



APLICAÇÕES DE
ATERRAMENTO E PROTEÇÃO
DE SISTEMAS ELÉTRICOS

Nélio Fleury
Leonardo Guedes

Aplicações de Aterramento e Proteção de Sistemas Elétricos



NÉLIO FLEURY
LEONARDO GUEDES

Aplicações de Aterramento e Proteção de Sistemas Elétricos

Goiânia
LONDON 7 Editora
2015

Copyright © 2015 por
Nélio Benedito Fleury & Leonardo Guerra de Rezende Guedes

Aplicações de Aterramento e Proteção de Sistemas Elétricos
1ª edição

1ª tiragem – março de 2015 – impresso e e-book

Edição: LONDON7 Editora

Prefixo Editorial: 67929

ISBN – 978-85-67929-10-1

CIP – (*Cataloguing-in-Publication*) – Brasil – Catalogação na Publicação
Ficha Catalográfica feita na Editora

Fleury, N B, 1959- & Guedes, L G de R, 1970

F6393 Aplicações de Aterramento e Proteção de Sistemas Elétricos

Nélio Benedito Fleury & Leonardo Guerra de Rezende Guedes – 2015

1ª ed. Goiânia: London7 Editora, 2015.

250p.: il. p&b ; 148 x 210 mm (brochura e e-book)

ISBN 978-85-67929-10-1

1. Engenharia- 620.

I. Aterramento II. Proteção Elétrica III. SPDA IV. Engenharia Elétrica

CDD 620 CDU 621.3

Índice para catálogo sistemático

1. Engenharia-620.

LONDON 7 Editora®

Prefixo Editorial: 67929

Corpo editorial:

Gelson da Ruz Junior, UFG, Dr. Eng. Elet./Unicamp

Lauro Eugênio Guimarães Nalini, PUC-GO, Dr. Psic./UnB

Leonardo Guerra de Rezende Guedes, UFG, PUC-GO, Dr. Eng. Elet./Unicamp

Lorena Teixeira Rodrigues Pinheiro do Prado, USal, Dr. Dir./Universidad de Salamanca

Luís Fernando Ramos Molinaro, UnB, Dr. Eng. Elet./USP

Marcelo Stehling de Castro, UFG, Dr. Eng. Elet./UnB

Rodrigo Pinto Lemos, UFG, Dr. Eng. Elet./Unicamp

Weber Martins, UFG, PUC-GO, D.Phil. in Electronics/University of York

Fale Conosco:

contato@london7.com.br

www.london7.com.br

SUMÁRIO

1 CONCEITOS

1.1 GRANDEZAS ELÉTRICAS

1.2 PROTEÇÕES EM SISTEMAS ENERGIZADOS

1.3 RESISTÊNCIA DE TERRA

2 ATERRAMENTO

2.1 FUNDAMENTOS DE ATERRAMENTO

2.2 ELETRODOS DE ATERRAMENTOS E NATURAL

2.3 ELETRODOS CONVENCIONAIS

2.4 COMPORTAMENTO DA TENSÃO E CORRENTE DURANTE SURTOS

3 O SOLO

3.1 RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO

3.2 HASTES INTERLIGADAS EM PARALELO

3.3 RESISTIVIDADE APARENTE

3.4 REDUÇÃO DE CAMADAS

3.5 RESISTIVIDADE ELÉTRICA DO SOLO

4 MEDIÇÕES DA RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO

4.1 PRINCÍPIOS DAS MEDIÇÕES DA RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO

4.2 MÉTODO DE MEDIÇÃO DA RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO

5 OBTENÇÃO DA RESISTIVIDADE DO SOLO

6 DIMENSIONAMENTO DA MALHA DE TERRA

7 PROJETO DA MALHA DE TERRA

7.1 PROJETO DE MALHA DE ATERRAMENTO EM SUBESTAÇÕES

8 MEDIÇÃO DE RESISTIVIDADE DO SOLO

8.1 ARRANJO DE WENNER

8.2 APLICAÇÃO DO MÉTODO WENNER SEGUNDO A ABNT

8.3 MÉTODOS DE ESTRATIFICAÇÃO DO SOLO

8.4 RESISTIVIDADE APARENTE DO SOLO

9 PROJETO MALHA DE TERRA

9.1 GEOMETRIA DA MALHA

9.2 CÁLCULO PRELIMINAR DA RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO

9.3 DIMENSIONAMENTO DO CONDUTOR DA MALHA

9.4 CÁLCULO DAS TENSÕES PERMISSÍVEIS

9.5 PROJETO MALHA DE TERRA

10 SISTEMAS DE PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

10.1 RAIOS

10.2 NÍVEL DE PROTEÇÃO CONTRA DESCARGA ATMOSFÉRICA

10.3 ÁREA DE CAPTAÇÃO DO RAIOS EM UMA ESTRUTURA

10.4 GAIOLA DE FARADAY

10.5 CONSIDERAÇÕES GERAIS DO SPDA

10.6 INSPEÇÃO

10.7 DOCUMENTAÇÃO TÉCNICA

11 CORROSÃO NO SISTEMA DE ATERRAMENTO

11.1 ELETRONEGATIVIDADE DOS METAIS

11.2 REAÇÃO DE CORROSÃO

11.3 CORROSÃO NO SISTEMA DE ATERRAMENTO

11.4 AERAÇÃO DIFERENCIAL

11.5 PROTEÇÃO CONTRA CORROSÃO

11.6 O RELIGADOR E A CORROSÃO

12 SOBRETENSÕES DE ORIGENS ATMOSFÉRICA

12.1 A DESCARGA ATMOSFÉRICA EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

12.2 MÉTODO ELETROGEOMÉTRICO

13 DIMENSIONAMENTO DE CABOS-GUARDA EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

13.1 CALCULO DA RESISTÊNCIA DE FALTA

13.2 RESISTIVIDADE DO SOLO, RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO DAS TORRES E RESISTÊNCIA DA MALHA DE TERRA DAS SEs.

13.3 TEMPO DESEJADO DE ATUAÇÃO DA PROTEÇÃO

13.4 OUTROS FATORES

13.5 EXEMPLO DE CÁLCULO DO CABO-GUARDA

14 EXEMPLO DE LAUDO DE CONFORMIDADE DE MALHA DE ATERRAMENTO

15 BIBLIOGRAFIA

1 CONCEITOS

1.1 GRANDEZAS ELÉTRICAS

Antes de iniciar este estudo faz-se necessário estressar o conhecimento das grandezas elétricas.

POTENCIAL ELÉTRICO

Potencial elétrico é a capacidade que um corpo energizado tem de atrair ou repelir outras cargas elétricas.

TENSÃO

A tensão é uma unidade que mede a Diferença de Potencial Elétrico (*d.d.p.*) que permite a passagem da carga de 1 *Coulomb* durante 1 segundo. Esta grandeza é medida pela unidade Volt (V) em homenagem a Alessandro Volta, quem inventou a bateria química.

CORRENTE

A corrente elétrica representa a passagem durante 1 segundo de uma carga equivalente a 1 *Coulomb*. Esta grandeza é medida pela unidade Ampère (A) em homenagem a André-Marie Ampère que fez importantes contribuições para o estudo do eletromagnetismo. Assim, temos que 1 A equivale à passagem durante 1 segundo de $6,25 \times 10^{18}$ *elétrons* (*e*).

$$1A = 6,25 \times 10^{18} e/\text{segundo}$$

RESISTÊNCIA

A resistência elétrica representa a característica físico-química do material que, ao conduzir corrente elétrica, produz uma certa tensão (diferença de potencial). Esta grandeza é medida pela unidade Ohm (Ω),

derivado do sobrenome do físico Georg Simon Ohm. Logo, a resistência que, ao conduzir 1 A, produz uma tensão de 1 V, equivale a 1 Ohm (Ω).

$$1 \Omega = 1V / 1A$$

A resistência de um dado material pode ser obtida por:

$$R = r \cdot \frac{l}{a}$$

onde l representa o comprimento do condutor, a sua área e ρ é a resistividade do material.

A resistividade de determinado material é uma medida da oposição de um material ao fluxo de corrente elétrica. Advém de suas características próprias e pode variar com a mudança da temperatura. Quanto maior a temperatura do material, maior a sua resistividade, maior a resistência à passagem de corrente.

POTÊNCIA

A potência é a capacidade de produzir trabalho e calculada pelo produto entre *d.d.p.* e corrente. Da Lei de Ohm se obtém as seguintes expressões:

$$P = V.I$$

$$P = V^2 / R$$

$$P = R.I^2$$

ENERGIA

A energia é a somatória infinitesimal da potência no tempo. Logo, quanto mais durar a potência aplicada, maior a energia transferida.

$$P = \frac{dW}{dt} \quad W = \int p dt \quad W = \int V \cdot I dt$$

A energia transferida por uma potência de 1 Watt durante 1 segundo é definida como sendo de 1 *Joule* (J), em homenagem ao físico britânico James Prescott Joule, quem demonstrou a equivalência entre trabalho e calor.

1.1.1 Alguns Exemplos

Das grandezas até agora estudadas, apenas corrente, *d.d.p.* e a resistência são passíveis de controle. Assim, para se analisar o comportamento do circuito durante a falha, deve-se verificar o funcionamento de alguns itens particulares dos equipamentos.

EXEMPLO 1: CIRCUITOS ELETRÔNICOS

Equipamentos da eletrônica digital que operam com tensões de até 5 V e corrente da ordem de $4,0 \times 10^{-3}$ A (4 miliampéres), dissipam potência da ordem de $2,0 \times 10^{-2}$ W (20 miliWatts).

Sendo o intervalo para transferência de informações de $1,5 \times 10^{-8}$ segundos (15 nanosegundos), temos a energia do circuito da ordem de 3×10^{-11} Joule, ou 0,3pJoule (picojoule), neste exemplo.

Percebe-se, então, que qualquer surto de tensão superior à 5 V (tensão de operação) e com duração maior que 3×10^{-3} segundos (3 milissegundos) colocará o sistema em risco. Caso o circuito não seja dotado de dispositivos protetores para absorver a energia, esta será dissipada na forma de calor, luz ou vibrações mecânicas (som), o que poderá danificar o sistema.

EXEMPLO 2: DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

Considerando-se que numa descarga atmosférica o arco elétrico surge na razão de 1 cm a cada 1.000V. Para uma ionização completa – formando o arco voltaico – deve-se haver uma tensão entre os dipolos – terra e nuvem – que permita aos elétrons livres da terra percorrer uma corrente elétrica até a nuvem, ou, vice-versa.

Considerando a distância das nuvens até a terra, pode-se calcular tensão das descargas atmosféricas. Ao se supor que as nuvens carregadas (cúmulos baixos - CB) possuem altura média de 1.000 metros, a descarga atmosférica neste caso será da ordem de:

$$V = 1,0 \times 10^3 \text{ (metros)} \cdot 1,0 \times 10^3 \text{ (Volts)} / 1,0 \times 10^{-2} \text{ (metros)}$$

$$V = 1,0 \times 10^8 \text{ Volts} = 10 \text{ milhões de Volts}$$

Logicamente que parte da energia das descargas atmosféricas são

dissipadas na forma de energias sonora e luminosa, e ainda possuem curta duração. Contudo, a duração das descargas atmosféricas em média de 0,15 segundos (150 milissegundos); em muito superior ao tempo máximo permitido para os circuitos digitais.

EXEMPLO 3: EQUIPAMENTOS ELETRODOMÉSTICOS

Os equipamentos eletrodomésticos operam com tensões da ordem de 220 a 380 Volts e com tempo de falha compatível com os dispositivos de proteção – curva de operação 0,01 a 0,02 segundos. Nestes equipamentos deve-se estabelecer o tempo de descarga das sobretensões em função das curvas características dos dispositivos de proteção – obedecendo à ABNT – NBR IEC-60947-2. O tempo da descarga dos surtos será definido pela resistência da malha de terra, ou malha de aterramento.

1.2 PROTEÇÕES EM SISTEMAS ENERGIZADOS

As proteções dos equipamentos elétricos e eletrônicos devem garantir o seu funcionamento pleno, estabelecendo segurança aos usuários, a terceiros, aos animais e à propriedade – conforme a ABNT NBR5410 e NR-10 MTE. Na proteção de um sistema elétrico, devem ser examinados três aspectos:

- Proteção para operação normal;
- Proteção contra falhas do sistema elétrico; e
- Proteção contra falhas de origens externas ao sistema.

A operação normal presume a inexistência de falhas do equipamento, a inexistência de erros dos operadores e a inexistência de falhas externas.

As proteções para a operação normal e contra falhas do sistema elétrico devem ser previstas de acordo com as características peculiares de cada sistema. Neste item temos as seguintes proteções:

- Proteção contra explosões;
- Proteção contra o contato a partes energizadas;
- Proteção contra sobrecorrente; e

- Proteção contra sobretensões operacionais.

Basicamente a proteção para operação normal e contra falhas do sistema estabelece uma faixa de tensão compatível e segura com os circuitos, e determina qual a corrente e tensão máximas permitidas nos diversos pontos do circuito.

Ao determinar os valores máximos de corrente e tensão por fase, se estabelece também os valores máximos residuais de corrente de neutro antes que esta corrente retorne ao ponto de entrega de energia ou de alimentação da carga.

Considerando a corrente de neutro como a corrente já utilizada, o equilíbrio é estabelecido quando o somatório das correntes de fase é idêntico à corrente de neutro. Quando este equilíbrio não é obtido fica evidenciado que a corrente elétrica exigida pela fase é diferente da corrente de retorno, caracterizando uma falha no sistema – parte da corrente está fluindo em pontos não seguros e previstos. Nesta condição é normatizado que os circuitos de alimentação devem ser seccionados.

O tempo em que os circuitos devem ser seccionados deve ser calculado, e uma das variáveis que são exigidas neste cálculo é o valor da resistência de aterramento, pois é através dela que a “*corrente de falha*” irá fluir.

Para a determinação dos esforços térmicos e magnéticos a que um circuito está dimensionado para suportar, utiliza-se a Integral de Joule, que indica que este esforço é transferido pelo quadrado da corrente em um período de tempo.

$$E = \int I^2 dt \quad E = \int \frac{V^2}{R} dt \quad E = \int \frac{P}{R} dt$$

Esta expressão define como “esforço Joule” (E) a energia suportável que pode passar pelo circuito em um período de tempo. Observa-se que a resistência nesta expressão é a resistência total do conjunto equipamento e proteção.

Destaca-se que a resistência do circuito ativo é definida e realmente conhecida e representa um paralelo à resistência dos circuitos de proteção.

Logo, quanto menor a resistência de proteção menor a resistência equivalente:

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_{circ}} + \frac{1}{R_{prot}} \quad R_{eq} = \frac{R_{prot} + R_{circ}}{R_{prot} R_{circ}}$$

A eficiência da proteção dos circuitos elétricos será proporcional ao menor tempo de duração da falha. Este tempo de duração será influenciado diretamente pelo valor da resistência de proteção.

Nos diversos esquemas de ligação dos circuitos, com os condutores de proteção e neutro separados ou comuns, deve-se atentar que a partir da conexão do condutor neutro com condutor de proteção este ponto eletricamente é único (TN-C), e que as falhas previstas devem ocorrer sempre antes desta conexão (TN-S), pois as falhas ocorridas após este ponto não indicarão desequilíbrio entre fase e neutro. A corrente de falha será absorvida pelos condutores de proteção e neutro, e caso os dispositivos diferenciais de proteção verifiquem as correntes de neutro e de fase, o tempo de acionamento será comprometido.

Nestes circuitos deve-se estabelecer a ligação equipotencial das massas metálicas em um ponto preestabelecido, preferencialmente junto ao ponto de entrega de energia da concessionária. A partir deste ponto, deve ser instalado o condutor neutro, o condutor de proteção e os condutores de fase.

Existem ainda dúvidas quanto à necessidade de interligar neste ponto o eletrodo de descarga do sistema de proteção contra descarga atmosférica - SPDA.

Como recomenda a ABNT NBR 5.410 e a ABNT NBR 5.419, afirma-se a necessidade de neste ponto, e unicamente neste ponto, tornar comum apenas os condutores de neutro e proteção, uma vez que os dispositivos de proteção serão instalados após este ponto. É normatizado que o condutor do SPDA, que suporta grandes surtos de sobretensão deve ser independente, pois em momento de falhas este poderá elevar o potencial e o esforço de Joule do circuito.

Em resumo, alguns princípios da Proteção dos circuitos elétricos:

- Menor tempo possível de duração da falha;
- Menor resistência equivalente possível;
- Sincronismo entre o tempo de falha e tempo de operação;
- Menor esforço Joule;
- Ligação equipotencial das massas metálicas; e
- Condutores (proteção, neutro e fase) independentes;

1.3 RESISTÊNCIA DE TERRA

Nesta seção são apresentados como definir o valor da resistência do circuito de proteção e ou do Sistema de Proteção Contra Descarga Atmosférica (SPDA) para as especificações de projeto, bem como quais são os parâmetros utilizados para estabelecer este o valor da resistência.

Como determina a ABNT NBR 5.419, a resistência máxima da malha de terra para o SPDA é de 10Ω . Neste item não tem-se dúvidas.

Mas, a malha de terra que irá alimentar o condutor de proteção dos circuitos elétricos deverá possuir valores compatíveis com os equipamentos e dispositivos de proteção instalados, não existindo nenhum valor predeterminado.

Por exemplo, a norma ABNT NBR 13.534 “Instalações Elétricas em Estabelecimentos Assistenciais de Saúde”, estabelece um conjunto de requisitos mínimos de segurança para instalações elétricas em hospitais, ambulatórios, clínicas médicas e odontológicas, veterinárias, etc.

Uma das determinações da norma em centros cirúrgicos:

“O paciente deve ser protegido contra os efeitos dos micros choques. As correntes de paciente não devem exceder $50\mu\text{A}$, assumida uma resistência de corpo de $1\text{k}\Omega$ ”.

(ABNT NBR 13.534)

Na configuração de projetos para obter corrente de micro choque na ordem de $50,0 \times 10^{-6}\text{A}$. Trabalhando com tensão em corrente contínua da ordem de $12,0\text{V}$ – exigência da Norma –, obtém-se a resistência máxima da ordem de $240\text{K}\Omega$ que em paralelo com a resistência de corpo na ordem de $1,0\text{K}\Omega$, obtém-se $R_{eq} = 995,0\Omega$.

Tratando agora das falhas, a mesma norma define como tempo máximo de duração 15 milissegundos, com possibilidades de surtos máximos de 300mA em até $1,0\text{kV}$. Neste caso a Energia máxima dissipada e sua respectiva resistência a partir do “esforço de Joule” com a tensão real de operação dos circuitos será:

$$E = V \cdot I \cdot t = 1.000 \text{ V} \times 0,30 \text{ A} \times 0,015 \text{ s} = 4,5 \text{ J}$$

$$E = V^2 / R^2$$

$$4,5 J = 12^2 V / R^2$$

$$R = 5,6 \Omega$$

Neste caso o valor máximo da resistência do circuito de proteção será de 5,6 Ω .

Caso neste estabelecimento seja feita a interligação da malha de terra do circuito de proteção com a malha de terra do SPDA, obter-se-á uma resistência de aterramento equivalente ao paralelo das duas resistências, caso a resistência do SPDA seja de 10 Ω , a R_{eq} se torna 5,58 Ω . Logicamente menor que a resistência do condutor de proteção, porém exposto a surtos de tensão infinitamente superiores àqueles previsto nas Normas Técnicas. Destaca-se que os dispositivos de controle de sobretensões, nos circuitos operacionais trabalham com a existência de tensões máximas de 1KV.

Para outro exemplo, pode-se verificar na ABNT NBR 14.639– “Postos de Serviço Instalações Elétricas” – os requisitos mínimos necessários para instalação elétrica de equipamentos e materiais em postos de serviços de venda de combustíveis. Esta norma determina que a resistência ente equipamento, ou qualquer corpo capaz de ficar eletricamente carregado, e a terra não deve ser superior a 10 Ω , e que os ensaios de continuidade dos fios de interligação devem ser realizados com instrumentos que forneçam no mínimo corrente de 10 A, com resistência de contato inferior a 500m Ω .

Neste caso a própria norma sinaliza que a resistência máxima para o condutor de proteção será de 10 Ω , o mesmo valor será aplicado na malha de terra do SPDA. Mais uma vez destaca-se que as duas malhas devem ser independentes, pois operam com níveis distintos de tensão.

2 ATERRAMENTO

2.1 FUNDAMENTOS DE ATERRAMENTO

Em toda instalação elétrica para que se possa garantir de forma adequada à segurança das pessoas e o seu funcionamento correto, devem existir o sistema de proteção através do condutor de proteção conectado a malha de terra eficiente. A ABNT NBR 14.039 exige que todas as instalações elétricas tenham o condutor de proteção além do condutor neutro – o que agora é Lei.

Existem por definição dois tipos de aterramento:

2.1.1 Aterramento funcional

O Aterramento Funcional é o aterramento de um condutor vivo (ativo) – que é o condutor neutro – e que possibilita o correto funcionamento da instalação.

2.1.2 Aterramento de proteção

O Aterramento de Proteção é o aterramento de um condutor que tem como objetivo prevenir contra choque e contatos diretos a partes energizada dos equipamentos por meio da conexão das massas dos equipamentos a uma malha de terra.

2.1.3 Malha de terra

Do ponto de vista da proteção contra choques elétricos, o objetivo de uma malha de terra é proporcionar uma superfície equipotencial no solo onde estão colocados os componentes da instalação elétrica e onde as pessoas estão pisando. Esta superfície irá garantir que quando uma corrente circular pela malha de aterramento, seja ela proveniente de uma falha ou de uma descarga atmosférica não aparecerá diferença de potencial entre diferentes pontos acessíveis à pessoa. Esta superfície somente será equipotencial se a condutividade da superfície for nula, que é uma situação irreal (Figura 1).

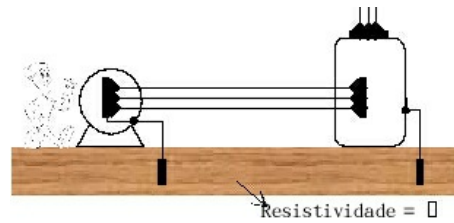


Figura 1: Resistividade do solo

O projeto de uma malha de terra visa buscar uma condição aceitável e real onde poderão aparecer gradientes de potencial ao longo da superfície de piso da área onde os equipamentos estão instalados, devido a circulação de correntes de falta. Os valores do gradiente devem ser aceitáveis, dentro do limite suportável pelas pessoas.

Para definir os limites suportáveis na especificação e dimensionamento da malha de terra, 2 variáveis são utilizadas (Figura 2):

- Tensão de contato, que é a tensão que surge entre as partes simultaneamente acessíveis, quando ocorre uma falha de isolamento no equipamento; e
- Tensão de passo, que a tensão produzida por uma corrente elétrica, causada por uma falha, que circula pela malha de terra entre dois pontos, com reflexos na superfície onde está instalado o equipamento. A diferença de potencial é verificada na distância de 1 metro que corresponde ao tamanho médio de um passo humano.

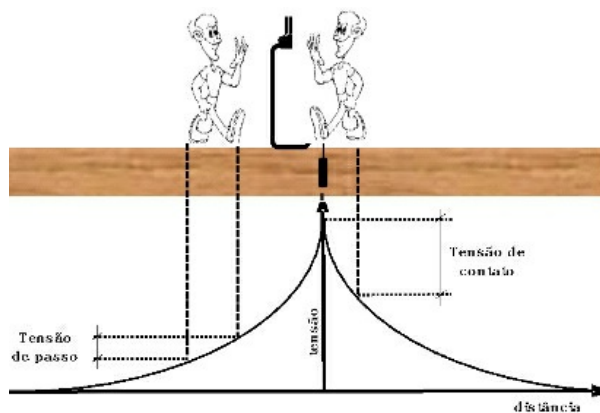


Figura 2: Tensão de contato e tensão de passo

2.2 ELETRODOS DE ATERRAMENTOS E NATURAL

O eletrodo de aterramento é um condutor ou conjunto de condutores enterrados no solo e eletricamente ligados, constituindo um sistema de aterramento ou malha de terra.

Os eletrodos de aterramento podem ser naturais, que são aqueles que não foram instalados especificamente para este fim, porém podem ser utilizados, em geral as armaduras de aço das edificações, por exemplo. Os eletrodos naturais são elementos metálicos inseridos no solo que originalmente não foram projetados para descarga de corrente elétrica ao solo.

2.3 ELETRODOS CONVENCIONAIS

As normas Brasileiras estabelecem que quando no aterramento forem utilizados eletrodos convencionais, a seleção e instalação dos componentes dos aterramentos devem ser tais que:

- O tipo do eletrodo e sua profundidade de fixação não sofram influência das mudanças das condições climáticas, aumentando a resistência do aterramento;
- O projeto do Sistema de Aterramento deve considerar o possível aumento da resistência devido à corrosão;
- Suportem as exigências térmicas, termomecânicas e eletromecânicas;
- Apresentem individualmente, baixos valores de resistência e impedância de aterramento; e
- Tenham distribuição espacial conveniente.

O eletrodo de aterramento convencional deve se constituir de uma malha de terra, o mais próximo possível dos pontos onde possa ocorrer a tensão de contato. Em edificações ainda em projeto, exige-se que a malha de aterramento seja construída na área imediatamente abaixo onde os equipamentos serão instalados. Ainda neste caso é determinada pela norma a necessidade de estabelecer um anel equipotencial no perímetro da edificação.

Para estabelecer a configuração e dimensionamento da malha de

terra, deve-se obrigatoriamente conhecer:

- O valor da resistência de aterramento – informação prévia;
- O valor da resistência dos eletrodos – hastes e cabos;
- A resistividade do solo – a ser conhecida, local da obra;
- A tensão de contato, tensão de alimentação dos equipamentos;
- A tensão de Passo.

Para definir a tensão de contato e a tensão de passo, deve-se analisar o que ocorre quando uma corrente elétrica é injetada em um eletrodo de aterramento. A terra por ser um material condutor apresenta propriedades físicas como a resistividade. E um eletrodo cravado no solo, assim como o próprio solo, passa a ser componentes da instalação elétrica, por onde circula corrente elétrica e, portanto possui uma resistência elétrica.

O valor da resistência de solo, conjunto de valores formados pelos eletrodos – cabos e hastes e pelo próprio solo, depende como todo condutor do material e da geometria dos componentes. Quando uma corrente é injetada no eletrodo de aterramento aparecem ao longo do solo em torno dos eletrodos gradientes de potencial, uma vez que a corrente não imediatamente escoada. O gradiente de potencial tem seus valores máximos próximo aos eletrodos e estes valores diminuem à medida que afastam do eletrodo.

2.4 COMPORTAMENTO DA TENSÃO E CORRENTE DURANTE SURTOS

Considera-se como zona de influência do eletrodo de aterramento a região no solo onde o potencial varia com a injeção de corrente. Um ponto importante que define os limites da zona de influência de um eletrodo o terra de referência. Pode-se definir o Terra de Referência como o ponto em que o potencial não varia, quando uma dada corrente circula pelo eletrodo. Do ponto de vista estritamente teórico este ponto está no infinito, para qualquer eletrodo e qualquer corrente, o que indica que do ponto de vista da aplicação prática este princípio é impraticável.

Para se estabelecer um modelo matemático, analisa-se o que acontece

quando uma haste vertical é usada como eletrodo. A corrente é injetada no eletrodo e a distribuição espacial do potencial parte de valores máximos próximo ao eletrodo – valores máximos da tensão de descarga, atenuando até valores próximos de zero, ou valores seguros a partir de determinada distância do eletrodo.

Neste modelo, substitui-se o valor de referência zero encontrado no infinito, por valores mínimos e seguros encontrados na periferia da malha de aterramento. Assim, define-se como resistência de aterramento R_t como a relação entre a tensão no eletrodo de aterramento e a corrente que a gerou $R_t = V/I$.

Durante uma falta a terra, supõe-se que o eletrodo de aterramento e todas as massas metálicas conectadas a ele podem ser elevados ao potencial máximo previsto, mas isto somente ocorre na superfície horizontal de um eletrodo contínuo. Para proteger a instalação e seus equipamentos com um eletrodo contínuo, no caso uma placa metálica, não seria necessária tecnicamente e nem viável economicamente. O que se faz é o uso de um conjunto de eletrodos elementares interligados em forma de malha.

No interior da malha de aterramento, onde estão os equipamentos e as pessoas, os valores de elevação de potencial deverão permanecer dentro dos limites aceitáveis. Um parâmetro importante no projeto das malhas de terra, para que os máximos valores de gradiente para os níveis da corrente de falta não sejam excedidos, é a dimensão das malhas básicas. Quanto maior for a malha básica maior será a elevação de potencial no interior da malha.

Este parâmetro é utilizado especialmente quando na obtenção de uma resistência de aterramento baixa, estende-se demasiadamente a malha de terra, provocando a sua ineficiência, para proteger os equipamentos. Esta condição é vulgarmente chamada de *saturação da malha de terra*. A saturação da malha de terra pode ser observada quando os valores da resistividade do solo e dos componentes da malha somam-se atingindo valores superiores aos estabelecidos pelas especificações da malha de aterramento.

Acrescentam-se agora novos parâmetros para a especificação e dimensionamento da malha de terra: a elevação máxima do potencial de malha.

Seguindo a sequência lógica já estabelecida, e usando o Método de

Diferenças Finitas no Domínio do Tempo – DFDT e os Resultados Obtidos para Potencial, Corrente e Resistência de Aterramento Transitória – RAT, projeta-se a malha de aterramento básica, porém antes se deve conhecer os princípios da medição da resistência de terra.

3 O SOLO

O solo é resultado do intemperismo sobre a matéria em determinado relevo, clima, bioma e ao longo de um certo período. O solo é um meio geralmente heterogêneo, de modo que o valor de sua resistividade varia de local para local em função:

- Tipo;
- Nível de umidade;
- Profundidade das camadas;
- Idade de formação geológica;
- Temperatura;
- Composição química e concentração dos sais dissolvidos na água retida;
- E outros fatores naturais, sendo também afetado por fatores externos como contaminação e compactação.



Figura 3: Diferentes camadas do solo

3.1 RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO

Uma haste cravada verticalmente em um solo homogêneo apresenta uma resistência elétrica determinada por:

$$R_{lh} = \frac{\rho_a}{2\pi \cdot L} \ln\left(\frac{4 \cdot L}{d}\right)$$

(10)

Onde:

- ρ_a = Resistividade aparente do solo ($\Omega \cdot m$);
- L = comprimento da haste (m);
- d = diâmetro do círculo equivalente a área da seção transversal (m).

Quando o diâmetro for dado em polegada temos:

$$R_{lh} = \frac{\rho_a}{2\pi \cdot L} \ln\left(\frac{400 \cdot L}{2,54 \cdot d}\right)$$

Para cantoneira efetuar o cálculo da área de seção transversal igual a área de um círculo. Portanto, o diâmetro equivalente será dado por:

$$d = 2 \cdot \sqrt{\frac{S_{cantoneira}}{\pi}}$$

onde:

$$S_{cantoneira} = S_{cantocirculo} = \pi \left(\frac{d}{2}\right)^2$$

EXEMPLO

Determinar a resistência de terra de uma haste de 2,4m de comprimento com um diâmetro de 15mm, cravada verticalmente em um solo com $\rho_a = 100\Omega \cdot m$.

$$R_{lh} = \frac{100}{2\pi \cdot 2,4} \ln\left(\frac{4 \cdot 2,4}{0,015}\right) = 42,85\Omega$$

3.2 HASTES INTERLIGADAS EM PARALELO

A interligação de hastes em paralelo tem como consequência uma

superposição das áreas de influência das hastes consideradas individualmente, implicando na alteração do valor da resistência de cada uma quando considerada uma parte do conjunto.

Para reduzir os efeitos dessa superposição, a distância entre hastes devem ser, no mínimo igual ao comprimento da própria haste.

A resistência elétrica que cada haste tem inserida no conjunto será calculada por:

$$R_h = R_{hh} + \sum_{m=1}^n R_{hm}$$

onde:

- R_h é a resistência da haste h inserida no conjunto considerando as interferências das outras hastes;
- N é o número de hastes em paralelo;
- R_{hh} é a resistência individual de cada haste; e
- R_{hm} é o acréscimo da resistência da haste h por influência da haste m e é dada por:

$$R_{hm} = \frac{\rho_a}{4 \cdot \pi \cdot L} \ln \left[\frac{(b_{hm} + L) - e^2}{e^2 - (b_{hm} + L)^2} \right]$$

onde:

- e_{hm} é o espaçamento entre a haste h e a haste m (em metros);
- L é o comprimento da haste (em metros)
- $b_{hm} = \sqrt{L^2 + e^2}$

Num sistema de aterramento emprega-se hastes iguais, o que facilita a resistência equivalente do conjunto. A resistência de cada haste do conjunto de n hastes é dada por:

$$\begin{aligned} R_1 &= R_{11} + R_{12} + R_{13} + \dots + R_{1n} \\ R_2 &= R_{21} + R_{22} + R_{23} + \dots + R_{2n} \\ R_3 &= R_{31} + R_{32} + R_{33} + \dots + R_{3n} \end{aligned}$$

E, assim:

$$R_3 = R_{31} + R_{32} + R_{33} + \dots + R_{3n}$$

Para o cálculo da resistência de aterramento das (n) hastes em paralelos, não será considerado o efeito do cabo de interligação dessas hastes. A resistência equivalente das hastes em paralelo será dada por:

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}$$

O índice de redução K ou coeficiente de aproveitamento é a relação entre a resistência equivalente do conjunto e a resistência individual de cada haste sem a presença de outras hastes é dada por:

$$K = \frac{R_{eq}}{R_{lhaste}}$$

Esta expressão indica que a resistência equivalente R_{eq} do conjunto de hastes em paralelo está reduzida de K vezes o valor da resistência de uma haste isoladamente.

3.3 RESISTIVIDADE APARENTE

A passagem da corrente elétrica do sistema de aterramento para o solo depende:

- Da composição do solo com suas respectivas camadas;
- Da geometria do sistema de aterramento; e
- Do tamanho do sistema de aterramento.

É necessário calcular a Resistividade Aparente que representa a integração entre o sistema de aterramento relativa ao seu tamanho em conformidade com o solo.

O tamanho do sistema de aterramento corresponde à profundidade de penetração das correntes escoadas. Esta penetração determina as camadas do solo envolvidos com o aterramento e conseqüentemente, a sua Resistividade Aparente.

A Resistividade Aparente é a resistividade vista pelo sistema de aterramento em integração com o solo, considerada a profundidade atingida pelo escoamento das correntes elétricas.

A resistência elétrica de um sistema de aterramento depende da Resistividade Aparente, da geometria e da forma como o sistema de

aterramento está enterrado.

$$R_{at} = \rho_a \cdot f(g)$$

- R_{at} é a resistência elétrica do sistema de aterramento;
- ρ_a é a Resistividade Aparente
- $f(g)$ é uma função que depende da geometria do sistema e da forma de colocação no solo.

A Resistividade Aparente é calculada pela fórmula de Hummel:

$$\rho_a = \frac{d_1 + d_2}{\frac{d_1}{\rho_1} + \frac{d_2}{\rho_2}}$$

onde d_n representa a espessura da camada n .

EXEMPLO

Para calcular a resistência do aterramento sendo: $d_1=2\text{m}$ e $d_2=5\text{m}$; $d_3=3\text{m}$ e $\rho_1 = 500 \Omega \cdot \text{m}$; $\rho_2=200 \Omega \cdot \text{m}$ e $\rho_3=120 \Omega \cdot \text{m}$, conforme a Figura 4.

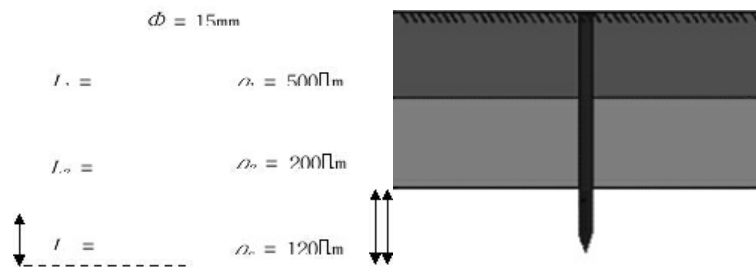


Figura 4: Dados característicos do aterramento

Assim, teremos:

$$\rho_a = \frac{2 + 3 + 5}{\frac{2}{500} + \frac{5}{200} + \frac{3}{120}}$$

$$R_{thaste} = \frac{185,18}{2\pi \cdot 10} \ln\left(\frac{4 \cdot 10}{15 \cdot 10^{-3}}\right) = 23,19\Omega$$

3.4 REDUÇÃO DE CAMADAS

A Resistividade Aparente de um sistema de aterramento é efetuada considerando o nível de penetração da corrente de escoamento em um solo de duas camadas, um solo com muitas camadas deve ser reduzido a um solo equivalente com duas camadas. Considerando o paralelismo entre as camadas usamos a fórmula de Hummel expressa por:

$$\rho_{eq} = \frac{d_1 + d_2 + \dots + d_n}{\frac{d_1}{\rho_1} + \frac{d_2}{\rho_2} + \dots + \frac{d_n}{\rho_n}} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{\rho_i}}$$

$$d_{eq} = d_1 + d_2 + \dots + d_n = \sum_{i=1}^n d_i$$

3.4.1 Coeficiente de penetração α

O coeficiente de penetração α indica o grau de penetração das correntes escoadas pelo aterramento no solo equivalente, dado por:

$$\alpha = \frac{r}{d_{eq}}$$

onde r é o raio do anel equivalente do sistema de aterramento considerando.

Para hastes alinhadas e igualmente espaçadas, r é dado por:

$$r = \frac{(n-1)}{2} \cdot e$$

onde:

- n é o número de hastes cravadas verticalmente no solo; e
- e é o espaçamento entre as hastes.

Outras configuração de r também pode ser dada por:

$$r = \frac{A}{D}$$

onde:

- A é a área abrangida pelo aterramento; e
- D é a maior dimensão do sistema de aterramento.

3.4.2 Coeficiente de Divergência β

Para solo de duas camadas, o coeficiente β é definido pela relação

entre a resistividade da última camada e a resistividade da primeira camada equivalente dado por:

$$\beta = \frac{\rho_{n-1}}{\rho_{eq}}$$

3.4.3 Resistividade aparente para o solo com duas camadas

Com α e β obtidos, pode-se determinar a Resistividade Aparente ρ_a do aterramento especificado em relação ao solo de duas camadas.

Utilizando-se das curvas desenvolvidas por Endrenyi, dada pela Figura 5 obtemos a relação α , β e N por:

$$\rho_a = N \cdot \rho_{eq}$$

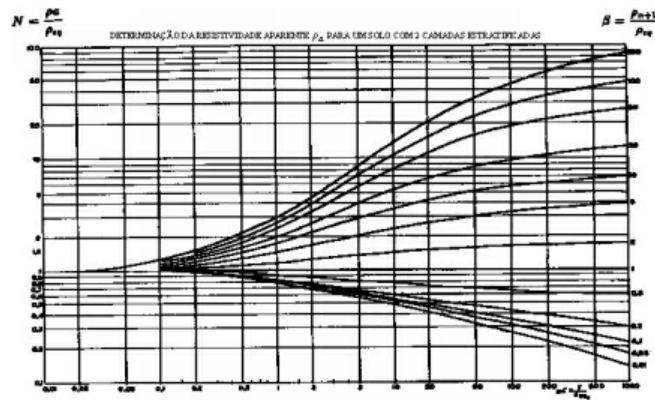


Figura 5: Curvas de Endrenyi

EXEMPLO

Considere 7 hastes de 2,4m com um diâmetro de 1/2" espaçados de 3m retilínea. Determinar a resistência do conjunto.

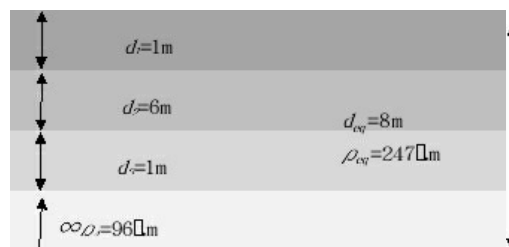


Figura 6: Camadas do solo do exemplo

Assim, temos:

$$r = \frac{(n-1)}{2} \cdot e = \frac{(7-1)}{2} \cdot 3 = 9m$$

$$\alpha = \frac{r}{d_{eq}} = \frac{9}{8} = 1,125$$

$$\beta = \frac{\rho_n + 1}{\rho_{eq}} = \frac{96}{247} = 0,389$$

Pela Figura 57, desenvolvida por Endrenyi, obtemos $N = 0,86$.

$$\rho_n = N \cdot \rho_{eq} = 0,86 \cdot 247 = 212,42 \text{ } \Omega \cdot m$$

Considerando $n=7$, $d=1/2''$ e $e=3m$, obtém-se:

$$R_{eq} = 0,085 \cdot \rho_n = 0,085 \cdot 212,42$$

$$R_{eq} = 18,2 \text{ } \Omega$$

3.5 RESISTIVIDADE ELÉTRICA DO SOLO

A resistividade do solo ρ é calculada como a resistência de um volume de solo cuja área da seção transversal é um metro quadrado e cujo comprimento é um metro. Ou seja:

$$R = r \frac{l}{A} \text{ ou } r = R \frac{A}{l}$$

Assim, maior a resistividade, maior é a dificuldade para a passagem da corrente. Por outro lado, quanto menor a resistividade, menor é a dificuldade para a passagem da corrente.

As diversas combinações dos fatores que influenciam o solo resultam em solos com características diferentes, com valores de resistividade distintos.

O solo, pode ser visto sobre diferentes óticas. Para o nosso estudo o solo será visto pelo sua propriedade elétrica.

Tabela 1: Exemplos de resistividade de diferentes tipos de Solo

Tipos de solo	Faixa de resistividades ($\Omega \cdot m$)
Alagadiço, limo, <i>humus</i> , lama	até 150
Água destilada	300
Argila	300 – 5 000
Calcário	500 – 5 000

Areia	1 000 – 8 000
Granito	1 500 – 10 000
Concreto	Molhado: 20 – 100 Úmido: 300 – 1 000 Seco: 3 k Ω ·m – 2 M Ω ·m

3.5.1 Umidade

A umidade faz com que os sais presentes no solo se dissolvam, formando um meio eletrolítico favorável à passagem da corrente iônica, portanto solo com concentração diferente de umidade, apresenta uma grande variação na sua resistividade principalmente quando esse valor cai abaixo de 10%.

O teor normal de umidade de um solo, além de variar com a localização, depende também da época do ano.

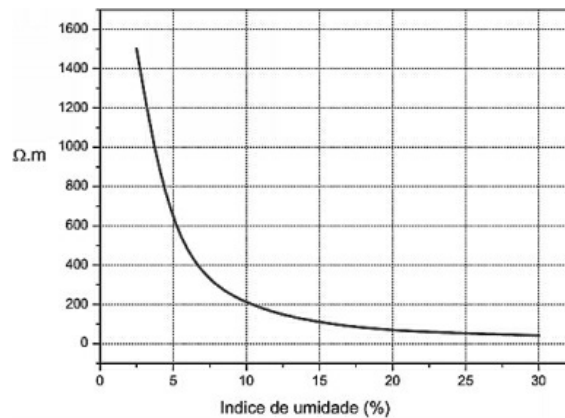


Figura 7: Curva característica: índice de umidade do solo

3.5.2 Temperatura

A resistividade do solo e a resistência de aterramento são bastante afetadas quando a temperatura cai abaixo de 0°C. Para temperaturas acima desse valor, a resistividade do solo e a resistência de aterramento se reduzem. Entretanto para temperaturas elevadas o estado de evaporação da água deixa o solo mais seco, com a formação de bolhas internas, dificultando, assim, a condução de corrente, elevando o valor de sua resistividade.

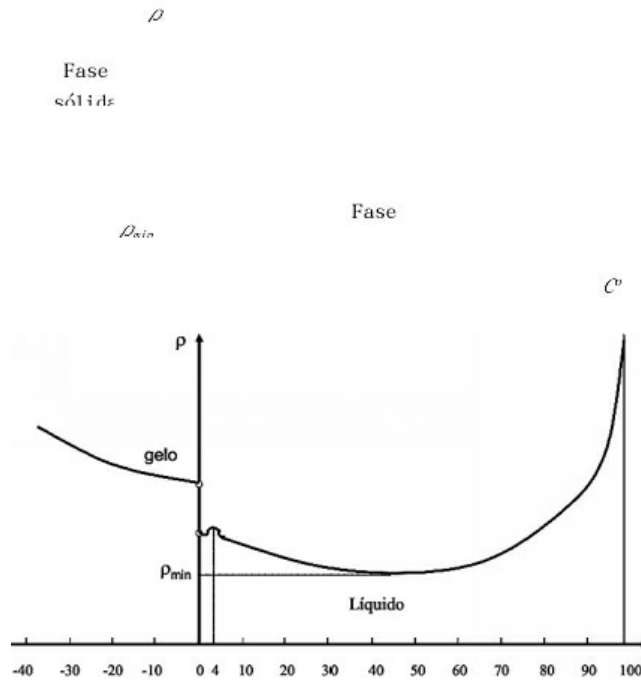


Figura 8: Curva característica: resistividade x temperatura

3.5.3 Sais dissolvidos na água retida

Sabendo que a resistividade do solo depende da quantidade de água retida, e reconhecendo-se o fato que a resistividade da água é governada pelos sais dissolvidos nesta (condução eletrolítica), conclui-se que a resistividade do solo é influenciada pela quantidade e tipo de sais dissolvidos na água retida no mesmo.

4 MEDIÇÕES DA RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO

4.1 PRINCÍPIOS DAS MEDIÇÕES DA RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO

O método largamente utilizado para medir a resistência de sistemas de aterramento é o da queda de tensão utilizando o aparelho medidor de resistência. Este aparelho possui um eletrodo de teste, um eletrodo de tensão e um eletrodo de corrente.

A medição da resistência do solo consiste na aplicação de uma determinada corrente elétrica no sistema em teste – eletrodo de teste, fazendo-a circular pelo eletrodo de corrente. O condutor que fará a interligação do eletrodo de teste ao eletrodo de corrente é o próprio solo. Esta corrente provocará o surgimento de potenciais na superfície do solo.

Estes potenciais serão captados e registrados pelo eletrodo de tensão. Para estabelecer um modelo matemático define-se como X a distância do eletrodo teste ao eletrodo de tensão, e d a distância entre o eletrodo teste e o eletrodo de corrente (Figura 9).

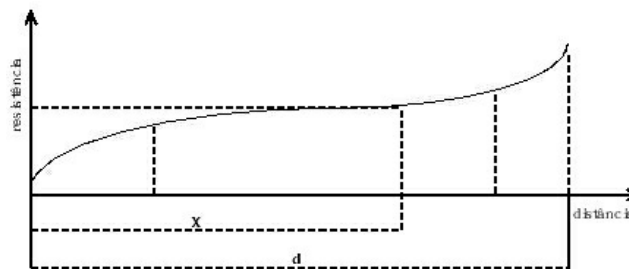


Figura 9: Resistência x distância

A resistência presente entre o eletrodo teste e o eletrodo corrente é o próprio solo, cuja resistividade e distância determinarão a ordem da resistência da malha de terra.

Para obter o valor real da resistência de aterramento é preciso instalar o eletrodo de potência fora das áreas de influências do sistema de teste e do

eletrodo de corrente. Na análise das curvas comprova-se que a distância ideal entre os eletrodos é:

- O eletrodo de potencial deve ser instalado a 61,8% da distância do eletrodo de corrente.

O eletrodo de corrente deverá ser instalado na maior distância possível, para que os patamares de estabilização sejam claros.

4.2 MÉTODO DE MEDIÇÃO DA RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO

4.2.1 Método de Interseção de Curvas - TAGG

Este método possui a seguinte metodologia:

- A colocação do eletrodo de potencial a 61,8% de distância do eletrodo de teste (centro elétrico) ao eletrodo de corrente. Isto nos obriga a conhecer este centro elétrico, que em sistemas elaborados, tais como, o de com hastes e cabos, torna-se de difícil determinação. O centro elétrico da malha de aterramento é o ponto provável de ocorrência da tensão de contato.
- Em grandes sistemas de aterramento os eletrodos auxiliares de corrente e potencial devem ser colocados a grandes distâncias do eletrodo de teste (centro elétrico) e desde que os mesmo contribuam juntos, para valores baixos de resistência de aterramento, de indutância própria e mútua e de capacitância, sendo que o somatório destes valores poderão introduzir altos valores de erro.

O princípio básico deste método consiste em se obter três curvas da resistência de aterramento em função da distância variável do eletrodo de potencial P, para uma posição fixa do eletrodo de corrente C para cada curva, sendo que todas as medições são executadas a partir de um ponto arbitrário d_0 . Este ponto de referência deve ser o centro elétrico, e onde será instalado o

eletrodo de teste (eletrodo móvel) (Figura 10).

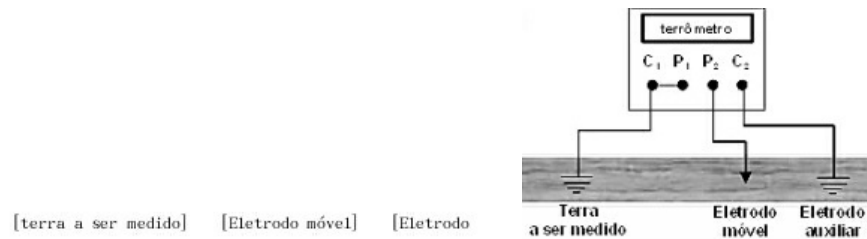


Figura 10: Utilização do terrômetro.

Supõe-se que o centro elétrico da malha de aterramento estiver em d_1 , a uma distância d_x de d_0 pela teoria anteriormente apresentada, a distância do centro elétrico ao eletrodo auxiliar de corrente será $(d_C + d_x)$, e a resistência verdadeira (R_∞) será medida se o eletrodo de potencial P estiver a $0,618.(d_C + d_x)$ do centro elétrico d_1 . Isto significa que a distância de d_p cedida com relação a d_0 seria:

$$d_p = 0,618.(d_C + d_x) - d_x$$

Portanto, d_p é a distância com relação ao centro elétrico que se deve colocar o eletrodo de corrente para se obter o verdadeiro valor da resistência de aterramento (R_∞) do sistema sob teste.

Após o levantamento das três curvas de resistência de aterramento em função da distância – obtidas para valores fixos do eletrodo de corrente C e variável do eletrodo de potencial P – procede-se como descrito abaixo.

Dão-se valores arbitrários para d_x , calculando-se o valor de P , cravando o eletrodo de potencial neste ponto encontra-se o valor de R correspondente, obtendo os valores para R em função dos valores arbitrários de d_x .

Estas curvas assim traçadas irão se encontrar em um ponto que será o valor verdadeiro da resistência de aterramento do sistema sob medição (R_∞).

4.2.2 Aplicando o Método Alternativo de TAGG

Escolhe-se a haste da periferia da malha de aterramento que mais convier a direção da medição, que tenha maior gradiente de potencial, para ser o eletrodo de teste.

Em seguida, escolhe-se três valores de distância de fixação do eletrodo de corrente C dentro da limitação $d < d_C < 4d$, conforme descrito no Método Alternativo, onde d é a menor dimensão da malha de terra, um dos seus lados independentes por exemplo e d_C é a distância entre a haste escolhida para ser eletrodo de teste e o eletrodo de corrente.

- d_p é a distância entre o ponto d_o (ponto zero – local do eletrodo de teste) e o eletrodo de potencial P .

Para cada valor de d_C adotado, escolhe-se de cinco a oito distâncias para fixação do eletrodo de potencial P entre a haste da malha de terra (em d_o) e a haste C .

Por exemplo, supõe-se uma malha de terra com menor lado de 16 metros, onde faz-se três sequências de medições:

- A primeira sequência com 07 medições, com o eletrodo de corrente cravado a 50 metros do eletrodo de teste, e o eletrodo de potencial cravado de 2 metros a 45 metros do eletrodo de teste;
- A segunda sequência com o eletrodo de corrente cravado a 40 metros; e
- A terceira sequência com o eletrodo de corrente cravado a 30 metros.

Tabela 1: Exemplos de medições

$d_{C1} = 50$ metros	
d_p - distância entre os pontos	Valores obtidos pelo terrômetro
02 metros	01,08 ohms
06 metros	01,19 ohms
12 metros	02,29 ohms
18 metros	01,78 ohms
24 metros	02,49 ohms
35 metros	05,98 ohms
45 metros	24,49 ohms

$d_{C2} = 40$ metros	
d_p - Distância entre os pontos	Valores obtidos pelo terrômetro
02 metros	00,91ohms
06 metros	01,06 ohms
12 metros	01,99 ohms
18 metros	01,96 ohms
24 metros	03,21 ohms
35 metros	13,33ohms
45 metros	-----

$d_{C3} = 30$ metros	
d_p - Distância entre os pontos	Valores obtidos pelo terrômetro
02 metros	00,99 ohms
06 metros	01,25 ohms
12 metros	02,55 ohms
18 metros	03,46 ohms
24 metros	07,63 ohms
35 metros	-----
45 metros	-----

Com os valores de R medidos, faz-se o gráfico de d_p e o seu correspondente valor de R . Tem-se, assim, três curvas: uma para cada valor de d_C adotado.



Figura 11: Plotagem da medições de resistência

4.2.3 Aplicando o Método de TAGG.

Outra maneira é se utilizar da formula $P = 0,618 (d_C + d_x) - d_x$, para cada valor de d_C adotado, arbitra-se os valores de d_x diferentes dos valores de d_p . O valor de d_x é o Centro Elétrico, ponto a partir do qual a estaca de P deve ser cravada para obtenção do valor real da resistência da malha de aterramento.

Tabela 3: Determinação de d_p para diferentes distâncias (d_C)

$d_{C1} = 50$ metros		
Valores escolhidos	$d_p = 0,618 (d_C + x) - x$	Valores medidos
04 metros	29,37	06,18
08 metros	27,84	05,60
10 metros	27,08	05,19
14 metros	25,55	04,50
16 metros	24,79	04,10
20 metros	23,26	03,60
22 metros	22,50	03,50
26 metros	20,97	03,20
28 metros	20,20	03,08
32 metros	18,68	02,85
34 metros	17,91	02,70
36 metros	17,15	02,80
38 metros	16,38	02,99
42 metros	14,86	03,08
44 metros	14,09	03,20
48 metros	12,56	03,34
52 metros	11,04	03,20

Tabela 3: Determinação de d_p para diferentes distâncias (d_C) (continuação)

$d_{C2} = 40$ metros		
Valores escolhidos	$d_p = 0,618 (d_C + x) - x$	Valores medidos
04 metros	23,19	04,56
08 metros	21,66	04,10
10 metros	20,90	03,90
14 metros	19,37	03,35
16 metros	18,61	03,10
20 metros	17,08	02,98
22 metros	16,32	02,99
26 metros	14,49	03,00
28 metros	14,02	03,00
32 metros	12,50	03,02
34 metros	11,73	02,98
36 metros	10,97	02,75
38 metros	10,20	02,60
42 metros	08,68	02,20
44 metros	07,91	02,05
48 metros	06,38	01,65

Tabela 3: Determinação de d_p para diferentes distâncias (d_C) (continuação)

$d_{C3} = 30$ metros		
Valores escolhidos	$d_p = 0,618 (d_C + x) - x$	Valores do medidos
04 metros	17,01	05,01
08 metros	15,48	04,60
10 metros	14,72	04,50
14 metros	13,19	04,10
16 metros	12,43	04,00
20 metros	10,90	03,50
22 metros	10,14	03,20
26 metros	08,61	02,60
28 metros	07,84	02,45
32 metros	06,32	02,00
34 metros	05,55	01,85
36 metros	04,79	01,75
38 metros	04,02	01,70
42 metros	02,50	01,55
44 metros	01,73	-----
48 metros	00,20	-----
52 metros		-----

Para cada comprimento de d_x , com os valores de d_p calculados através das medições da malha de aterramento, se obtém os valores correspondentes de R .

Na sequência plota-se o gráfico da Resistência medida em função da distância do eletrodo de potencial P . A interseção das três curvas d_C nos dará o valor da resistência de terra da malha do aterramento elétrico.

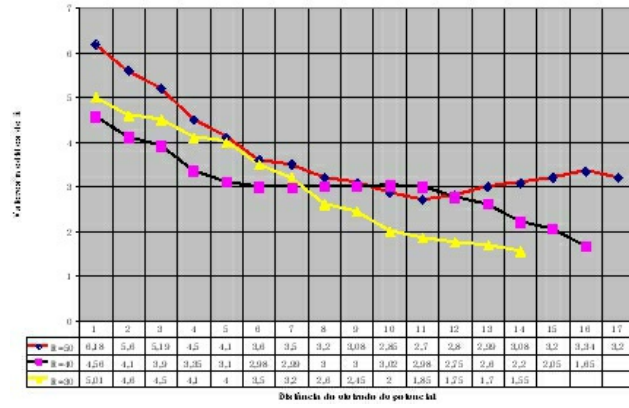


Figura 12: Medição da malha P

5 OBTENÇÃO DA RESISTIVIDADE DO SOLO

No dimensionamento de uma malha de aterramento é necessário o levantamento da resistividade do solo onde a malha será implantada. As medidas de resistividade para um sistema de aterramento normalmente são feitas injetando corrente no solo através de eletrodos, sendo um eletrodo de corrente e outro de potencial. De acordo com a norma ABNT/COBEI 03:102.01-004-1993 faz-se vários levantamentos da resistividade do solo em diversas direções e com diferentes espaçamentos entre os eletrodos, para cada espaçamento tira-se a média aritmética simples, se cada resistividade, para este determinado espaçamento, tiver um desvio padrão maior ou igual a 50% essa medida será desprezada para o dimensionamento da malha de aterramento.

O procedimento descrito considera o solo com camadas horizontais perfeitas o que é um caso ideal. A não consideração de alguns valores de resistividade, do ponto de vista da Geofísica, perde-se sobre falhas, contatos verticais entre outros. Neste procedimento, despreza-se a existência de contatos verticais no solo, assim trabalha-se com uma modelagem bidimensional, usando o Método de Diferenças Finitas no Domínio do Tempo – DFDT. Este método tem como objetivo obter valor da Resistividade Aparente do solo, com a configuração de eletrodo adotada, para uma dada estrutura de condutividade da subsuperfície.

A resistividade do solo será, portanto uma função das dimensões da superfície, ou seja, $\rho(x,y)$, enquanto que o potencial registrado na camada geológica será função também da profundidade do solo, ou seja, $V(x,y,z)$. A aplicação do método de elementos finitos sobre estas equações gera um sistema de equações lineares, temos que $AV^* = b$. Onde A é uma matriz simétrica e esparsa de ordem $n_x n_y$, com n sendo o número de nós da malha de elementos finitos; e b é o vetor fonte. Assim, para uma malha de $8_x 5$ tem-se 8 nós na direção x e 5 nós na direção y .

O sistema de equações lineares é resolvido pelo método de decomposição, considerando os eletrodos localizados no plano $z=0$, com solução na transformada inversa de Fourier reduzida à integral:

$$V(x, y, 0) = \frac{1}{P} \int_0^{\infty} V(x, y, l) dl$$

Que resolvida permite a obtenção da Resistividade Aparente que é calculada através da expressão a seguir, onde K é o fator geométrico relacionado com o arranjo de eletrodos, como no exemplo da Tabela 4. Neste modelo matemático o erro máximo é menor que 1%.

$$\rho_a = K \cdot V / I$$

Tabela 4: Exemplo de medição de resistividade do solo em uma área 256 m² (16x16m)

Espaçamento (m)	Direção de medida P(Ω.m)	desvio	Resistividade Média (Ω. m)	Resistividade DFDT (Ω.m)
2	94	2,38	96,25	96,25
4	88	8,09	95,75	95,75
8	59	33,14	88,25	88,25
16	186	54,35	120,5	98,67

6 DIMENSIONAMENTO DA MALHA DE TERRA

Uma vez definidos os parâmetros que irão configurar a malha de terra, como conhecido anteriormente, os únicos limitadores de nosso projeto são o acesso ao solo e a disponibilidade de área livre para trabalho. Como exemplo, dimensiona-se o sistema de aterramento do condutor de proteção de um posto de abastecimento de combustível em um *shopping center*, cujos parâmetros conhecidos são:

- Resistência de aterramento máxima: 5Ω ;
- Resistência dos eletrodos (hastes e cabos de cobre):
 - $\rho_{cu} = 0,01783 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$;
- A resistividade do solo: $98 \Omega \cdot \text{m}$;
- A tensão de contato (alimentação): 1.000V ;
- A tensão de Passo: 50V

Inicialmente verifica-se a possível área a ser utilizada para a confecção da malha de terra, e partir daí estabelece um primeiro traçado com perímetro e interseções deste perímetro. Sabe-se que a distância mínima permitida ente dois eletrodos profundos é a profundidade deste eletrodo. Para obter acesso às camadas de solos menos estratificadas, inicialmente utiliza-se em cada eletrodo profundo duas hastes *Cooperweld* $16 \times 3.000\text{mm}$ – um eletrodo de $16 \times 6.000\text{mm}$, obrigando o espaçamento mínimo de 6 metros entre eles. Na configuração inicial pode-se utilizar o cabo de cobre nu com área de 50mm^2 .

Neste exemplo, é possível executar uma malha de terra em um polígono de $14,5 \times 6,0 \times 12,5 \times 6,2$ metros, que através de um condutor de $10,30$ metros interligará a malha de terra aos equipamentos que necessitam de proteção. Nesta configuração é possível instalar 08 eletrodos profundos de $16 \times 6000\text{mm}$. Assim, tem-se:

- Comprimento total da malha de aterramento: $66,10$ metros;

- Comprimento total dos eletrodos profundos: 48,0 metros

Neste caso deve-se inicialmente calcular a resistência total da malha de terra:

- Resistência do cabo de cobre 50mm²:

$$R = 0,01783 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m} \times 66,10 \text{ m} / 50 \text{ mm}^2$$

$$R = 0,0236 \Omega$$

- Resistência dos eletrodos profundos (16x6.000mm):

$$R = 0,01783 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m} \times 48,0 \text{ m} / 201 \text{ mm}^2$$

$$R = 0,004 \Omega$$

Pode-se utilizar a pior das hipóteses matemática, que é o comportamento em série das resistências de malha e do eletrodo profundo em uma resistência equivalente de malha:

$$R_{malha} = 0,0236 + 0,004$$

$$R_{malha} = 0,0276 \Omega$$

Analisa-se a resistividade do solo, que fornece a resistência do volume compreendido pela malha de terra. Para este cálculo utiliza-se o Modelo Matemático da Resistência de Aterramento Transitória (*RAT*) que mostra boa concordância com valores experimentais disponíveis na literatura técnica.

A *RAT* é calculada a partir dos valores obtidos de tensão e corrente dos eletrodos, que são os mesmos utilizados na obtenção da resistividade do solo.

$$RAT(n) = V(n) / I(n)$$

Para a modelagem do *RAT* utiliza-se eletrodos de 16mm de diâmetro, e obtém-se a resistividade do solo, método que já analisamos. A equação para a obtenção da resistência de aterramento transitória é a seguinte:

$$R = \frac{r}{2\rho L} \left[\frac{e^{8L/d} - 1}{e^{8L/d} + 1} \right]$$

onde:

- ρ é a resistividade do solo, em $\Omega.m$;
- L é o comprimento da malha de terra; e
- d é largura média da seção transversal da malha de terra.

Para o caso tem-se os seguintes valores:

- $\rho = 98 \Omega.m$
- $L = (12,5 + 14,5) / 2 = 13,5m$
- $d = (6 + 6,1)/2 = 6,05m$

$$R = \frac{98 \cdot \pi \cdot 13,5}{2 \cdot 6,05} = 2,17 \Omega$$

$$RAT = 2,17 \Omega$$

A resistência total da malha de aterramento, neste modelo matemático será uma resistência equivalente correspondente à ligação em série da Resistência de Aterramento Transitório e da resistência dos eletrodos. Portanto:

$$R = RAT + R_{malha}$$

$$R = 2,17 + 0,0276$$

$$R = 2,2 \Omega$$

Nesta configuração se obtém uma resistência compatível com a resistência máxima que é de 5Ω . Portanto, a configuração apresentada poderá ser utilizada.

Neste exemplo se trabalha com o circuito de proteção para equipamentos de automação, não existe necessidade de verificar-se a tensão de contato e ou de passo, pois a alimentação será em baixa tensão.

7 PROJETO DA MALHA DE TERRA

Para a execução de um Projeto Malha de Terra, devemos obedecer às exigências técnicas e legais. Neste livro utilizaremos como um exemplo de referência técnica a norma NTC-60, emitido pela CELG-D (Companhia Energética de Goiás S/A - Distribuição), e que foi construída referenciando a ABNT- "Sistema de Aterramento e Subestações". Contudo, para cada estado, deverá ser utilizada a Norma específica da concessionária. Esta norma determina que deverá ser encaminhado o projeto de aterramento à CELG-D para análise e aprovação, sendo este constituído de:

- Memorial de cálculo realizado com os critérios estabelecidos na NTC-60 e normas ABNT pertinentes.
- Planta baixa apresentando a configuração da malha de terra e seus pontos de conexão.
- Detalhes construtivos e especificações dos materiais empregados;
- Tipo e condições do solo no momento da medição da resistividade; e
- ART.

(NTC-60 CELG-D)

7.1 PROJETO DE MALHA DE ATERRAMENTO EM SUBESTAÇÕES

Conforme os critérios estabelecidos NTC-60 CELG-D:

o projeto do referido sistema deve ser realizado para a condição de falta para a terra e envolve o dimensionamento dos condutores da malha, para suportar os esforços térmicos decorrentes da circulação de correntes de curto-circuito, bem como, o estabelecimento de uma geometria de malha adequada para o controle dos potenciais de passo e toque, causados pelo processo de dissipação da malha para o solo de parte ou toda a corrente de falta.

(NTC-60 CELG-D)

7.1.1 Estratificação do Solo

A estratificação do solo onde será implantado aterramento é desenvolvida por meio de medições da Resistividade Aparente em diversos

pontos. Isto para determinar as características das camadas (profundidades e resistividades).

Este procedimento de estratificação é realizado conforme os métodos descritos no Anexo D da NTC-60 CELG-D, em compatibilidade com a norma ABNT NBR 7.117.

7.1.2 Geometria Básica da Malha

O dimensionamento de uma malha de aterramento se inicia por definir a geometria básica, delimitando a área abrangida pela malha e o arranjo inicial dos condutores. Para esta definição deve considerar o modelo de solo, a distribuição dos equipamentos e edificações no interior da área abrangida.

7.1.3 Cálculo Preliminar da Resistência de Aterramento

Deve-se obter uma estimativa da resistência de aterramento da malha antes de definir a geometria. Faz-se isto considerando que essa resistência é função da área ocupada pela malha de aterramento e da resistividade do solo onde a malha se localizará.

7.1.4 Condutor da Malha

O condutor da malha de terra deve ser calculado levando em conta os esforços mecânicos e térmicos que o condutor consegue suportar.

7.1.5 Tensões Permissíveis & Potenciais de Passo e Toque

Um sistema de seguro para qualquer falha ou defeito requer calcular valores máximos permissíveis para as tensões (potenciais de passo e toque) em função da resistividade da camada superficial do solo e do intervalo t para supressão da falha ou defeito.

Os variados materiais de cobertura do solo (terra, brita, concreto, etc.) levam à necessidade da determinação de níveis de suportabilidade específicos para as várias áreas no interior e na periferia das instalações.

Os potenciais de Passo e Toque são determinados para cada condição das resistências e correntes de curto-circuito, para assegurar intensidades sejam inferiores às máximas permissíveis pelo corpo humano. Para tal, estas

tensões (passo e toque) devem ser obtidas das equações detalhadas na ABNT NBR15.751.

7.1.6 Cálculo da Corrente de Malha

Quando da ocorrência de uma falta de curta duração para a terra, a corrente de falta I_f inicialmente injetada na malha de aterramento se dividirá por todo este sistema interligado, cabendo, então, a cada um dos seus componentes, a função de escoar uma fração desta corrente. A corrente de malha I_m é a parcela da corrente de falta que escoar para o solo através da malha.

7.1.7 Cálculo de Potenciais no Solo

No dimensionamento de malhas de aterramento é necessária a verificação do surgimento de potenciais perigosos, interna e externamente, quando da ocorrência de curtos-circuitos ou existência de correntes de desequilíbrios de neutro para o terra do sistema. Para tanto, deve-se calcular os valores máximos de tensão de toque e passo que podem ocorrer.

7.1.8 Aterramento dos Equipamentos

Os aterramentos dos equipamentos e componentes da subestação devem ser feitos conforme os critérios estabelecidos no Projeto de Norma da ABNT NBR15.751.

8 MEDIÇÃO DE RESISTIVIDADE DO SOLO

A determinação dos valores das resistividades do solo e sua estratificação é de importância fundamental para o cálculo das características de um sistema de aterramento, subsidiando o desenvolvimento de projetos, bem como a determinação de seus potenciais de passo e toque.

Em geral, o solo é constituído por diversas camadas, cada uma apresentando um certo valor de resistividade e uma espessura própria.

O valor de resistividade do solo é determinado através de medições, cujos resultados recebem um tratamento matemático, de modo a se obter a estratificação do solo em camadas paralelas ou horizontais, de diferentes resistividades ρ e de espessuras e definidas

A medição da resistividade do solo deve ser feita após a terraplanagem e depois de ocorrido algum tempo para a estabilização físico-química do solo.

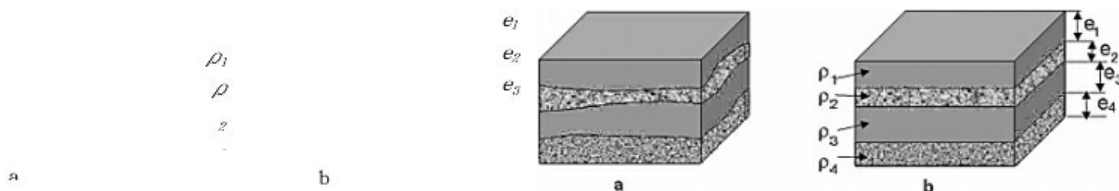


Figura 13: Exemplo de camadas do solo:(a) real (b) estratificado

8.1 ARRANJO DE WENNER

C_1 P_1 G No Arranjo de Wenner (ou Arranjo dos Quatros Pontos Igualmente Espaçados) os eletrodos são igualmente espaçados, como mostrado na Figura 14.

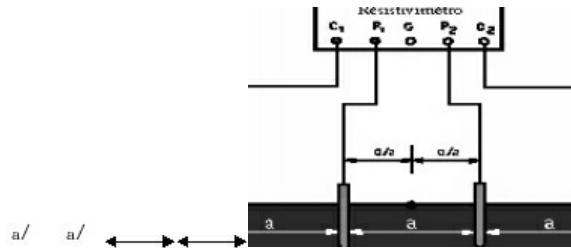


Figura 14: Configuração do Arranjo de Wenner

C_1 e C_2 são os eletrodos de corrente. A tensão é medida entre os eletrodos P_1 e P_2 do arranjo. Sendo a a distância entre eletrodos adjacentes e p a profundidade de cravação destes, a resistividade em função de a e b é dada por:

$$r = \frac{4 \rho \times a \times \frac{V}{I}}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}}$$

O Arranjo dos quatro pontos igualmente espaçados (ou arranjo de Wenner) considera, na prática, o uso de quatro eletrodos localizados em uma linha reta em intervalos a , enterrados a uma profundidade que não exceda 10 % de a .

Quando $p \leq a/10$, a resistividade por ser calculada na seguintes forma:

$$r = 2 \rho \times a \times \frac{V}{I}$$

Essa equação é oferece uma estimativa da resistividade média do solo na profundidade de p , sendo $a \square p \square 1,5.a$.

Um conjunto de leituras tomadas com vários espaçamentos entre eletrodos, resulta em um conjunto de resistividades que, quando plotadas em função do espaçamento, indicam a variação da resistividade com a profundidade.

8.2 APLICAÇÃO DO MÉTODO WENNER SEGUNDO A ABNT

A ABNT determina os seguintes procedimentos para execução da

medição:

- É recomendado o uso de equipamento com filtro para eliminação de interferências, o qual injete corrente em frequência diferente de 60 Hz.
- Em caso de medições de resistividade em subestações implantadas, esta deverá ser executada com a subestação desenergizada.
- Os eletrodos utilizados devem possuir ponteira e ter 30cm ou 40cm de comprimento, com diâmetro entre 10mm e 15mm. Deve ser preferencialmente de material não sujeito à corrosão e apresentar resistência mecânica suficiente para suportar os impactos de cravação.
- Os cabos de interligação devem ter isolação de acordo com o nível de tensão aplicado pelo equipamento, além de flexibilidade e resistência mecânica adequadas. Devem ser munidos de garra tipo "jacaré" numa das extremidades, visando a facilidade de conexão aos eletrodos.
- Os eletrodos devem estar sempre alinhados, isentos de óxidos e gorduras, bem como serem cravados a uma profundidade aproximada de 20cm, ou até que apresentem resistência mecânica de cravação aceitável que defina uma resistência ôhmica de contato.
- As distâncias entre os eletrodos devem ser sempre iguais.
- Se a indicação do equipamento oscilar, significa que existe alguma interferência, caso em que, o ponto de medição deve ser deslocado até ser eliminada ou minimizada a interferência.
- Para equipamentos que possuam o terminal "GROUND", este deverá ser utilizado para minimizar as interferências, interligando-o, através de um eletrodo, ao ponto do solo A, objeto da medição.
- Deverá ser anotada a condição atual do solo (seco, úmido, etc.).
- O croqui de locação dos pontos onde foram executadas as medidas deverá acompanhar os resultados na planilha de medição.

8.2.1 Número e localização das linhas de medição

Da ABNT NBR 7.117 temos que:

“Será determinado pela dimensão e importância do local, bem como pela variação dos valores encontrados nas diversas medições efetuadas.”

(ABNT NBR 7.117)

A Recomendação ABNT NBR 7.117 determina que o número mínimo de linhas de medição bem como os croquis para medições em áreas retangulares deve obedecer à Tabela 5:

Tabela 5: Número mínimo de linhas de medição (Fonte: ABNT NBR 7.117)

Área do terreno (m ²)	Número mínimo de linhas de medição	Croquis para as linhas de medição
$S \leq 1000$	2	(a)
$1000 \leq S \leq 2000$	3	(b)
$2000 \leq S \leq 5000$	4	(c)
$5000 \leq S \leq 10000$	5	(d)
$10000 \leq S \leq 20000$	6	(e)

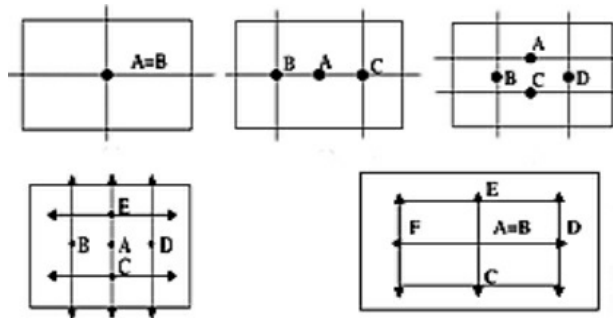


Figura 15: Croquis retangulares para medições retangulares (Fonte: ABNT NBR 7.117)

O equipamento de medição deve possuir 4 bornes. Os bornes externos geram uma corrente através do solo medida pelo circuito de corrente do instrumento, enquanto os bornes internos medem a tensão produzida no solo.

Durante as medidas, não podem aparecer tensões de contato perigosas. Este objetivo pode ser alcançado através de um projeto adequado da fonte de tensão de saída mediante as seguintes providências:

- Limitar o valor da tensão de saída de circuito aberto a um valor eficaz de 50 V ou um valor de pico de 70 V;
- Quando o valor da tensão de saída de circuito aberto exceder 50 V eficazes ou 70 V de pico, o equipamento deve limitar o valor máximo da corrente injetada no terreno a 7mA eficazes, ou 10mA valor de pico.

Deve-se observar os seguintes cuidados na medição:

- Não fazer medições sob condições atmosféricas adversas.
- Utilizar Equipamentos de Proteção Individual (EPIs) compatíveis com o tipo e o local da medição a ser realizada;
- Evitar que pessoas estranhas e animais se aproximem do local;
- Não tocar nos eletrodos durante a medição.

Para as medições de resistividade de solo em malhas de aterramento já implantadas, as linhas de medições devem traçadas, contudo, os pontos escolhidos fora da área da malha preexistente.

8.2.2 Exemplos de equipamentos de medição

SMARTEC MI-3123

Equipamento digital, com cinco dígitos. Mede em leitura direta a resistividade do solo, em função da distância dos eletrodos de corrente e tensão. Possui ajuste automático de escala com exatidão 1% em valores medidos de até $1\Omega.m$ e exatidão de 0,67% em valores superiores a $30\Omega.m$. Os eletrodos de corrente e tensão são obtidos através de haste de 20cm e podem ser utilizadas com penetração de até 5cm.



Figura 16: Exemplo de equipamentos de medição: SMARTEC MI-3123 e MTD-20KW.

MTD-20KW

Digital. De $3\frac{1}{2}$ dígitos. Mede resistência de aterramento, tensões espúrias e resistividade específica do terreno pelo método de Wenner. Possui sistema automático de controle de corrente injetada no terreno, alarme indicador de corrente insuficiente, escalas de 0-20/200/2.000/20.000 Ω ,

exatidão de 1% do valor lido $\pm 1\%$ do fundo de escala, resolução de $0,01\Omega$, alimentação por 9 pilhas grandes e dimensões de $290 \times 155 \times 130\text{mm}$, com peso de $2,1\text{kg}$ (ou $3,6\text{kg}$).

MTD-20KWE

Medição de resistências de aterramento (com 3 bornes), resistividade do solo pelo método de Wenner (com 4 bornes) e tensões presentes no terreno. Possui resistências de: $0-20 \Omega$; $0-200 \Omega$; $0-2000 \Omega$ e $0-20 \text{k}\Omega$, tensão de $0-200 \text{V}\sim$, medição de resistências de $\pm 2\%$ do valor medido e $\pm 1\%$ do fundo de escala, medição de tensão de $\pm 2\%$ do valor medido e $\pm 1\%$ do fundo de escala, resolução de $0,01\text{W}$ na medição de resistência e $0,1 \text{V}$ na medição de tensão. E opera com potência de saída inferior a $0,5\text{W}$ e com corrente inferior a 15mA (pico à pico).



Figura 17: Exemplo de equipamento de medição MTD-20KWe

8.3 MÉTODOS DE ESTRATIFICAÇÃO DO SOLO

A estratificação do solo tem por objetivo definir as camadas verticais, suas profundidades e respectivas resistividades que o compõem.

A ABNT faz referência ao Método Simplificado e ao Método Gráfico.

8.3.1 Método Simplificado de Estratificação do Solo

Este método é indicado apenas para solos estratificáveis em duas camadas, em que suas curvas típicas “ $\rho \times a$ ” (resistividade medida *versus* a

distância entre os eletrodos) apresentem nas seguintes formas:

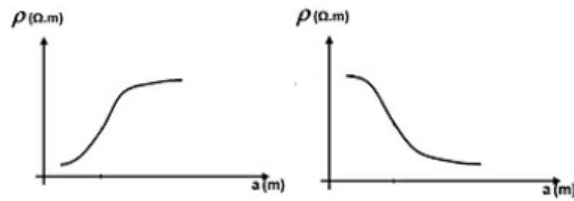


Figura 18: Curvas típicas de resistividade para solos de duas camadas

Em posse da curva “ $\rho \times a$ ”, deve-se prolongar a curva até interceptar o eixo das ordenadas e determinar o valor da resistividade da camada superior do solo ρ_1 .

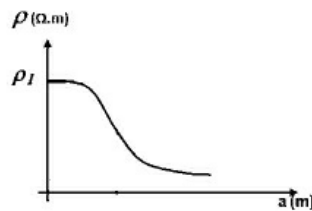


Figura 19: Prolongação da curva de resistividade

Em seguida, deve-se traçar a assíntota à curva de resistividade e prolongá-la até o eixo das ordenadas; sua interseção com esse eixo indicará o valor da resistividade da camada inferior do solo ρ_2 .

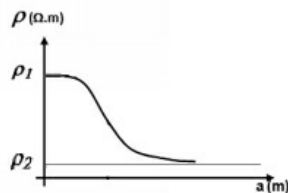


Figura 20: Assíntota à curva de resistividade

Após calcular a relação ρ_2/ρ_1 , deve-se determinar o valor de M_o na Tabela D-1 da NTC- 60 CELG-D (pág. 50).

Tabela 6: Tabela D-1 (Fonte: NTC- 60 CELG-D, pág. 50)

ρ_2/ρ_1	M_o	ρ_2/ρ_1	M_o	ρ_2/ρ_1	M_o	ρ_2/ρ_1	M_o
0,0010	0,6839	0,30	0,8170	6,50	1,331	19,00	1,432
0,0020	0,6844	0,35	0,8348	7,00	1,340	20,00	1,435
0,0025	0,6847	0,40	0,8517	7,50	1,349	30,00	1,456
0,0030	0,6850	0,45	0,8676	8,00	1,356	40,00	1,467
0,0040	0,6855	0,50	0,8827	8,50	1,363	50,00	1,474
0,0045	0,6858	0,55	0,8971	9,00	1,369	60,00	1,479
0,005	0,6861	0,60	0,9107	9,50	1,375	70,00	1,482
0,006	0,6866	0,65	0,9237	10,00	1,380	80,00	1,484
0,007	0,6871	0,70	0,9361	10,50	1,385	90,00	1,486
0,008	0,6877	0,75	0,9480	11,00	1,390	100,00	1,488
0,009	0,6882	0,80	0,9593	11,50	1,394	110,00	1,489
0,010	0,6887	0,85	0,9701	12,00	1,398	120,00	1,490
0,015	0,6914	0,90	0,9805	12,50	1,401	130,00	1,491
0,020	0,6940	0,95	0,9904	13,00	1,404	140,00	1,492
0,030	0,6993	1,00	1,0000	13,50	1,408	150,00	1,493
0,040	0,7044	1,50	1,078	14,00	1,410	160,00	1,494
0,050	0,7095	2,00	1,134	14,50	1,413	180,00	1,495
0,060	0,7145	2,50	1,177	15,00	1,416	200,00	1,496
0,070	0,7195	3,00	1,210	15,50	1,418	240,00	1,497
0,080	0,7243	3,50	1,237	16,00	1,421	280,00	1,498
0,090	0,7292	4,00	1,260	16,50	1,423	350,00	1,499
0,10	0,7339	4,50	1,278	17,00	1,425	450,00	1,500
0,15	0,7567	5,00	1,294	17,50	1,427	640,00	1,501
0,20	0,7781	5,50	1,308	18,00	1,429	1000,00	1,501
0,25	0,7981	6,00	1,320	18,50	1,430		

Calculado o valor de ρ_m (resistividade média) dado por $\rho_m = M_o \cdot \rho_1$, parte-se para a curva de resistividade " $\rho \times a$ " para determinar a espessura da primeira camada do solo (camada superior), conforme a seguir onde d é a espessura da primeira camada.

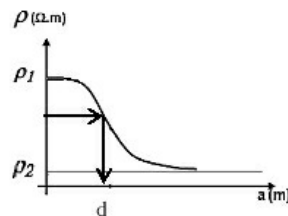


Figura 21: Espessura d da primeira camada do solo (camada superior)

Assim, temos o resultado Estratificação do solo em duas camadas conforme a seguir:

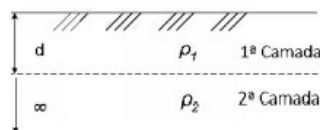


Figura 22: Estratificação do solo em duas camadas

8.3.2 Exemplo de aplicação do Método Simplificado

Para determinar a Resistividade Aparente do solo, utilizaremos do seguinte exemplo, do qual obtemos os valores medidos em campo da Tabela 7 e plotamos a curva " $\rho \times a$ " mostrada na Figura 23.

Tabela 7: Valores medidos em campo

Distância a (m)	$R_{m\u00e9dio}(\Omega)$	$2.\pi.a$	$\rho_{(1,5 \times a)}=2.\pi.a.R$ ($\Omega.m$)
2	22,3	12,56	280
4	10,9	25,12	274
8	5,17	50,25	260
16	2,08	100,5	215
32	1,02	200,1	205

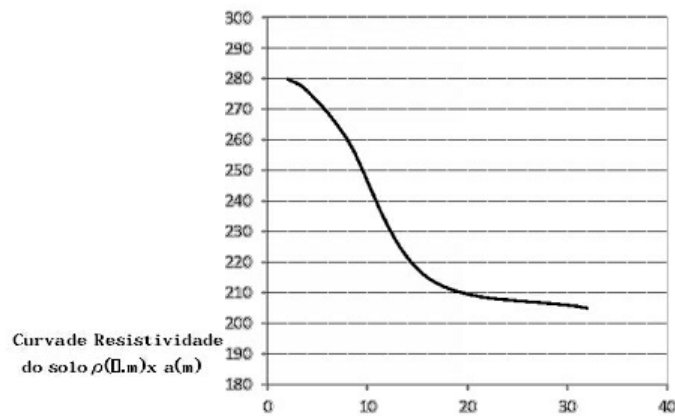


Figura 23: Curva de resistividade do solo

Ao prolongar a curva acima até interceptar o eixo das ordenadas determina-se o valor da resistividade da camada superior do solo ρ_1 igual a $282\Omega.m$. E ao traçar a assíntota à curva de resistividade e prolongá-la até o eixo das ordenadas; sua interseção com esse eixo indicará o valor da resistividade da camada inferior do solo ρ_2 igual a $202\Omega.m$.

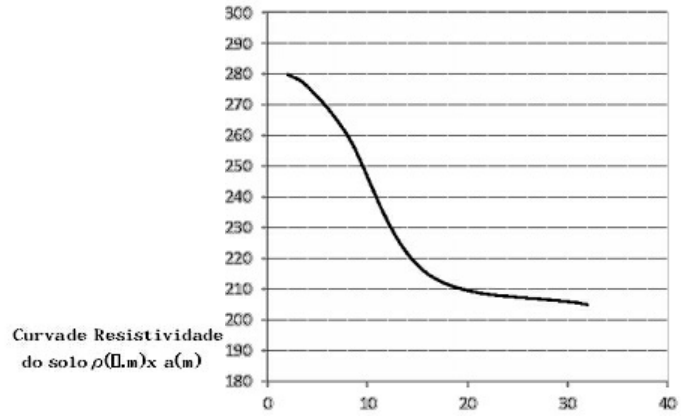


Figura 24: Determinação de Curva de $\rho_1 \rho_2$

Logo, da relação $\rho_2/\rho_1 = 202/282 = 0,7163$.

Utiliza-se a Tabela D-1 para obter M_o .

Tabela 8: Determinação de N_o pela Tabela D-1 (Fonte: NTC- 60 CELG-D, pág. 50)

$\rho_1 \rho_2$	M_o	$\rho_1 \rho_2$	M_o	$\rho_1 \rho_2$	M_o	$\rho_1 \rho_2$	M_o
0,000	0,0000	0,000	0,0000	0,000	1,000	0,000	1,000
0,000	0,0004	0,000	0,0005	0,000	1,005	0,000	1,005
0,000	0,0007	0,000	0,0007	0,000	1,010	0,000	1,010
0,000	0,0010	0,000	0,0010	0,000	1,015	0,000	1,015
0,000	0,0013	0,000	0,0013	0,000	1,020	0,000	1,020
0,000	0,0016	0,000	0,0016	0,000	1,025	0,000	1,025
0,000	0,0019	0,000	0,0019	0,000	1,030	0,000	1,030
0,000	0,0022	0,000	0,0022	0,000	1,035	0,000	1,035
0,000	0,0025	0,000	0,0025	0,000	1,040	0,000	1,040
0,000	0,0028	0,000	0,0028	0,000	1,045	0,000	1,045
0,000	0,0031	0,000	0,0031	0,000	1,050	0,000	1,050
0,000	0,0034	0,000	0,0034	0,000	1,055	0,000	1,055
0,000	0,0037	0,000	0,0037	0,000	1,060	0,000	1,060
0,000	0,0040	0,000	0,0040	0,000	1,065	0,000	1,065
0,000	0,0043	0,000	0,0043	0,000	1,070	0,000	1,070
0,000	0,0046	0,000	0,0046	0,000	1,075	0,000	1,075
0,000	0,0049	0,000	0,0049	0,000	1,080	0,000	1,080
0,000	0,0052	0,000	0,0052	0,000	1,085	0,000	1,085
0,000	0,0055	0,000	0,0055	0,000	1,090	0,000	1,090
0,000	0,0058	0,000	0,0058	0,000	1,095	0,000	1,095
0,000	0,0061	0,000	0,0061	0,000	1,100	0,000	1,100
0,000	0,0064	0,000	0,0064	0,000	1,105	0,000	1,105
0,000	0,0067	0,000	0,0067	0,000	1,110	0,000	1,110
0,000	0,0070	0,000	0,0070	0,000	1,115	0,000	1,115
0,000	0,0073	0,000	0,0073	0,000	1,120	0,000	1,120
0,000	0,0076	0,000	0,0076	0,000	1,125	0,000	1,125
0,000	0,0079	0,000	0,0079	0,000	1,130	0,000	1,130
0,000	0,0082	0,000	0,0082	0,000	1,135	0,000	1,135
0,000	0,0085	0,000	0,0085	0,000	1,140	0,000	1,140
0,000	0,0088	0,000	0,0088	0,000	1,145	0,000	1,145
0,000	0,0091	0,000	0,0091	0,000	1,150	0,000	1,150
0,000	0,0094	0,000	0,0094	0,000	1,155	0,000	1,155
0,000	0,0097	0,000	0,0097	0,000	1,160	0,000	1,160
0,000	0,0100	0,000	0,0100	0,000	1,165	0,000	1,165

Obtém-se um valor mais preciso pela seguinte interpolação:

$$\frac{1 - 0,7}{1 - 0,9361} = \frac{1 - 0,7163}{1 - X}$$

$$\frac{0,3}{0,0639} = \frac{0,2837}{1 - X}$$

$$X = 0,9395$$

Agora, a partir de $M_o = 0,9395 \Omega.m$, calcula-se o valor de ρ_m (resistividade média), onde $\rho_m = M_o \cdot \rho_1$. Logo:

$$\rho_m = 0,9395 \cdot (282) = 264,96 \Omega.m$$

Com ρ_m definido, deve-se buscar na curva de resistividade " $\rho \times a$ " a espessura da primeira camada do solo (camada superior).

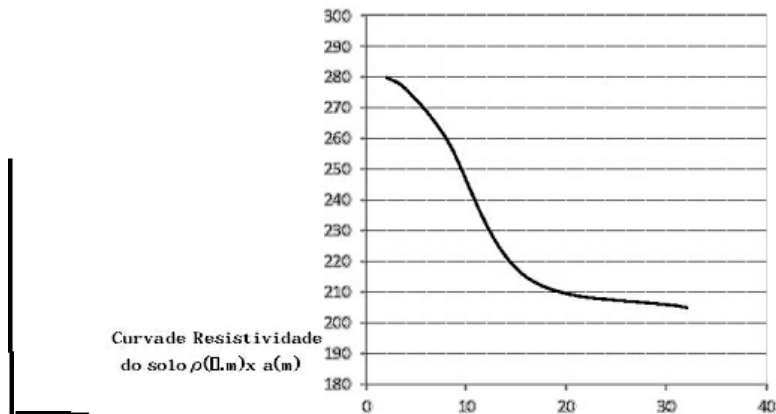


Figura 25: Determinação da espessura da primeira camada

Obtemos a espessura da primeira camada como 7,8m. Assim, podemos determinar o resultado da estratificação do solo em duas camadas conforme a seguir:

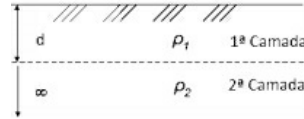


Figura 26: Resultado da estratificação do solo

8.3.3 Método Gráfico de Yokogawa

O método gráfico de Yokogawa pode ser utilizado para a estratificação de solos de duas ou mais camadas.

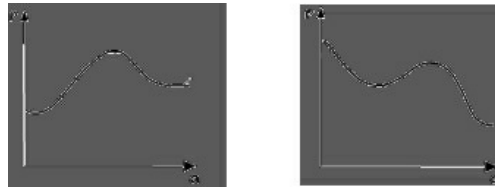


Figura 27: Exemplo de solos com 3 e 4 camadas, respectivamente

O método gráfico de Yokogawa é desenvolvido utilizando as curvas chamadas de: “curvas-padrão”, e “Curvas Auxiliares”, que foram plotadas de forma a determinar a resistividade e profundidade das camadas do solo.

As curvas “padrão” e “auxiliares” podem ser obtidas das Figuras D-6 e D-7 constantes da NTC-60 CELG-D (págs. 51 e 52).

8.3.4 Exemplo de aplicação do Método Gráfico de Yokogawa

Considere, para efeito deste exemplo, a tabela a seguir como as medições realizadas em campo.

Tabela 9: Exemplo de curva padrão (Fonte: NTC-60 CELG-D)

Distância a (m)	$R_{médio}$ (Ω)	$2.\pi.a$	$\rho_{(1,5 \times a)} = 2.\pi.a.R$ ($\Omega.m$)
2	54,10	12,56	680
4	33,40	25,12	840
8	18,50	50,25	930

16	6,87	100,5	690
32	1,64	200,1	330

Da Tabela 9 se obtém a curva “ $\rho \times a$ ” a seguir.

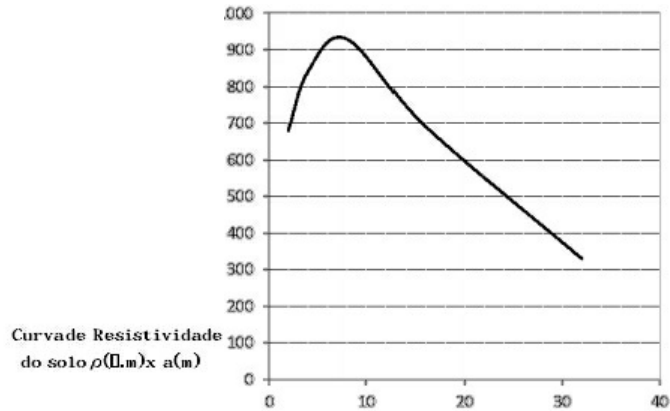


Figura 28: Curva de Resistividade do solo $\rho(\Omega.m) \times a(m)$

Para a determinação da estratificação do solo pelo método proceder com o seguintes passos:

- PASSO 1: Em posse dos valores de resistividade média obtidos através de medição em campo, marcar os pontos e traçar a curva " $\rho \times a$ " representativa do local; esta curva deve ser traçada em papel semitransparente com escalas logarítmicas. Para tal plotaremos os pontos da Tabela 10:

Tabela 10: Valores de $\rho_{médio}$ medidos em função da distância (Fonte: NTC-60 CELG-D)

Distância a (m)	$\rho_{médio} = 2 \cdot \pi \cdot a \cdot R$ ($\Omega.m$)
2	680
4	840
8	930
16	690

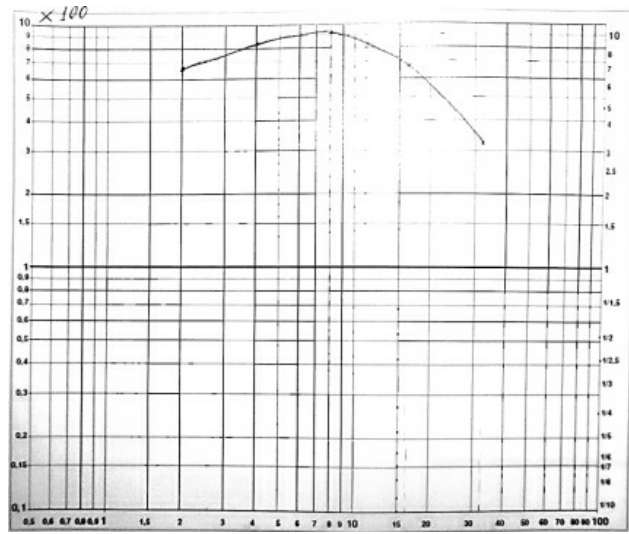


Figura 29: Traçado dos pontos $\rho_{\text{médio}}$ em escala logarítmica [1]

- PASSO 2: Dividir a curva " $\rho \times a$ " em trechos ascendentes e descendentes:

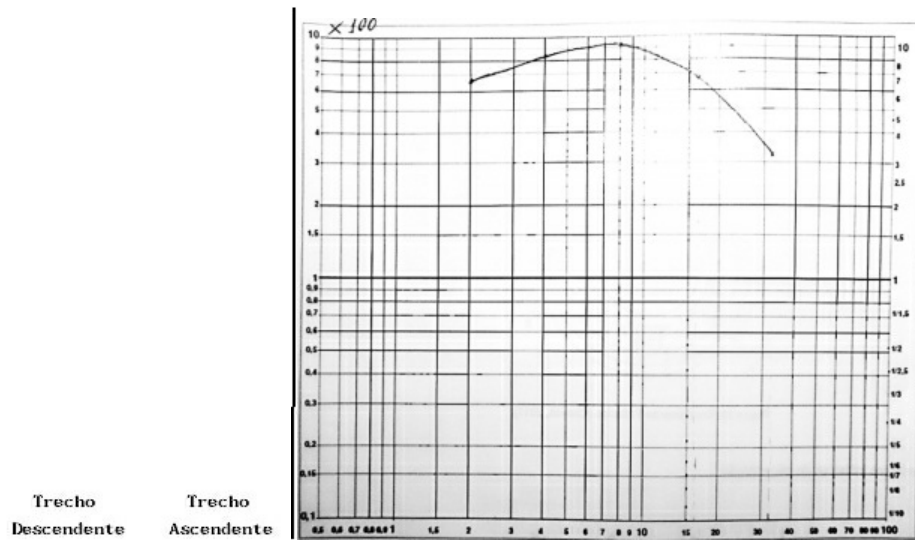


Figura 30: Identificação de trechos do $\rho_{médio}$ em escala logarítmica

- PASSO 3: Colocar a curva citada sobre as "Curvas Padrão" e pesquisar com qual delas o primeiro trecho da curva " $\rho \times a$ " mais se identifica, deslocando-se para tal, as curvas padrão, mantendo os eixos paralelos:

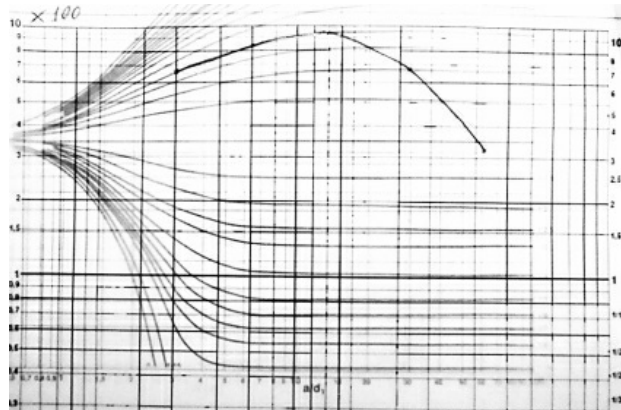


Figura 31: Superposição de Curva Padrão[2]

- PASSO 4: Transcrever a origem das curvas padrões no gráfico " $\rho \times a$ " – agora será chamado de polo 1:

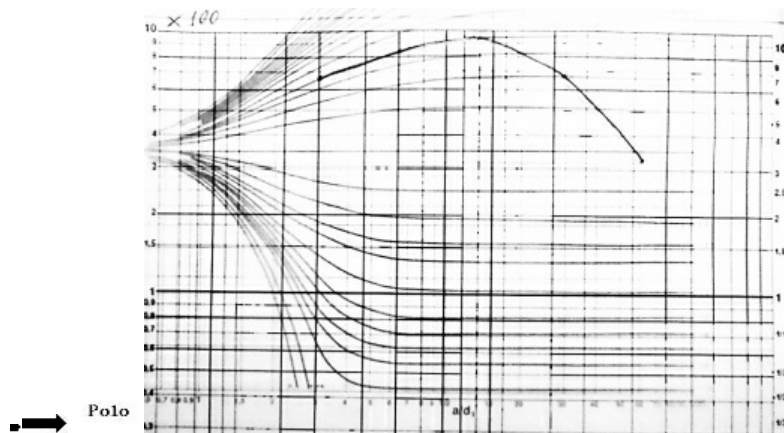


Figura 32: Identificação do polo 1 na Curva Padrão

- PASSO 5: Calcular a resistividade da segunda camada (ρ_2) através do valor ρ_2/ρ_1 , da curva padrão que mais se identificou com o trecho inicial da curva " $\rho \times a$ " e de ρ_1 , obtidos através de 01:

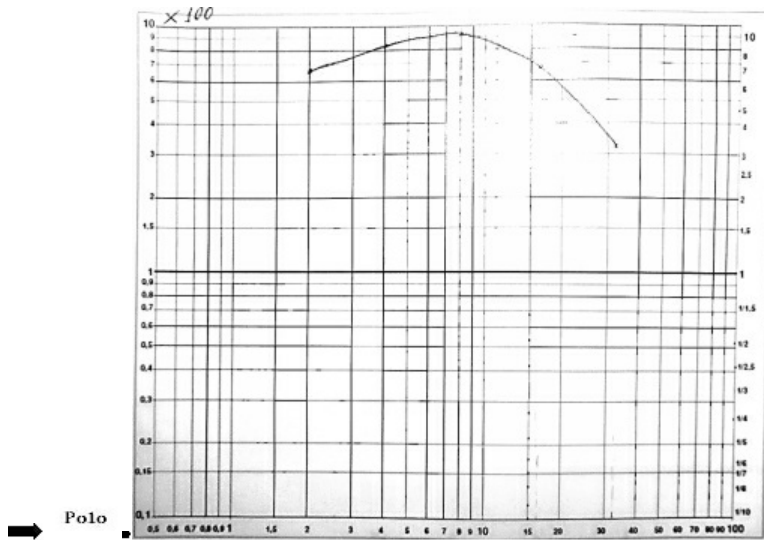


Figura 33: Identificação do polo 1

Portanto, tem-se que:

$$\rho_1 = 340 \Omega.m$$

$$d_1 = 0,69 \Omega.m$$

PASSO 6: A resistividade da segunda camada ρ_2 será calculada através de valor da curva padrão que mais se identificou com o trecho inicial da curva " $\rho \times a$ " e de ρ_1 , obtido no processo anterior. Assim:

$$r_2 = r_1 \times k$$

$$r_2 = 340 \times 3$$

$$r_2 = 1020 \Omega.m$$

PASSO 7: A seguir, deve-se colocar o gráfico " $\rho \times a$ " sobre as "Curvas Auxiliares", de maneira que o polo 1 coincida com a origem dessas curvas:

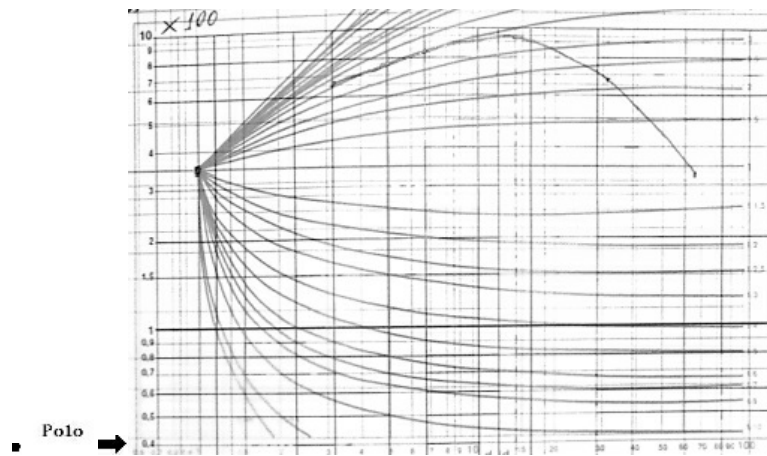


Figura 34: Identificação do polo 1 nas Curva Auxiliares[3]

PASSO 8: Traçar na curva " $\rho \times a$ ", a curva auxiliar correspondente ao mesmo índice da curva padrão determinada nos passos anteriores. Para o nosso exemplo significar tracejar a curva 3 auxiliar na curva " $\rho \times a$ ":

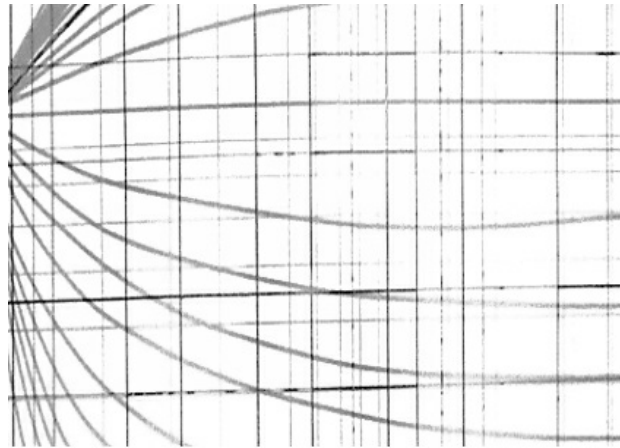


Figura 35: Curva Auxiliar correspondente ao índice da Curva Padrão

Passo 9: Voltar às "Curvas Padrão", fazer coincidir o polo 1 com a origem das mesmas; deslizar a curva tracejada vermelha obtida no passo anterior sobre a origem das "Curvas Padrão", até que se consiga outra que se assemelhe ao segundo trecho da curva " $\rho \times a$ " em análise; ao deslizar a curva tracejada sobre a origem, deverá ser mantido o paralelismo entre as linhas verticais e horizontais da curva " $\rho \times a$ ", respectivamente, com as mesmas linhas das curvas padrão:

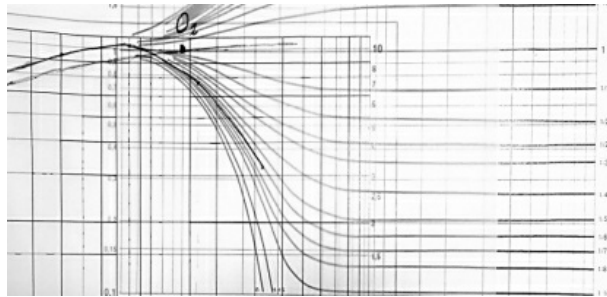


Figura 36: Determinação do polo 2

Escolhida a nova curva padrão, marcar a origem dessa sobre a curva " $\rho \times a$ "; esse ponto fornecerá o polo 2. Assim, são as seguintes as coordenadas a partir da definição do polo 2:

$$\rho_2' = 900 \, \Omega \quad \text{e} \quad d_1 + d_2 = 14 \, \text{m}$$

A resistividade da terceira camada (ρ_3) será calculada, através de valor da curva padrão que mais se identificou com o trecho descendente da curva " $\rho \times a$ " e de ρ_3' , obtido no processo anterior.

$$r_3 = r_2 \cdot X_2 = 900 \cdot (1/6) = 150 \, \text{W.m}$$

Por fim, temos:

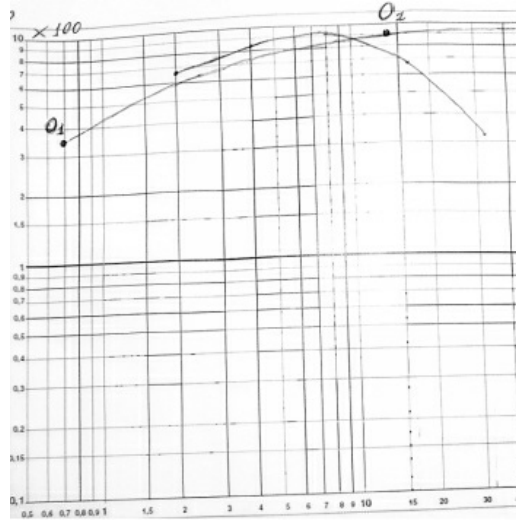


Figura 37: Resultados da estratificação do solo

Assim, o perfil de resistividade do solo é dado por:

$$\text{Polo 1: } \rho_1 = 340 \, \Omega \cdot \text{m} \text{ e } d_1 = 0,69 \text{m}$$

$$\text{Polo 2: } \rho_2' = 900 \, \Omega \cdot \text{m} \text{ e } d_1 + d_2 = 15 \text{m}$$

$$\text{Curvas: } c_1 = 3 \text{ e } c_2 = 1/6$$

Disto seguimos aos cálculos de resistividade dados por:

$$\rho_1 = 340 \, \Omega \cdot \text{m}$$

$$\rho_2 = c_1 \cdot \rho_1 = (3) \cdot 340 = 1020 \, \Omega \cdot \text{m}$$

$$\rho_3 = c_2 \cdot \rho_2' = (1/6) \cdot 900 = 150 \, \Omega \cdot \text{m}$$

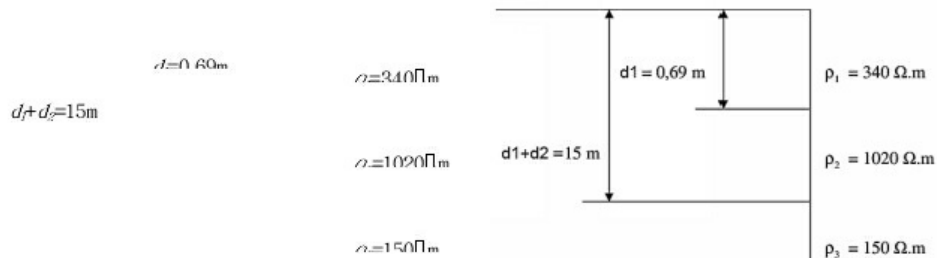
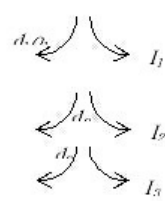


Figura 38: Perfil de resistividade do solo do exemplo estudado

8.4 RESISTIVIDADE APARENTE DO SOLO



A Resistividade Aparente do solo é um valor equivalente das camadas de diversas resistividades que compõem um solo não homogêneo, calculado para uma determinada dimensão do sistema de aterramento em estudo.

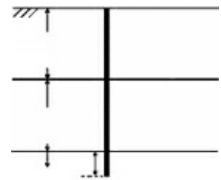


Figura 39: Camadas de resistividades que compõem um solo não homogêneo

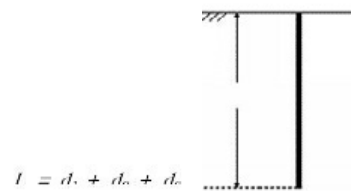
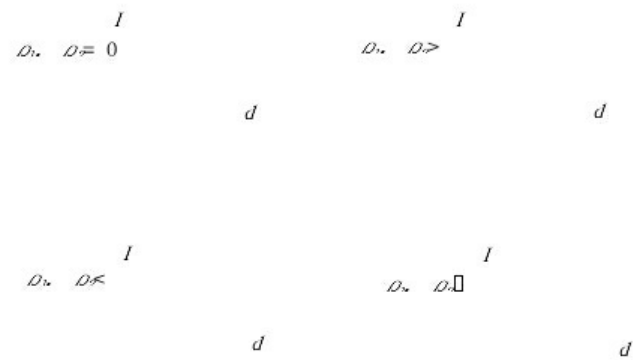


Figura 40: Resistividade Aparente do solo

A Resistividade Aparente do Solo caracteriza os efeitos de dispersão nas camadas do solo da corrente do sistema de aterramento.



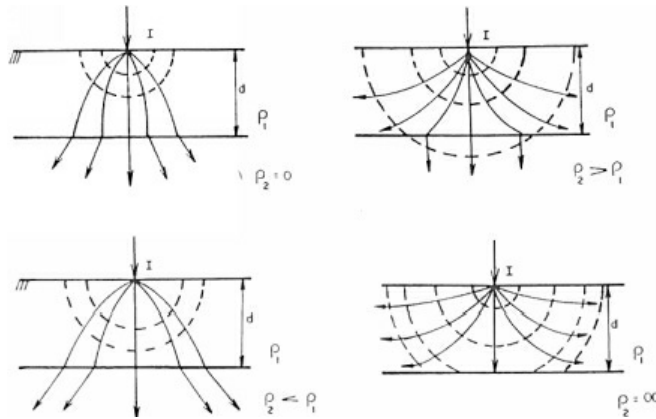


Figura 41: Dispersão pelas camadas do solo.

O cálculo da Resistividade Aparente do solo é necessário, pois a resistência do sistema de aterramento depende das:

- Resistividade Aparente do solo apresentado para esse determinado aterramento; e
- Geometria e Forma como o sistema de aterramento está enterrado no solo.

Assim, genericamente, para qualquer sistema de aterramento tem-se:

$$R_{\text{aterramento}} = r_a \cdot f(g)$$

onde:

- $R_{\text{aterramento}}$: resistência elétrica do sistema de aterramento;
- ρ_a : Resistividade Aparente do solo;
- $f(g)$: função que depende da geometria do sistema e da forma de colocação no solo.

O cálculo da Resistividade Aparente de um sistema de aterramento é efetuado considerando o nível de penetração da corrente de escoamento num solo de duas camadas. Portanto, em um solo com muitas camadas deve ser reduzido a um solo equivalente com duas camadas.

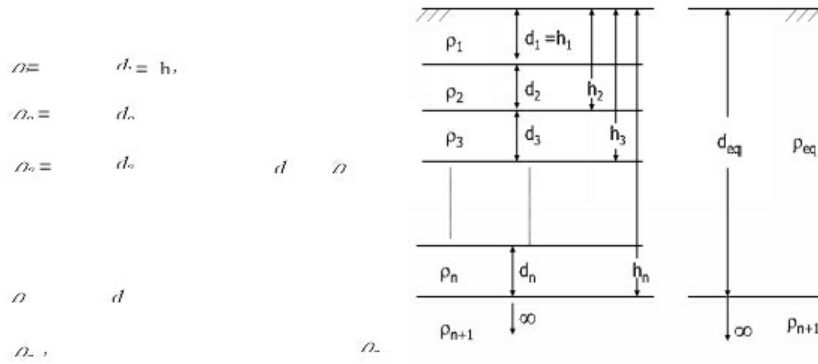


Figura 42: Redução ao Solo Equivalente.

Da Figura 42, considerando-se o paralelismo entre cada duas camadas, utiliza-se a fórmula de Hummel em que transforma o solo em duas camadas equivalentes:

$$r_{eq} = \frac{d_1 + d_2 + \dots + d_n}{\frac{d_1}{r_1} + \frac{d_2}{r_2} + \dots + \frac{d_n}{r_n}} = \frac{\hat{a} \sum_{i=1}^n d_i}{\hat{a} \sum_{i=1}^n \frac{d_i}{r_i}}$$

$$d_{eq} = d_1 + d_2 + \dots + d_n = \hat{a} \sum_{i=1}^n d_i$$

A partir das dimensões do sistema de aterramento, determina-se o coeficiente de penetração α , que indica o grau de penetração das correntes escoadas pelo aterramento no solo equivalente, o qual é dado por:

$$\alpha = \frac{r}{d_{eq}}$$

onde que r é o raio do círculo equivalente à malha da subestação.

Para áreas retangulares r pode ser calculado por:

$$r = \sqrt{\frac{A}{p}}$$

onde A é a área da subestação.

Para hastes alinhadas r pode ser calculado:

$$r = \frac{(n-1)e}{2}$$

onde n representa o número de hastes cravadas verticalmente e e representa o espaçamento entre as hastes.

Em seguida, calcula-se o coeficiente de divergência β dado por:

$$\beta = \frac{r^{n+1}}{r_{eq}^n}$$

De posse dos coeficientes α e β , e através do gráfico do Desenho D-3 NTC-60 (pág. 48), determina-se N .

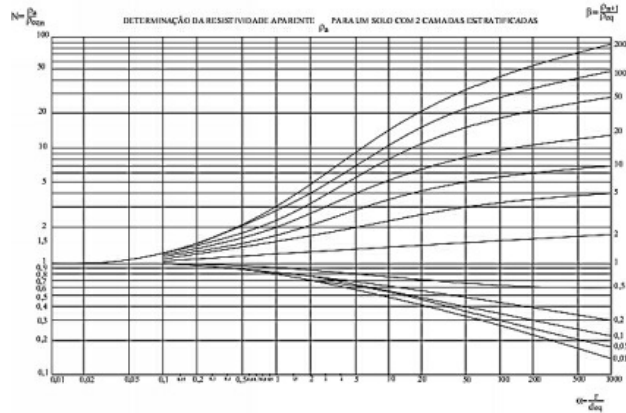


Figura 43: Resistividade Aparente (Fonte: D-3 NTC-60)

Finalmente a Resistividade Aparente é dada por:

$$r_a = N \cdot r_{\infty}$$

8.4.1 Exemplo de cálculo da Resistividade Aparente do Solo

Neste exemplo deve-se calcular a Resistividade Aparente do solo ρ_a considerando a geometria da malha retangular de dimensões 17,5m x 7,5m, considerando-se o resultado estratificação do solo em duas camadas da Figura 43, onde:

$$\rho_1 = \rho_{eq} = 282 \Omega.m$$

$$\rho_2 = \rho_{n+1} = 202 \Omega.m$$

$$d = d_{eq} = 7,8 \text{ m}$$

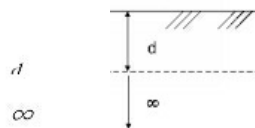


Figura 44: Estratificação do solo em duas camadas

O Raio do círculo equivalente à malha de terra da subestação é dado por:

$$r = \sqrt{\frac{A}{\rho}} = \sqrt{\frac{17,5 \cdot (7,5)}{\rho}} = 6,46 \text{ m}$$

O coeficiente de penetração α é dado por:

$$a = \frac{r}{d_{eq}} = \frac{6,46}{7,8} = 0,828$$

E o coeficiente de divergência β dado por:

$$b = \frac{r_{n+1}}{r_{eq_n}} = \frac{202}{282} = 0,7163$$

Utilizando as curvas da Figura 42D-3 da NTC 60 da CELG (pág. 48):

$$N = 0,95$$

Portanto, a Resistividade Aparente do Solo ρ_a é:

$$r_a = N \cdot r_{eq} = 0,95 \cdot (282) = 267,9 \text{ W}$$

8.4.2 Outro exemplo de cálculo da Resistividade Aparente do Solo.

Neste outro exemplo pretende-se calcular a Resistividade Aparente do solo ρ_a considerando a geometria da malha retangular e com as dimensões de 17,5m x 7,5m.

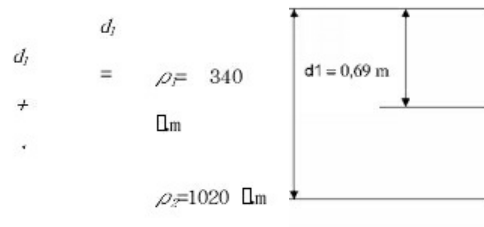


Figura 45: Resultado estratificação do solo

Para a redução das camadas do solo deste exemplo faz-se:

$$r_{eq} = \frac{d_1 + d_2}{\frac{d_1}{r_1} + \frac{d_2}{r_2}} = \frac{15}{\frac{0,69}{340} + \frac{14,31}{1020}} = 936,32 \text{ W.m}$$

$$d_{eq} = d_1 + d_2 = 15 \text{ m}$$

Assim temos a redução representada agora pela Figura 46.



Figura 46: Redução das camadas do solo

Passando para o cálculo do raio do círculo equivalente à malha de terra da subestação, tem-se:

$$r = \sqrt{\frac{A}{\rho}} = \sqrt{\frac{17,5(7,5)}{\rho}} = 6,46 \text{ m}$$

Sendo o coeficiente de penetração α calculado como:

$$a = \frac{r}{d_{eq}} = \frac{6,46}{15} = 0,43$$

E o coeficiente de divergência β conforme a seguir:

$$b = \frac{r^{a+1}}{r_{eq,a}} = \frac{150}{936,32} = 0,16$$

Utilizando as curvas da Figura 42 da NTC 60 da CELG (pág. 48):

$$N = 0,9$$

Portanto a Resistividade Aparente do solo ρ_a é

$$r_a = N \cdot r_{eq} = 0,9 \cdot (936,32) = 842,68 \text{ W}$$

9 PROJETO MALHA DE TERRA

9.1 GEOMETRIA DA MALHA

A etapa inicial do dimensionamento de uma malha de aterramento consiste na seleção de uma geometria básica, a qual deve considerar a delimitação da área a ser abrangida pela mesma e o arranjo inicial dos condutores.

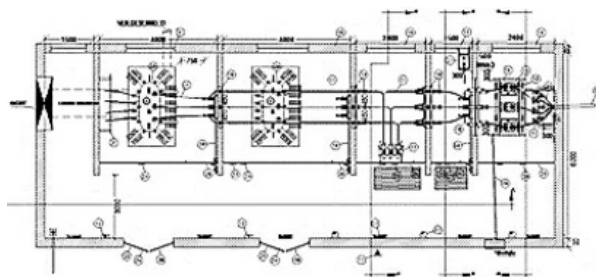


Figura 47: Exemplo de Subestação de formato retangular 7,0mx16,5m.

9.1.1 Geometria da Malha pelo Critério ABNT NBR 15.751

“Dentre as características de geometria básica de uma malha de aterramento de subestação: profundidade de enterramento mínima 0,50 m, recomendada por razões mecânicas, sendo admitido 0,25 m em áreas de piso de concreto ou devido a um substrato rochoso muito superficial; condutor periférico no entorno das edificações (1 m para fora das paredes externas, sempre que possível).”

(ABNT NBR 15.751)

Importante ressaltar que, a partir da arquitetura da subestação (projeto elétrico e estrutural), conhecendo as suas dimensões, deve-se inicialmente considerar como área da subestação (incluindo as portas e portões abertos), para fins de cálculo da malha, acrescenta-se 1 metro em todas as direções.

Como exemplo, define-se o formato da malha com as dimensões de 20x10m (Figura 48).

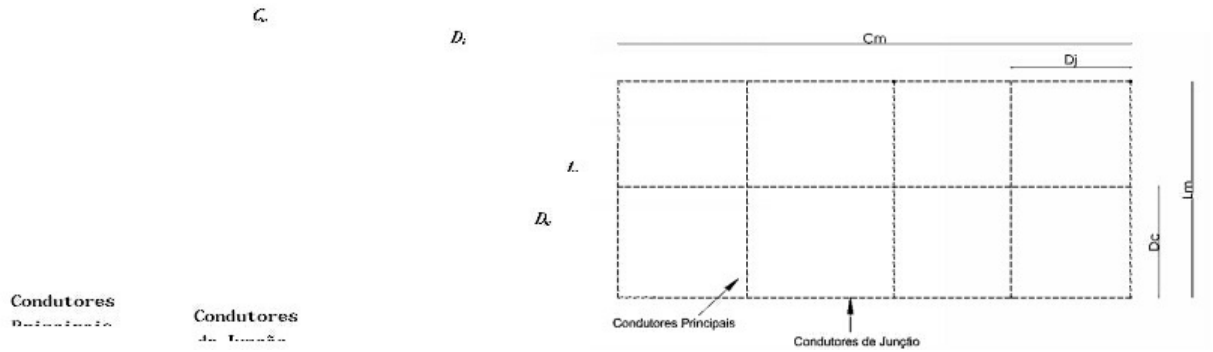


Figura 48: Representação do formato inicial da malha.

onde:

- C_m é o comprimento da malha de terra em metros;
- D_j é a distância entre os cabos correspondentes à largura da malha de terra em metros;
- L_m é a largura da malha de terra em metros;
- D_c é a distância entre os cabos correspondentes ao comprimento da malha de terra em metros.

Os Condutores Principais são aqueles instalados na direção do comprimento da malha de terra:

$$N_{cp} = \frac{C_m}{D_j} + 1 = \frac{20}{2,5} + 1 = 9$$

Os Condutores de Junção são aqueles instalados na direção que corresponde a largura da malha:

$$N_{cj} = \frac{L_m}{D_c} + 1 = \frac{10}{2,5} + 1 = 5$$

10m

2,5 m

10

2,5

Assim, partimos para uma geometria geral da malha dada pela Figura 49.

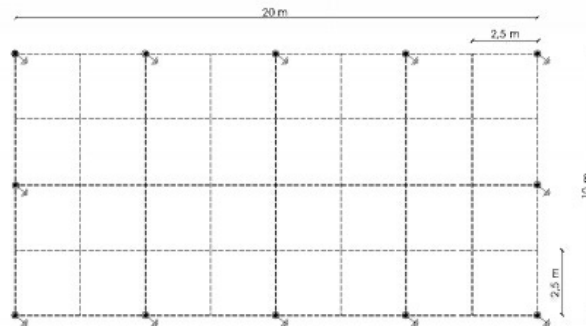


Figura 49: Geometria geral da Malha

Donde levantamos os seguintes parâmetros:

- Condutores principais: $N_{cp} = 9$
- Condutores de junção: $N_{cj} = 5$
- Quantidade de hastes verticais: 12
- Comprimento das hastes: 3 m
- Comprimento dos condutores da malha de terra: 190 m
- Comprimento das hastes: 36 m
- Comprimento total dos condutores Lt: 226 m
- Profundidade da malha H: 0,5 m

9.2 CÁLCULO PRELIMINAR DA RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO

Como observado pela ABNT NBR 15.751:

“É recomendável calcular de forma aproximada a resistência de aterramento da malha, antes da geometria definitiva. A partir da geometria inicial da malha, o comprimento aproximado dos condutores a serem enterrados pode ser obtido pelo somatório das extensões dos eletrodos horizontais enterrados, permitindo que a resistência de aterramento seja calculada.”

(ABNT NBR 15.751)

Uma boa estimativa resistência de aterramento da malha pode ser obtida pela equação de Severak:

$$R_s = r_s \left[\frac{1}{L_c} + \frac{1}{\sqrt{20 \times 4} \phi} + \frac{1}{\sqrt{20/A} \phi} \right]$$

onde:

- L_t é o comprimento total de condutores enterrados;
- H é a profundidade da malha, em metros; e
- A é a área ocupada pela malha, em metros quadrados.

$$R_s = 267,9 \times \frac{1}{\sqrt{226 \phi}} + \frac{1}{\sqrt{20 \times 200 \phi}} + \frac{1}{\sqrt{1 + 0,5 \times \sqrt{20 / 200 \phi}}}$$

$$R_s = 9,07 \text{ W}$$

A equação para a obtenção da resistência de aterramento transitória é a seguinte:

$$R = \frac{\rho_{eq}}{2pL} \left(\frac{L}{d} - 1 \right)$$

onde:

- ρ_{eq} é a resistividade equivalente do solo ($\Omega.m$)
- L é o comprimento da malha de terra
- d é largura média da seção transversal da malha de terra

9.3 DIMENSIONAMENTO DO CONDUTOR DA MALHA

As dimensões do condutor da malha de terra são calculadas segundo as solicitações mecânicas e térmicas das correntes que ele consegue suportar.

9.3.1 Dimensionamento mecânico

Tendo por referência a ABNT NBR 15.751, teremos as seguintes bitolas mínimas dos condutores:

- Cobre – 50 mm²
- Aço – 35 mm² (5/16”).

9.3.2 Dimensionamento térmico

O condutor deve ter uma seção S capaz de suportar uma corrente

máxima em curto-circuito pleno I_p isto durante o intervalo t em que a temperatura esteja acima do limite suportável T_m , para a temperatura ambiente T_a , desde que a energia térmica fique retida no condutor pela curto intervalo da corrente de curto-circuito.

A fórmula de *Onderdonk* permite determinar a seção S :

$$S = I_f \sqrt{\frac{t \alpha_r \rho_t \times 10^{-4}}{TCAP \ln \frac{(k_r + T_m)}{(k_r + T_a)}}}$$

onde:

- S é a seção, em mm²;
- I_f é a corrente de falta fase-terra, em kA;
- t é o tempo, em segundos;
- α_r é o coeficiente térmico de resistividade do condutor (°C);
- ρ_t é a resistividade do condutor de aterramento, em (Ω.cm);
- $TCAP$ é o fator de capacidade térmica, em (joule/cm³) x °C;
- T_m é a temperatura máxima suportável, em °C, conforme a Tabela 1 da ABNT NBR 15.751;
- T_a é a temperatura ambiente, em C;
- K_0 é o coeficiente térmico de resistividade do condutor a 0 °C;
- T_r é a temperatura de referência do material, em °C.

Para condutores de cobre, segundo os tipos de conexões mais utilizados, calculam-se os coeficientes da Tabela 11.

Tabela 11: Coeficiente térmico de emendas ao cobre.

Conexão	K_f
Mecânica (aparafusada ou por pressão)	11,5
Emenda tipo solda oxiacetilênica	9,2
Emenda com solda exotérmica	7,5
Emenda à compressão	7,5

A equação de *Onderdonk* pode ser simplificada para:

$$S = I_f \times \sqrt{t}$$

onde I_f é a corrente de falta fase-terra, em kA.

Para um consumidor atendido em 13,8 kV, com tensão de operação de 380/220 V_{ca} à 60 Hz e um transformador de 1,5 MVA 13,8/0,38 kV com impedância de 10%. Calcula-se do curto-circuito trifásico na barra de baixa tensão como:

$$I_{CC-FT} = 20,46 \angle -88,28^\circ \text{ kA}$$

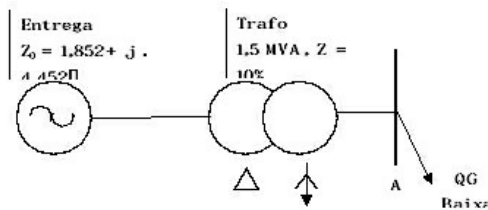


Figura 50: Exemplo de corrente de falta I_f

Logo:

$$S = I_f \times \sqrt{t}$$

$$S = 20,46 \times (7,5) \times \sqrt{0,37}$$

$$S = 93,34$$

$$S @ 95 \text{ mm}^2$$

9.4 CÁLCULO DAS TENSÕES PERMISSÍVEIS

O principal objetivo de um sistema de aterramento de uma subestação é assegurar a segurança para os equipamentos e pessoas. Esta segurança é caracterizada pelas diferenças de potenciais que podem ocorrer na subestação devido a um curto-circuito. Os potenciais considerados são o Potencial de Toque e o Potencial de Passo. O aterramento deve ser calculado para manter seus níveis em um limite suportável pelo ser humano. Isto é, evitar a fibrilação ventricular do coração.

O choque elétrico em um ser humano causa perturbações, dependendo

dos seguintes fatores:

- Percurso da corrente elétrica;
- Intensidade da corrente elétrica;
- Duração do choque elétrico;
- Frequência da corrente elétrica;
- Tensão elétrica;
- Umidade da pele;
- Condições orgânicas da pessoa.

Estas perturbações fisiológicas podem ser:

- Tetanização
- Parada respiratória;
- Fibrilação ventricular;
- Parada cardíaca;
- Queimaduras profundas;
- Morte.

Com foco especial em tetanização, que é decorrente da contração muscular produzida por um impulso elétrico, verifica-se que, sob a ação de um estímulo devido a aplicação de uma tensão a uma fibra nervosa, o músculo se contrai, para em seguida retornar ao repouso.

Da ABNT NR-10 “Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade”, temos:

“Para valores mais elevados de corrente ocorre a tetanização (contração muscular). A excitação muscular pode ser suficientemente violenta provocando uma repulsão. Dependendo da situação, o indivíduo pode ser até atirado a uma certa distância.”

(ABNT NR-10)

Assim, o Limite de Largar é a máxima corrente que uma pessoa, segurando uma parte energizada, ainda consegue largá-la. Estudos empíricos em 50/60 Hz concluíram que esta Limite de Largar é aproximadamente 10 mA (6 a 14mA) para mulheres e 16 mA (9 a 23mA) para homens.

Para um sistema de aterramento ser considerado seguro para qualquer condição de defeito, é necessário estabelecer os valores máximos permissíveis para as tensões de Passo e Toque.

Da ABNT NBR 15.751, temos que:

“Os potenciais toleráveis de “passo” e de “toque” são estabelecidos em função do tempo de eliminação do defeito (t) e da resistividade da camada superficial do solo.”

O tempo t deve ser escolhido de forma conservativa, de acordo com a filosofia de proteção adotada e com as características dos equipamentos de proteção utilizados. Devem ser considerados dois casos: defeitos com duração determinada pelo sistema de proteção; a corrente permissível pelo corpo humano (I_{chcd}); e defeitos de longa duração que não sensibilizam os dispositivos de proteção; a corrente permissível pelo corpo humano (I_{chld}).

(ABNT NBR 15.751)

9.4.1 Corrente de Choque de Longa Duração (I_{chld})

Corrente de Choque de Longa Duração é aquela que surge de uma tensão de Toque ou Passo pela corrente de defeito com mais longa duração.

A Corrente de Choque de Longa Duração Permissível é a maior intensidade de corrente que circula pelo corpo de uma pessoa sem causar fibrilação, conforme empiricamente fora determinada na Tabela 12.

Tabela 12: Limiar da Corrente de Choque de Longa Duração (I_{chld}).

Porcentagem da população que suporta:	Homens	Mulheres
99,5%	9 mA	6 mA
50%	16 mA	10,6 mA

9.4.2 Corrente de Choque de Curta Duração (I_{chcd})

A Corrente de Choque de Curta Duração é aquela de maior intensidade antes de ocorrer fibrilação no intervalo de tempo $0,03s \leq t \leq 3s$. Ela pode ser calculada pela equação de Charles Dalziel:

$$I_{chcd} = \frac{0,116}{\sqrt{t}} A$$

$$I_{chcd} = \frac{0,116}{\sqrt{0,37}} = 0,1907 A$$

O valor de t , que é a duração do choque, é estabelecido pelo tempo máximo de eliminação da falta baseado na proteção.

9.4.3 Tensão de Toque

I_{chld} ou

E_t

R_{ch}

R_n

R_p R_{mp}

A Tensão de Toque representa a diferença de potencial entre um objeto metálico aterrado ou não e um ponto da superfície do solo separado por uma distância horizontal equivalente ao alcance normal do braço de uma pessoa; essa distância é convencionalmente igual a 1m, representada pelo circuito da Figura 51.

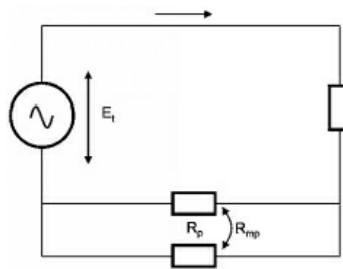


Figura 51: Circuito representativo da Tensão de Toque

onde:

- R_{ch} é a resistência do corpo humano, adotada como sendo 1000Ω ;
- R_p é a resistência de cada pé com relação ao terra remoto;
- R_{mp} é a resistência mútua entre dois pés;
- I_{chld} é a máxima corrente de longa duração admissível pelo corpo humano; e
- I_{chcd} é a máxima corrente de curta duração admissível pelo corpo humano.

No caso de Curta Duração, a Tensão de Toque Máxima Permissível é calculada por:

$$E_{tcd} = \frac{\infty}{\infty} R_{ch} + \frac{(R_p + R_{mp})}{2} \frac{\infty}{\infty} I_{chcd} = (R_{ch} + 1,5 \times R_s \times \mathcal{C}) \times I_{chcd}$$

$$E_{tcd} = (R_{ch} + 1,5 \times R_s \times \mathcal{C}) \times I_{chcd}$$

onde:

- R_{ch} é a resistência do corpo humano = 1000 Ω ;
- ρ_s é a resistividade do revestimento da camada superficial; e
- C é o fator de redução em função da espessura da camada de revestimento.

Já, para o caso de Longa Duração, temos:

$$E_{red} = \frac{R_{ch}}{2} + \frac{(\rho_s + R_{sp})}{2} \times I_{chid}$$

$$E_{lid} = (R_{ch} + 1,5 \times r_s \times C) \times I_{chid}$$

O fator de redução C é calculado por:

$$C = 1 - 0,106 \times \frac{1 - \frac{r_1}{r_s}}{2 \times h_s + 0,106}$$

onde h_s é a espessura da camada de revestimento superficial.

Tabela 13: Resistividade de alguns materiais.

Descrição do material	Resistividade ($\Omega.m$)	
	Seco	Úmido
Brita granito	14000000	1300
Seixo rolado grosso	700000	3000
Brita de granito fino	200000	10000
Concreto tipo 1	10000	100
Concreto tipo 2	280000	63
Brita granito c/ cascalho 2 cm	19000000	8000
Asfalto	3000000	600000

Como exemplo e considerando:

- Resistividade da camada de revestimento em Concreto Tipo1: $\rho_s = 10.000 \Omega.m$;
- Resistividade da 1ª camada do solo: $\rho_1 = 282 \Omega.m$; e
- Espessura da camada de revestimento superficial: $h_s = 0,1m$.

Logo:

$$C = 1 - 0,106 \times \frac{1 - \frac{r_1}{r_s}}{2 \times \rho_s + 0,106}$$

$$C = 1 - 0,106 \times \frac{1 - \frac{282}{10000}}{2 \times (0,1) + 0,106}$$

$$C = 0,6683$$

Na condição de Curta Duração, tem-se:

$$E_{icd} = (R_{cb} + 1,5 \times r_s \times C) \times I_{cbcd}$$

$$E_{icd} = (1000 + 1,5 \times 0000 \times 0,6634) \times 0,1907$$

$$E_{icd} = 2088,35 V$$

E na condição de Longa Duração, tem-se:

$$E_{ild} = (R_{cb} + 1,5 \times r_s \times C) \times I_{cbld}$$

$$E_{ild} = (1000 + 1,5 \times 0000 \times 0,6634) \times 0,006$$

$$E_{ild} = 65,7 V$$

9.4.4 Tensão de Passo

A Tensão de Passo representa a diferença de potencial entre dois pontos da superfície do solo separados pela distância de um passo de uma pessoa, considerada igual a 1,0 m. E pode ser representada pelo circuito dado pela Figura 52.

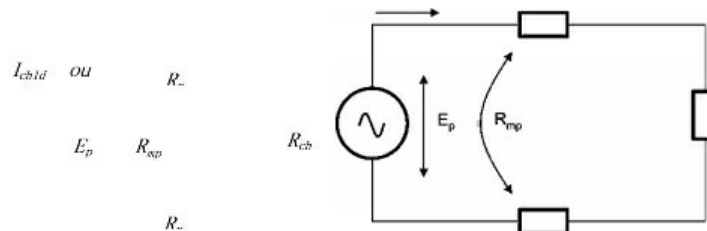


Figura 52: Circuito representativo da Tensão de Passo

onde:

- R_{ch} é a resistência do corpo humano - 1000 Ω ;
- R_p é a resistência de cada pé com relação ao terra remoto;
- R_{mp} é a resistência mútua entre dois pés; e
- I_{chcd} é a máxima corrente de curta duração admissível pelo corpo humano.

A Tensão de Passo Máxima Permissível pode ser calculada da seguinte forma para a situação da Curta Duração:

$$E_p = (R_{ch} + 6 \times R_s \times C) \times I_{chcd}$$

$$E_p = (1000 + 6 \times 0000 \times 0,6634) \times 0,1906$$

$$E_p = 7590,316 \text{ V}$$

E para o caso de Longa Duração tem-se:

$$E_p = (R_{ch} + 6 \times R_s \times C) \times I_{chld}$$

$$E_p = (1000 + 6 \times 0000 \times 0,6634) \times 0,006 = 244,8$$

9.4.5 Maiores valores de Tensão de Toque

A ABNT NBR 15.751 afirma que a maior intensidade de tensão de toque em malhas de aterramento, quando estas são constituídas de condutores aproximadamente equidistantes, ocorrem em sua periferia – especialmente

nos reticulados das quinas.

A maior tensão de toque V_t , quando correntes de curta duração ou longa duração circulam entre a malha e o solo, pode ser obtida por:

$$V_t = \frac{\rho \times I \times K_m \times K_i}{L_t}$$

onde:

- ρ é a resistividade do solo, expressa em $\Omega.m$, utilizando-se ρ_1 quando se tratar de solos com $\rho_2 < \rho_1$; ou ρ_2 quando se tratar de solos com $\rho_1 > \rho_2$; e
- I é a máxima corrente de malha de curta ou longa duração, em ampères.

Coefficiente K_m é o fator geométrico usado para calcular a tensão de toque e é função da distância entre os condutores paralelos da malha, da sua profundidade e do diâmetro d dos condutores, dado por:

$$K_m = \frac{1}{2.p} \left[\frac{D^2}{16.H.d} + \frac{(D+2.H)^2}{8.D.d} - \frac{H}{4.d} \sqrt{1 + \frac{k_i}{H}} \right] \ln \frac{8}{p(2n-1)}$$

onde:

- D é a distância entre os condutores paralelos, em metros;
- H é a profundidade da malha;
- n é o número de condutores paralelos em uma direção;
- d diâmetro dos condutores, em metros.

No caso de malhas sem hastes de aterramento, ou algumas poucas hastes fora da sua periferia, utiliza-se:

$$k_i = (2n)^{-2/3}$$

O Coeficiente de Irregularidade K_i representa a correção da não-uniformidade da dispersão de corrente pelos condutores.

K_i é obtido, na direção dos condutores principais por:

$$K_i = 0,65 + 0,172 \cdot N_{c,p}$$

K_i é obtido para direção dos condutores de junção por:

$$K_i = 0,65 + 0,172 \cdot N_{c,j}$$

A Tensão de Toque é obtida para o maior produto de K_m e K_i :

$$V_t = \frac{r \times I \times K_m \times K_i}{L_t}$$

9.4.6 Maiores valores de Tensão de Passo

As maiores intensidades de Tensão de Passo encontram-se na periferia fora da malha (fora de sua área). A maior intensidade Tensão de Passo V_p é obtida por:

$$V_p = \frac{r \times I \times K_s \times K_i}{L_t}$$

onde:

- ρ é a resistividade do solo, expressa em $\Omega.m$, utilizando-se ρ_1 quando se tratar de solos com $\rho_2 < \rho_1$; ou ρ_2 quando se tratar de solos com $\rho_1 > \rho_2$; e
- I é a máxima corrente de malha de curta ou longa duração, expressa em ampères.

O coeficiente K_s é o fator geométrico utilizado nos cálculos da tensão de passo que leva em consideração o espaçamento entre os condutores paralelos da malha e sua profundidade e dado por:

$$K_s = \frac{1}{p} \left(\frac{1}{2.H} + \frac{1}{D+H} + \frac{1}{D} (1 - 0,5^{n-2}) \right)$$

onde:

- D é a distância entre condutores paralelos ao longo da malha;
- H é a profundidade da malha; e
- n é o número de condutores paralelos em uma direção.

9.4.7 Restrições para Tensão de Toque e Tensão de Passo

A ABNT NBR 15.751 recomenda que a Máxima Tensão de Toque Permissível seja maior que a Tensão de Toque existente, ou seja:

$$E_t = (R_{cb} + 1,5 \times r_s \times C) \times I_{cb}^3 \quad V_t = \frac{r \times I \times K_m \times K_i}{L_t}$$

Já, para a Máxima Tensão de Passo Permissível, esta deve ser maior que a Tensão de Passo existente. Assim:

$$E_p = (R_{cb} + 6 \times r_s \times C) \times I_{cb} \quad V_p = \frac{r \times K_s \times K_t}{L_t}$$

9.5 PROJETO MALHA DE TERRA

A seguir é apresentado um fluxograma das etapas de projeto de uma malha de aterramento.

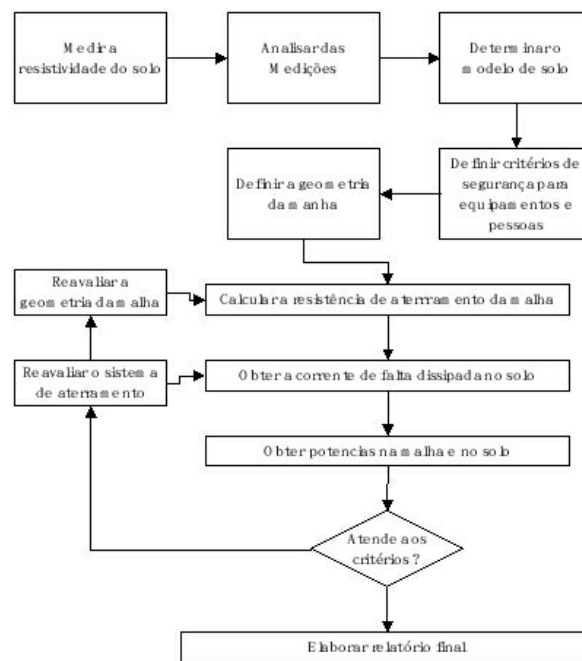


Figura 53: Fluxograma do projeto da malha de aterramento

9.5.1 Aterramento de Equipamentos

Para o aterramento de equipamentos, a ABNT NBR 15.751 apresenta no “item 10.4” uma série de recomendações detalhadas. Por exemplo, para equipamentos de aterramentos de:

- Para-raios sobre suportes e de disjuntores de corpo único;
- Para-raios sobre vigas;
- Transformadores de corrente;
- Isoladores de pedestal;

- Chaves seccionadoras;
- Disjuntores com polos separados;
- Transformadores de potência trifásicos; etc.

A norma dá detalhes inclusive dos pontos a serem aterrados, da bitola do condutor, dos tipos de conectores, etc.

9.5.2 Aterramento das cercas metálicas

Eventuais cercas metálicas localizadas no interior da malha da subestação devem ser multiaterradas, ou seja, interligadas à malha em vários pontos. As que estiverem localizadas fora da área de abrangência da malha devem ser seccionadas e cada seção deve ser multiaterrada, porém em

quadrículas (*meshs*) distintas da malha. A norma ABNT NBR 15.751 apresenta a Figura 54 e a Figura 55 que representam estes casos.

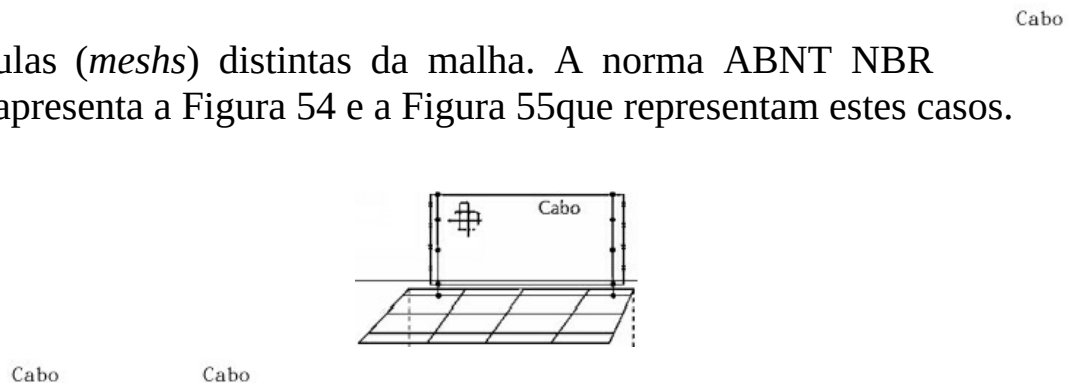


Figura 54: Aterramento de cerca elétrica interna à malha.



Figura 55: Aterramento de cerca elétrica externa seccionada.

10 SISTEMAS DE PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

10.1 RAIOS

Sobre a superfície da terra ocorrem de 50 a 100 descargas (raios) por segundo, ou seja, 3.153.600.000 raios por ano ou isto representa umas 4000 trovoadas e 9 milhões de descargas diárias.

Os raios de altíssima intensidade podem ocorrer quando uma nuvem extremamente carregada se aproxima do solo, empurrada e abaixada pela ação de correntes de ar descendentes. Este fenômeno, apesar de raros, pode ocorrer em dias normais, isto é, sem chuva, sendo conhecida como raio seco.

10.1.1 Forma do raio

A duração de um raio (descarga atmosférica) é aproximadamente 200 μ s. Em análise de fotografias e registros dos oscilógrafos, obteve-se a forma de onda do impulso da descarga, bem como a sua duração, conforme a Figura 56.

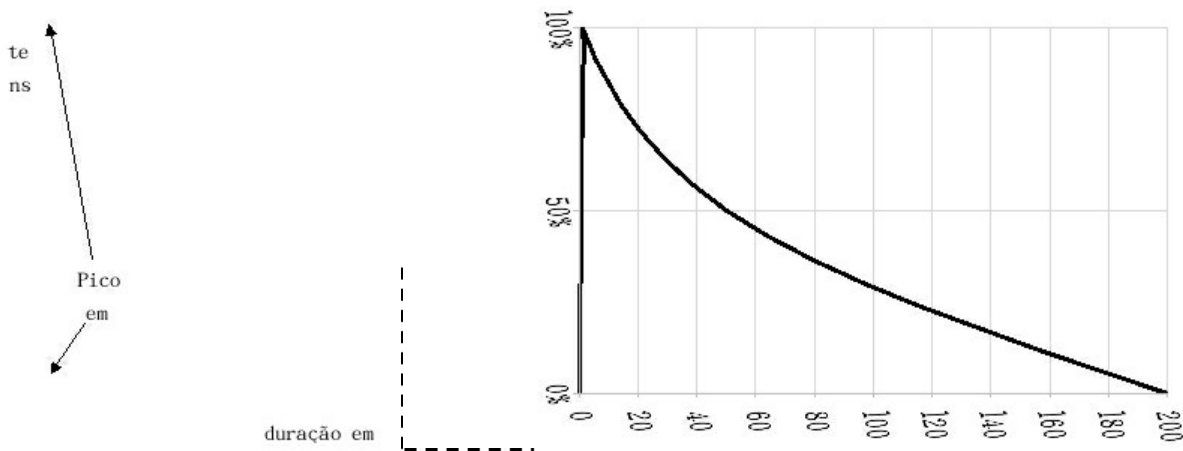


Figura 56: Curva típica do impulso da descarga atmosférica.

A frente de onda corresponde ao período da subida da corrente ou tensão do raio, sendo sua duração estimada em 1,2 μ s, correspondente à ação

fulminante do raio. O valor de crista é a maior intensidade atingida pela corrente ou tensão do raio. Já a cauda do raio corresponde à forma do raio, até o valor final em torno de 200 μ s. O período ou tempo de meia cauda é o tempo em que a cauda atinge o valor de meia crista, 50 μ s. É neste tempo que o raio causa mais danos.

Comparando a velocidade de ocorrência de um raio em relação a duração de uma piscada (100ms), vê-se que durante uma piscada podem ocorrer 500 (100ms / 200 μ s) raios sequenciais.

10.1.2 Dados característicos dos raios

VALOR DOS RAIOS

- Corrente 200 a 200.000 A
- Tensão 10 a 1000kV
- Duração 70 a 200 μ s
- Carga 15 a 415 C = média 30 C
- Pot. liberada 1000 a 8000 milhões de kW
- Energia 4 a 10Kwh

MAIOR OCORRÊNCIA, 30.000 A 50.000 AMPÈRES:

- Temperatura 30.000° C - temperatura do ar 3.000°C
- Velocidade Principal: 30.000 km/s (velocidade média)

CAMPO ELÉTRICO SUPORTÁVEL PELO AR:

- Mínimo 5.000V/m.
- Máximo 20.000V/m.

INFLUÊNCIA UMIDADE

- Altitude/pressão
- Salinidade

- Altura do nível, etc.

DESCARGAS DIRETAS DE RAIOS

- 0,1% excede 200.000A
- 0,7% excede 100.000A
- 6,0% excede 60.000A
- 50,0% excede 15.000A

10.2 NÍVEL DE PROTEÇÃO CONTRA DESCARGA ATMOSFÉRICA

Para cada estrutura são recomendados níveis de proteção a serem obedecidos pelo projetista constantes da ABNT NBR 15.751. São quatro os níveis destacados na Tabela 14.

Tabela 14: Classificação de proteção contra descargas atmosféricas

Nível de Proteção	Característica da Proteção
I	Nível Máximo de Proteção = 98%
II	Nível Médio de Proteção = 95%
III	Nível Moderado de Proteção = 90%
IV	Nível Normal de Proteção = 80%

Quanto maior o nível de proteção requerido, maior é a quantidade de elementos usados na instalação. Poderão ser utilizadas as combinações dos seguintes elementos:

- Mais para-raios de Franklin;
- Mais hastes;
- Mais condutores horizontais;
- Rede da gaiola de Faraday mais malhada;
- Mais cabos de descida;
- Mais superfícies equipotenciais; e
- Melhor sistema de aterramento.

As descargas atmosféricas são de diferentes tipos e intensidade. Assim, um sistema de proteção se limita a determinadas descargas atmosféricas.

Raios de altíssima intensidade danificam o sistema de proteção e causam estragos estruturais, inclusive nos equipamentos dentro da edificação. Não há proteção plena.

10.3 ÁREA DE CAPTAÇÃO DO RAIOS EM UMA ESTRUTURA

Define-se como área de captação (atração) do raio em uma estrutura (edificação) normal, sem sistema de proteção, como sendo a área (equivalente no solo) em que se ocorrer a incidência do raio o mesmo será atraído pela

estrutura. Para uma edificação com geometria simétrica, a área de captação é calculada pela soma da área de ocupação da própria estrutura mais a área correspondente à uma faixa contígua à primeira, de largura constante e igual à altura, ao longo do seu perímetro. Esta área é obtida por:

$$S_{\text{captação}} = S_{\text{estrutura}} + S_{\text{visinhança de estrutura}}$$

$$S_{\text{captação}} = L.W + 2.L.H + 2.W.H + \pi.H^2$$

10.3.1 Condutor Horizontal

Um condutor tem a mesma eficiência que uma haste da mesma altura que se desloca ao longo do condutor, como mostrado na Figura 57.

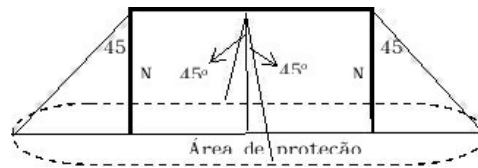


Figura 57: Volume de Proteção do Condutor Horizontal

10.3.2 Condutor Horizontal Fictício de Proteção

Quando se utiliza duas ou mais Hastes de Franklin, o espaço (volume) protegido entre as hastes fica aumentado. Este aumento do espaço protegido pode ser associado à existência de um condutor fictício colocado horizontalmente a uma altura menor do que a altura da Haste de Franklin.

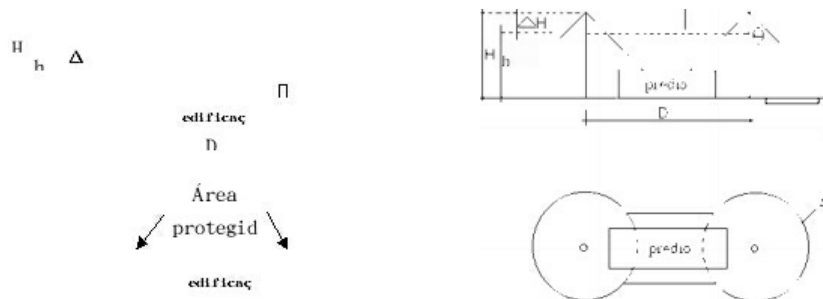


Figura 58: Exemplo de área protegida por duas hastes.

O condutor horizontal fictício deverá ser colocado a uma altura um pouco menor que a altura da Haste de Franklin, cujo cálculo é:

$$h_{\text{cabo fictício}} = H_{\text{haste}} - \Delta H$$

onde:

- H_{haste} é a altura do captor Franklin para a proteção;
- $h_{cabo\ fictício}$ representa a altura do cabo fictício;
- ΔH é o decréscimo da altura do cabo fictício em relação à altura da haste (captor) de Franklin.

$$\Delta H = H_{haste} - R - \sqrt{(R - H_{haste})^2 + \frac{D^2}{4}}$$

onde:

- D é a distância entre as haste (captor) de Franklin.
- R é um parâmetro que depende do Grau de Proteção pretendido da estrutura. Seu valor é obtido da Tabela 15.

Tabela 15: Parâmetro R em função do Nível de Proteção

Nível de Proteção	Parâmetro R (m)
I	20
II	30
III	45
IV	60

Só haverá o cabo fictício se a altura da haste H_{haste} e a distância D entre as Hastes de Franklin, satisfazem as equações a seguir.

$$H_{haste} \leq R$$

$$D \leq 2 \cdot \sqrt{2 \cdot R \cdot H_{haste} - H_{haste}^2}$$

O ângulo de proteção a ser adotado em toda a estrutura é o mesmo para a Haste de Franklin e para o cabo fictício.

EXEMPLO

Calcular a altura do cabo fictício para proteção de Grau IV, usando duas Hastes de Franklin de 15m de altura, afastadas de 20m.

- $H_{\text{haste}} = 15\text{m}$;
- Grau de Proteção IV, com ângulo de 55° ;
- $D = 20\text{m}$;
- $R = 60\text{m}$

Calculamos ΔH da seguinte forma:

$$\Delta H = 15 - 60 - \sqrt{(60 - 15)^2 + \frac{20^2}{4}}$$

$$\Delta H = 1,09\text{m}$$

Deste modo, “estendendo-se” o cabo fictício horizontalmente à altura de 13,91m, pode-se determinar a zona de proteção. Esta zona é obtida pela conjugação da zona obtida pela Haste de Franklin com a zona do cabo fictício, considerando um ângulo de 55° .

EXEMPLO

Idem ao exemplo anterior, considerando um Grau de Proteção III. Solução: Neste caso, para $R = 45\text{m}$, tem-se:

A altura do cabo fictício é de:

$$\Delta H = 15 - 45 - \sqrt{(45 - 15)^2 + \frac{20^2}{4}}$$

$$\Delta H = 1,62\text{m}$$

O ângulo de proteção a considerar não pode ser maior que 45° .

10.3.3 Plano Fictício de Proteção

Se utilizarmos mais de duas Hastes de Franklin, a zona de proteção é obtida combinando as hastes duas a duas. Mas mesmo assim, há um ganho real de proteção na zona central das hastes isto é, há um plano fictício, a seguir do qual a estrutura estará protegida.

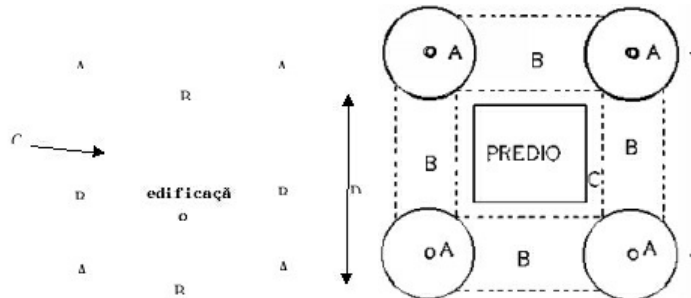


Figura 59: Área de proteção de quatro hastes formando um quadrado

Para o caso particular de 4 Hastes de Franklin, de mesma altura, formando uma configuração quadrada, a Figura 59 mostra a altura do cabo fictício, bem como a zona de proteção do conjunto.

onde:

- A é a zona de proteção devido a Haste de Franklin;
- B é a zona de proteção devido ao cabo fictício; e
- C é a zona de proteção devido ao plano fictício.

Nota-se que, devido às quatro hastes, há um ganho de proteção na zona central. Tudo se passa como se houvesse um plano fictício de proteção colocado a uma certa altura, determinado por.

$$h_{\text{plano fictício}} = H_{\text{haste}} - \hat{\rho}_{\text{plano fictício}}$$

Sendo $\hat{\rho}_{\text{plano fictício}}$ obtido por:

$$\hat{\rho}_{\text{plano fictício}} = R - \sqrt{R^2 - \frac{D_i^2}{4}}$$

onde:

- D_i é o comprimento da diagonal formada pelas quatro hastes, tanto na configuração quadrada como na retangular.
- R é um parâmetro que depende do Grau de Proteção pretendido na estrutura.

Contudo, só haverá plano fictício, se atender a condição a seguir:

$$D_i < 2.R$$

Como o Grau de Proteção é IV e a altura da haste é 25m, considera-se um ângulo de 45° a ser usado na ponta das hastes e nos cabos fictícios. Deste modo combinam-se.

Todas as zonas de proteção, obtendo-se a zona real de proteção do sistema considerando, levam ao cálculo do afastamento do plano fictício do retângulo formado pelas 4 Hastes de Franklin. Assim, tem-se:

$$\hat{\rho}_{\text{plano fictício}} = \sqrt{(2 \cdot 60 \cdot 21) - 21,32^2} - \sqrt{(2 \cdot 60 \cdot 25) - 25^2 - \frac{35^2}{4}}$$

Evidentemente, no projeto da proteção de descarga atmosférica, o plano fictício deverá estar acima da estrutura considerada, e deverá estar afastado da região quadrangular das Hastes de Franklin. Ou seja:

$$D_{\text{afastamento}} = \sqrt{2.R.h_{\text{plano fictício}} - h_{\text{plano fictício}}^2} - \sqrt{2.R.H_{\text{hastes}} - H_{\text{hastes}}^2 - \frac{d^2}{4}}$$

onde d é a maior distância entre duas Hastes de Franklin consecutivas.

EXEMPLO

Quatro para-raios de Franklin de 25m de altura, formam uma configuração retangular de 22m x 35m. Considerando um Grau de Proteção IV, calcular a altura do plano fictício.

- $H_{\text{haste}} = 25\text{m}$; Proteção de grau IV, $R = 60\text{m}$

$$D_i = \sqrt{22^2 + 35^2} = 41,34 \text{ m}$$

$$h_{\text{plano fictício}} = 60 - \sqrt{60^2 + \frac{41,34^2}{4}} = 3,68 \text{ m}$$

10.4 GAIOLA DE FARADAY

A proteção por Franklin utiliza uma haste (captor) ou fio estendido horizontalmente como forma de captura do raio. O princípio básico da proteção proposta por Michael Faraday (1791-1867) é usar os condutores de captura em forma de anel. Os condutores em anel formam malhas ou gaiolas, advindo daí da Gaiola de Faraday.

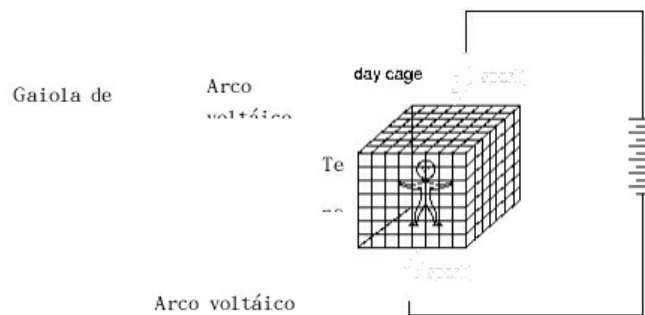


Figura 60: Esquema de uma Gaiola de Faraday

A Gaiola de Faraday por ser uma proteção eficiente, é largamente adotada. Para melhorar a sua eficiência, pode ser usada consorciada com a proteção tipo Franklin.

10.4.1 Lei de Lenz

A Lei de Lenz indica que qualquer sistema condutor em anel, tende a reagir às variações de campos magnéticos. Esta reação se dá pela circulação de corrente induzida no anel, que por sua vez, cria um campo magnético contrário à variação do campo magnético indutor. A Lei de Lenz é fundamental na determinação do sentido da corrente induzida.

10.4.2 Princípio da Proteção por Faraday

O princípio básico da Proteção por Faraday é a Lei de Lenz. A Gaiola de Faraday é formada por várias quadrículas de condutores, ou seja, anéis, que evitarão a penetração do raio no interior do prédio. Faraday, na sua experiência, demonstrou que quando as correntes uniformemente distribuídas passam pela Gaiola, o campo magnético no interior da mesma é nulo. Quando as correntes não são uniformes o campo no seu interior não é nulo, mas é muito pequeno.

O raio, ao cair na estrutura, não produz uma dissipação uniforme. Por este motivo ocorrem induções internas devido à variação do campo magnético existente no interior da gaiola.

A proteção devido à Gaiola de Faraday se dá porque as correntes induzidas nas quadrículas criam campos magnéticos de oposição, levando o raio para as bordas da malha, obrigando-o a fluir para o cabo de descida.

10.4.3 Dimensão das Quadrículas da Gaiola de Faraday

Como resultado de vários estudos, foi estabelecida a dimensão das quadrículas (retículos), isto é, os espaçamentos dos condutores para diferentes níveis de proteção. Este estudo foi apresentado pela IEC e adotado pela ABNT NBR 5.419. Nesta proposta, os retículos da Gaiola são quadrados, isto é, formam quadrículas.

As distâncias máximas dos espaçamentos dos condutores da malha, em relação ao nível de proteção pretendido, estão demonstrados na Tabela 16.

Tabela 16: Distâncias dos espaçamentos dos condutores da malha (Fonte: NBR 5.419)

Nível de Proteção	Distância Máxima Espaçamentos
I	5 m
II e III	10 m
IV	20 m

Na Tabela 16, os retículos da Gaiola de Faraday devem ser quadrados. Hoje, aceita-se formar retículos retangulares, sendo um lado de 1,5 a 2 vezes maior que o primeiro. Assim, os retângulos da Gaiola de Faraday terão as dimensões da Tabela 17.

Tabela 17: Dimensões da Gaiola de Faraday (Fonte: NBR 5.419)

Nível de Proteção	Retângulos da Gaiola de Faraday
I	5 x 7,5 m
II e III	10 x 15 m
IV	20 x30 m

As bitolas são dimensionadas usando a mesma tabela dos cabos de descida da proteção de Franklin.

Locais de antenas de TV, de rádio, antenas parabólicas, ou letreiros luminosos, deverão ser protegidos usando para-raios de Franklin.

10.4.4 Cabos de Descida

Recomenda-se usar em cada canto do prédio um cabo de descida. Nas laterais emprega-se o mesmo critério do método de Franklin.

Observe-se que na lateral do prédio, os anéis retangulares são formados com a malha superior, com os cabos de descida e com a malha de equalização. Os espaçamentos na lateral não seguem o recomendado na Tabela 16 e na Tabela 17, mas sim o espaçamento usado no método de Franklin. Estas malhas na lateral do prédio dão proteção contra descargas nas laterais.

Portanto, a Gaiola de Faraday do prédio é composta pela malha

superior e quadrículas laterais. Como a probabilidade do raio é maior na cobertura do prédio sua malha é mais fechada, isto é, mais quadriculada. Já nas laterais as malhas são maiores, porque a incidência do raio é maior.

Se o prédio for construído com aberturas (janelas) metálicas, elas funcionarão como um anel de oposição ao raio, ajudando deste modo a melhorar a qualidade da Gaiola de Faraday.

10.4.5 Instalação da Malha Superior da Gaiola de Faraday

Há quatro modos de proceder a instalação da malha superior:

- Grade (malha) suspensa, formando um varal a certa altura da cobertura;
- Grade (malha) suspensa a 20 cm da cobertura;
- Grade (malha) depositada sobre a cobertura; e
- Grade (malha) embutida na própria laje da cobertura.

Quanto à malha lateral, não há maiores problemas, porque a possibilidade da ocorrência do raio é bem menor. Se o raio cair na lateral, no ponto de impacto, pedaços de cimento podem cair.

10.4.6 Coberturas Metálicas da Gaiola de Faraday

As coberturas metálicas formam uma blindagem completa da Gaiola de Faraday e a malha superior é dispensável. Neste caso, deve ser usada a mesma quantidade de cabos de descida recomendada pelo método de Franklin.

O raio ao atingir a cobertura metálica, se dispersará pela mesma, dirigindo-se aos pontos da conexão dos cabos de descida, e finalmente escoando à terra. A preocupação maior neste caso, é quanto à espessura da cobertura metálica. Isto porque o impacto do raio não deverá produzir pontos de aquecimento no lado interno da estrutura.

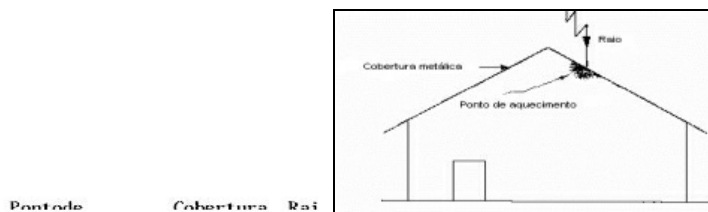


Figura 61: Aquecimento no local de impacto do raio

Se o interior da estrutura for ocupado por material comum de alto ponto de fulgor, e o impacto do raio não vier a produzir aquecimento interno, a espessura mínima da chapa metálica é dada pela Tabela 18.

Tabela 18: Indicação de espessura mínima da chapa

Nível de Proteção	Material da Chapa	Espessura da Chapa (mínimo)
I a IV	Aço	4 mm
	Cu	3 mm
	Al	7 mm
	Zn	7 mm

Adicionando-se 2mm na espessura da chapa indicada na Tabela 18, elas são adequadas para captar e escoar o raio, de modo que o aquecimento interno seja menor que o ponto de fulgor dos produtos inflamáveis e combustíveis, tais como gás, álcool, gasolina, etc.

A cobertura metálica deve ter perfeita continuidade elétrica.

10.5 CONSIDERAÇÕES GERAIS DO SPDA

A ABNT NBR 5.419- "Proteção de estruturas contra descargas atmosféricas" determina um série de condições gerais a serem observadas:

O tipo e o posicionamento do SPDA devem ser estudados cuidadosamente no estágio de projeto da edificação, para se tirar o máximo proveito dos elementos condutores da própria estrutura. Isto facilita o projeto e a construção de uma instalação integrada, permite melhorar o aspecto estético, aumentar a eficiência do SPDA e minimizar custos.

O projeto, a instalação e os materiais utilizados em um SPDA devem atender plenamente às Normas da ABNT. Não são admitidos quaisquer recursos artificiais destinados a aumentar o raio de proteção dos captores, tais como captores com formatos especiais, ou de metais de alta condutividade, ou ainda ionizantes, radioativos ou não. Os SPDA que tenham sido instalados com tais captores devem ser redimensionados e substituídos de modo a atender às Normas da ABNT.

No topo das estruturas, em especial naquelas com altura superior a 10 m, recomenda-se instalar um captor em forma de anel, disposto ao longo de todo perímetro. Este captor não deve estar situado a

mais de 0,5 m da borda do perímetro superior da edificação. Esta recomendação é suplementar e não exclui a necessidade de outros captadores, quando determinada pelo projeto.

Os condutores de descida devem ser distribuídos ao longo do perímetro do volume a proteger, de modo que seus espaçamentos médios não sejam superiores aos indicados na tabela 12. Se o número mínimo de condutores assim determinado for inferior a dois, devem ser instaladas duas descidas.

Os condutores de descida não naturais devem ser interligados por meio de condutores horizontais, formando anéis. O primeiro deve ser o anel de aterramento e na impossibilidade deste, um anel até no máximo 4 m acima do nível do solo e os outros a cada 20 m de altura. São aceitos como captadores de descargas laterais os elementos condutores expostos, naturais ou não (por exemplo: caixilhos de janelas), desde que se encontrem aterrados ou interligados, com espaçamento horizontal não superior a 6 m, mantendo-se o espaçamento máximo vertical de 20 m.

Os condutores de descida não naturais devem ser instalados a uma distância mínima de 0,5 m de portas, janelas e outras aberturas e fixados a cada metro de percurso.

Condutores de descida em alumínio, mesmo com capa isolante, não devem ser instalados dentro de calhas ou tubos de águas pluviais, para evitar problemas de corrosão.

A instalação dos condutores de descida deve levar em consideração o material da parede onde os mesmos serão fixados: (i) caso a parede for de material não inflamável, os condutores de descida podem ser instalados na sua superfície ou embutidos na mesma; (ii) caso a parede for de material inflamável e a elevação de temperatura causada pela passagem da corrente de descarga atmosférica não resultar em risco para este material, os condutores de descida podem ser instalados na sua superfície; ou (iii) caso a parede for de material inflamável e a elevação de temperatura dos condutores de descida resultar em risco para este material, a distância entre os condutores e o volume a proteger deve ser no mínimo 10 cm (os suportes metálicos dos condutores de descida podem estar em contato com a parede).

Condutores de descida devem ser retilíneos e verticais, de modo a prover o trajeto mais curto e direto para a terra. Laços devem ser evitados. Onde isto não for possível, a distância medida entre dois pontos do condutor e o comprimento (ℓ) do condutor entre esses dois pontos.

Não são admitidas emendas nos cabos utilizados como condutores de descida, exceto na interligação entre o condutor de descida e o condutor do aterramento, onde deverá ser utilizado um conector de medição. São admitidas emendas nas descidas constituídas por perfis metálicos, desde que estas emendas encontrem-se conforme a seguir.

Os elementos da fachada (perfis e suportes) poderão ser utilizados como condutores de descidas naturais, desde que suas seções sejam no mínimo iguais às especificadas para os condutores de descida conforme tabela 11 e com a sua continuidade elétrica no sentido vertical no mínimo equivalente. Em alternativa admite-se um afastamento não superior a 1 mm entre as superfícies sobrepostas de condutores consecutivos, desde que com área não inferior a 100 cm².

Os cabos de descida devem ser protegidos contra danos mecânicos até, no mínimo, 2,5 m acima do nível do solo. A proteção deve ser por eletroduto rígido de PVC ou metálico sendo que, neste último caso, o cabo de descida deve ser conectado às extremidades superior e inferior do eletroduto.

Para assegurar a dispersão da corrente de descarga atmosférica na terra sem causar sobretensões perigosas, o arranjo e as dimensões do subsistema de aterramento são mais importantes que o próprio valor da resistência de aterramento. No caso de solo rochoso ou de alta resistividade, poderá não ser possível atingir valores próximos dos sugeridos. Nestes casos a solução adotada deverá ser tecnicamente justificada no projeto.

O número de conexões nos condutores do SPDA deve ser reduzido ao mínimo. As conexões devem ser

asseguradas por meio de soldagem exotérmica, oxiacetiênica ou elétrica, conectores de pressão ou de compressão, rebites ou parafusos.

Conexões embutidas em concreto armado devem atender às Normas, a menos que se destinem a estabelecer uma ligação para utilização fora do concreto armado, caso em que devem ser feitas a uma armadura de diâmetro não inferior a 8 mm, por solda ou conector com derivação para exterior.

Uma ligação equipotencial deve ser efetuada: (i) no subsolo, ou próximo ao quadro geral de entrada de baixa tensão. Os condutores de ligação equipotencial devem ser conectados a uma barra de ligação equipotencial principal, construída e instalada de modo a permitir fácil acesso para inspeção. Essa barra de ligação equipotencial deve estar conectada ao subsistema de aterramento; e (ii) acima do nível do solo, em intervalos verticais não superiores a 20 m, para estruturas com mais de 20 m de altura. As barras secundárias de ligação equipotencial devem ser conectadas a armaduras do concreto ao nível correspondente, mesmo que estas não sejam utilizadas como componentes naturais.

(ABNT NBR 5.419)

10.6 INSPEÇÃO

Este item da ABNT NBR 5.419 não se aplica aos subsistemas do SPDA instalados, que tenham seus acessos impossibilitados por estarem embutidos no concreto armado (ferragens estruturais) ou reboco. As inspeções visam assegurar que:

O SPDA está conforme o projeto;

Todos os componentes do SPDA estão em bom estado, as conexões e fixações estão firmes e livres de corrosão;

O valor da resistência de aterramento seja compatível com o arranjo e com as dimensões do subsistema de aterramento e com a resistividade do solo. Excetuam-se desta exigência os sistemas que usam as fundações como eletrodo;

Todas as construções acrescentadas à estrutura posteriormente à instalação original estão integradas no volume a proteger, mediante ligação ao SPDA ou ampliação deste;

A resistência pode também ser calculada a partir da estratificação do solo e com uso de um programa adequado. Neste caso fica dispensada a medição da resistência de aterramento.

(ABNT NBR 5.419)

10.6.1 Sequência das Inspeções

Conforme a ABNT NBR 5.419 (Proteção de estruturas contra descargas atmosféricas), as inspeções prescritas em seu “item 18.1” devem ser efetuadas na seguinte ordem cronológica:

Durante a construção da estrutura, para verificar a correta instalação dos eletrodos de aterramento e das condições para utilização das armaduras como integrantes da gaiola de Faraday;

*Após o término da instalação do SPDA, para as inspeções prescritas em 18.1-a), 18.1-b) e 18.1-c);
Periodicamente, para todas as inspeções prescritas em 18.1, e respectiva manutenção, em intervalos não superiores aos estabelecidos em 18.3;
Após qualquer modificação ou reparo no SPDA, para inspeções completas conforme 18.1;
Quando for constatado que o SPDA foi atingido por uma descarga atmosférica, para inspeções conforme 18.1-b) e 18.1-c).*

(ABNT NBR 5.419)

10.6.2 Periodicidade das Inspeções

Conforme a ABNT NBR 5.419, deve acontecer pelo menos uma inspeção visual anual do SPDA e inspeções completas conforme o “item 18.1” da norma periodicamente, em intervalos de:

- a) 5 anos, para estruturas destinadas a fins residenciais, comerciais, administrativos, agrícolas ou industriais, excetuando-se áreas classificadas com risco de incêndio ou explosão;*
- b) 3 anos, para estruturas destinadas a grandes concentrações públicas (por exemplo: hospitais, escolas, teatros, cinemas, estádios de esporte, centros comerciais e pavilhões), indústrias contendo áreas com risco de explosão, conforme a NBR 9518, e depósitos de material inflamável;*
- c) 1 ano, para estruturas contendo munição ou explosivos, ou em locais expostos à corrosão atmosférica severa (regiões litorâneas, ambientes industriais com atmosfera agressiva etc.).*

(ABNT NBR 5.419)

10.7 DOCUMENTAÇÃO TÉCNICA

AABNT NBR 5.419 especifica a seguinte documentação técnica para ser mantida no local, ou em poder dos responsáveis pela manutenção do SPDA:

Relatório de verificação de necessidade do SPDA e de seleção do respectivo nível de proteção. A não necessidade de instalação do SPDA deverá ser documentada através dos cálculos no Anexo B na ABNT NBR 5.419.

Desenhos em escala mostrando as dimensões, os materiais e as posições de todos os componentes do SPDA, inclusive eletrodos de aterramento;

Os dados sobre a natureza e a resistividade do solo, constando obrigatoriamente detalhes relativos às estratificações do solo, ou seja, o número de camadas, a espessura e o valor da resistividade de cada uma, se for aplicado 18.1-c);

Um registro de valores medidos de resistência de aterramento a ser atualizado nas inspeções periódicas ou quaisquer modificações ou reparos SPDA. A medição de resistência de aterramento

pode ser realizada pelo método de queda de potencial usando o medidor da resistência de aterramento, voltímetro/amperímetro ou outro equivalente. Não é admissível a utilização de multímetro.

(ABNT NBR 5.419)

11 CORROSÃO NO SISTEMA DE ATERRAMENTO

Corrosão, neste caso, é a destruição gradativa de metais devido à ação do meio. Como o solo é um meio eletrolítico, o metal em contato com ele sempre sofrerá corrosão.

É importante ressaltar que a corrosão é muito mais afeta às correntes contínuas que as alternadas; geralmente na razão de 100:1 ou até mais se for uma corrente alternada de baixa frequência.

11.1 ELETRONEGATIVIDADE DOS METAIS

Eletronegatividade. É a tendência que um átomo tem de atrair elétrons. Na Tabela 19, temos a eletronegatividade dos metais mais importantes, onde os potenciais desses metais tem como referência ao valor zero que é potencial do hidrogênio. Estes metais formam o material do ânodo e cátodo, ficando caracterizado pela Tabela 19 de eletronegatividade os polos da pilha eletroquímica.

Tabela 19: Eletronegatividade dos Metais

Metal	Potencial [V] (25°C)
Potássio (K)	-2,922
Cálcio (Ca)	-2,870
Sódio (Na)	-2,712
Magnésio (Mg)	-2,370
Alumínio (Al)	-1,670
Manganês (Mn)	-1,180

Zinco (Zn)	-0,762
Ferro (Fe)	-0,440
Níquel (Ni)	-0,250
Chumbo (Pb)	-0,126
Hidrogênio (H ₂)	0,000
Cobre (Cu)	0,345
Prata (Ag)	0,800
Ouro (Au)	1,680

11.2 REAÇÃO DE CORROSÃO

A corrosão eletroquímica ocorre na presença de 4 elementos:

- Eletrólito é meio em que se realiza a reação de liberação dos íons;
- Ânodo que é representado pelo eletrodo que libera lacunas (íons positivos) para o eletrólito, ficando este eletrodo com potencial negativo;
- Cátodo que é representado pelo eletrodo protegido, com potencial positivo, que não se dissolve na reação eletroquímica;
- Ligação externa que é o circuito que permite a condução dos elétrons do ânodo para o cátodo.



Eletrólito

Estes quatro elementos agrupados sob

condições propícias, forma a pilha eletroquímica visto na Figura 62.

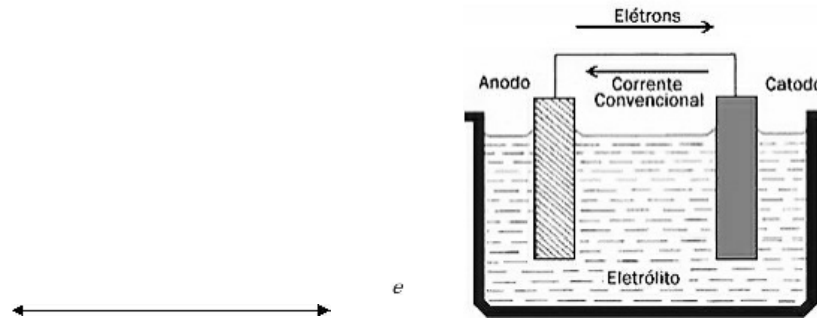


Figura 62: Pilha eletroquímica

A corrosão sempre acontecerá no ânodo (polo negativo), pois este dissolve seu metal pela passagem de corrente elétrica, gerando elétrons para manter seu potencial negativo. Para tal, as lacunas (íons positivos) são liberados no eletrólito e esta corrente é chamada de Corrente Galvânica.

CUBA ELETROLÍTICA

Usando dois eletrodos de cobre e ferro numa cuba eletrolítica da Figura 63, o potencial da pilha eletroquímica, que será obtido pela diferença entre as eletronegatividades dos metais da Tabela 19, será calculado por:

$$E_{\text{pilha}} = E_{\text{cátodo}} - E_{\text{ânodo}}$$

onde:

- $E_{\text{cátodo}}$ é o potencial do metal que será o cátodo na pilha; e
- $E_{\text{ânodo}}$ é o potencial do metal que será o ânodo na pilha.

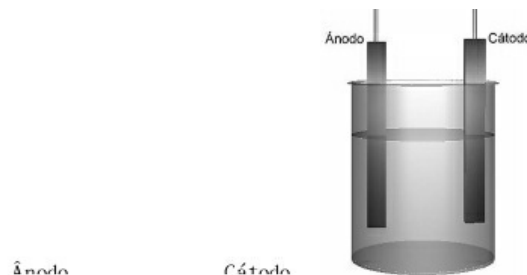


Figura 63: Cuba eletrolítica sem Ligação Externa

Assim, considerando um ânodo de ferro e um cátodo de cobre, teremos

$$E_{\text{pilha}} = 0,345 - (-0,44) = 0,785 \text{ V}$$

Apesar desta tensão, sem a Ligação Externa nenhum eletrodo sofrerá corrosão, pois não há corrente elétrica.

CORRENTE GALVÂNICA

Ao realizar a Ligação Externa por meio de um fio condutor entre os dois eletrodos haverá corrente e, portanto, corrosão. Contudo, o eletrodo de ferro (ânodo) sofrerá corrosão, pois os íons metálicos (Fe^{+}) o ferro e serão liberados o Eletrólito.

Já o cátodo, isto é, a barra de cobre, será o eletrodo protegido, e não sofrerá a corrosão.



Figura 64: Cuba eletrolítica com Ligação Externa

PILHA ELETROQUÍMICA BLOQUEADA

Ao adicionarmos uma fonte de tensão externa, com o mesmo potencial e polaridade da pilha, haverá um bloqueio na Corrente Galvânica. Tendo fonte externa a mesma tensão – mas com polaridade contrária – não haverá circulação de corrente e, portanto, não haverá corrosão.

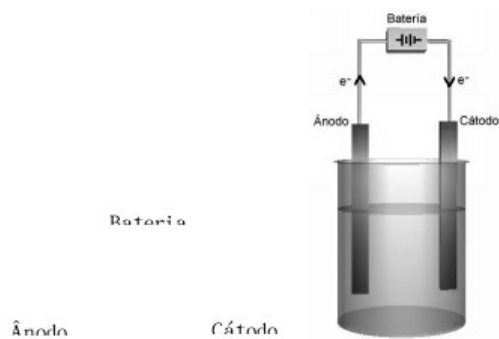


Figura 65: Pilha eletroquímica bloqueada

CORRENTE IMPRESSA

Se a tensão da fonte externa da Figura 65 for maior que o potencial da pilha, a circulação da corrente será ao contrário. Esta condição é chamada de Corrente Impressa ou Corrente Forçada.

Como a Corrente Impressa circula ao contrário, haverá corrosão, agora, na barra de cobre. Portanto, a Corrente Impressa pode ser utilizada para determinar qual elétrodo será protegido da corrosão. Esta técnica é utilizada para garantir a proteção de determinado material escolhido.

11.3 CORROSÃO NO SISTEMA DE ATERRAMENTO

Os sistemas elétrico, inclusive os de aterramento, sempre sofrem corrosão, principalmente em cabos, hastes e conexões no solo. Mas dependendo das diferenças de solo, ambiente e de tipo de material do aterramento, em separado ou combinadas, a corrosão ocorre diferentemente, isto devido à:

- As diferenças dos materiais de aterramento;
- Concentrações diferentes de sais e umidade;
- As diferenças das camadas dos solos;
- Variações de temperaturas no sistema;
- Variações de aeração; e
- Outras correntes elétricas dispersas.

11.3.1 Diferenças dos materiais de aterramento

O ideal seria empregar no sistema de aterramento, materiais com a mesma concentração de metal, para evitar eletronegatividade diferentes, impossibilitando a geração da força eletromotriz da pilha eletroquímica. Assim, o sistema não teria corrosão.

Os sistemas de aterramento, no entanto, são construídos usando componentes diferentes. Ver exemplo na Tabela 19.

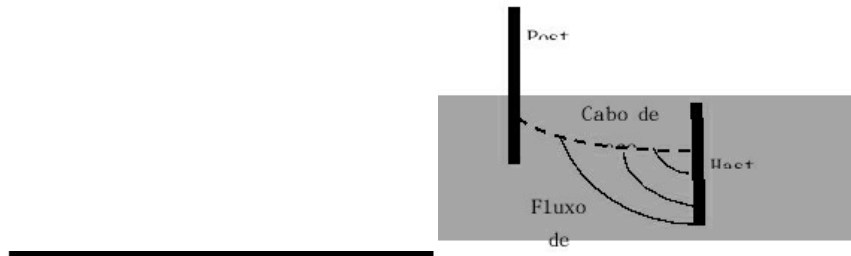


Figura 66: Diferentes materiais no sistema de aterramento.

O aterramento do equipamento no poste, (por exemplo, um transformador), é feito por um cabo de descida de aço (ferro) e a haste usada é do tipo Copperweld, isto é, cobreada.

O solo contém sais dissolvidos na água, tendo-se assim a formação do eletrólito. Portanto, a pilha eletroquímica está formada. A Corrente Galvânica do fluxo de elétrons tem o sentido indicado na figura 68. A parte do cabo de descida que está enterrado no solo, que sofrerá a corrosão, isto é, os íons Fe^{+} irão para o solo, deixando perfurações no cabo de aço.

Outro exemplo é o caso do desfolhamento de pequena parte da cobertura do cobre da haste, que ocorre devido a abrasão no momento da cravação. Exemplo Figura 67.



Figura 67: Área de ferro do eletrodo exposta.

A pilha eletroquímica será constituída da camada de cobre e da área exposta (Fe), com o fluxo de elétrons do cobre para o ferro. Assim, será gerada grande quantidade de elétrons e uma corrente em direção à pequena área de ferro. Logo, haverá corrosão.

11.3.2 Concentrações diferentes de sais e umidade

Apesar do mesmo solo, ainda pode haver variações de concentração dos tipos de sais e de umidade. Isto gera zonas anódicas e catódicas. Na condição da Figura 68, as partes do sistema de aterramento inseridas na região de menor resistividade (anódica) serão corroídas.

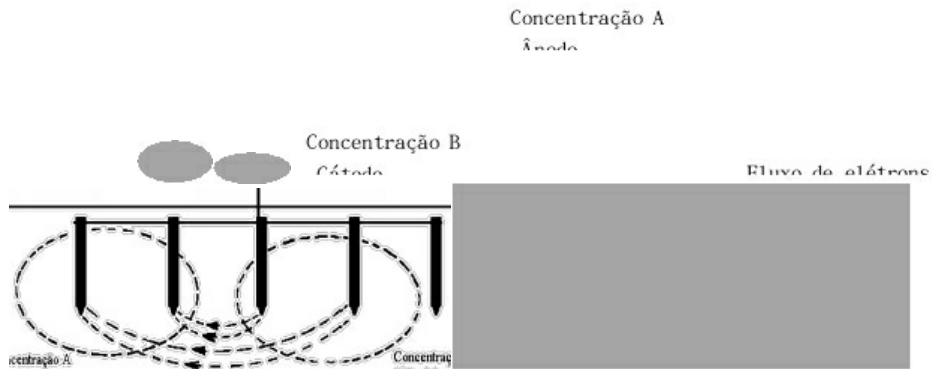


Figura 68: Diferentes concentrações de sais e umidade

11.3.3 Diferenças das camadas dos solos

A variação das características de cada camada do solo induz à corrosão quando se trata de uma área grande no solo. A heterogeneidade do solo – diferentes concentrações de sais, umidade e temperatura – criam zonas anódicas e catódicas na região do aterramento.

11.3.4 Heterogeneidade da Temperatura do Solo

Quando um sistema de aterramento encontra-se em regiões com temperaturas distintas, tem-se ação termogalvânica, ou seja, surgirá uma diferença de potencial gerando uma corrente. Para temperaturas até 95°C a diferença de potencial aumenta negativamente 2mV/°C. Assim, as chamadas pilhas termogalvânicas são geradas pelos fluxos entre eletrodos de um mesmo material metálico em diferentes temperaturas, gerando a corrosão termogalvânica.

11.4 AERAÇÃO DIFERENCIAL

A aeração variável em um terreno – especialmente em solos porosos – cria eletrólitos diferentes e, por conseguinte, gera regiões anódicas e catódicas. Esta diferença de concentração de oxigênio leva à pilha por meio de um cátodo criado na região mais aerada e o ânodo na menos aerada. Disto decorre que a maior corrosão acometerá os elementos mais profundos no solo.

11.5 PROTEÇÃO CONTRA CORROSÃO

Para evitar ou mitigar a corrosão dos elementos do sistema de aterramento, deve-se aplicar algumas das seguintes técnicas:

- Utilizar o mesmo metal;
- Isolar eletrólito e demais metais diferentes do sistema;
- Valer-se da Corrente Impressa;
- Buscar a proteção catódica por meio do Ânodo de Sacrifício.

11.5.1 Isolamento do eletrólito

Cabo de



Isolamento



Das alternativas anteriores, isolar convenientemente o cabo de descida do equipamento aterrado é uma saída simples, envolvendo a conexão por massa isolante (emborrachada) (Figura 69).



Figura 69: Isolação da conexão do cabo de descida.

11.5.2 Proteção por Corrente Impressa

Em solos com resistividade elevada, a Corrente Galvânica é pequena de tal forma que não se consegue realizar a proteção catódica com Ânodo de Sacrifício com a eficiência desejada. Neste caso, deve-se utilizar uma fonte externa para impor uma corrente contínua, conhecida por Corrente Impressa (ou Corrente Forçada).

Para controlar o eletrodo a ser corroído, um circuito formado por transformador conectado à rede local e uma fonte retificadora geram uma corrente contínua que direciona a corrente convencional deste eletrodo para o aterramento a ser protegido. Desta forma, naquele eletrodo onde se origina o fluxo de elétrons é que haverá a corrosão.

11.5.3 Proteção Catódica por Anodo de Sacrifício

Ânodo de Sacrifício é aquele que se opõe a um cátodo – o metal do sistema de aterramento que se deseja proteger – para que este ânodo sofra corrosão. Para isto basta conectar o metal do sistema de aterramento a outro metal com menor potencial de eletronegatividade (Ex.: Zinco e Magnésio) e com as seguintes características:

- Tender para uma Corrente Galvânica estabilizada, para uma corrosão uniforme.
- Tender a um potencial negativo constante durante a vida útil;
- Impedir a geração de uma capa pelas lacunas (íons positivos) o que reduz a área deste corrosão induzida.

Os Ânodos de Sacrifício devem ter uma grande área, para produzirem proteções catódicas adequadas.

O Ânodo Magnésio é indicado para solos de até 3000 Ω .m de resistividade e o de Zinco para solos de até 1000 Ω .m. Contudo, pode-se aumentar o volume dos destes ânodos por meio de um revestimento nas ligas de Zinco ou Magnésio pela mistura Gesso/Bentonita/Sulfato de Sódio na proporção 0,75 : 0,2 : 0,05.

11.6 O RELIGADOR E A CORROSÃO

O Religador prejudica o sistema de aterramento vez que suas aberturas e tentativas de religamento geram interrupções e correntes de ligação (*inrush*) que aceleram o processo de corrosão, pois a temperatura se eleva nos religamentos. Isto implica em observar um adequado sobredimensionamento do aterramento.

12 SOBRETENSÕES DE ORIGENS ATMOSFÉRICA

Uma descarga atmosférica resulta de seu impacto com o solo uma corrente instantânea da ordem de dezenas de milhares de amperes. Este acúmulo repentino de carga gera uma sobretensão no sistema levando até a causar diversos problemas nos equipamentos e mesmo nas edificações adjacentes ao impacto.

As descargas atmosféricas são responsáveis por mais de dois terços das interrupções de linhas de transmissão e ainda responsáveis por quase um terço dos desligamentos das redes de distribuição.

As descargas atmosféricas nas linhas de transmissão, nas de distribuição ou em suas vizinhanças resultam em sobretensões transitórias de alta intensidade, podendo até ocasionar arcos voltaicos. Isto pode resultar na falta de fases para a terra. Apesar de sua duração inferior a 30 segundos, estes acontecimentos podem desencadear prejuízos ao setor produtivo e à população.

As Sobretensões Conduzidas surgem quanto a descarga atinge diretamente as linhas aéreas. Disto, a sobretensão se propaga até à terra através dos equipamentos da rede. As Sobretensões Induzidas surgem do campo eletromagnético oriundo da descarga, que induz correntes transitórias nos equipamentos próximos. Já as Sobretensões Capacitivas surgem da indução de um acoplamento capacitivo entre um par de condutores, por exemplo.

12.1 A DESCARGA ATMOSFÉRICA EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

As descargas se propaga por um caminho de ar ionizado entre a

nuvem e o solo. A velocidade média de propagação do raio em direção ao solo é de 150 km/s. O campo elétrico aumenta à medida que o raio se aproxima do solo e, a uma próxima dos 20m, este campo já é suficiente para induzir uma descarga no sentido contrário do raio –entre o solo e a ponta do raio descendente –. Este raio ascendente – chamado de *return stroke* – se propaga com correntes da ordem de 20 kA a 110 kA.

12.2 MÉTODO ELETROGEOMÉTRICO

Devido à correlação entre a distância de atração e corrente do *return stroke*, utiliza-se o Modelo Eletrogeométrico, sendo a distância de atração h_s , função do valor de crista da corrente I (kA).

$$h_s = 1 - I^6 \text{ (metros)}$$

Sendo o Raio de Atração é determinado por:

$$R_a = \sqrt{h_s^2 - (h_a - h)^2}$$

O raio atingirá o solo caso a distância perpendicular entre a linha e o raio for maior que o raio de atração R_a , senão o raio incidirá na linha. Onde:

- h é a altura da linha de transmissão; e
- h_a é uma fração da distância de atração, normalmente adotado como $0,9.h_s$ para linhas de distribuição.

O método eletrogeométrico – ou da Esfera Rolante – é utilizado no cálculo da zona de proteção do sistema de proteção (ABNT NBR 5.419).

Neste método, para a determinação da Distância da Atração é dada pela maior distância em que o raio será atraído pela linha ou pela terra. Uma dos vários modelos empíricos para seu cálculo é dado por:

$$h_s = 2.I + 30.(1 - e^{-1/68})$$

onde:

- h_s é o raio da Esfera Rolante, em metros; e
- I é a corrente de crista do raio, em kA.

O raio da Esfera Rolante é aquele igual à distância de atração h_s , e tendo sua correspondente corrente dada pela Tabela 20.

Tabela 20: Raio da Esfera Rolante em função da corrente máxima

Nível de Proteção	Raio	Valor de Crista I_{max} [kA]
I	20m	3,7
II	30m	6,1
III	45m	10,6
IV	60m	16,5

A Zona Espacial de Proteção é a região na qual todo raio incidente tende a fluir para o sistema de proteção e representa o espaço no qual a Esfera Rolante não toca, como na Figura 70.

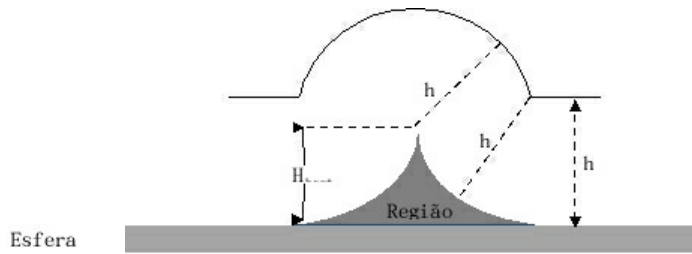


Figura 70: Esquema de Zona de Proteção

O dimensionamento por este método implica em que Esfera Rolante não deverá tocar a estrutura protegida.

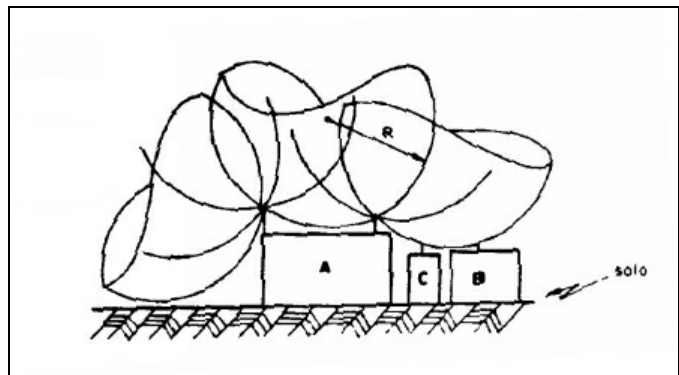


Figura 71: Zona de Proteção de várias estruturas de para-raios.

Já para a aplicação do cabo esticado como proteção, deve-se observar sua altura, pois, como na Figura 72, um cabo muito alto pode diminuir a região protegida.

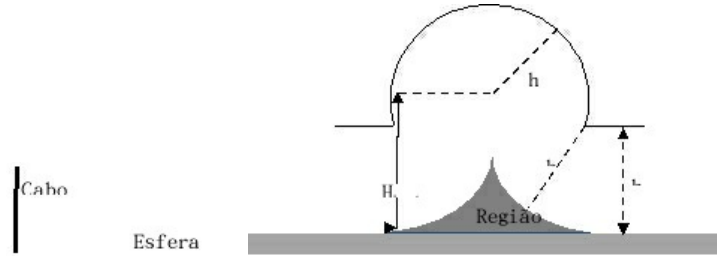


Figura 72: Zona de Proteção para cabo esticado

13 DIMENSIONAMENTO DE CABOS-GUARDA EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

O cabos-guarda em linhas de transmissão são dimensionados a partir das seguintes principais fatores:

13.1 CALCULO DA RESISTÊNCIA DE FALTA

A maior restrição na escolha do cabo-guarda é a determinação de sua suportabilidade térmica frente um curto circuito envolvendo a terra. Neste caso, estuda-se a condição de rompimento do dielétrico dos isoladores, em que uma corrente de falta (função da resistência de falta) escoar para a terra pela torre e pelos cabos-guarda, como exemplificado na Figura 73.

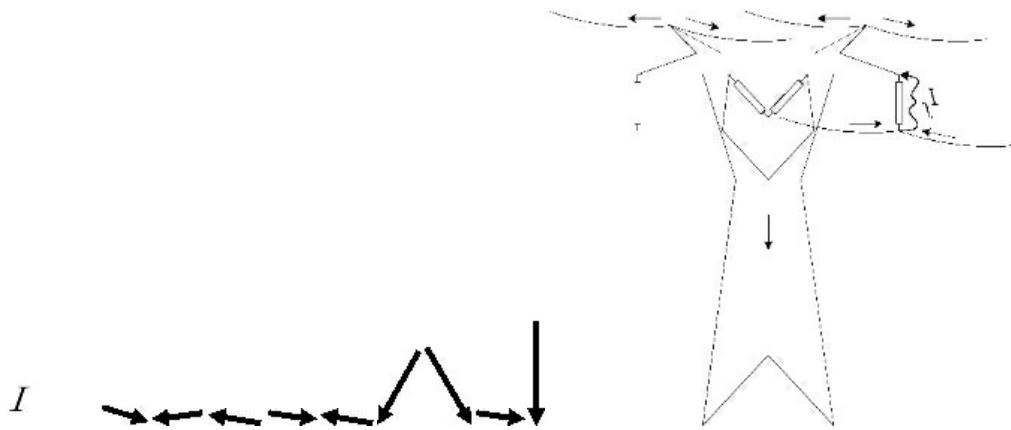


Figura 73: Escoamento de correntes em curto fase-terra.

13.2 RESISTIVIDADE DO SOLO, RESISTÊNCIA DE

ATERRAMENTO DAS TORRES E RESISTÊNCIA DA MALHA DE TERRA DAS SEs.

Para as torres adjacentes o fluxo das correntes é conforme apresentado na Figura 74, sendo que estes fluxos podem alterar em função da resistividade do solo e sua implicação na resistência de aterramento das torres e da malha da SE. Por exemplo, se há uma resistência de aterramento bem mais baixa em uma torre adjacente, isto leva o fluxo de corrente escoar para os cabos-guarda desta torre.

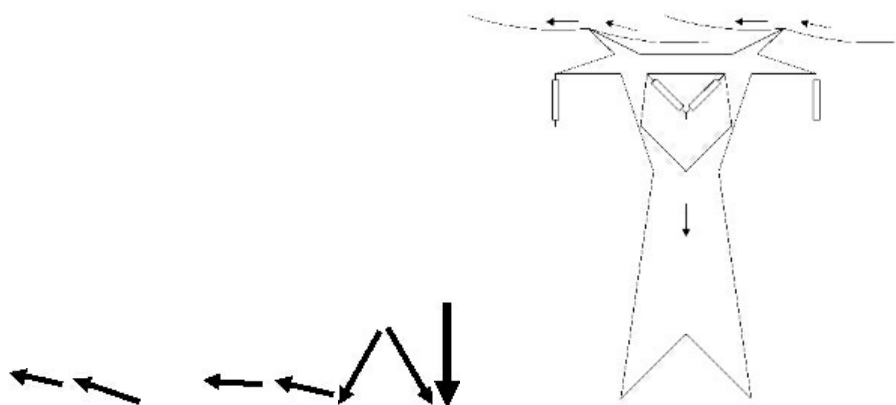


Figura 74: Fluxo de correntes em curto fase-terra nas torres subsequentes.

13.3 TEMPO DESEJADO DE ATUAÇÃO DA PROTEÇÃO

É sabido que os pontos os pontos próximos às subestações sofrem as maiores correntes nas ocorrências de falta com as maiores. Isto pela diferença de resistência de aterramento e na extensão vãos. Contudo, deseja-se que, na ocorrência de um curto, a temperatura do cabo-guarda (função da corrente) não ultrapasse seu limite. Isto impõe uma restrição ao tempo de atuação da proteção.

A determinação da corrente limite do cabo-guarda é realizada pelo cálculo da taxa de curto circuito e do tempo de atuação da proteção; ou ainda pelos perfis de temperatura máxima suportável nos cabos-guarda na atuação da proteção.

13.4 OUTROS FATORES

Além dessas ações, devem ser observados os seguintes fatores:

- Características físicas do condutor
- Determinação dos vãos entre torres
- Características físicas e de forma da torre
- Capacidade de curto-circuito do cabo-guarda

A determinação do cabo-guarda é função dos valores de corrente obtidos. Ainda assim, cabe considerar a possibilidade de um cabo-guarda auxiliar em alguns trechos da linha. Outra opção é melhorar os parâmetros de aterramento das torres.

13.5 EXEMPLO DE CÁLCULO DO CABO-GUARDA

Para este exemplo utilizaremos os cálculos realizados por Pereira e Zaneta (2006), que considera uma linha curta de 17,5 km e 500 kV, com a seguinte torre apresentada pela Figura 75.

Sendo a corrente limite do cabo-guarda obtida por:

$$I_{adm} = \sqrt{T_{cc}/t_{prot}}$$

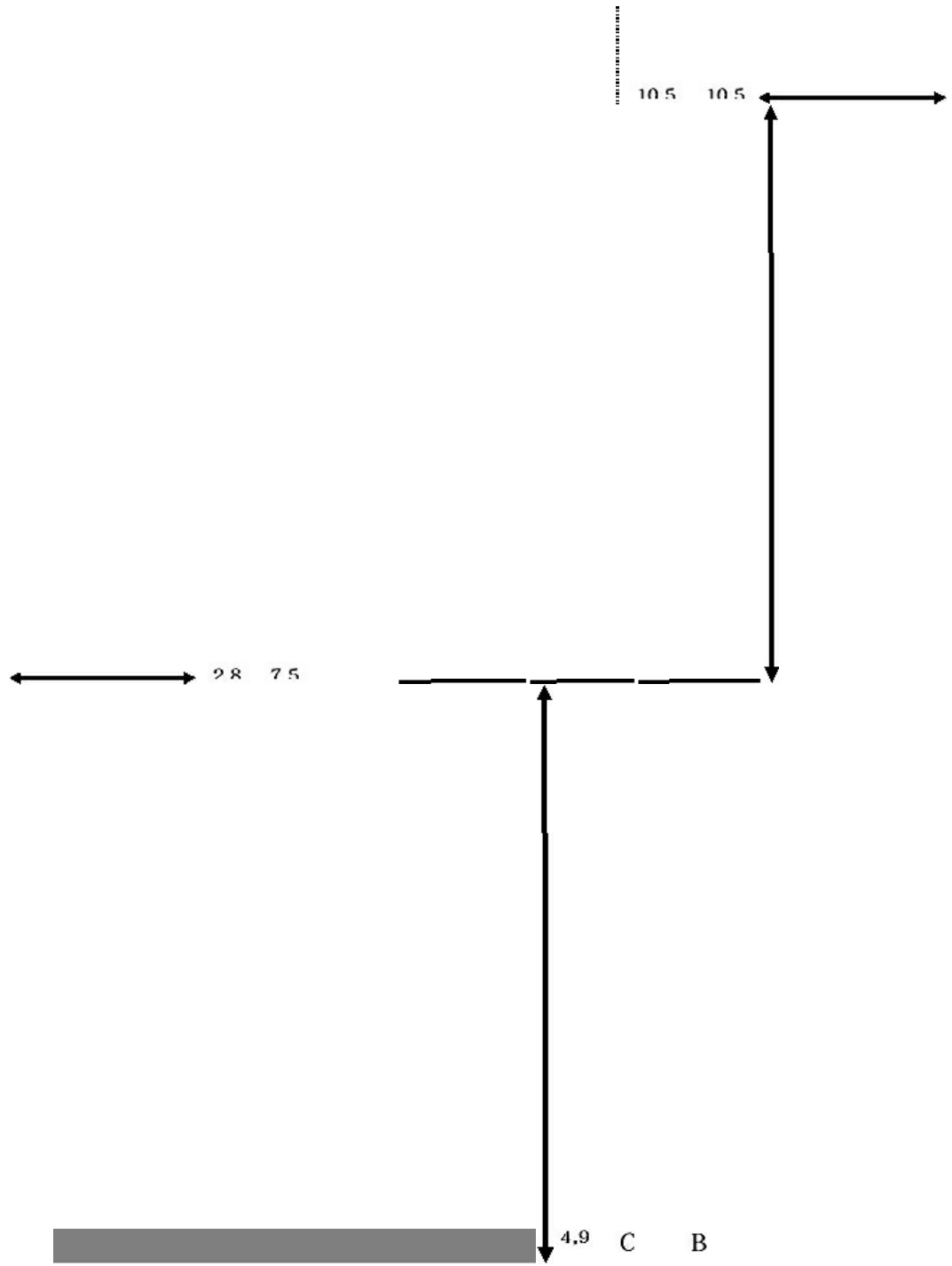
E corrente de curto no cabo-guarda gera a seguinte temperatura:

$$\theta = \theta_0(e^{kI^2 t} - 1)/\alpha$$

Onde T_{cc} é a taxa de curto-circuito, em kA^2s , para elevação da temperatura; e t_{prot} é o tempo de atuação da proteção e t é o tempo; e:

- θ, θ_0 são as temperaturas atual e inicial do condutor;
- k é calculado como $(R_0 \cdot \alpha) / (\omega \cdot c)$;
- I é a corrente máxima no cabo-guarda;
- R_0 é a resistência do cabo-guarda à θ_0 , em Ω/km ;
- α é o coeficiente de elevação de resistência em $^{\circ}C^{-1}$;
- ω é o peso específico do cabo, em kgf/km ; e
- c é o calor específico do cabo, em $J/^{\circ}C/kgf$.

27, 34, A



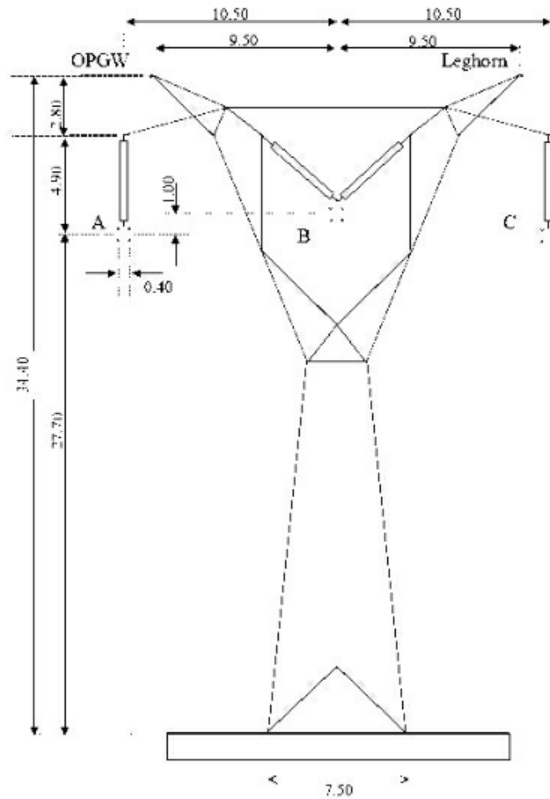


Figura 75: Torre da linha de 500 kV.

O projeto básico considera:

- 01 cabo-guarda *Leghorn*;
- 01 cabo-guarda *OPGW* de 115mm^2 ;
- Resistividade do solo = $1000\ \Omega\text{m}$;
- Resistência de aterramento das torres = $20\ \Omega$;
- Resistência de aterramento das subestações = $0,1\ \Omega$.
- Corrente admissível = $13\ \text{kA}$ para o cabo *Leghorn* (obtido da ABNT);
- Taxa de curto circuito do cabo *OPGW* = $63,5\ \text{kA}^2\text{s}$, com corrente admissível de $11,27\ \text{kA}_{\text{ef}}$ para se um tempo de atuação de $0,5\ \text{s}$;
 - Vão médio dos trechos = $300\ \text{m}$;
 - Corrente de curto circuito fase terra = $40\ \text{kA}$.

O curto mais crítico para esse exemplo é o curto “fase A – terra”. A soma das correntes de falta das 3 fases só não é nula porque a linha não é transposta.

Inicia-se o dimensionamento pela determinação dos perfis de corrente

conforme Figura 76.

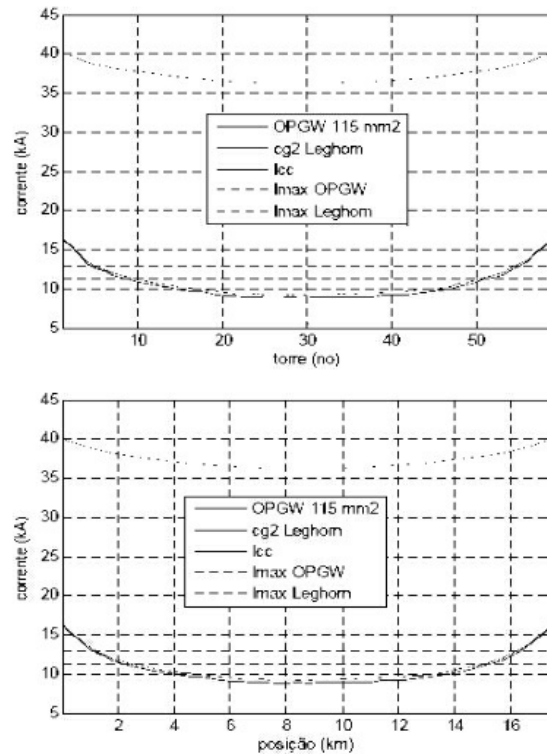


Figura 76: Perfil de correntes. Fonte: Pereira e Zaneta (2006)

Dos perfis apresentados na Figura 76, Pereira e Zaneta (2006) sugerem que há superação de corrente para faltas nas 10 primeiras torres (a partir de cada extremidade da linha).

Solução 1:

Especificar o tempo de atuação da proteção em 0,24 s ante o valor original 0,5 s. Contudo, isto traria consequências de factibilidade técnica.

Solução 2:

Reduzir a Resistência de Aterramento das torres para 10 Ω . Contudo, pelo perfil de correntes da Figura 76, temos que a corrente máxima no cabo OPGW se reduz somente a 15,9 kA, ainda superior ao limite de 11,3 kA_{ef}.

Solução 3:

Optar pela inserção de um cabo-guarda Leghorn adicional nas extremidades. Para essa solução tem-se se o seguinte perfil.

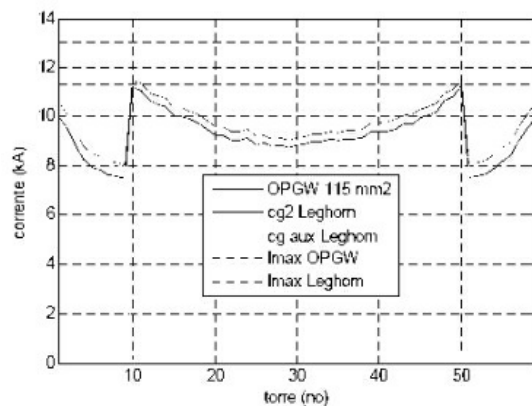


Figura 77: Perfil de correntes com cabo-guarda adicional.

Esta solução ainda impõe a superação da corrente admissível no cabo OPGW. Assim, sugere-se prolongar o cabo-guarda adicional por mais um vão. Desta forma, o valor máximo de corrente no cabo OPGW é de 11,25 kA, abaixo do limite admissível de $11,3 \text{ kA}_{\text{ef}}$.

14 EXEMPLO DE LAUDO DE CONFORMIDADE DE MALHA DE ATERRAMENTO

LAUDO DE CONFORMIDADE DE
MALHA DE ATERRAMENTO
SE 138 - 13.8KV - 6/7.5 E 12/15 MVA SE



Laudo Técnico de Malha de Aterramento da SE

PROPRIETÁRIO:

CNPJ:

RESPONSÁVEL:

CPF:

LOCAL:

FINALIDADE

É objeto deste documento a ***Elaboração do Laudo Técnico de Conformidade da Malha de Aterramento e Proteção da Subestação Rebaixadora 138/13.8KV - 12/15MVA (SE)***, como dispõe o Código Estadual de Proteção contra Incêndio, Explosão, Pânico e Desastres - Lei Estadual 15.802/2006, as Normas Regulamentadoras NR-10 e NR-12 do Ministério do Trabalho Emprego, as Normas Técnicas - NBR's da ABNT 5.410, 5.413 e 5.419 e 60.439 e as Notas Técnicas NTC - 60 - Critérios para Projetos e Procedimentos para Execuções de Aterramentos de Redes Aéreas e Subestações de Distribuição, NTC - 05 - Fornecimento de Energia Elétrica em Tensão Primária de Distribuição e ainda a NBR-15751-2009 ABNT – Sistemas de Aterramento de Subestações – Requisitos.

Para a elaboração deste laudo técnico, foi realizada a vistoria nas Instalações Eletromecânicas da Subestação, específico ao cumprimento das determinações constantes do projeto executivo da malha de aterramento e proteção elétrica (SPDA), com o registro das possíveis *não conformidade técnica* e das grandezas medidas.

Para a elaboração deste laudo deverá ser obtido:

- **Valor da Resistividade do Solo;**
- **Valor da Resistência da Malha de Aterramento;**
- **Tensão de Passo da Malha de Aterramento;**

CARACTERÍSTICAS DA MALHA DE ATERRAMENTO:

A malha de aterramento a ser vistoriada foi construída utilizando-se cabos de cobre nú de 70mm², instalados em valas e 70cm de profundidade e com hastes de aço cobreadas de 5/8" x 6.000mm (16x3.000mm). A geometria de malha é retangular com dimensões de 56x44 metros, com o anel externo afastado 7,5 metros da cerca divisória.

A malha principal possui 11(onze) linhas de 44 metros, 13 (treze) colunas de

32 metros e 69 (sessenta e nove) hastes de aterramento. (**Documento: HY994-203 Planta da Malha de Terra Rev. 03**)

CARACTERÍSTICAS ELETROMECÂNICAS DOS EQUIPAMENTOS DA SE

A malha de aterramento da Subestação **SE** foi projetada e executada para garantir a coordenação, a seletividade e proteção dos equipamentos ativos nela instalados.

Na configuração proposta estão instalados dois transformadores de potência distintas.

O primeiro de fabricação da **WEG Transformadores S/A**, *n° de série 1.015.414.663 ano 2012*, na configuração **138 / 13.8 KV - 6/7.5MVA**, possui a 85°C impedância de 9,67% (6MVA) e 12,05% (7.5MVA), possui Corrente de Curto Circuito Simétrica de 0,29KA (Primário) e 2,6KA (Secundário), possui Corrente de Curto Circuito Assimétrica de 0,74KA (Primário) e 6,6KA (Secundário) com duração máxima de 2 segundos.

O segundo de fabricação da **SIEMENS Transformador**, *n° de série 81.031.987 ano 2014*, na configuração **138 / 13.8 KV - 12/15MVA**, possui a 75°C impedância de 10,54% (15MVA), possui Corrente de Curto Circuito Simétrica de 0,7KA (Primário) e 6,0KA (Secundário), possui Corrente de Curto Circuito Assimétrica de 1,7KA (Primário) e 15,3KA (Secundário) com duração máxima de 2 segundos.

Estes dois transformadores estão protegidos por um Disjuntor de 145KV de fabricação da ABB Ltda. *n° de série 2GDB530.146/01/01 ano 2012* com corrente nominal de 3,15KA, ajustados em operação com corrente de interrupção nominal de 40KA em 1 segundo, com **tempo de interrupção de falha ajustado em 50ms** (50 milissegundos) e **capacidade de interrupção em vazio de 70A**.

Nesta configuração - com o atual ajuste do disjuntor de 145KV, os dois transformadores, mesmo alimentando circuitos distintos, não podem trabalhar

simultaneamente uma vez que a corrente de interrupção é menor que a soma das correntes nominais dos dois transformadores.

A corrente de falha assimétrica máxima da SE será a corrente de curto circuito assimétrica do transformador de 12/15MVA que é 15,3KA no barramento de 13.8KV (secundário) com ajuste de duração máxima de 2 segundos.

Em nossos cálculos iremos definir a duração máxima das falhas em 2 (dois) segundos, ou seja a malha de aterramento terá que dissipar toda e qualquer falha do Sistema Elétrico em um tempo máximo de 2 segundos.

Denominamos a corrente máxima suportável por um transformador de potência, definidos por um período máximo de tempo por “corrente ANSI”.

Assim os valores da corrente “ANSI” podem ser expressos da seguinte forma:

$$I_{ANSI} = I_{nominal} \times 100 / Z\%$$

Onde $Z\%$ é a impedância percentual do transformador e $I_{nominal}$ é a corrente nominal do transformador.

Para o Transformador SIEMENS, 138 / 13.8 KV - 12/15MVA, no barramento de 13.8KV, temos que:

$$I_{nominal} = 627,6A$$

com $Z = 10.54\%$ e $t = 2s$; obtemos:

$$I_{ANSIf} = 15,3KA \text{ (Corrente de Fase)}$$

A corrente de magnetização “ I_{NRUSH} ” pode ser estabelecida como sendo entre 8 (oito) a 12 (doze) vezes a **corrente nominal do sistema** a ser protegido, no caso a corrente nominal do transformador de 15MVA. Para este estudo vamos a princípio utilizar a média destes valores, ou seja, teremos que:

$$I_{n \text{ sistema}} = 627,6^a$$

$$I_{NRUSH} = 10 \times I_{n \text{ sistema}}$$

$$I_{NRUSH} = 10 \times 627,6A$$

$$I_{NRUSH} = 6,3KA$$

Assim neste arranjo proposto, para o ajuste do relé instalado na subestação de entrada de energia temos as seguintes correntes:

$$I_{n \text{ sistema}} = 627,6$$

$$I_{NRUSH} = 6,3K A$$

$$I_{ANSIf} = 15,3KA \text{ (Corrente de Fase)}$$

Com as grandezas elétricas acima apresentadas, devemos a princípio determinar a resistência máxima da malha de aterramento que dissipara a falha máxima no tempo máximo, ou seja qual a resistência da malha de aterramento que dissipará a Corrente $I_{ANSIf} = 15,3KA$ (Corrente de Fase) no tempo de 0,5 segundos no barramento de 13.8KV.

- A energia a ser dissipada durante a falha pode ser expressa como sendo:

$$E = V.I.t \rightarrow E = 13.8KV \times 15,3KA \times 0,50 s$$

$$E = 105,57MJ$$

- A potência da falha deverá ser dissipada no sistema resistivo da malha, que pode ser calculada como sendo:

$$P = V^2 / R \rightarrow 105,57MJ = (13.8K)^2V/R$$

$$R=1,81 \Omega$$

Neste caso o valor ideal da resistência da malha de aterramento e do circuito de proteção será de 1,81 Ω .

MODELAGEM e RESSITIVIDADE DO SOLO:

A malha de aterramento em questão da SE, como já afirmado foi executada utilizando-se de hastes cobreadas de 6 (seis) metros, portanto, devemos a princípio identificar a modelagem do solo a uma profundidade de até 7,5 (sete ponto cinco) metros, que é a profundidade de influência e dissipação dos campos eletromagnéticos.

Para a obtenção da Resistividade do Solo da SE, fizemos duas medições - em sentido perpendicular, na área externa da SE ainda afastado da malha externa e da influência dos campos da malha existente, a primeira medição - Medição 01, foi no vão de entrada da SE e a segunda - Medição 02, foi empreendida da lateral direita da SE. Os valores obtidos nestas medições e a metodologia utilizada e estão contidas nas planilhas de Cálculo de Resistividade de Solo.

A seguir destacamos os gráficos obtidos destas medições.

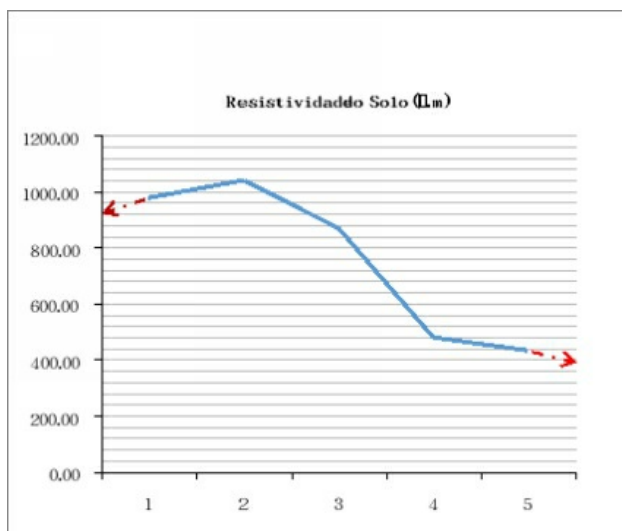


Figura 78: Resistividade do Solo Medição 01: Vão de entrada da Subestação

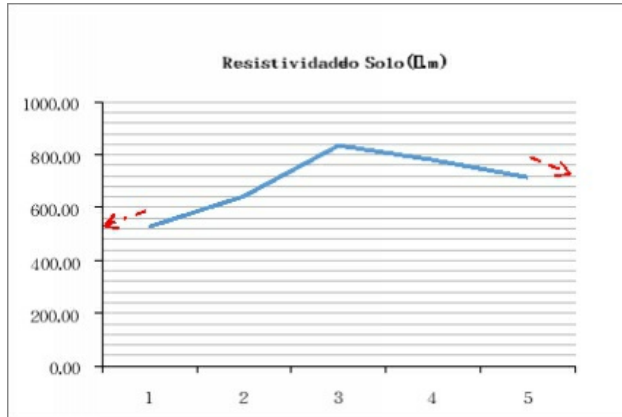


Figura 79: Resistividade do Solo Medição 02 Lateral Direita da Subestação

Para a Medição 01, temos:

- Prolongando-se a curva na possibilidade de encontrarmos a resistividade em uma profundidade tendendo ao infinito (interceptar o eixo das ordenadas, se possível) tem-se:

$$\rho_{s1} = 400 \ \Omega.m$$

- Traçando-se a assíntota à curva de resistividade e prolongá-la até os eixos das abscissas, na obtenção da **Resistividade Superficial** tem-se:

$$\rho_{s21} = 950 \ \Omega.m$$

Para a Medição 02, temos:

- Prolongando-se a curva na possibilidade de encontrarmos a resistividade em uma profundidade tendendo ao infinito (interceptar o eixo das ordenadas, se possível) tem-se:

$$\rho_{s21} = 640 \ \Omega.m$$

- Traçando-se a assíntota à curva de resistividade e prolongá-la até os eixos

das abscissas, na obtenção da **Resistividade Superficial** tem-se:

$$\rho_{22} = 480 \Omega.m$$

Devemos a seguir calcular qual seria a **Resistividade Superficial Equivalente** do solo da **SE**

- Cálculo da relação da Menor pela Maior Resistividade Superficial ρ_{22}/ρ_{21} :

$$\frac{r_{22}}{r_{21}} = \frac{480}{950} = 0,505$$

- M_o de acordo com a Tabela D-1 da NTC-60 CELG: $M_o = 0,8827$

- Cálculo valor da Resistividade Superficial Média $\rho_{sup m}$:

$$r_{sup m} = M_o \times r_1 = (0,8827) \cdot (950) = 838,56 \Omega.m$$

- Cálculo da Resistividade Equivalente ρ_{eq} :

Para calcularmos a Resistividade Equivalente devemos considerar que a malha de aterramento existente foi executada com hastes cobreadas de 6 (seis) metros de profundidade, portanto esta resistividade deve ser obtida nesta profundidade.

$$\rho_{eq} = \frac{L1 + L2 + L3 + L4}{\frac{L1}{\rho1} + \frac{L2}{\rho2} + \frac{L3}{\rho3} + \frac{L4}{\rho4}}$$

Onde L é a profundidade da camada e ρ a resistividade desta camada;
Para os eletrodos distantes de 4 (quatro) metros L = 6m (veja tabela de medições)

Assim a Resistividade Equivalente nas duas medições são:

$$\rho_{eq01} = 569 \Omega.m$$

$$\rho_{eq02} = 722 \Omega.m$$

Cálculo da relação da Menor pela Maior Resistividade Equivalente (ρ_{eq01}/ρ_{eq02}):

$$\frac{r_{eq01}}{r_{eq02}} = \frac{569}{722} = 0,788$$

M_o de acordo com a Tabela D-1 da NTC-60 CELG: $M_o = 0,9593$

Cálculo valor da Resistividade Equivalente Média ρ_{meq} :

$$r_{eq01} = M_o \cdot r_{eq01} = (0,8827) \cdot (722) = 637,31 \Omega.m$$

$$\rho_{meq} = \mathbf{637,31\Omega}$$

- Espessura da camada equivalente d_{eq} em função da Resistividade Média Equivalente: (Valores a serem obtidos nos gráficos 01 e 03)

$$r_{eq01} = 637,31 \Omega.m \text{ @ } d_{eq} = 4,3m$$

- Determinação da resistividade aparente do solo:

- Raio do círculo equivalente à malha de terra da subestação:

$$R = \sqrt{\frac{A}{\rho}} = \sqrt{\frac{2,464m^2}{\rho}} = 28m$$

Em que:

A: área da malha de terra, em m^2

- Coeficiente α dado por:

$$\alpha = \frac{R}{d_{eq}}$$

$$\alpha = 6,51$$

- Coeficiente β dado por:

$$b = \frac{r_{n+1}}{r_{eq}} = \frac{400}{637} = 0,628$$

- Utilizando as curvas do Desenho D-3 da NTC 60 da CELG

$$N = 0,35$$

Portanto a resistividade aparente do solo ρ_s :

$$r_s = N \times r_1 = 0,35 \cdot (637,31) = 223,06 \Omega.m$$

DIMENSIONAMENTO DO CONDUTOR DA MALHA

O condutor da malha de terra é dimensionado considerando as solicitações mecânicas e térmicas devidas às correntes elétricas que ele possa suportar.

DIMENSIONAMENTO MECÂNICO

Considerando a necessidade de suportar esforços mecânicos e eletromagnéticos, tem-se as seguintes bitolas mínimas dos condutores de cobre é de 50 mm² e na malha de aterramento da SE foi utilizado cabos de cobre nú de 70mm².

DIMENSIONAMENTO TÉRMICO

O condutor deve ter uma seção (S) capaz de suportar a circulação de uma corrente máxima (I_f) durante um tempo (t) em que a temperatura se eleve acima de um valor-limite suportável (T_m), considerando uma temperatura ambiente (T_a) e que toda energia térmica fica retida no condutor devido a pequena duração da corrente de curto.

A equação de **Onderdonk**, que permite o cálculo desta seção, é dada por:

$$S = I_f \sqrt{\frac{t \cdot a_r \cdot r_t \cdot 10^4}{TCAP \cdot \ln\left(\frac{k_0 + T_m}{k_0 + T_a}\right)}}$$

Em que:

- S é a seção, expressa em milímetros quadrados (mm^2);
- I_f é a corrente de falta fase-terra, expressa em quiloampères (kA);
- t é o tempo, expresso em segundos (s);
- a_r é o coeficiente térmico de resistividade do condutor a t °C ($^{\circ}\text{C}^{-1}$);
- r_t é a resistividade do condutor de aterramento a t °C, expressa em ohm x centímetro;
- $TCAP$ é o fator de capacidade térmica, em joule por centímetro cúbico vezes graus Celsius;
- T_m é a temperatura máxima suportável, expressa em graus Celsius (°C), conforme Tabela 1 da ABNT NBR 15751:2009;
- T_a é a temperatura ambiente, expressa em graus Celsius (°C);
- $k_0 = 1/a_0$ ou $(1/a_0) - T_r$; é o coeficiente térmico de resistividade do condutor a 0 °C;
- T_r é a temperatura de referência das constantes do material, em graus Celsius (°C).

O valor de T_m é função do tipo de conexão a ser utilizada conforme Tabela 2 ABNT NBR 15751:2009. Os valores de K_f para as conexões de aterramento

mais utilizadas estão listados na Tabela 3 ABNT NBR 15751:2009. Assim, a equação de Onderdonk pode ser simplificada para:

$$S = I_f \times K_f \times \sqrt{t}$$

Em que K_f é a constante para materiais considerando temperatura ambiente (T_a) de 40 °C

Assim, a corrente de falta fase terra considerada é o pior caso de corrente de falta fase terra analisado do sistema, que consiste na corrente de curto circuito fase terra do lado secundário da subestação para uma impedância desprezível, com o sistema de proteção atuando em $t = 0,5s$.

Dados do sistema:

- Potência transformador: 12,00MVA;
- Tensão secundário transformador: 13,80KV;

Considerando $I_f = 15,3kA$ e $t = 0,5 s$, os condutores de cobre e com conexão exotérmica.

$$S = 15,3 \times 5,5 \times \sqrt{0,5} = 81,14 \text{ mm}^2$$

$$S = 81,14 \text{ mm}^2$$

Portanto deveria ser utilizado cabos de 95mm² para a malha de aterramento.

Com a utilização do cabo de 70mm² a princípio foi estabelecido um ponto de fragilidade no sistema de proteção da malha de aterramento. Porém veremos mais adiante se a geometria da malha poderá atenuar este ponto.

GEOMETRIA DA MALHA

A geometria da malha consiste em 11(onze) linhas de 44 metros, 13 (treze) colunas de 32 metros em cabos de cobre nú de 70mm², instalados em valas e 70cm de profundidade e 69 (sessenta e nove) hastes de aterramento e com

hastes de aço cobreadas de 5/8" x 6.000mm (16x3.000mm). A geometria de malha é retangular com dimensões de 56x44 metros, com o anel externo afastado 7,5 metros da cerca divisória.

O comprimento total da malha será:

$$L_t = L_{cubos} + L_{hastes}$$

$$L_t = (11) \times (44) + (13) \times (32) + (6) \times (69) = 1.314 \text{ m}$$

CÁLCULO PRELIMINAR DA RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO

- Profundidade da malha H = 0,7 m

$$R = r_{\text{cubo}} \left[\frac{1}{L_t} + \frac{1}{\sqrt{20} \times 4} \right] + \frac{1}{\delta(1 + H/\sqrt{20} \times 4)}$$

$$R = 637,31 \left[\frac{1}{1314} + \frac{1}{\sqrt{20} \times 2464} \right] + \frac{1}{\delta(1 + 0,7/\sqrt{20} \times 2464)}$$

$$R = 3,35 \Omega$$

Podemos ainda utilizar a seguinte fórmula para ajuste da Resistência da Malha:

$$R = \frac{\rho_{\text{eqm}}}{2\pi L} \cdot \{ \ln 8,4 | L | \} - 1$$

Onde "L" é o maior comprimento da malha e "d" a largura média

$$R = \frac{637,31}{2\pi \cdot 56} \cdot \{ \ln 8,4 | 56 | \} - 1$$

$$R = 1,53 \Omega$$

Assim, na configuração da malha de aterramento da SE, com a Resistividade do Solo encontrada, teremos uma Resistência entre 1,53Ω a 3,35Ω

CÁLCULO DAS TENSÕES PERMISSÍVEIS

Para um sistema de aterramento ser considerado seguro para qualquer condição de defeito, é necessário estabelecer os valores máximos permissíveis para as tensões de passo e toque. Os potenciais toleráveis de passo e de toque são estabelecidos em função do tempo de eliminação do defeito (t) e da resistividade da camada superficial do solo.

Foram considerados dois casos

- a) Defeitos com duração determinada pelo sistema de proteção, com corrente permissível pelo corpo humano
- b) Defeitos de longa duração que não sensibilizam os dispositivos de proteção; a corrente permissível pelo corpo humano (I_{chld})

TENSÃO MÁXIMA DE PASSO PERMISSÍVEL

$$E_p = (R_{ch} + 6 \times r_s \times C) \times \frac{116}{\sqrt{t}}$$

Em que:

- E_p : tensão máxima de passo;
- r_s : é a resistividade do recobrimento da camada superficial;
- t : tempo de duração do choque (s)
- C : fator de redução.

O fator de redução C é calculado pela equação:

$$C = 1 - a \times \frac{1 - \frac{r_1}{r_{sup\sigma}}}{2h_s + a}$$

Onde

- $\rho_{sup\sigma}$ é a Resistividade Superficial Média, já calculado anteriormente
- $r_{sup\sigma} = M_s \times r_1 = (0,8827) \cdot (950) = 838,56 \Omega.m$
- $a = 0,106$ m;
- h_s é a espessura da camada de revestimento superficial (m);

Foi considerado que o tempo de duração do choque o tempo de atuação da proteção de 0,5s. O material do recobrimento da camada superficial considerado foi a brita molhada (pior caso) com espessura de 0,15m, de acordo com a tabela 5 da NBR 15751:2009 $r_s = 3000 \Omega.m$.

$$C = 1 - 0,106 \times \frac{1 - \frac{838,56}{3000}}{2 \times 0,15 + 0,106} = 0,812$$

Portanto:

$$E_p = (1000 + 6 \times 3000 \times 0,812) \times \frac{0,116}{\sqrt{0,5}}$$

$$E_p = 2.561,79 \text{ V}$$

6.2) TENSÃO DE PASSO EXISTENTE NA PERIFERIA DA MALHA

Os maiores valores de tensão de passo são encontrados fora da área da malha, próximo aos condutores periféricos.

$$V_p = \frac{K_s \times K_i \times r_{eqs} \times In}{L_i}$$

Foi considerado a corrente de falta fase terra ($In = 627,6$ A trafo de 15MVA) para tempo de proteção $t=0,5$ conforme a coordenação e seletividade do sistema e os piores índices de K_s e K_i

$$V_p = \frac{(0,4509) \times (1,51) \times 637,31.627,6}{1314 \text{ m}} = 459,64 \text{ V}$$

$$E_p \geq V_p \text{ (Condição satisfeita)}$$

TENSÃO MÁXIMA DE TOQUE PERMISSÍVEL

$$E_i = (R_{co} + 1,5 \times r_s \times C) \times \frac{116}{\sqrt{t}}$$

$$E_i = (1000 + 1,5 \times 8000 \times 0,7635) \times \frac{0,116}{\sqrt{0,5}} = 727,67 \text{ V}$$

TENSÃO DE TOQUE EXISTENTE

A maior tensão de toque quando da circulação de correntes de longa duração entre a malha e o solo pode ser calculada pela seguinte equação:

$$V_t = \frac{K_a \times K_i \times r_{coss} \times I}{L_t}$$

Foi considerado a corrente de falta fase terra ($I_n = 627.6 \text{ A}$) para tempo de proteção $t=0,5$ conforme a coordenação e seletividade do sistema e os piores índices K_a e K_i

$$V_t = \frac{(0,6718) \times (1,51) \times 617,31.627,6}{1314 \text{ m}} = 299,09 \text{ V}$$

$$E_i \geq V_t \text{ (Condição satisfeita)}$$

CORRENTE MÁXIMA DE CHOQUE

Tempo do sistema de proteção, $t=0,5\text{s}$

$$I_{cb} = \frac{116}{\sqrt{t}} = \frac{116}{\sqrt{0,5}} = 164 \text{ mA}$$

CORRENTE DE CHOQUE EXISTENTE DEVIDO À TENSÃO DE PASSO SEM BRITA NA PERIFERIA DA MALHA

$$I_{passb} = \frac{1000 \times V_p}{1000 + 6 \times r_1} = \frac{1000 \times 459,64}{1000 + 6 \times 17,31} = 97,72 \text{ mA}$$

CORRENTE DE CHOQUE EXISTENTE NA PERIFERIA DA MALHA DEVIDO À TENSÃO DE PASSO, COM CAMADA DE BRITA

$$I_{passb} = \frac{1000 \times V_p}{1000 + 6 \times (r_{eqn} + r_s)} = \frac{1000 \times 459,64}{1000 + 6 \times (617,31 + 3000)} = 20,24 \text{ mA}$$

$$I_{passb} \ll I_{cb} \text{ (Condição satisfeita)}$$

CORRENTE DE CHOQUE DEVIDO À TENSÃO DE TOQUE EXISTENTE, SEM BRITA

$$I_{passb} = \frac{1000 \times V_t}{1000 + 1,5 \times r_{eqn}} = \frac{1000 \times 299,09}{1000 + 1,5 \times 17,31} = 155,29 \text{ mA}$$

$$I_{passb} \gg I_{cb}$$

Condição não satisfeita: **a utilização de brita é, portanto, fundamental.**

CORRENTE DE CHOQUE DEVIDO À TENSÃO DE TOQUE EXISTENTE, COM BRITA

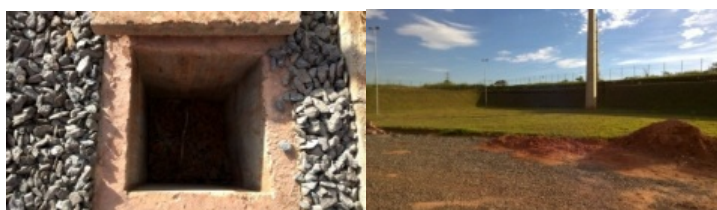
$$I_{passb} = \frac{1000 \times 299,09}{1000 + 1,5 \times (617,31 + 3000)} = 46,54 \text{ mA}$$

$$I_{pacb} \ll I_{cb} \text{ (Condição satisfeita)}$$

MEDIÇÃO DA RESISTÊNCIA DA MALHA DE ATERRAMENTO:

Para a obtenção da Resistência da Malha de Aterramento da SE, fizemos uma medição utilizando o método de interseção de curvas (Método TAGG) em três (03) curvas, como detalhado na planilha anexa a este documento.

O local escolhido para medirmos a resistência da malha foi a partir da caixa de inspeção instalada próxima ao portão principal de acesso da SE com os eletrodos de corrente e tensão instalado em sentido diagonal da SE.



Fotografias 01 e 02: Caixa de inspeção da Malha e terreno onde foram instalados os eletrodos

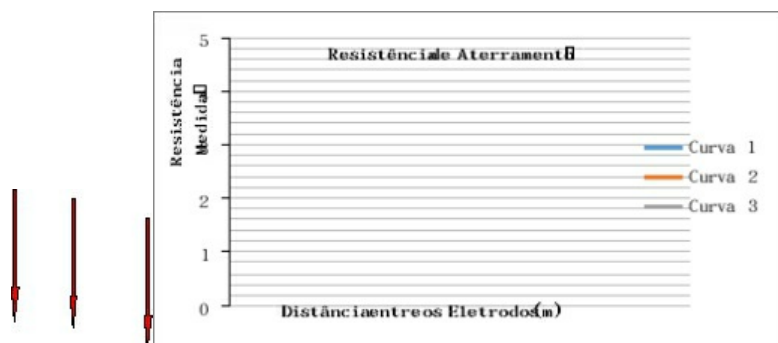


Gráfico 03: Medição da Resistência da Malha de Aterramento SECOSMED

Analisando o Gráfico 03 identificamos três pontos de interseção das curvas:

- curva 01 com eletrodo de corrente a 40 metros de distância,
- curva 02 a 30 metros e curva 03 a 15 metros.

Estes pontos sinalizam que a Resistência da malha de aterramento da SE está entre o valor mínimo de $1,2\Omega$ e um valor máximo de $1,8\Omega$.

Assim podemos com segurança afirmar que a malha da SE possui uma Resistência de Aterramento Média de $1,5\Omega$ (Hum Ohm e cinco décimos).

CONCLUSÃO:

Em nossa vistoria e medições, destacamos que a resistividade do solo, as grandezas elétricas presentes na malha de aterramento da SE e a Resistência da Malha estão de acordo com as normas técnicas vigentes e que estão aptas a operarem com a ampliação de carga projetada - 15MVA.

Ressaltamos que a única não conformidade verificada foi que o cabo de cobre nú utilizado (70mm^2) está no limite da capacidade térmica da SE, e que havendo a possibilidade dos dois transformadores trabalharem simultaneamente (22,5MVA) é recomendado redimensionar estes condutores, ou identificar nova solução para a malha de aterramento.

Quadro Comparativo das Grandezas Elétricas

<i>Grandeza Elétrica</i>	<i>Valor Previsto</i>	<i>Valor Encontrado</i>
<i>Resistência da Malha de Aterramento</i>	<i>1,81 Ω</i>	<i>1,5 Ω</i>
<i>Diâmetro do Condutor de Malha**</i>	<i>95 mm^2</i>	<i>70 mm^2</i>
<i>Resistividade Equivalente do Solo</i>	<i>*</i>	<i>637,31 $\Omega.m$</i>
<i>Profundidade da Camada Equivalente</i>	<i>*</i>	<i>4.3m</i>
<i>Corrente de Falha</i>	<i>15,3KA</i>	<i>15,3KA</i>
<i>Máxima Tensão de Passo</i>	<i>2,56KV</i>	<i>459,64V</i>
<i>Máxima Tensão de Toque</i>	<i>727,67V</i>	<i>299,09V</i>


Corrente Máxima de Toque **164,0mA** **96,72mA**
**** Ponto de não conformidade isolado**


15 BIBLIOGRAFIA

- ABNT – *Instalações elétricas de média tensão de 1,0 kV a 36,2 kV*, NBR 14039:2005.
- ABNT – *Sistemas de Aterramento de Subestações – Requisitos*, NBR-15751-2009.
- BABA, Y.; NAGAOKA, N.; *Modeling of Thin Wires in a Lossy Medium for FDTD Simulations*. IEEE Transactions on Electromagnetics Compatibility, Vol 47, n.1, 2005.
- CELG. Norma Técnica Celg. Critérios para Projetos e Procedimentos para Execuções de Aterramentos de Redes Aéreas e Subestações de Distribuição. NTC-60- 2008.
- FARIAS, V.J.C., *Interpretação de Dados de Polarização Induzida usando o Modelo Fractal para Resistividade Complexa e Imagens Tomográficas*. Tese de Doutorado, UFPA, 2004.
- IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding, IEEE Std 80 2000.
- IDONE, V.P., and ORVILLE, R.E. 1982. Lightning return stroke velocities in the Thunderstorm Research International Program (TRIP). J. Geophys. Res. 87 490315
- KELLER, G.V.; FRISCHKNECHT, F.C., *Electrical Methods in Geophysical Prospecting*: Pergamon Press, Inc., 1966.
- KINDERMANN, G. *Proteção de Sistemas Elétricos de Potência*. 1. ed. Florianópolis: Edição do Autor, 1999. v. 1. 231p
- KINDERMANN, G.; CAMPAGNOLO, J. M., *Aterramento Elétrico*. Editora da UFSC. Florianópolis. 2011.
- KINDERMANN, G.; CAMPAGNOLO, J. M., *Aterramento Elétrico*, 5ª ed. Porto Alegre: Editora Sagra DC Luzzatto, 1995.
- LEGACE, P.J.; Mukhedkar, D.; Hoang, H.H.; Greiss, H., *Evaluation of the Effect of Vertical Faults on the Voltage Distribution around HVD Electrodes using a Supercomputer*. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 5, n.3, 1990.
- LEITE, C. M.; PEREIRA FILHO, M. L., *Técnicas de Aterramentos Elétricos: Cálculos, Projetos e Softwares para Aterramentos Elétricos*. São Paulo: Oficina de Mydia, 1996.
- MAMEDE F, J., *Instalações Elétricas Industriais*. Editora LTC. 8ª Edição, 2010.
- MARANHÃO, C. H. M.; FARIAS, V. J. C.; *Modelagem da Sub-Superfície para o Cálculo de Malha de Aterramento*. Tese de Doutorado, UFPA, 2005.
- NODA, T.; Yokoyama, S., *Thin Wire Representation in Finite Difference Time Domain Surge Simulations*. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 17, n.3, 2002.
- PEREIRA, C. E. M.; ZANETTA JUNIOR, Luiz Cera. *Metodologia para dimensionamento de cabos-guarda em linhas de transmissão de alta tensão*. Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, 2006
- THAPAR, B. Simplified Equations for Mesh and Step Voltages in na AC substation. IEEE Trans. on Power Delivery Vol. 6, N° 2. 1991.

TUMA, E. T.;SANTOS, R. O.,*Análise do Comportamento Transitório dos Parâmetros de Sistema de Aterramento Usando o Método FDTD*. UFPA, 2005.

VISACRO FILHO, S., *Aterramentos Elétricos: Conceitos Básicos, Técnica, Medição e Instrumentação, Filosofias de Aterramento*, 1ª ed., São Paulo: Editora ArtLiber, 2002.

 NÉLIO FLEURY possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Goiás (1982), especialização em Engenharia de Segurança do Trabalho pela Universidade Federal de Goiás (1998) e mestrado em Engenharia Elétrica e de Computação pela Universidade Federal de Goiás (2006). Ex-secretário municipal da Prefeitura Municipal de Aparecida de Goiânia, ex-presidente da Associação Goiana de Engenheiros de Segurança do Trabalho – AGEST-GO e professor da Pontifícia Universidade Católica de Goiás. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, atuando principalmente nos seguintes temas: engenharia, segurança, perícias, avaliações, tecnologia, planejamento, eletricidade e gestão pública. Atuou como Presidente da Associação Brasileira de Engenheiros Eletricistas - ABEE Nacional.

 LEONARDO GUEDES é Doutor e Mestre em Engenharia Elétrica e de Computação pela Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP (1996, 1994). É professor titular da PUC-Goiás, e da Universidade Federal de Goiás. Tem experiência na área de Gestão, com ênfase em Planejamento e Gerenciamento de Projetos em Tecnologia, atuando principalmente nos seguintes temas: planejamento e gestão industrial, computação aplicada e sistemas de comunicação. Atuações de destaque: Presidente do Conselho Superior da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás - FAPEG; Presidente da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás - FAPEG; Presidente da Associação Brasileira de Engenheiros Eletricistas - Sessão Goiás - ABEE-GO; Vice-Presidente do Conselho Regional de Engenharia, Arquitetura e Agronomia - Regional Goiás - CREA-GO; Diretor Executivo da Fundação Aroeira (PUC Goiás); Membro do Conselho Diretor da Rede Centro Oeste de Pós-Graduação, Pesquisa e Inovação PRÓ-CENTRO OESTE (Portaria Interministerial MCT-MEC 1.038/2009); Diretor da Associação Comercial e Industrial e de Serviços de Goiás (ACIEG).



-
- [1] Pela curva percebe-se que o solo possui três camadas.
 - [2] Curva de índice 3 é a que mais se identifica portanto $C_1 = 3$
 - [3] Polo 1 da curva " $\rho \times a$ " coincide com o polo das Curvas Auxiliares.