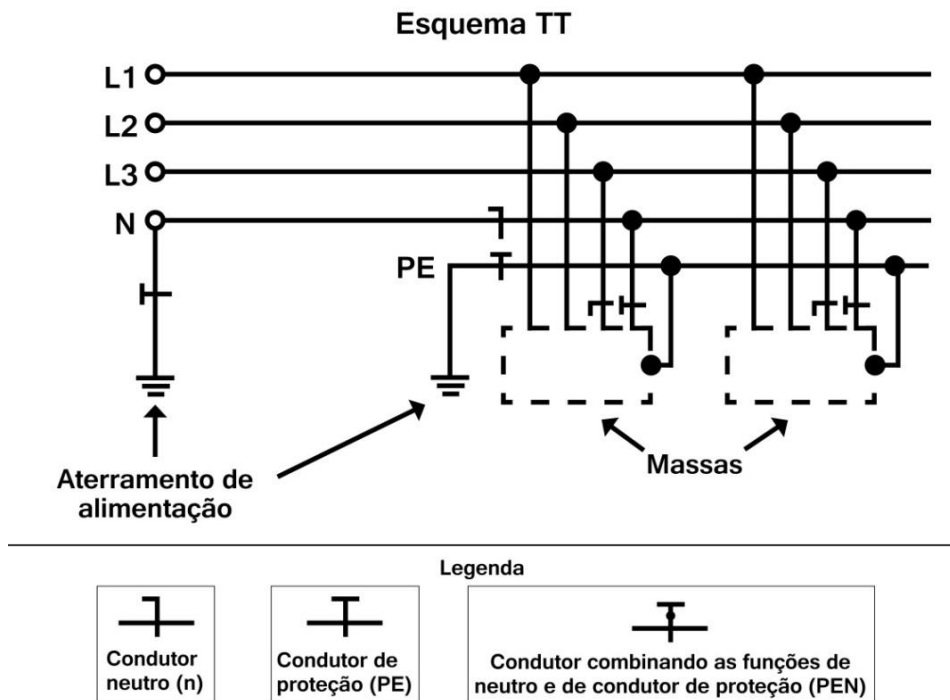
Figura 2 - Esquema TN-S.



Fonte: Cabral (2010)

E finalmente de acordo com Cabral (2010), o esquema TT. Além desses, é importante citar que existe outros esquemas, como o IT, que tem aplicações particulares, tais como hospitais; e o TN-C-S, que é um misto do TN-S com o TN-C. O esquema TT, entretanto, um aterramento em separado (ou isolado) é utilizado somente para aterrar a massa metálica de cada um dos equipamentos, tal como mostrado na Figura 3.

Figura 3 - Esquema TT.



Fonte: Cabral (2010)

## 2.4. O SOLO

O solo é considerado um condutor que a corrente elétrica pode fluir, se possuir uma resistividade na faixa de 50 a 100  $\Omega \cdot m$  (ohm.metro) o solo é considerado um bom condutor, acima desse valor considera-se como um condutor razoável. Ainda, utilizando tratamento químico, pode-se fazer com que o solo melhore sua característica como condutor.

Em muitas instalações é necessário medir a resistência do solo, para assim poder determinar um valor real e mais preciso para aprimorar o aterramento, os métodos para medir a resistência do solo, assim como as fórmulas usadas, são discutidos nos próximos capítulos.

## 2.5. TIPOS DE ATERRAMENTOS

O aterramento consiste em um conjunto de condutores, hastes, cabos e conectores, junto com algum elemento que dissipe as correntes que sejam impostas a esse sistema, com o principal objetivo de garantir a segurança das pessoas próximas e dentro do local onde o sistema foi instalado e proteger também os equipamentos protegidos por esse aterramento. Para a segurança, todos os equipamentos que possam ter contato com alguma parte energizada devem ser devidamente aterrados.

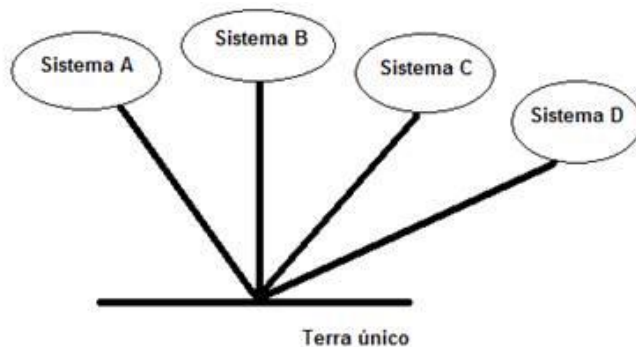
Segundo Pinheiro (2013), com a condição de todos os equipamentos ou partes que possam estar em contato com partes energizadas estejam devidamente aterrados qualquer contato acidental causará um curto-circuito, e assim a proteção do sistema irá atuar interrompendo a ligação do circuito a massa. Existem diferentes maneiras de aterrar um circuito, estas variam desde simples hastes até grandes e complexas malhas com cabos enterrados no solo, sempre levando em consideração que deve ser escolhido o método que melhor se encaixa em cada sistema, os principais tipos são:

- Haste cravada ao solo;
- Hastes alinhadas;
- Hastes em triângulos;
- Hastes em quadrado;
- Hastes em círculos;
- Placas de material condutor enterrado no solo;
- Fios ou cabos enterrados no solo, formando configurações diversas, tais como em cruz, em estrela, quadriculados formando uma malha de terra.

### **2.5.1. Exemplo de aplicação**

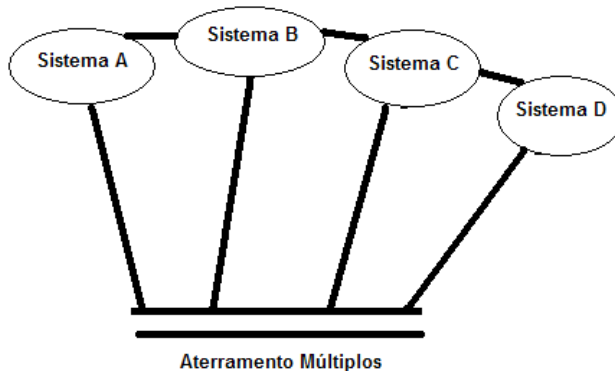
Um exemplo de aplicação simples seria vários equipamentos, como computadores, ligados em rede e com vários periféricos, como impressoras, ploters e microprocessadores, estando a alguns metros uns dos outros. O aterramento desses equipamentos pode ser realizado tanto com um ponto único quanto em pontos múltiplos, como mostrados na Figura 4 e Figura 5, respectivamente.

Figura 4 - Aterramento em ponto único.



Fonte: César (2011)

Figura 5 - Aterramento em pontos múltiplos.



Fonte: César (2011)

### 2.5.2. Segurança

Conforme a norma NBR 5410 (ABNT 2004), em baixa tensão, toda parte metálica não energizada como, por exemplo, portas e tubulações devem ser aterradas individualmente como no esquema TT (Figura 3) ou através de um condutor de proteção aterrado esquema TN-C ou TNC-S (Figura 1 e Figura 2).

Quando uma pessoa toca em uma massa não aterrada ou aterrada sob uma impedância elevada a mesma fica submetida a uma tensão de toque e por consequência a uma corrente que, dependendo do sistema, pode levar a morte. Lembrando assim da importância de seguir a norma e realizar um aterramento seguro.

O aterramento deve limitar a tensão que pode estar presente entre a carcaça metálica de um equipamento com falha de isolamento e o solo ou superfície que está segurando o equipamento.



A corrente deve ser drenada pelo sistema de aterramento ao invés de circular pelo corpo de uma pessoa que entrou em contato com o equipamento, para isso deve existir um caminho de baixa impedância para essa corrente.

No caso de existir cargas com líquidos inflamáveis ou algum material explosivo deve ter cuidado extra para não causar explosões.

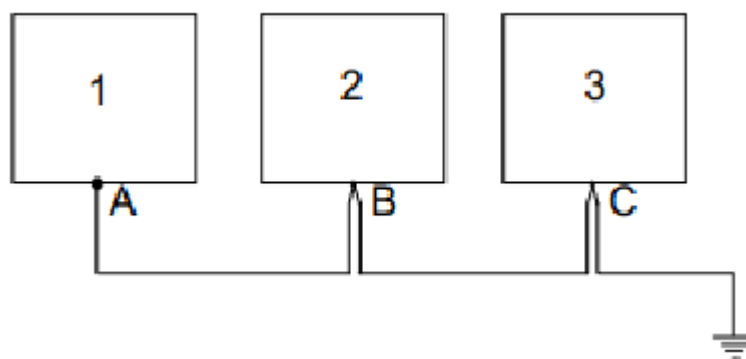
## 2.6. ATERRAMENTO EM TELECOMUNICAÇÕES

Como comentado anteriormente, o aterramento também depende da necessidade específica de cada área, para equipamentos de telecomunicações e de processamento de dados, devido à grande possibilidade de interferência eletromagnética e eletrostática devem receber um aterramento mais específico.

### 2.6.1. Conexões em Série

Este esquema representa uma série de equipamentos ligados em série até o ponto de aterramento, como exemplificado na Figura 6.

Figura 6 - Aterramento em série.



Fonte: Norma Técnica Petrobras

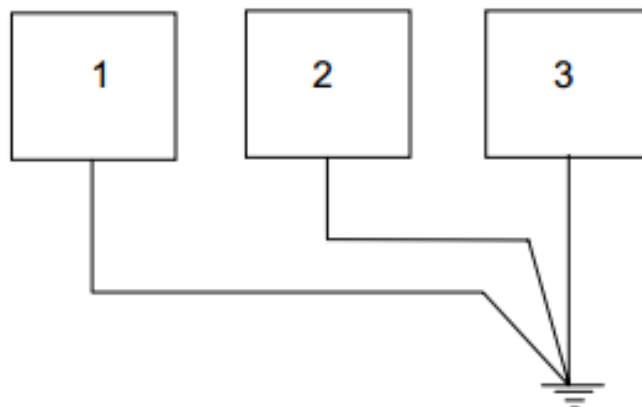
(2002)

De acordo com a Norma Técnica Petrobras (2002), em relação a susceptibilidade a ruídos, o mais importante na área de telecomunicações, esta conexão não é aconselhável por caso haver algum tipo de problema em um dos equipamentos todos serem afetados, porém pode ser usada caso a tensão e a corrente dos equipamentos trabalhem com níveis semelhantes.

### 2.6.2. Conexões em Paralelo

Segundo a Norma Técnica Petrobras (2002), a conexão da Figura 7, conhecida aterramento em paralelo, é a mais aconselhável para a grande maioria dos equipamentos em telecomunicação, suprimindo o problema encontrado nas conexões em série e podendo ser usado mesmo com níveis diferentes de tensão e corrente.

Figura 7- Aterramento em paralelo.



Petrobras (2002)

Fonte: Norma Técnica

## 2.7. LOCALIZAÇÃO DO SISTEMA

De acordo com Sardinha (2012), a localização do sistema de aterramento depende da posição estratégica ocupada pelos equipamentos elétricos importantes do sistema em questão. Deve ser definida sua localização levando em consideração os seguintes itens:

- Centro geométrico de cargas;
- Local com terreno disponível;
- Terreno acessível economicamente;
- Local seguro de inundações;
- Não comprometer a segurança da população.

Assim havendo algum tipo de problema que possa comprometer a segurança ou o uso adequado do sistema de aterramento, deve-se, então, escolher um novo local.

### **3. ATERRAMENTO E SEUS MÉTODOS**

#### **3.1. INTRODUÇÃO**

Existem diferentes considerações quando se trata da malha de aterramento, como o material e a escolha da bitola dos condutores desta malha. Sendo assim é importante ter o conhecimento dos cálculos teóricos usados para definir qual a resistividade do solo, qual o tamanho da malha de aterramento e quais métodos são melhores de acordo com a necessidade prática de cada local ou equipamento.

#### **3.2. MATERIAIS DOS CONDUTORES**

##### **3.2.1. Cobre**

Conforme Rocha (2007), o cobre é o material mais usado em sistemas de aterramentos no Brasil, isso ocorre pelo fato do cobre possuir elevada condutividade e alta resistência à corrosão que podem acontecer no solo. Isto se deve ao fato de que o cobre se comporta como catodo em relação a maioria dos metais que são encontrados próximos aos sistemas de aterramentos.

Pelo fato do cobre não sofrer corrosão tão facilmente pode ser prejudicial aos equipamentos metálicos próximos, pois as malhas construídas de cobre formam células galvânicas em potencial que promove a corrosão dessas peças metálicas. Para controlar este problema usam-se anodos de sacrifício, que iriam corroer no lugar do equipamento.

##### **3.2.2. AÇO COBREADO**

De acordo com Rocha (2007), o condutor de aço cobreado é um condutor feito de aço com uma camada envoltória de cobre. Este material é muito usado para haste de aterramento em todo o Brasil.

Este material é uma boa escolha também para malhas de aterramento, principalmente quando a instalação se situa onde o furto de cobre é comum e pode ser um problema, ou seja, devido a sua boa resistência mecânica o aço se torna mais difícil de ser furtado, porém deve-se tomar cuidado, pois o aço tem um risco maior de corroer.

### **3.2.3. Alumínio**

O Alumínio é um material utilizado em malhas de aterramento com menor frequência. Apesar de parecer que o alumínio é um bom material para aterrar, ele possui algumas desvantagens (ROCHA, 2007).

- O alumínio é suscetível à corrosão dependendo do solo e, além disso, a camada superficial que se forma no alumínio devido a sua corrosão é péssima condutora.
- A corrosão gradual devido a corrente alternada pode causar problemas no condutor.
- O alumínio se comporta como anodo com relação a muitos outros metais, ou seja, na proximidade de outros metais o alumínio se comporta como um metal de sacrifício.

Por esses motivos na utilização do condutor de alumínio deve-se fazer uma investigação do local para evitar riscos de corrosão.

### **3.2.4. Aço**

O aço pode ser usado tanto em condutores quanto em hastes de aterramentos, desde que todas as precauções sejam tomadas no sentido de evitar sua corrosão. Neste caso seria ideal a utilização do aço galvanizado ou aço resistente à corrosão (ROCHA, 2007).

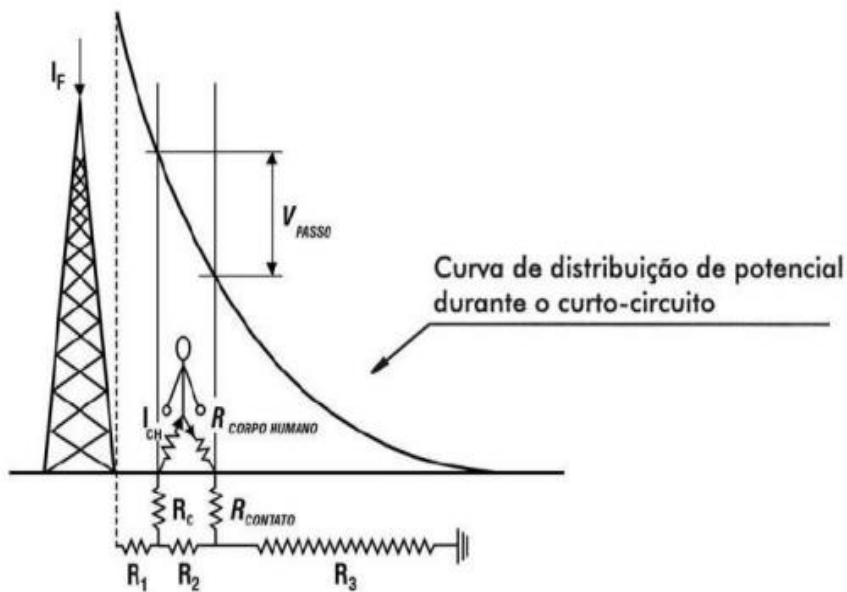
## **3.3. SEGURANÇA EM ATERRAMENTO**

Segundo Beltani (2007), as malhas de aterramento elétrico têm por função manter os valores de potencial dentro de limites que proporcionem segurança de pessoas e até mesmo animais, que por acaso cheguem próximo ou até toquem em estruturas metálicas próximos de sistemas energizados.

### **3.3.1. Tensão de passo**

De acordo com Kinderman (1998), Tensão de passo é definida pela diferença de potencial que aparece entre dois pontos situados no chão e distanciados de um metro, devido à passagem de corrente de falha pela terra. A Figura 8 mostra a aplicação da tensão de passo na qual se observa um indivíduo que apesar de não estar em contato direto com a carcaça metálica ele ainda sofre risco de vida por estar próximo, isso acontece por ele estar em contato com a terra em dois pontos diferentes criando uma resistência.

Figura 8 - Exemplo de tensão de passo.



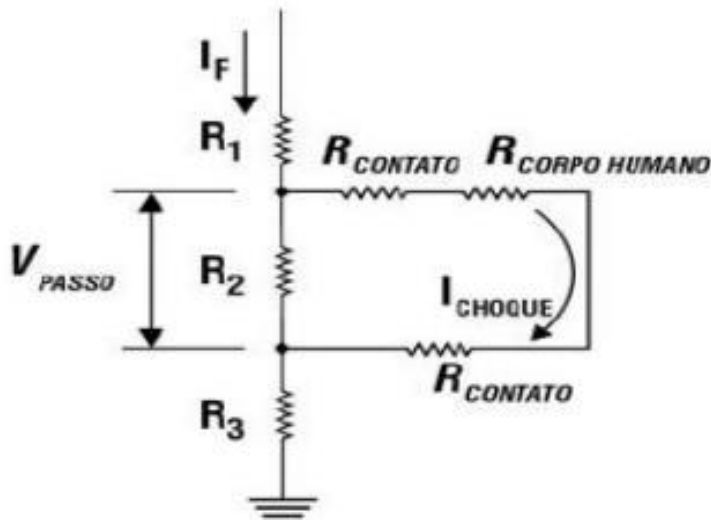
Fonte: Kinderman (1998)

Sendo:

- $I_{CH}$  – é corrente de choque (A);
- $R_1$  – é resistência referente a distância entre o ponto mais próximo da carcaça metálica e o corpo humano ( $\Omega$ );
- $R_2$  – é a resistência referente a distância entre as duas pernas do corpo humano ( $\Omega$ );
- $R_3$  - é a resistência referente a distância entre a segunda perna até o ponto em que o potencial é zero ( $\Omega$ );
- $R_{contato}$  - é a resistência entre a perna e o solo ( $\Omega$ );
- $R_{corpo humano}$  - é a resistência interna entre as duas pernas do corpo humano ( $\Omega$ ).

Através da Figura 8 pode-se criar um esquema elétrico, mostrado na Figura 9.

Figura 9 - Esquema elétrico da tensão de passo.



Fonte: Kinderman (1998)

A partir do circuito ilustrado na Figura 9 a tensão de passo é calculada pela equação (3.1):

$$V_{passo} = (2R_{contato} + R_{corpo humano}) \times I_{choque} \quad (3.1)$$

A resistência de contato é considerada como 3 vezes a do solo e a resistência do corpo humano varia de acordo com cada pessoa, então segundo Beltani (2007) deve-se considerar 1000  $\Omega$ .

### 3.3.2. Tensão de passo máxima suportável

Seguindo a norma IEEE 80-2015, (IEEE, 2015) substituindo a equação (3.2) na equação (3.3) é possível saber qual é a tensão máxima de passo suportável:

$$C_s = 1 - \frac{0,09 \cdot \left(1 - \frac{\rho_1}{\rho_s}\right)}{2 \cdot h_s + 0,09} \quad (3.2)$$

$$V_{passo\ suportavel} = (1000 + 6 \cdot C_s \cdot \rho_s) \cdot \frac{0,157}{\sqrt{t_s}} \quad (3.3)$$

Sendo:

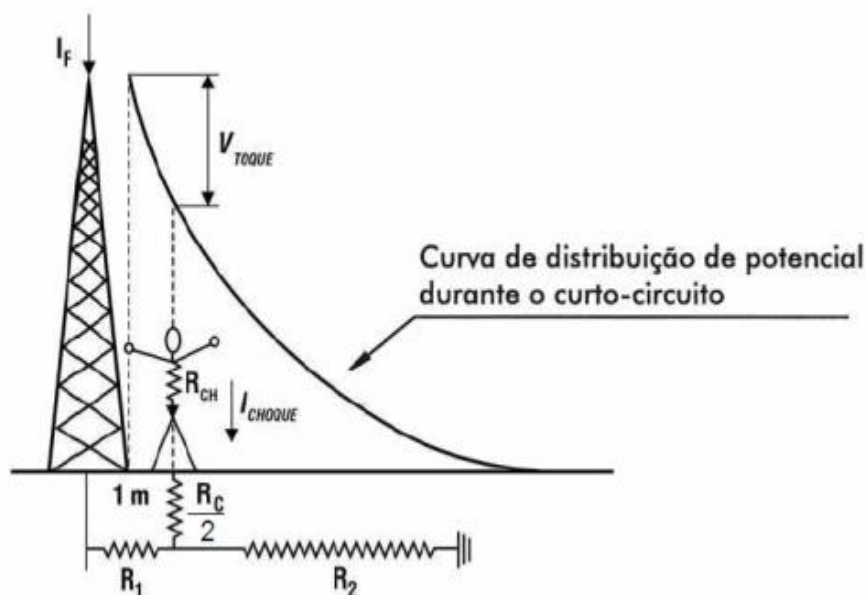
- $C_s$  - é o fator de redução ( $\Omega \cdot m$ );

- $h_s$  - é a espessura da camada de recobrimento (m);
- $\rho_1$  - é a resistividade da camada de recobrimento ( $\Omega.m$ );
- $\rho_s$  - é a resistividade do solo natural ( $\Omega.m$ );
- $t_s$  - é o tempo de eliminação da corrente de falta (s);
- $V_{passo\ suportavel}$  - é a tensão de passo máxima suportável (V).

### 3.3.3. Tensão de toque

A tensão de toque ocorre quando uma pessoa ou animal encosta-se a uma superfície de um equipamento energizado que esteja com um mau isolamento criando assim uma diferença de potencial entre as mãos e os pés (KINDERMAN, 1998). Por consequência tem-se a passagem de corrente pelo corpo humano que dependendo da sua duração e intensidade pode gerar alto risco a pessoa. A Figura 10 mostra a aplicação da tensão de toque e na Figura 11 sua respectiva representação esquemática, a qual permite calcular a deferida tensão através da equação (3.4).

Figura 10 – Exemplo de tensão de toque.



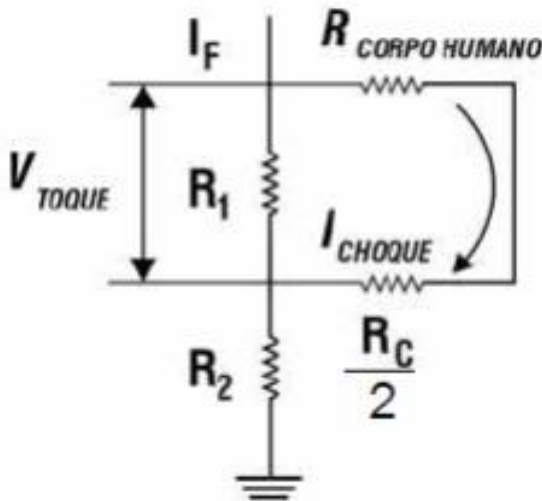
Fonte: Kinderman (1998)

Sendo:

- $I_{CHOQUE}$  – é corrente de choque (A);

- $R_1$  – é resistência referente a distância entre o ponto de toque com a carcaça metálica e resistência do corpo humano ( $\Omega$ );
- $R_2$  - é a resistência referente a distância entre a resistência do corpo humano até o ponto em que o potencial é zero ( $\Omega$ );
- $R_c$  - é a resistência entre a perna e o solo ( $\Omega$ );
- $R_{CH}$  - é a resistência interna do corpo humano ( $\Omega$ ).

Figura 11 – Esquema elétrico da tensão de toque.



Fonte: Kinderman (1998)

A partir do circuito ilustrado na Figura 11 a tensão de toque é calculada pela equação (3.4):

$$V_{toque} = \left( \frac{R_{contato}}{2} + R_{corpo\ humano} \right) \times I_{choque} \quad (3.4)$$

Assim como no caso da tensão de passo, a resistência de contato é considerada como 3 vezes a do solo e a resistência do corpo humano varia de acordo com cada pessoa, então segundo Beltani deve-se considerar 1000  $\Omega$ . Nota-se que neste caso a resistência de contato fica a metade, pois se divide entre as duas pernas.



### 3.3.4. Tensão máxima de toque suportável

Seguindo a norma IEEE 80-2015, substituindo a equação (3.5) na equação (3.6) é possível saber qual é a tensão máxima de toque suportável:

$$C_s = 1 - \frac{0,09 \cdot \left(1 - \frac{\rho_1}{\rho_s}\right)}{2 \cdot h_s + 0,09} \quad (3.5)$$

$$V_{\text{toque suportavel}} = (1000 + 1,5 \cdot C_s \cdot \rho_s) \cdot \frac{0,157}{\sqrt{t_s}} \quad (3.6)$$

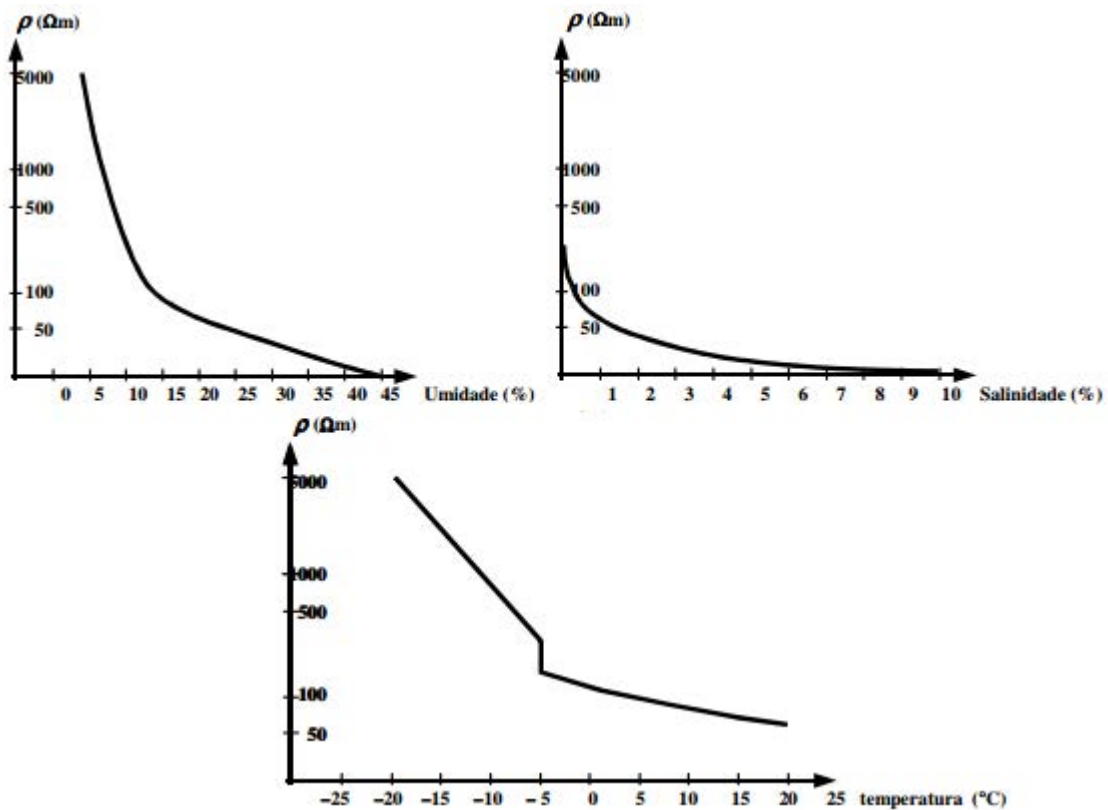
Sendo:

- $C_s$  - é o fator de redução ( $\Omega \cdot m$ );
- $h_s$  - é a espessura da camada de recobrimento (m);
- $\rho_1$  - é a resistividade da camada de recobrimento ( $\Omega \cdot m$ );
- $\rho_s$  - é a resistividade do solo natural ( $\Omega \cdot m$ );
- $t_s$  - é o tempo de eliminação da corrente de falta (s);
- $V_{\text{toque suportavel}}$  - é a tensão de toque máxima suportável (V).

### 3.4. ANÁLISE DO SOLO

A NBR7117 (ABNT, 2004) estabelece os requisitos para medição da resistividade e a determinação da especificação do solo. O solo tem uma composição bastante heterogênea, sendo que o valor da sua resistividade pode variar de local para local, em função do tipo de solo (argila, calcário, areia e granito), devido à umidade, salinidade, temperatura, como mostrado na Figura 12, e também devido à idade da formação geológica. A resistividade do solo é afetada também pela contaminação e compactação do solo, ou seja, pode ser alterado por fatores humanos, um exemplo de resistividade em relação ao tipo de solo pode ser visto na Tabela .

Figura 12 – Curvas de resistividade em função da umidade, salinidade e temperatura.



Fonte:

ABNT (2004)

Tabela 1 – Resistividade do solo

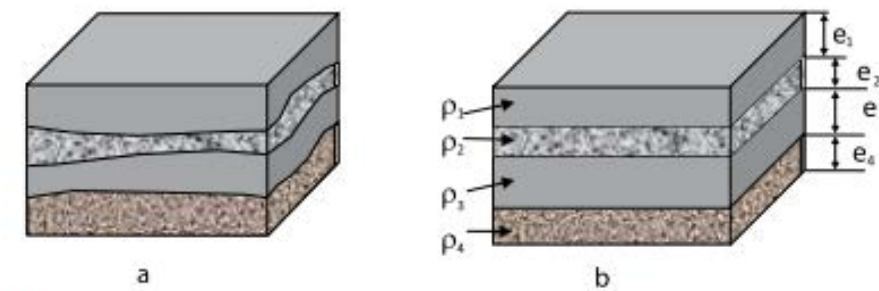
| Tipo de solo      | Resistividade ( $\Omega.m$ ) |
|-------------------|------------------------------|
| Lama              | 5 a 100                      |
| Solos aráveis     | 50 a 500                     |
| Argila            | 300 a 5000                   |
| Areia             | 1000 a 8000                  |
| Calcário          | 500 a 5000                   |
| Granito e arenito | 100 a 10000                  |
| Basalto           | 10000 a 20000                |

Fonte: Sueta (2012)

O solo normalmente é constituído por várias camadas, sendo que cada uma delas apresenta uma espessura e um valor de resistividade. É de extrema importância saber estas características para poder definir a malha de aterramento que será usada.

Na Figura 13 pode-se observar a diferença entre o solo real e como são consideradas as camadas para facilitar no cálculo sem que tenha muita diferença com o esperado.

Figura 13 – Estratificação do (a) Solo real e (b) Solo modelado para análise.



Legenda

|               |                                                 |
|---------------|-------------------------------------------------|
| $\rho_1, e_1$ | Resistividade e espessura da camada de número 1 |
| $\rho_2, e_2$ | Resistividade e espessura da camada de número 2 |
| $\rho_3, e_3$ | Resistividade e espessura da camada de número 3 |
| $\rho_4, e_4$ | Resistividade e espessura da camada de número 4 |

Fonte: Sueta (2012)

### 3.5. MÉTODOS DE MEDIÇÃO DA RESISTIVIDADE DO SOLO

Segundo Sueta (2012), são alguns dos métodos usados para medição da resistividade do solo:

- Amostragem física do solo;
- Método da variação de profundidade;
- Método dos dois pontos;
- Método dos quatro pontos, com diferentes arranjos:
  - Arranjo do eletrodo central;
  - Arranjo de Lee;
  - Arranjo de Wenner.

#### 3.5.1. Amostragem física do solo

Este método é usado como comparativo, são levantados em laboratório as curvas de resistividade de acordo com a quantidade de água adicionada ao solo e também com a capacidade que o solo tem de reter esta água. Desta forma determinam-se os valores mínimos do solo, quando está saturado com água, e máximos, quando está totalmente seco. Após analisado o solo pode-se determinar a capacidade de retenção de umidade que este solo terá na maior parte do tempo, com isso estimasse o valor da resistividade do solo.

### 3.5.2. Método da variação de profundidade

De acordo com a NBR 7117 (ABNT, 2004), este método consiste em ensaios de medição de resistência de terra usando várias e diferentes profundidades (L) do eletrodo de ensaio de diâmetro (d). O método de variação de profundidade é útil para saber sobre a natureza do solo na vizinhança da haste, porém se um grande volume de solo deve ser investigado deve-se adotar o método dos quatro eletrodos, já que o cravamento de hastes muito longas não é prático. A resistência de aterramento de uma haste enterrada em um solo uniforme é dada pela equação (3.7):

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left\{ \ln \left( \frac{4L}{r} \right) - 1 \right\} \quad (3.7)$$

Sendo:

- $\rho$  - é a resistividade média do solo ( $\Omega.m$ );
- R - é a resistência medida em ( $\Omega$ );
- L - é a profundidade de cravação (m);
- r - é o raio do eletrodo (m).

### 3.5.3. Método dos dois pontos

Segundo a NBR 7117 (ABNT, 2004), trata-se de um método aproximado para avaliar pequenos volumes de solo onde se usa dois eletrodos iguais, na mesma profundidade e afastado de uma distância de aproximadamente '5xL'. Usa-se um cabo isolado para ligar ambos os eletrodos e assim medir sua resistência em série através de um terrômetro, com a pinça enlaçando o cabo que interliga os eletrodos.

Portanto, a resistividade média do solo entre os dois eletrodos é dada pela equação (3.8):

$$\rho_{2e} = \frac{R_m \times \pi L}{\ln \left( \frac{2L}{r} \right)} \quad (3.8)$$

Sendo:

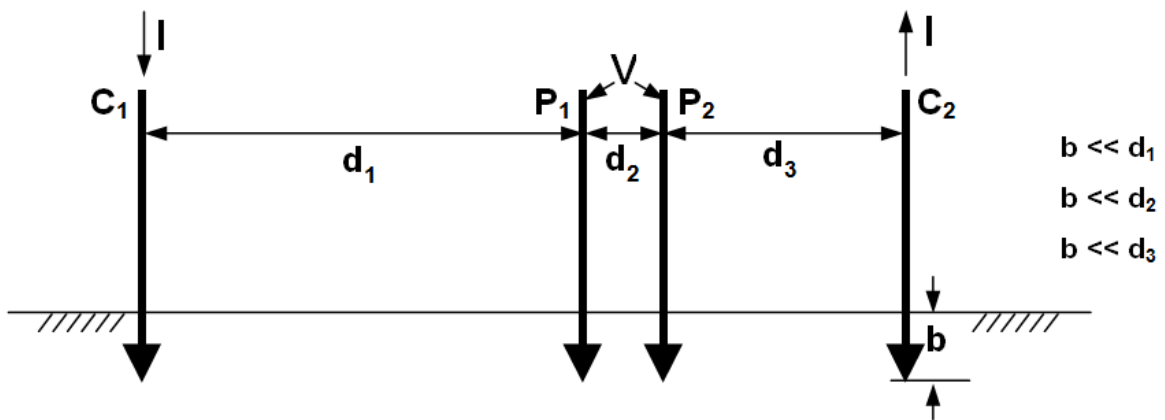
- $\rho_{2e}$  - é a resistividade média vista pelos dois eletrodos em ( $\Omega.m$ );

- $R_m$  - é a resistência medida em ( $\Omega$ );
- $L$  - é a profundidade de cravação (m);
- $r$  - é o raio do eletrodo (m).

### 3.5.4. Método dos quatro eletrodos

Conforme a NBR 7117 (ABNT, 2004), este método é mais utilizado para medição da resistividade média de grandes volumes de terra. Pequenos eletrodos são cravados no solo a pequenas profundidades todos alinhados e espaçados de intervalos não necessariamente iguais. A corrente de ensaio  $I$  (mA) é injetada entre os dois eletrodos externos e a diferença de potencial  $V$  é medida entre os dois eletrodos internos com um potenciômetro ou voltímetro. A resistividade é dada pela equação (3.9), cujas variáveis estão indicadas na Figura 14:

Figura 14 – Método dos quatros eletrodos



Fonte: Sueta (2012)

$$\rho_1 = \frac{2\pi}{\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_3} - \frac{1}{(d_1 + d_2)} - \frac{1}{(d_2 + d_3)}} \times \left(\frac{V}{I}\right) \quad (3.9)$$

Sendo,

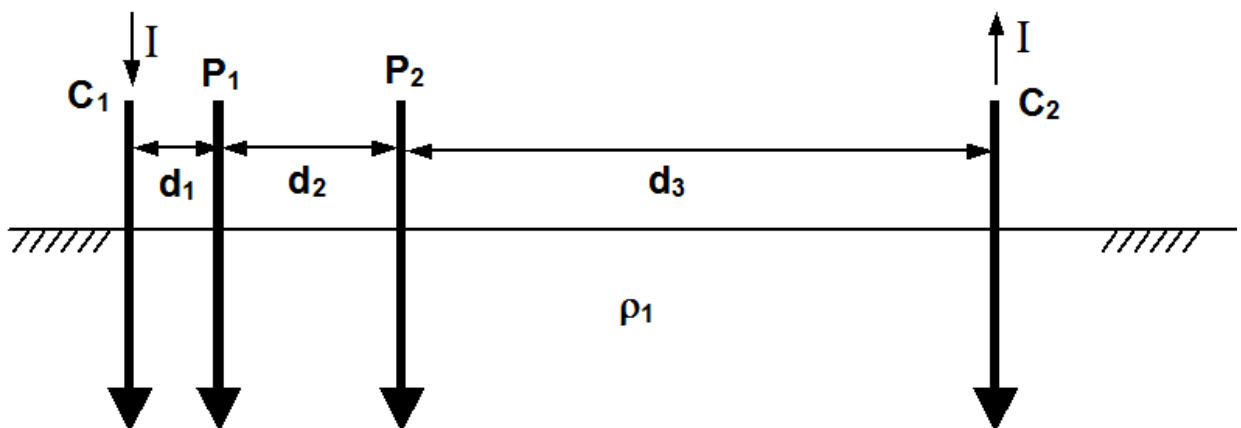
- $\rho_1$  – resistividade;
- $d_1$  – distância entre os eletrodos  $C_1$  e  $P_1$ ;
- $d_2$  – distância entre os eletrodos  $P_1$  e  $P_2$ ;
- $d_3$  – distância entre os eletrodos  $C_2$  e  $P_2$ ;

- V – diferença de tensão entre os eletrodos de potencial P<sub>1</sub> e P<sub>2</sub>;
- I – corrente entre os eletrodos de corrente C<sub>1</sub> e C<sub>2</sub>.

### 3.5.5. Arranjo do eletrodo central

De acordo com a NBR 7117 (ABNT, 2004), este arranjo deve ser usado em locais onde a resistividade do solo é elevada e é mais recomendado para grandes profundidades. Conforme a Figura 15, C<sub>2</sub> é fixado no centro da área a ser medida, devendo manter a condição de d<sub>3</sub> muito maior que d<sub>1</sub> e d<sub>2</sub>. A resistividade para determinada profundidade de encravamento é dada pela média aritmética das distâncias através da equação (3.10).

Figura 15 - Método do eletrodo central.



Fonte: Sueta (2012)

$$\rho_{(h)} = \frac{2\pi \times d_1 \times (d_1 + d_2)}{d_2} \times \left(\frac{V}{I}\right) \quad (3.10)$$

Sendo,

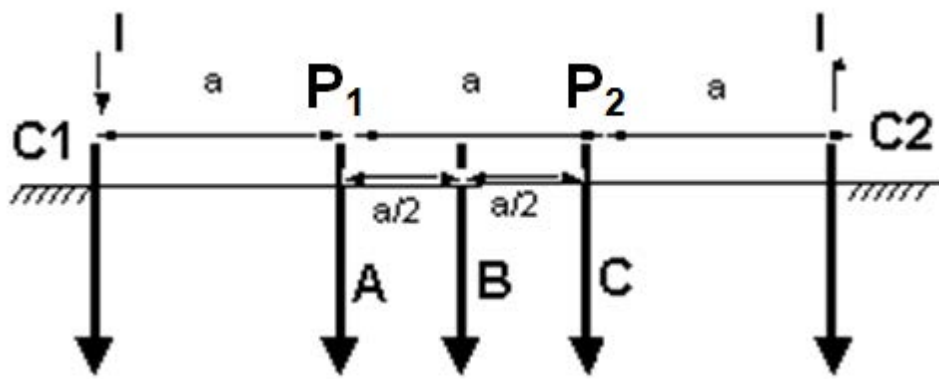
- $\rho_{(h)}$  – resistividade;
- d<sub>1</sub> – distância entre os eletrodos C<sub>1</sub> e P<sub>1</sub>;
- d<sub>2</sub> – distância entre os eletrodos P<sub>1</sub> e P<sub>2</sub>;
- d<sub>3</sub> – distância entre os eletrodos C<sub>2</sub> e P<sub>2</sub>;
- V – diferença de tensão entre os eletrodos de potencial P<sub>1</sub> e P<sub>2</sub>;

- $I$  – corrente entre os eletrodos de corrente  $C_1$  e  $C_2$ .

### 3.5.6. Arranjo de Lee

Conforme a NBR 7117 (ABNT, 2004), o arranjo de Lee permite detectar variações nas espessuras das camadas do solo, para isso as distâncias devem ser iguais, como mostra a Figura 16.

Figura 16 - Arranjo de Lee



Fonte: Sueta

(2012)

A resistividade do solo neste caso é baseada na diferença de potencial entre as hastes A, B e C, usando as equações (3.11) e (3.12):

$$\rho_{1a} = 4\pi a \times \left( \frac{V_{AB}}{I} \right) \quad (3.11)$$

$$\rho_{2a} = 4\pi a \times \left( \frac{V_{BC}}{I} \right) \quad (3.12)$$

Sendo,

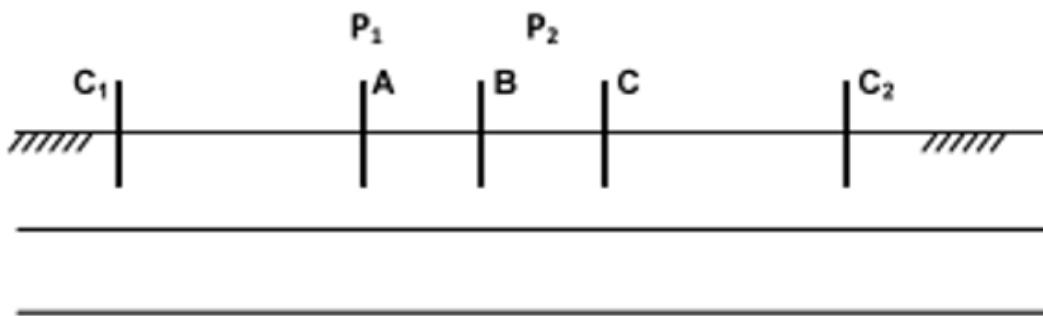
- $\rho_{1a}$  e  $\rho_{2a}$  – resistividade;
- $a$  – distância entre os eletrodos  $P_1$  e  $P_2$ ;
- $V_{AB}$  – diferença de tensão entre os eletrodos de potencial A e B;
- $V_{BC}$  – diferença de tensão entre os eletrodos de potencial B e C;

- $I$  – corrente entre os eletrodos de corrente  $C_1$  e  $C_2$ .

Com a aplicação da equação (3.11) e (3.12) em diferentes pontos e sabendo que as distâncias entre as hastes A, B e C serão sempre as mesmas têm-se as seguintes interpretações:

- $V_{AB} = V_{BC}$  Desta forma  $\rho_{1a} = \rho_{2a}$ , neste caso por serem iguais não existe variação de espessura neste trecho do solo, observado na Figura 17.

Figura 17 – Solo com camadas sem variação de espessura.

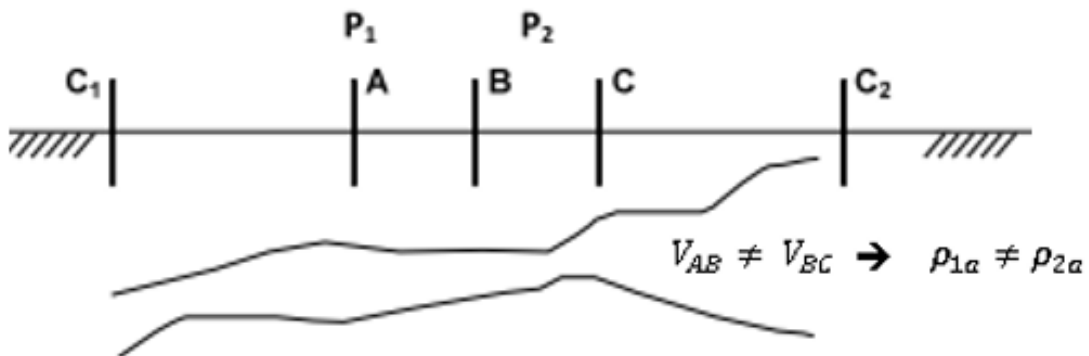


$$\text{Se } V_{AB} = V_{BC} \rightarrow \rho_{1a} = \rho_{2a}$$

Fonte: Sueta (2012)

- $V_{AB} \neq V_{BC}$  Assim  $\rho_{1a} \neq \rho_{2a}$ , neste caso por serem de valores diferentes o solo tem camadas de espessuras variáveis, observado na Figura 18.

Figura 18 – Solo com camadas de espessuras variáveis.



Sueta (2012)

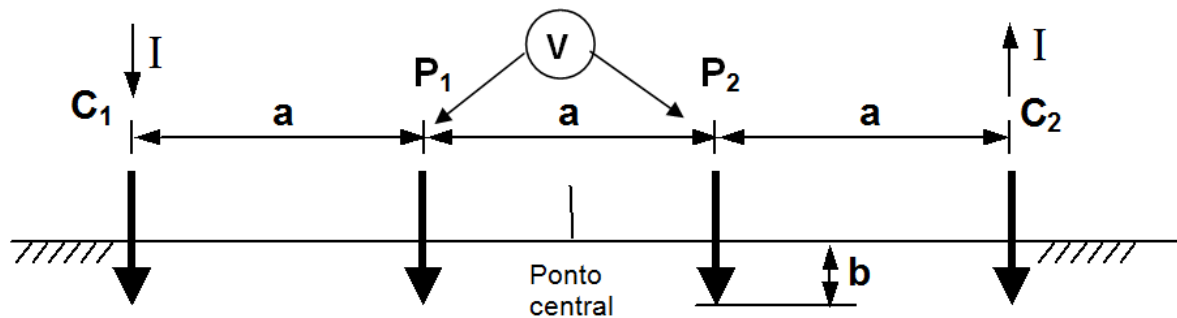
Fonte:



### 3.5.7. Arranjo de Wenner

Segundo a NBR 7117 (ABNT, 2004), neste arranjo os eletrodos são igualmente espaçados e a resistividade é dada em função da distância entre os eletrodos e a profundidade de cravação dos mesmos, como é observado na Figura 19 e equação (3.13) a seguir:

Figura 19 - Arranjo de Wenner



Fonte: Sueta (2012)

$$\rho = \frac{4\pi \times a \times \left(\frac{V}{I}\right)}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}} \quad (3.13)$$

Sendo,

- $\rho$  – resistividade;
- $a$  – distância entre os eletrodos adjacentes;
- $b$  – profundidade de cravação dos eletrodos;
- $I$  – corrente entre os eletrodos de corrente  $C_1$  e  $C_2$ ;
- $V$  – diferença de tensão entre os eletrodos de potencial  $P_1$  e  $P_2$ .

Na prática os eletrodos devem estar firmes e com boa aderência ao solo, normalmente em solos arenosos ou rochosos requerem adição de água para melhorar o contato.

### 3.6. DIMENSIONAMENTO DO CABO A SER UTILIZADO NA MALHA DE ATERRAMENTO

Para fins de dimensionamento do cabo, utilizando as equações (3.14) e (3.15), encontradas na norma da IEEE 80/2015 (IEEE, 2015), que serão demonstradas no capítulo 4.8. As conexões utilizadas deverão ser do tipo solda exotérmica:

$$K_0 = \frac{1}{\alpha_r} - T_r \quad (3.14)$$

$$S_{mm^2} = I_{cc} \cdot \frac{1}{\sqrt{\frac{TCAP \cdot 10^{-4}}{t_c \cdot \alpha_r \cdot \rho_r} \cdot \ln\left(\frac{K_0 + T_m}{K_0 + T_a}\right)}} \quad (3.15)$$

Sendo:

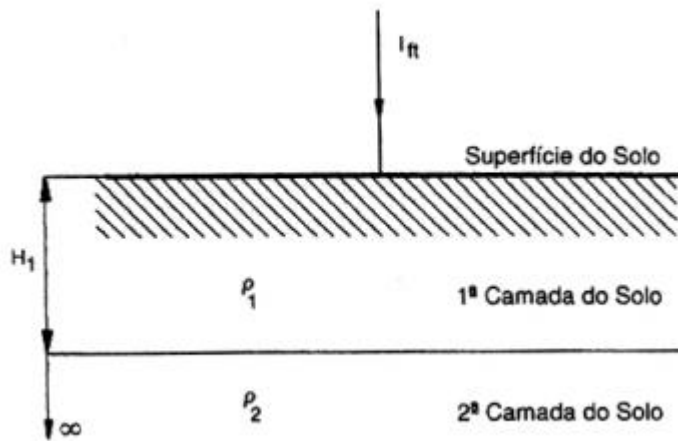
- $S_{mm^2}$  - é a bitola mínima do cabo ( $mm^2$ );
- $I_{cc}$  - é a corrente de curto-circuito em rms (kA);
- $TCAP$  - é a capacidade térmica por unidade de volume ( $J/(cm^3 \cdot ^\circ C)$ );
- $t_c$  - é a duração da corrente (s);
- $T_m$  - é a temperatura máxima permitida ( $^\circ C$ );
- $T_r$  - é a temperatura de referencia para a constante  $\alpha_r$  ( $^\circ C$ );
- $T_a$  - é a temperatura ambiente ( $^\circ C$ );
- $\alpha_r$  - é o coeficiente térmico da resistividade na temperatura  $T_r$  ( $1/^\circ C$ );
- $\rho_r$  - é a resistividade do solo condutor na temperatura de referência  $T_r$  ( $\mu\Omega\text{-cm}$ );
- $K_0$  - é dado pela equação (3.14) ( $^\circ C$ ).

### 3.7. ESTRATIFICAÇÃO DO SOLO

Na prática em poucos casos o solo pode ser representado por um meio semi-infinito homogêneo, então na grande maioria das ocasiões a representação de duas camadas é suficiente e em alguns casos específicos usa-se a representação de três ou quatro camadas. Nos projetos de malhas de aterramento a resistência de aterramento e a distribuição de equipotenciais na

superfície do solo não são criticamente afetadas por variações de resistividade das camadas mais profundas do solo, portanto é viável o uso de duas camadas, representada na Figura 20.

Figura 20 - Estratificação do solo em duas camadas



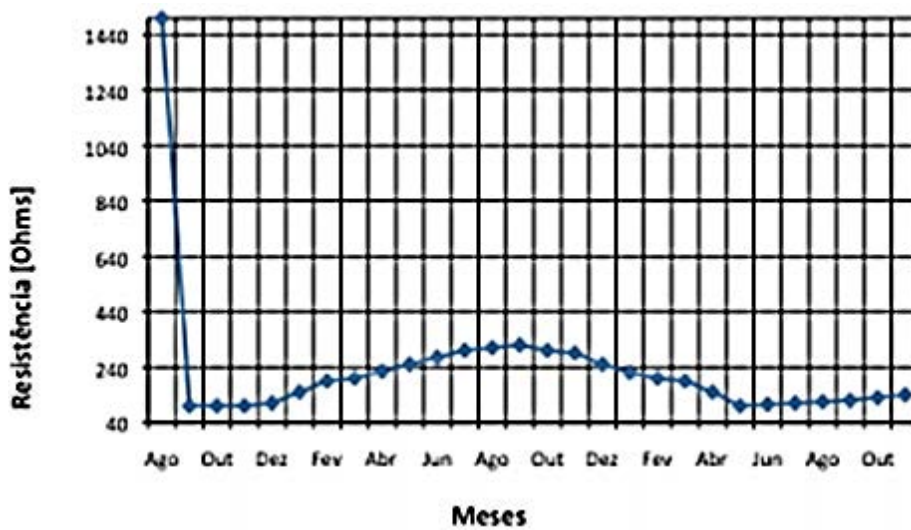
Fonte: Silva (2012)

### 3.8. TRATAMENTO QUÍMICO DO SOLO

O tratamento químico do solo envolve uma haste cravada e é extremamente útil para diminuir a resistência de um aterramento, principalmente onde não é executável um aterramento com hastes profundas devido ao tipo de solo ou pedras adjacentes. O tratamento diminui resistividade do solo próximo à haste, proporcionando uma passagem condutora, bastante boa até o ponto onde a área do cilindro da terra envolvendo a haste é relativamente grande.

A Figura 21 mostra a redução de resistência de um determinado aterramento após tratamento químico do solo que o envolve.

Figura 21 – Exemplo de redução da resistência de um solo com tratamento químico.



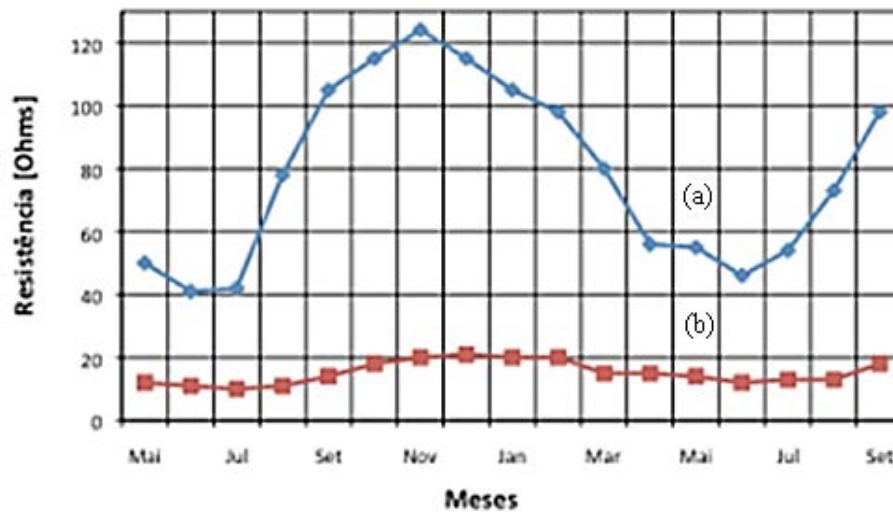
Fonte: Capelli (2013)

Observa-se no gráfico dá para notar a queda brusca na resistência de aterramento do local, que anteriormente estava próxima a 1500 ohms e após o tratamento caiu para, em média, 200 ohms.

No exemplo usado a seguir percebe-se que a porcentagem de redução de resistência é alta e é típica de resultados obtidos em circunstâncias onde a resistência do solo é extremamente alta. Aterramentos de resistência mais baixa também podem ser melhorados com tratamentos químicos do solo, mas não na mesma proporção. O tratamento químico do solo é também benéfico para reduzir as variações da resistência de um aterramento pode sofrer por ficar no solo periodicamente molhado e seco em seguida.

A Figura 22 mostra um exemplo de resultados de testes feitos em aterramentos tratados, curva (a), e não tratados, curva (b), na mesma localidade.

Figura 22 – Diferença de um solo tratado e não tratado.



Fonte: Capelli (2013)

Com os dados da Figura 22 percebe-se que os aterramentos não tratados mostram uma grande variação de resistência, diferente do aterramento com o solo tratado, mostrando uma variação de resistência bem menor.

A resistência normalmente é mais alta durante os meses úmidos de verão, exatamente na época em que uma baixa resistência seria especificamente desejável para a proteção contra raios. O aterramento tratado mostra apenas um pequeno aumento durante a estação das secas, mas não tão acentuado como para o solo não tratada.

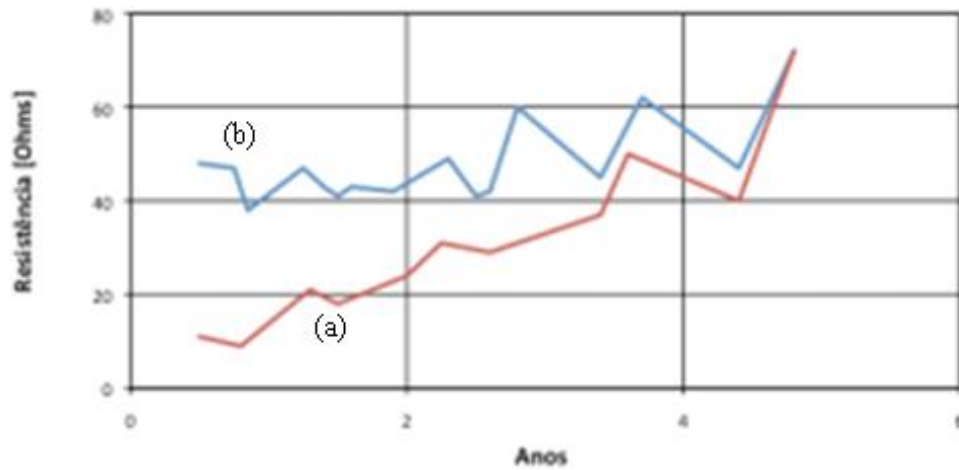
Conforme Sardinha (2012), os materiais de tratamento devem ser colocados de preferência em um poço de aterramento que fica em volta da haste, mas não devem ficar em contato direto com ela. Isso possibilita a melhor distribuição do material de tratamento e diminui o efeito corrosivo. Sulfato de magnésio, sulfato de cobre, sal-gema comum e bentonita, são todos usados como materiais de tratamento, porém o sulfato de magnésio e a bentonita são os mais indicados por serem menos corrosivos.

Segundo Capelli (2013), o tratamento do solo não é permanente porque os produtos químicos são levados pela chuva e pela drenagem natural através do solo fazendo com que o tratamento químico tenha uma grande desvantagem em relação ao aumento do número de hastes, pois a terra, aos poucos, absorve os elementos adicionados. Com o passar do tempo, sua resistência volta a aumentar, portanto, essa alternativa deve ser o último recurso.

O material de tratamento pode ser substituído depois de um período de vários anos, dependendo da porosidade do solo e das chuvas. Dessa maneira este método de melhoria de

resistência só é usado quando aterramentos profundos ou eletrodos múltiplos não são práticos. A Figura 23 mostra a variação da resistência em relação ao tempo para hastes tratadas, curva (a), e não tratadas, curva (b), em um local.

Figura 23 - Variação da resistência de aterramento de acordo com o tempo em solo tratado e não tratado.



Fonte: Capelli (2013)

Percebe-se que os efeitos do tratamento químico gradualmente desaparecem e, neste caso, depois de um período de cerca de 5 anos, os dois aterramentos tem a mesma resistência.

## 4. ENSAIO DE TIPO

### 4.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo são feitas as considerações necessárias para um ensaio de tipo mais próximo possível do real, como a escolha do solo, do tamanho do terreno, do desenho da malha de aterramento (quadriculada, circular, em forma de pentágonos ou alguma outra da escolha do projetista), a escolha dos limites da subestação e como é considerado no projeto de aterramento.

### 4.2. SOLDA UTILIZADA

Segundo Silva (2012), todos os cruzamentos de cabos da malha de aterramento e as ligações com as hastes e com os cabos que fazem conexão com os equipamentos devem ser soldados. A escolha da solda é muito importante, pois se for de uma má qualidade pode haver comprometimento da circulação de corrente.

A solda mais utilizada em subestações é a solda exotérmica devido a sua boa segurança, resistência mecânica, não soltar com o tempo, os materiais nessa solda não sofrem corrosão e ainda por ter a característica muito importante de resistir a altas temperaturas, chegando a resistir a uma temperatura máxima de 850 °C, sendo assim recomendado para elevados surtos de correntes sem se romper.

A soldagem exotérmica, mostrada na Figura 24, é uma técnica usada para criar uma conexão permanente entre dois componentes metálicos, tratando-se de uma reação química que gera calor, conhecida como reação exotérmica (Silva, 2012). Este processo é muito bom para a durabilidade dos materiais e para a preservação da boa condutividade elétrica dos cabos.

**Figura 24 – Solda Exotérmica.**



### 4.3. LIMITES DE UMA SUBESTAÇÃO

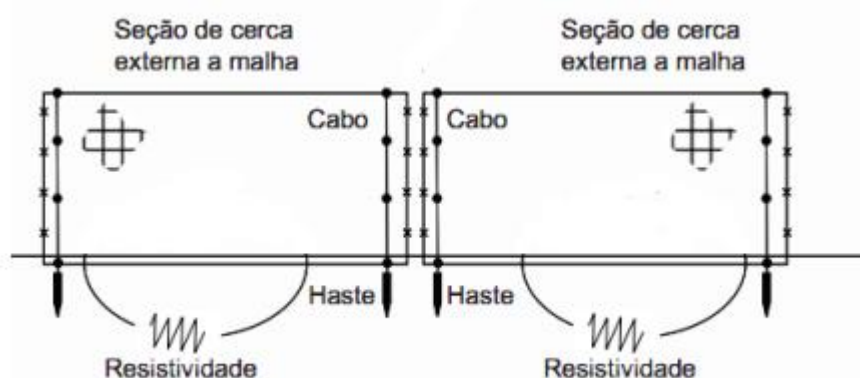
Conforme Silva (2012), os limites de uma subestação também devem receber atenção, pois pode haver circulação de pessoas que não tenha conhecimento técnico dos riscos destes locais. A área do terreno normalmente é separada por grades ou muros, onde na maior parte das vezes são utilizadas grades devido ao baixo custo e maior facilidade de ser montada.

A existência de um material condutor nesta cerca, no caso o metal, trás o risco da tensão de toque, caso algum curioso ou até mesmo vândalos cheguem a encostar-se a ela, motivo pelo qual deve incluir os limites da subestação no sistema de aterramento.

Existem algumas maneiras de se aterrar a cerca, que no geral depende localização e da escolha do projetista, que pode ser dentro ou fora do limite da malha de terra. O mais convencional é interligar o aterramento da cerca junto à malha, para isso basta em cada secção da cerca colocar uma haste de aterramento e interligar junto à malha existente, garantindo assim a segurança em todas as cercas na subestação.

Nos casos em que se encontram fora do limite da rede de terra deve-se aterrar diretamente através de uma haste de aterramento no início da secção da cerca e outra no final, como mostra a Figura 25.

Figura 25 – Aterramento da cerca da subestação.



Fonte: Silva (2012)

Conforme Silva (2012), no caso de se usar muros de concreto para os limites da subestação faz com que a subestação fique mais segura e seja mais simples, pois o concreto é um material mau condutor, excluindo assim o risco de ocorrer à tensão de toque e também aumentando a segurança contra vândalos que invadam em busca de roubar o cobre que está



com um alto valor no mercado, porém esse muro aumenta muito o custo de construção levando em comparação à cerca metálica.

Em relação a um projeto de aterramento de uma subestação a escolha entre o muro ou uma cerca, ou ainda se a cerca será aterrada individualmente ou juntamente com a malha existente deve ser considerada pelo projetista.

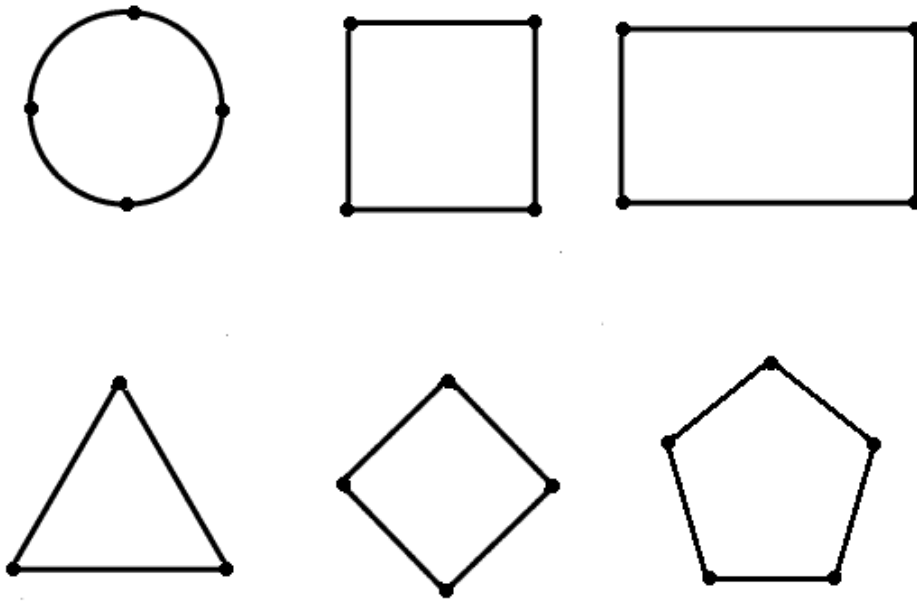
#### 4.4. FORMATOS DE MALHAS

De acordo com Beltani (2007), a fim de achar uma resistência do solo onde seja possível realizar a instalação da malha de aterramento da subestação, considerando a Tabela , é escolhido um solo para os cálculos, sempre escolhendo um valor intermediário de resistividade para obter um valor mais próximo do real e são usados mais de um tipo de solo para o ensaio de tipo.

Com o tipo de solo já escolhido a próxima etapa é escolher as limitações dos terrenos e os formatos da malha de aterramento, o formato mais usual e que será utilizado para o ensaio de tipo é o linear. Interligando uma linha a outra se forma várias malhas em paralelo em um formato simples.

Não existe um jeito correto ou mais prático de qual formato utilizar em uma malha de aterramento, depende apenas da área do terreno e como se pode aproveitar melhor ela, a Figura 26 mostra alguns formatos usados para o cálculo da resistência, lembrando que o importante são as distâncias entre as hastes.

Figura 26 – Outras formas de malhas.



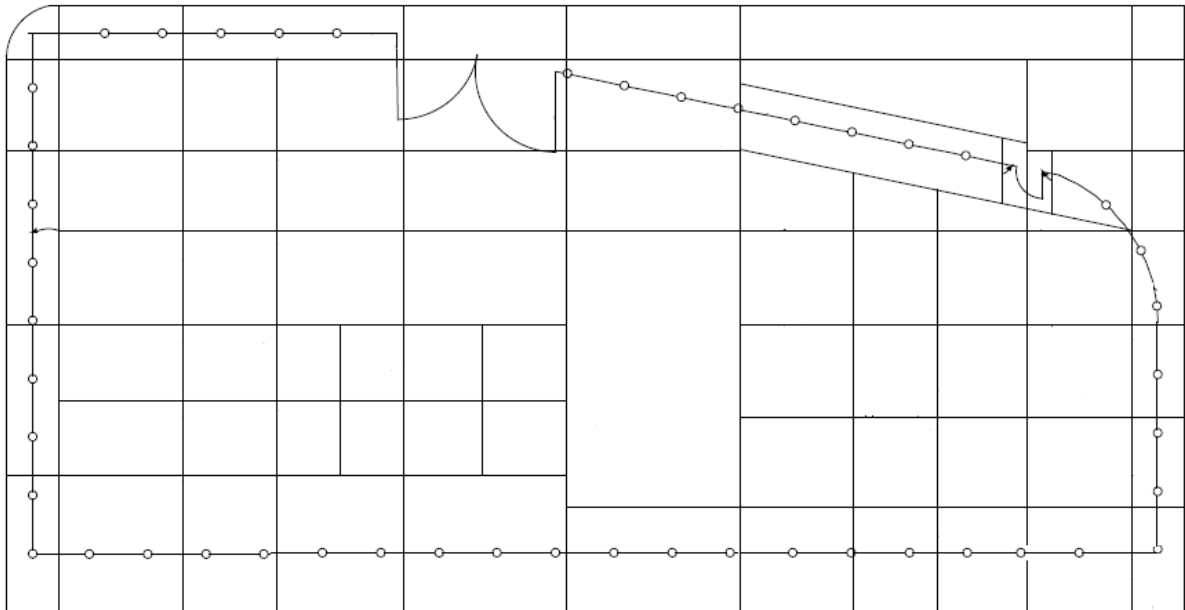
pelo autor (2016)

Fonte: Adaptado

#### 4.5. O TERRENO

Na prática não existem terrenos idênticos, algumas subestações possuem áreas maiores e outras precisam realizar uma malha de aterramento com espaço limitado. Lembrando que além da área que o terreno possui a malha de aterramento também depende do tipo de solo do local. A partir disso a Figura 27 representa um terreno de uma subestação que mostra como o ensaio de tipo é considerado, onde as linhas representam as malhas de aterramento, ou seja, cabos de cobre enterrados onde são feitas as conexões das hastes e as soldas exotérmicas.

Figura 27 - Limites e área da subestação.



Fonte: Adaptado pelo autor (2016)

Com as hastes interligadas forma-se uma grande malha em paralelo, à medida que essa malha aumenta e mais hastes são enterradas a resistência diminui, pois se trata de uma associação de resistores.

Percebe-se também que a cerca já foi escolhida, é metálica e faz parte da malha de aterramento, assim não há o perigo de tensão de toque. A cerca é representada pelas linhas com círculos.

#### 4.6. CÁLCULO DA TENSÃO MÁXIMA DE PASSO SUPORTÁVEL

Seguindo a norma IEEE 80-2015, sabendo que  $\rho_1 = 1234 \Omega \cdot m$  e  $t_s = 0,5$  segundos para os casos a seguir, é possível calcular as tensões máximas de passo suportáveis, aplicando-se as equações (3.2) e (3.3):

- Caso 1 – Solo com uma camada de recobrimento de  $h_s = 0,1$  m e  $\rho_s = 3000 \Omega \cdot m$ .

$$C_s = 1 - \frac{0,09 \cdot \left(1 - \frac{\rho_1}{\rho_s}\right)}{2 \cdot h_s + 0,09} = C_s = 1 - \frac{0,09 \cdot \left(1 - \frac{1234}{3000}\right)}{2 \cdot 0,1 + 0,09} = 0,8173$$

$$V_{\text{passo suportavel}} = (1000 + 6 \cdot C_s \cdot \rho_s) \cdot \frac{0,157}{\sqrt{t_s}} = (1000 + 6 \cdot 0,8173 \cdot 3000) \cdot \frac{0,157}{\sqrt{0,5}} = 3488 \text{ V}$$

- Caso 2 – Solo sem uma camada de recobrimento de  $h_s = 0 \text{ m}$  e  $\rho_s = 1234 \text{ } \Omega \cdot m$ .

$$C_s = 1 - \frac{0,09 \cdot \left(1 - \frac{\rho_1}{\rho_s}\right)}{2 \cdot h_s + 0,09} = C_s = 1 - \frac{0,09 \cdot \left(1 - \frac{1234}{1234}\right)}{2 \cdot 0 + 0,09} = 1$$

$$V_{\text{passo suportavel}} = (1000 + 6 \cdot C_s \cdot \rho_s) \cdot \frac{0,157}{\sqrt{t_s}} = (1000 + 6 \cdot 1 \cdot 1234) \cdot \frac{0,157}{\sqrt{0,5}} = 1866 \text{ V}$$

#### 4.7. CÁLCULO DA TENSÃO MÁXIMA DE TOQUE SUPORTÁVEL

Seguindo a norma IEEE 80-2015, sabendo que  $\rho_1 = 1234 \text{ } \Omega \cdot m$  e  $t_s = 0,5$  segundos para os casos a seguir, é possível calcular as tensões máximas de toque suportáveis, através das equações (3.5 e (3.5):

- Caso 1 – Solo com uma camada de recobrimento de  $h_s = 0,1 \text{ m}$  e  $\rho_s = 3000 \text{ } \Omega \cdot m$ .

$$C_s = 1 - \frac{0,09 \cdot \left(1 - \frac{\rho_1}{\rho_s}\right)}{2 \cdot h_s + 0,09} = C_s = 1 - \frac{0,09 \cdot \left(1 - \frac{1234}{3000}\right)}{2 \cdot 0,1 + 0,09} = 0,8173$$

$$V_{\text{toque suportavel}} = (1000 + 1,5 \cdot C_s \cdot \rho_s) \cdot \frac{0,157}{\sqrt{t_s}} = (1000 + 1,5 \cdot 0,8173 \cdot 3000) \cdot \frac{0,157}{\sqrt{0,5}} = 1038 \text{ V}$$

- Caso 2 – Solo sem uma camada de recobrimento de  $h_s = 0 \text{ m}$  e  $\rho_s = 1234 \text{ } \Omega \cdot m$ .

$$C_s = 1 - \frac{0,09 \cdot \left(1 - \frac{\rho_1}{\rho_s}\right)}{2 \cdot h_s + 0,09} = C_s = 1 - \frac{0,09 \cdot \left(1 - \frac{1234}{1234}\right)}{2 \cdot 0 + 0,09} = 1$$

$$V_{\text{toque suportavel}} = (1000 + 1,5 \cdot C_s \cdot \rho_s) \cdot \frac{0,157}{\sqrt{t_s}} = (1000 + 1,5 \cdot 1 \cdot 1234) \cdot \frac{0,157}{\sqrt{0,5}} =$$

633 V.

#### 4.8. DIMENSIONAMENTO DO CABO A SER UTILIZADO NA MALHA DE ATERRAMENTO

A Tabela utilizada na norma IEEE 80-2015 mostra as constantes necessárias para a utilização da equação (3.15).

Tabela 2 - Constantes dos materiais.

| Descrição                                    | Condutividade do material | Fator $\alpha_r$ a 20 °C (1/°C) | $K_0$ a 0 °C (0 °C) | Temperatura de fusão <sup>a</sup> $T_m$ (°C) | $\rho_r$ 20 °C ( $\mu\Omega \cdot \text{cm}$ ) | TCAP capacidade térmica [ $\text{J}/(\text{cm}^3 \cdot ^\circ\text{C})$ ] |
|----------------------------------------------|---------------------------|---------------------------------|---------------------|----------------------------------------------|------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| Cobre recozido                               | 100,0                     | 0,00393                         | 234                 | 1083                                         | 1,72                                           | 3,42                                                                      |
| Cobre Comercial                              | 97,0                      | 0,00381                         | 242                 | 1084                                         | 1,78                                           | 3,42                                                                      |
| Fio de aço revestido de cobre                | 40,0                      | 0,00378                         | 245                 | 1084                                         | 4,40                                           | 3,85                                                                      |
| Fio de aço revestido de cobre                | 30,0                      | 0,00378                         | 245                 | 1084                                         | 5,86                                           | 3,85                                                                      |
| Haste de aço revestido de cobre <sup>a</sup> | 20,0                      | 0,00378                         | 245                 | 1084                                         | 8,62                                           | 3,85                                                                      |
| Grade de alumínio CE                         | 61,0                      | 0,00403                         | 228                 | 657                                          | 2,86                                           | 2,56                                                                      |
| Liga de alumínio 5005                        | 53,5                      | 0,00353                         | 263                 | 652                                          | 3,22                                           | 2,60                                                                      |
| Liga de alumínio 6021                        | 52,5                      | 0,00347                         | 268                 | 654                                          | 3,28                                           | 2,6                                                                       |
| Fio de aço revestido de alumínio             | 20,3                      | 0,00360                         | 258                 | 657                                          | 8,48                                           | 3,58                                                                      |
| Aço 1020                                     | 10,8                      | 0,00160                         | 605                 | 1510                                         | 15,9                                           | 3,28                                                                      |
| Haste de aço inoxidável <sup>b</sup>         | 9,8                       | 0,00160                         | 605                 | 1400                                         | 17,50                                          | 4,44                                                                      |
| Haste de aço revestido de zinco              | 8,6                       | 0,00320                         | 293                 | 419                                          | 20,10                                          | 3,93                                                                      |
| Aço inoxidável, 304                          | 2,4                       | 0,00130                         | 749                 | 1400                                         | 72,00                                          | 4,03                                                                      |

Fonte: IEEE (2015)

<sup>a</sup>Haste de aço revestido de cobre baseado em 0,254 mm de espessura do cobre.

<sup>b</sup>Haste de aço inoxidável baseado em 0,508 mm de grossura de aço inoxidável.

No dimensionamento foi considerado o cabo de cobre têmpera meio dura e utilizando a temperatura máxima admissível para conexões exotérmicas, que é de 850°C. Além disso, considerando uma corrente de 5,0 kA, a duração da corrente de 2 segundos e os dados obtidos da Tabela , tem-se a equação (4.9)

$$S_{mm^2} = I_{cc} \cdot \frac{1}{\sqrt{\frac{TCAP \cdot 10^{-4}}{t_c \cdot \alpha_r \cdot \rho_r} \cdot \ln\left(\frac{K_0 + T_m}{K_0 + T_a}\right)}} = 5 \cdot \frac{1}{\sqrt{\frac{3.42 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot 0,00381 \cdot 1,78} \cdot \ln\left(\frac{242 + 850}{242 + 40}\right)}} \Rightarrow \quad (4.9)$$

$$S_{mm^2} = 27,06 \text{ mm}^2$$

Então padronizando por questões comerciais a bitola mínima de secção 50 mm<sup>2</sup>.

#### 4.9. CÁLCULO DA RESISTÊNCIA

O método escolhido para este ensaio de tipo foi o método de Wenner, devido a sua alta confiabilidade, boa precisão e ainda devido a ele ser o método mais usado para medir malhas de aterramento em subestações. Com a equação (3.13), apresentada no capítulo 3 e também com um valor de resistividade escolhido de acordo com o tipo de solo, podemos obter os valores de resistências e assim fazer uma análise da melhor forma de aterramento que deve ser utilizado nos diferentes arranjos que serão apresentados neste capítulo.

Os valores mais convencionais para as distâncias entre as hastes variam entre 1, 2, 4, 8 e 16 metros e para o caso da profundidade usa-se uma haste de 2,5 metros, pois caso ela seja mais profunda pode vir a atingir a próxima camada do solo estratificado modificando assim o cálculo da resistência ou ainda dificultar a instalação física devido a pedras ou outras coisas que possam ser encontradas a medida que se aprofunda no solo. Assim com essas considerações têm-se os seguintes casos:

- Caso 1: sendo, a = 1 m e b = 2,5 m;

$$\rho = \frac{4\pi \times a \times \left(\frac{V}{I}\right)}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}} = \rho = \frac{4\pi \times 1 \times R}{1 + \frac{2 \times 1}{\sqrt{1^2 + 4 \times 2,5^2}} - \frac{1}{\sqrt{1^2 + 2,5^2}}} \Rightarrow$$

$$\rho = 12,303R$$

- Caso 2: sendo, a = 2 m e b = 2,5 m;

$$\rho = \frac{4\pi \times a \times \left(\frac{V}{I}\right)}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}} = \rho = \frac{4\pi \times 2 \times R}{1 + \frac{2 \times 2}{\sqrt{2^2 + 4 \times 2,5^2}} - \frac{2}{\sqrt{2^2 + 2,5^2}}} \Rightarrow$$

$$\rho = 22,467R$$

- Caso 3: sendo, a = 4 m e b = 2,5 m;

$$\rho = \frac{4\pi \times a \times \left(\frac{V}{I}\right)}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}} = \rho = \frac{4\pi \times 4 \times R}{1 + \frac{2 \times 4}{\sqrt{4^2 + 4 \times 2,5^2}} - \frac{4}{\sqrt{4^2 + 2,5^2}}} \Rightarrow$$

$$\rho = 35,850R$$

- Caso 4: sendo, a = 8 m e b = 2,5 m;

$$\rho = \frac{4\pi \times a \times \left(\frac{V}{I}\right)}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}} = \rho = \frac{4\pi \times 8 \times R}{1 + \frac{2 \times 8}{\sqrt{8^2 + 4 \times 2,5^2}} - \frac{8}{\sqrt{8^2 + 2,5^2}}} \Rightarrow$$

$$\rho = 57,697R$$

- Caso 5: sendo, a = 16 m e b = 2,5 m.

$$\rho = \frac{4\pi \times a \times \left(\frac{V}{I}\right)}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}} = \rho = \frac{4\pi \times 16 \times R}{1 + \frac{2 \times 16}{\sqrt{16^2 + 4 \times 2,5^2}} - \frac{16}{\sqrt{16^2 + 2,5^2}}} \Rightarrow$$

$$\rho = 104,615R$$

Assim percebe-se que com a diferença das distancias entres as hastes existe uma variação significativa do valor da resistência que será menor quanto maior a distância, isso levando em consideração que a resistividade do solo não está variando, então dependendo do tamanho da área da subestação é possível utilizar maiores distâncias ou até formas diferentes para as malhas, sempre levando em consideração que a malha deve ter o menor de resistência possível e com o menor custo também.

Caso a resistência ainda esteja muito acima da esperada o que pode ser feito é aumentar a profundidade da haste de aterramento, porém como foi dito anteriormente quanto mais profundo a haste menos usual ela será.

De acordo com todos os casos descritos acima tem-se a Tabela 7:

**Tabela 3 – Resumo dos cálculos.**

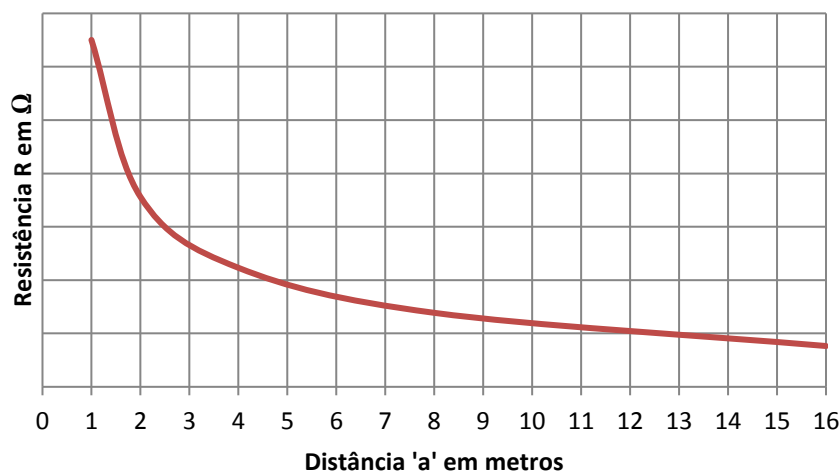
| Resumo dos cálculos                    |                  |                  |                  |                  |                   |
|----------------------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-------------------|
| Distância 'a' entre hastes (m)         | 1                | 2                | 4                | 8                | 16                |
| Profundidade 'b' das hastes (m)        | 2,5              | 2,5              | 2,5              | 2,5              | 2,5               |
| Cálculos das resistências ( $\Omega$ ) |                  |                  |                  |                  |                   |
| Relação $\rho \times R$                | $\rho = 12,303R$ | $\rho = 22,467R$ | $\rho = 35,850R$ | $\rho = 57,697R$ | $\rho = 104,615R$ |
| $\rho = 800 \Omega.m$                  | 65,02 $\Omega$   | 35,61 $\Omega$   | 22,31 $\Omega$   | 13,87 $\Omega$   | 7,65 $\Omega$     |
| $\rho = 2700 \Omega.m$                 | 219,45 $\Omega$  | 120,18 $\Omega$  | 75,31 $\Omega$   | 46,80 $\Omega$   | 25,81 $\Omega$    |
| $\rho = 15000 \Omega.m$                | 1219,22 $\Omega$ | 667,65 $\Omega$  | 418,41 $\Omega$  | 259,98 $\Omega$  | 143,38 $\Omega$   |

Fonte: Adaptado pelo autor

Observa-se da Tabela 7 que à medida que a distância 'a' aumenta a relação  $\rho \times R$  também cresce, ou seja, quanto maior a distância menor será o valor da resistência para um solo sem variação de resistividade.

Com as equações da Tabela 7 pode-se ainda criar um gráfico, ilustrado na Figura 28, para termos a curva aproximada de resistência pela distância, e assim de acordo com o valor de  $\rho$  temos a curva real para cada tipo de solo.

**Figura 28 - Gráfico Resistência x Distância.**



Fonte: Adaptado pelo autor



Observa-se no gráfico na Figura 28 que, como dito anteriormente, à medida que a distância aumenta a resistência diminui, porém isso não acontece de uma maneira proporcional, no gráfico os primeiros metros a resistência diminuem rapidamente e na medida em que a distância aumenta a resistência diminui mais lentamente.

Com isso imagina-se como distribuir as hastes em um terreno, ou seja, caso o terreno da subestação seja muito grande é possível fazer associações com distâncias maiores, garantindo que o aterramento cubra todo o terreno com uma baixa impedância e menor custo, porém quando não é possível utilizar de um terreno espaçoso deve-se trabalhar com associação de hastes com distâncias menores. Apesar de o preço ser maior, devido à necessidade de mais hastes, o aterramento com hastes mais próximas garante a confiabilidade e a segurança da subestação, que são os pontos mais importantes dentro de um projeto de aterramento.

A

Tabela aponta a área retangular aproximada necessária para garantir, com todas as associações em paralelo, um aterramento de baixa impedância de aproximadamente  $1 \Omega$ .

**Tabela 4 - Área mínima aproximada da subestação.**

|                                 |                  | Resumo dos cálculos    |                  |                  |                   |  |
|---------------------------------|------------------|------------------------|------------------|------------------|-------------------|--|
| Distância 'a' entre hastes (m)  | 1                | 2                      | 4                | 8                | 16                |  |
| Profundidade 'b' das hastes (m) | 2,5              | 2,5                    | 2,5              | 2,5              | 2,5               |  |
| Relação $\rho \times R$         | $\rho = 12,303R$ | $\rho = 22,467R$       | $\rho = 35,850R$ | $\rho = 57,697R$ | $\rho = 104,615R$ |  |
|                                 |                  | Área da subestação (m) |                  |                  |                   |  |
| $\rho = 800 \Omega.m$           | 195              | 216                    | 264              | 336              | 367               |  |
| $\rho = 2700 \Omega.m$          | 660              | 720                    | 900              | 1128             | 1248              |  |
| $\rho = 15000 \Omega.m$         | 3657             | 4008                   | 5028             | 6240             | 6912              |  |

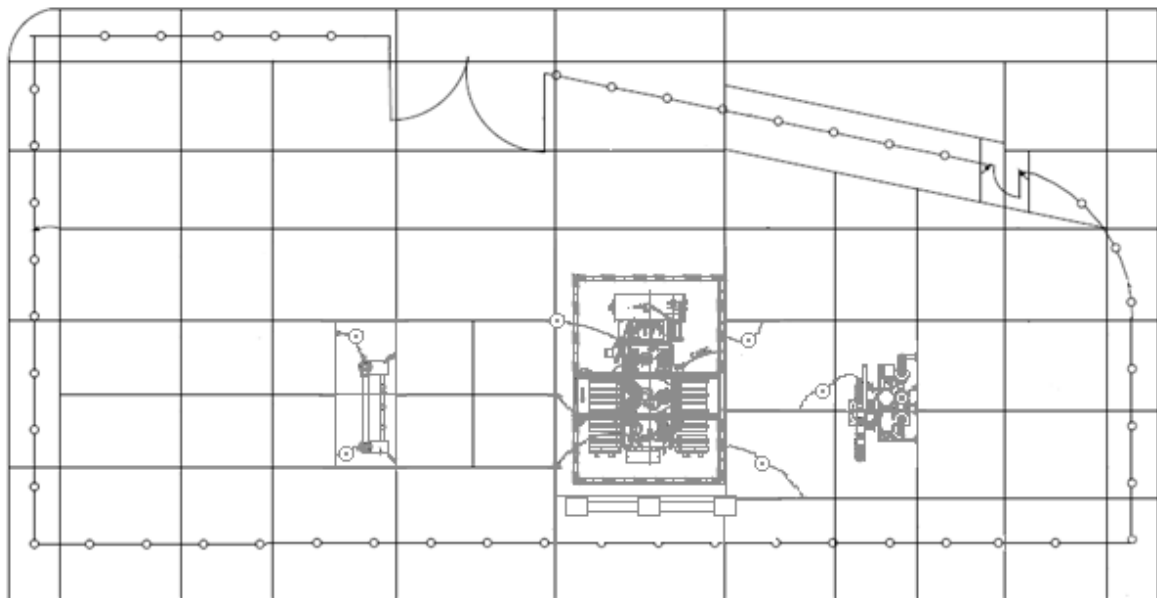
Fonte: Adaptador pelo autor

Em uma subestação é muito importante o aterramento individual de cada equipamento e construção que se encontra por perto, como mostrado no primeiro capítulo, então além de toda a malha de aterramento o projetista deve ainda levar em consideração o aterramento dos transformadores, disjuntores, chaves seccionadoras, e outros equipamentos ou construções que seja necessário. A Figura 29 mostra a subestação com os equipamentos instalados e com a haste

de aterramento já instalada e conectada a malha de terra, assim em caso de qualquer defeito ou descarga toda a carcaça e componentes dos equipamentos estão devidamente aterrados, protegendo as pessoas próximas de um possível acidente com a tensão de toque, caso haja alguém em contato com algum deles.

É importante que o aterramento dos equipamentos deva sempre estar conectado, independentemente do equipamento estar ligado ou não, pois, como já foi dito anteriormente, toda carcaça metálica sofre efeito de indução, gerando uma tensão de toque que pode chegar a causar acidentes graves.

**Figura 29 – Subestação com os equipamentos aterrados.**



Fonte: Adaptado pelo autor

Observa-se da Figura 29 que o disjuntor, a chave seccionadora e o transformador encontram-se aterrados junto à malha da subestação, a partir dos cálculos de resistividade e das áreas da subestação conclui-se que não existe uma maneira mais ou menos correta de realizar o aterramento de uma subestação, todos os métodos mostrados no capítulo 3 podem ser usados desde que respeitem as normas e garantam a confiabilidade e a segurança dos equipamentos e das pessoas que trabalham no local.

O projeto de aterramento depende mais do tipo de solo, do custo e da área que a subestação possui do que do método e formato da malha, sendo assim apenas após todas as medições no local e a realização dos cálculos que é possível saber qual melhor material da haste, se será necessário realizar tratamento químico do solo e o melhor formato para cada aplicação.

Uma parte dos problemas encontrados em subestação acontecem durante a construção da malha, por isso a grande importância da existência de um projeto e uma inspeção bem realizadas.

Os estudos apontam o cuidado que se deve ter quando se fala em malha aterramento de subestações, as diversas normas técnicas apresentadas nos capítulos anteriores devem ser seguidas e respeitadas, porém existem várias dificuldades nessa área da engenharia, uma vez que as pesquisas e os projetos sobre aterramento muitas vezes não são divulgadas.

Adicionalmente as dificuldades já encontradas nos estudos a malha de aterramento deve suportar e garantir a segurança dos equipamentos e das pessoas do local contra o risco de curto-circuito, descargas atmosféricas, tensão de passo e tensão de toque, além de servir como um ponto de referência de tensão para muitos equipamentos eletrônicos. Na prática, devido ao mal aterramento, isso nem sempre acontece.

## 5. CONCLUSÃO

Apesar do foco dos estudos serem em malhas de aterramentos de subestações, são apresentadas outras aplicações na área de telecomunicações e eletrônica, pois ambas as áreas estão diretamente associadas e conectados aos aterramentos das subestações. Isso acontece porque os equipamentos eletrônicos que estão instalados nos ativos da subestação, como relés de proteção, equipamentos de monitoramento e equipamentos de supervisão são totalmente dependentes e eletricamente conectados ao aterramento do local, podendo apresentar falhas, queimas ou defeitos devido a um aterramento mal executado.

Na prática os estudos apresentam os diversos métodos de aterramento de equipamentos e cálculos de resistividade do solo que podem e devem ser utilizados para aterramento de uma subestação, mostrando as respectivas normas brasileiras e internacionais existentes, mostrando também como proceder para saber qual tipo de solo que a instalação será realizada, como calcular a resistividade do solo, o princípio básico de funcionamento do tratamento químico do solo, mostrar os princípios de estratificação do solo e ainda apresentar todos os cálculos utilizados para calcular a resistência da malha de aterramento e para garantir que essa malha respeite a segurança necessária para todas as pessoas que trabalham ou adentram o local da instalação, que considerado um local de alto risco.

O método de Wenner foi o escolhido por ser um dos mais conhecidos, confiáveis e utilizados na atualidade, apesar disso qualquer método pode ser utilizado desde que cumpra as normas brasileiras de aterramento de subestações e cálculo de resistividade do solo.

O aterramento é um muitas vezes mal feito durante uma construção de uma subestação, isso acontece porque os problemas causados por um aterramento não necessariamente aparecem logo após a finalização da instalação e, várias vezes, os defeitos são descobertos depois de graves acidentes ou no caso de algum equipamento conectado a malha de aterramento, inclusive os para-raios, ser atingido por uma descarga atmosférica.

O conhecimento sobre malhas de aterramento é essencial para a área de eletrotécnica, eletrônica e telecomunicações, o aterramento mal feito é o causador de vários problemas em aparelhos eletrônicos e, nos piores casos, de acidentes graves ou fatais em uma subestação. Além de possuir o conhecimento de aterramento, para se construir uma malha de aterramento de uma subestação, é necessário saber como se faz um levantamento de resistividade do solo e

muitas vezes como se faz o tratamento químico do solo, para poder se adequar as necessidades daquela subestação ou projeto em específico.

Existem inúmeras maneiras de se fazer o levantamento e preparar um projeto de aterramento. As escolhas de como serão feitos os estudos do solo e como será conduzido o projeto cabe ao projetista, dessa maneira é de sua responsabilidade escolher o método em que se sente mais confortável ou que se adequa melhor a aplicação. Além disso, é necessário escolher o material que será utilizado em toda a construção de malha de aterramento e apresentar os cálculos da resistência do solo que garantam e cumpram as normas de segurança.

Como existem diversos tipos de solos, com varias propriedades e características diferentes, é improvável que um aterramento de uma subestação seja igual à outra. Sabendo disso são impossíveis que as construções físicas das malhas sejam as mesmas, uma vez que as áreas, as construções, as disposições e os números de equipamentos são diferentes. Mesmo sabendo disso não existem ou não são divulgados muitos estudos sobre qual deveria ser a melhor maneira de se construir uma malha de aterramento.

A pesquisa permitiu estudar diversas maneiras, de acordo com a necessidade de cada projeto, de se preparar uma malha de aterramento adequado para uma determinada área. As formas das malhas de aterramento variam dentre as mais usais como retangular ou quadricular, mas também pode assumir outras formas como circular ou hexagonal, ou ainda não possuir uma forma em específico, isso acontece porque o importante para a malha de aterramento é possuir uma impedância baixa o suficiente para garantir que a tensão de toque e a tensão de passo não ultrapasse o valor calculado e mantenham as pessoas no local seguro mesmo que haja corrente de curto-circuito na em algum ativo na subestação.

O trabalho mostrou resultados muito satisfatórios, interessantes e foram essenciais para obtenção de conhecimento na área de aterramento de equipamentos e subestações que hoje é uma área pouco valorizada, porém de muita importância porque está envolvido diretamente com a engenharia elétrica e outras áreas da engenharia.

## REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR5410**: instalações elétricas de baixa tensão. Rio de Janeiro, 2004. 209 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR7117**: medição da resistividade e determinação da estratificação do solo. Rio de Janeiro, 2012. 64 p.
- BELTANI, Juliano Munhoz. **Medição de malha de terra em subestações energizadas**. 2007. 81 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2007. Cap. 2. Disponível em: <[www.feis.unesp.br](http://www.feis.unesp.br)>. Acesso em: 7 jul. 2016.
- CABRAL, Sergio Henrique Lopes. Esquemas elétricos de aterramento: análise comparativa de funcionalidades. **O Setor Elétrico**, São Paulo, v. 53, p.60-65, jun. 2010.
- CAPELLI, Alexandre. **Energia elétrica: qualidade e eficiência para aplicações industriais**. São Paulo: Érica, 2013.
- CÉSSAR CASSIOLATO. **Dicas de blindagem e aterramento em automação industrial**. Barueri: Smar, 2011. Disponível em: <<http://www.smar.com/brasil/artigo-tecnico/dicas-de-blindagem-e-aterramento-em-automacao-industrial>>. Acesso em: 07 jul. 2016.
- INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERS. **IEEE 80**: guide for safety in ac substation grounding. Piscataway: Ieee, 2015. 226 p.
- KINDERMAN, G. **Aterramento elétrico**. 4. ed. Porto Alegre: Editora Sagra, 1998.
- LEITE, Moreira Carlos. **Técnicas de aterramentos elétricos: cálculos, projetos e softwares para aterramentos elétricos**. São Paulo: Oficina de Mydia, 1996.
- MOERNO, Hilton; COSTA, Paulo Fernandes. **Aterramento elétrico**. São Paulo: Procobre, 2003.
- NORMA TÉCNICA PETROBRAS. **N-2437**: proteção de equipamentos eletrônicos sensíveis: Rev.A/ NORTEC, 2002.
- PINHEIRO, Tiago Figueira Leão. **Sistema de aterramento em baixa tensão**. 2013. 90 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013. Disponível em: <<http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10006066.pdf>>. Acesso em: 7 jul. 2016.
- ROCHA, Pedro Loques. **Introdução à modelagem de sistemas de aterramento**. 2007. 83 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007. Cap. 2. Disponível em: <<http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10001362.pdf>>. Acesso em: 7 jul. 2016.

SILVA, Arnaldo Fleck. **Análise do aterramento de subestações**. 2012. 71 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/65428/000858053.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 7 jul. 2016.

SUETA, Hélio Eiji. **Uso de componentes naturais de edificações como parte integrante do sistema de proteção contra descargas atmosféricas: uma visão aos danos físicos**. 2005. 255 f. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

TELLÓ, Marcos et al. **Aterramento elétrico impulsivo, em baixa e alta frequência**. Porto Alegre: PUCRS, 2007.