

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

ARNALDO FLECK E SILVA

PROJETO DE DIPLOMAÇÃO

ANÁLISE DO ATERRAMENTO DE SUBESTAÇÕES

Porto Alegre

2012

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

ANÁLISE DO ATERRAMENTO DE SUBESTAÇÕES

Projeto de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para Graduação em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro

Porto Alegre

2012

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

ARNALDO FLECK E SILVA

ANÁLISE DO ATERRAMENTO DE SUBESTAÇÕES

Este projeto foi julgado adequado para fazer jus aos créditos da Disciplina de “Projeto de Diplomação”, do Departamento de Engenharia Elétrica e aprovado em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: _____

Prof. Dr. Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro, UFRGS

Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre,

Brasil

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro, UFRGS

Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre,

Brasil

Eng. Aurélio Ferrer Toscano de Brito, CDP Engenharia Ltda.

Prof. Dr. Sérgio Luis Haffner, UFRGS

Doutor pela Universidade Estadual de Campinas – Campinas, Brasil

Porto Alegre, Junho de 2012

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho ao meu pai, Jorge Tarcisio Silva das Silva (*in memoriam*), que me ensinou a ser a pessoa que sou hoje, e foi exemplo de vida pra mim.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família, mãe e irmãos que me derem suporte e todas as condições para chegar até aqui.

À minha namorada, Renata, que me ajudou muita nesta etapa final de curso.

Ao meu orientador, pela ajuda, paciência e dedicação para a realização deste trabalho e também durante todo o curso.

Aos meus amigos do colégio e da UFRGS que me aguentaram todos esses anos de muitos estudos e noites sem dormir.

Por fim, a UFRGS que apesar das dificuldades, consegue manter uma excelente universidade, dando um ensino de qualidade a todos os alunos.

RESUMO

O aumento constante do sistema elétrico brasileiro resulta na necessidade de crescimento nos sistemas de geração, transmissão, distribuição e conseqüentemente, nas subestações de energia. A construção de novas subestações ou mesmo a reforma e ampliação das subestações existentes deixa evidente a necessidade de um avanço nas técnicas de medições e projetos dos sistemas de aterramento de subestações. Atualmente existem métodos eficientes para a medição de resistividade do solo e resistência de terra, mas que muitas vezes esbarram em dificuldades para a sua realização. Essas dificuldades passam de desconhecimentos técnicos de profissionais, dificuldades de aquisição e uso dos equipamentos específicos para as medições, até limites físicos impostos pela grande urbanização em torno das subestações. O conhecimento profundo de todos os dados envolvidos no sistema de aterramento de uma subestação, a análise e interpretação destes dados e saber todos os equipamentos e métodos envolvidos em seu projeto são requisitos para um profissional poder realizar o projeto de um sistema de aterramento eficiente e seguro. O desenvolvimento de novas técnicas de medição de resistência de aterramento é parte fundamental neste processo de ampliação das subestações, pois assim haverá uma maior precisão nos dados medidos, um tempo menor necessário para as medições, além de uma economia de custos em todo o processo.

Palavras-chave: Aterramento, Resistividade do Solo, Subestação, Medição, Segurança.

ABSTRACT

The constant increase of the Brazilian electrical system results in the need for growth in the generation, transmission, distribution and consequently on the power substations. The construction of new substations or the reform and expansion of existing substations makes clear the need for an improvement on the measurement techniques and projects of grounding systems of substations. Currently there are efficient methods for measuring soil resistivity and ground resistance, but they often run into difficulties in its implementation. These difficulties are lack of technical professionals, difficulties in the acquisition and use of specific equipment for measurements up to physical limits imposed by the great urbanization around the substation. Profound knowledge of all data involved in the grounding system of a substation, analysis and interpretation of data and know all the equipment and methods involved in your project are requirements for a professional able to perform the project of a efficiently and safely grounding system . The development of new techniques for measuring ground resistance is a key part in this process of expansion of substations, because then there will be a more accurate measurement data, a shorter time required for measurements, in addition to cost savings throughout the process.

Keywords: Ground, Soil Resistivity, Substation, Measurement, Safety.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	13
1 CONTEXTO DO TRABALHO	14
2 ATERRAMENTO	15
2.1 ATERRAMENTO DE SUBESTAÇÃO	16
3 CONCEITOS GERAIS	18
3.1 RESISTIVIDADE DO SOLO.....	18
3.1.1 Influência da Umidade	19
3.1.2 Influência da Temperatura.....	20
3.1.3 Influência da Estratificação	21
3.2 RESISTIVIDADE APARENTE DO SOLO.....	22
3.3 NÍVEIS DE SEGURANÇA	23
3.3.1 Potencial de Toque	24
3.3.2 Potencial de Passo	24
4 CARACTERÍSTICAS GERAIS	27
4.1 TIPOS DE CABOS	27
4.2 TIPOS DE SOLDA	28
4.3 LIMITES DA SUBESTAÇÃO	29
4.4 HASTES DE ATERRAMENTO	32
4.5 SUB-MALHA	32
4.6 PROGRAMAS COMPUTACIONAIS	33
4.6.1 CYMEGRD [16]	33
4.6.2 TECAT V PRO	34
4.6.3 CDEGS.....	35
5 MEDIÇÃO DE RESISTIVIDADE DO SOLO	37
5.1 ÁREAS SEM SUBESTAÇÃO	37
5.2 ÁREAS COM SUBESTAÇÃO	40
6 ESTRATIFICAÇÃO DO SOLO	45
7 RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO	49
7.1 SUBESTAÇÃO DESERNEGIZADA	50
7.2 SUBESTAÇÃO ENERGIZADA	51
7.2.1 Altas Correntes.....	52
7.2.2 Alta Frequência	54

7.2.2.1	Método convencional reduzido [11].....	59
7.2.2.2	Método DDPprox [11]	60
7.3	TESTES EM CAMPO [11].....	63
8	ANÁLISE DAS METODOLOGIAS	67
	CONCLUSÃO	68
	REFERÊNCIAS	70

LISTAS DE QUADROS

QUADRO 1 : TIPOS DE SOLO E RESISTIVIDADE [1].....	19
QUADRO 2 : RESISTIVIDADE DE UM SOLO PELA UMIDADE [1].....	20
QUADRO 3 : VARIAÇÃO DA RESISTIVIDADE PELA TEMPERATURA [1]	20
QUADRO 4 : : DADOS OBTIDOS EM CAMPO E CALCULADOS [11].....	64

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - EXEMPLO DE UMA QUINA DE UMA REDE DE ATERRAMENTO DA SUBESTAÇÃO CANOAS 3	17
FIGURA 2: RESISTIVIDADE X TEMPERATURA [1]	21
FIGURA 3 : ESTRATIFICAÇÃO DO SOLO EM DUAS CAMADAS [1].....	22
FIGURA 4 : EXEMPLO DE UM PERFIL DO POTENCIAL NO SOLO [9]	26
FIGURA 5 : CABO DE COBRE NU [21]	27
FIGURA 6 : SOLDA EXOTÉRMICA [21]	29
FIGURA 7 : CERCA METÁLICA NOS LIMITES DA MALHA DE TERRA [7]	30
FIGURA 8 : CERCA METÁLICA FORA DOS LIMITES DA MALHA DE TERRA [7]	31
FIGURA 9 : HASTE DE ATERRAMENTO [21]	32
FIGURA 10 : SUB-MALHA	33
FIGURA 11 : MÉTODO DE WENNER [5].....	38
FIGURA 12 : DIMENSÕES DE MEDIÇÃO PRÓXIMA À MALHA DE TERRA	42
FIGURA 13 : CURVA P X A [5].....	45
FIGURA 14 - M0 EM FUNÇÃO DE P2/P1	46
FIGURA 15 : SOLO ESTRATIFICADO EM DUAS CAMADAS [1]	46
FIGURA 16 - CURVA DE RESISTIVIDADE APARENTE [5]	48
FIGURA 17 : CIRCUITO PARA MEDIÇÃO DA RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO [6].....	49
FIGURA 18 - MODELAGEM DO CIRCUITO PARA MEDIÇÃO [9]	50
FIGURA 19 : CURVA DO POTENCIAL DE PATAMAR DO SOLO [6].....	51
FIGURA 20 : INFLUÊNCIA DA MALHA NA MEDIÇÃO DA RESISTIVIDADE DO SOLO [6].....	52
FIGURA 21 : CIRCUITO DE INJEÇÃO DE CORRENTE [12]	53
FIGURA 22 : COMPONENTES DAS LIGAÇÕES PARA MEDIÇÕES EM ALTA CORRENTE [10] ...	54
FIGURA 23 - ESQUEMA SIMPLIFICADO DA MEDIÇÃO [6]	55
FIGURA 24 : METODOLOGIA DDPPROX APLICADA A MALHAS DE ATERRAMENTO COM CONFIGURAÇÃO CONHECIDA [11].....	62
FIGURA 25 : METODOLOGIA DDPPROX APLICADA A MALHAS DE ATERRAMENTO COM CONFIGURAÇÃO DESCONHECIDA [11].....	63
FIGURA 26 : CURVAS OBTIDAS EM MEDIÇÕES NO CAMPO [11]	64

LISTA DE ABREVIATURAS

SE: Subestação

V: Tensão elétrica (Volts)

kV: Unidade de potencial (Quilovolts)

I: Corrente Elétrica

Hz: Unidade de frequência (Hertz)

Ω : Unidade de resistência elétrica (Ohm)

Kg: Unidade de massa (Quilograma)

t: Tempo (em segundos)

s: Unidade de tempo (segundos)

m: Unidade de distância (metros)

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

NBR: Denominação de norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas

V_{toque} : Potencial de toque

V_{passo} : Potencial de passo

ρ : Resistividade do solo

ρ_s : Resistividade superficial do solo

ρ_a : Resistividade aparente do solo

I_{malha} : Corrente elétrica da malha

$^{\circ}\text{C}$: Unidade de temperatura (grau Celcius)

f: Frequência (Hz)

LT: Linha de Transmissão

DMG: Distância Média Geométrica

RMG: Raio médio geométrico

AT: Alta Tensão

E_c : Eletrodo de corrente

E_p : Eletrodo de potencial

R: Resistência Elétrica (Ω)

INTRODUÇÃO

O sistema elétrico brasileiro está crescendo constantemente, cada vez necessitando de mais usinas geradoras, linhas de transmissão, de distribuição e também subestação de energia elétrica. Para o bom funcionamento e confiabilidade de um sistema elétrico, as subestações são essenciais. E para o funcionamento adequado delas, o sistema de aterramento é uma parte fundamental.

Uma subestação precisa de um sistema de aterramento adequado, bem dimensionado, para proteger os equipamentos e as pessoas que trabalham no local e permitir o funcionamento adequado dos sistemas de proteção.

O cálculo, dimensionamento e projeto do sistema de aterramento de uma subestação é um processo extremamente complexo, que depende de muitas variáveis, como o tipo de solo, umidade, temperatura, potência, tensão, corrente, etc. Todos esses aspectos devem ser levados em consideração ao fazer um projeto de um sistema de aterramento.

Um fator que influencia a obtenção de dados para o projeto de aterramento é a existência ou não de uma malha de terra no local a ser feita a medição e projeto, como no caso de ampliação de uma subestação. A existência de uma subestação ativa pode mascarar e alterar os dados da resistividade do solo, os quais são essenciais para o projeto, quando feitos por métodos tradicionais, como o método de Wenner. Por isso são necessários métodos e equipamentos específicos para essas situações.

Este trabalho aborda as principais características de medição e cálculo de um sistema de aterramento de uma subestação.

1 CONTEXTO DO TRABALHO

Este trabalho visa mostrar e exemplificar os dados, características e suas influências no sistema de aterramento de uma subestação.

A motivação deste trabalho vem da dificuldade de encontrar livros e matérias didáticos específicos sobre aterramento de subestações. A maioria dos matérias que tratam deste assunto são anais de seminários e convenções, artigos, partes de livros e normas internacionais (como a IEEE STD 80), e não em um livro que aborde as principais características do aterramento de uma subestação.

Também foi constatado durante o curso de Engenharia Elétrica a falta de profissionais especializados na área. E foi observado alguns erros de conhecimentos básicos sobre o sistema de aterramento de uma subestação, que poderiam ser superados caso houvesse mais engenheiros eletricitas com conhecimento específico na área.

Com este trabalho espera-se reunir as principais características necessárias para o entendimento do sistema de aterramento de uma subestação de energia em um único documento.

2 ATERRAMENTO

A palavra aterramento se refere à terra propriamente dita ou a uma grande massa que se utiliza em seu lugar. O aterramento é o fio ou a barra, normalmente feito de cobre, onde passa a corrente elétrica para o solo. Quando se diz que algo está aterrado, significa que um dos seus elementos está propositalmente ligado à terra.

O “terra” é um conector que possui potencial igual a 0 (zero) volt absoluto, ou seja, seu valor não se altera. Desta forma, ele é o responsável por escoar a corrente elétrica de equipamentos e sistemas, pois toda carga eletrostática que se acumula neles é descarregada para a terra e tem como objetivo manter a tensão em relação à terra dentro de limites previsíveis. O aterramento fornece um caminho para a circulação de corrente quando há uma ligação indesejada entre condutores vivos, descargas elétricas, assim diminuindo o risco de choque elétrico em pessoas e protegendo equipamentos e sistemas elétricos.

Já o objetivo do aterramento dos sistemas elétricos é proteger as pessoas e os equipamentos contra um curto-circuito na instalação, além de oferecer um caminho seguro, controlado e de baixa impedância em direção à terra para as correntes induzidas por descargas atmosféricas.

Na questão da segurança pessoal, a conexão dos equipamentos elétricos ao sistema de aterramento permite que, caso ocorra uma falha na isolação dos equipamentos, a falta passe através do condutor de aterramento ao invés de percorrer o corpo de uma pessoa que toque o equipamento. O aterramento possibilita um controle das tensões desenvolvidas no solo (passo e toque) quando um curto-circuito fase-terra retorna pela terra para a fonte próxima ou quando ocorre uma descarga atmosférica no local e também escoar as cargas estáticas acumuladas em estruturas, suportes e carcaças dos equipamentos.

O sistema de aterramento, ao oferecer um percurso de baixa impedância de retorno para a terra da corrente de falta, torna possível que os sistemas de proteção possam atuar rapidamente e de forma segura, assim protegendo os equipamentos da subestação.

2.1 ATERRAMENTO DE SUBESTAÇÃO

Existem muitas maneiras de fazer o aterramento de um sistema elétrico, que pode ser uma haste, diversos tipos de placas e também as mais diversas configurações de cabos enterrados no solo.

Para o caso mais específico de subestações são utilizadas redes de terra, ou seja, um conjunto de cabos de cobre enterrados no solo formando, normalmente, um quadriculado com esses cabos. O tamanho e a configuração exata destas redes de terra variam para cada subestação, pois para a sua definição são necessários vários dados específicos. Esses dados são:

- resistividade do solo;
- resistividade superficial do solo;
- corrente de curto-circuito máxima entre a fase e a terra;
- área da malha;
- valor máximo da resistência da terra;
- tempo de defeito para a máxima corrente de curto-circuito fase-terra.

A subestação por ser um sistema elétrico complexo de alta potência, com tensões e correntes elevadas, e também por ocupar uma área grande necessita de um sistema de aterramento igualmente complexo para manter os níveis de segurança dentro do esperado. A configuração de aterramento mais utilizada é a junção das técnicas mais usuais (hastes, rede de terra e placas) em um único sistema.

A parte principal é a rede de terra, que é um quadriculado de cabos de cobre enterrados no solo, em uma área um pouco maior que a subestação. Todos os equipamentos e o sistema de proteção contra descargas atmosféricas são ligados à rede de terra. Já foi comprovado por medições que a corrente tem tendência a escoar para as margens e cantos da malha de aterramento, por isso é recomendado o arredondamento de todos os cantos da rede de terra [1].

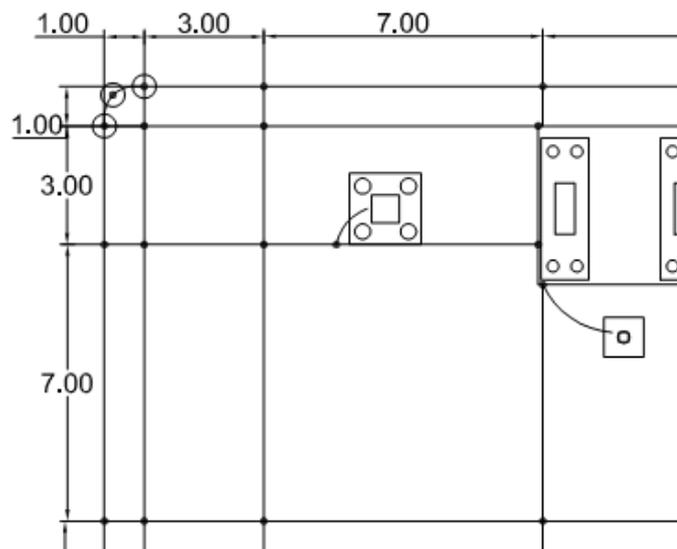


Figura 1 - Exemplo de uma quina de uma rede de aterramento da Subestação Canoas 3

Para ajudar o escoamento da corrente à terra também é preciso instalar hastes de cobre junto à rede de terra. Estas hastes devem ser colocadas por toda periferia da rede e também junto ao aterramento de alguns equipamentos, como os transformadores de corrente, disjuntores, seccionadoras e transformador de força.

Dependendo das características do solo e da subestação também é recomendada a utilização de placas de aterramento enterradas no solo, junto às caixas de operação de alguns equipamentos, como as seccionadoras.

3 CONCEITOS GERAIS

O sistema de aterramento de uma subestação é composto de vários aspectos, englobando muitos dados e características tanto elétricas como também de conhecimentos específicos de outras áreas, como as do solo. Assim, é necessário ter o conhecimento e a influência de todos os aspectos que compõem o sistema de aterramento.

3.1 RESISTIVIDADE DO SOLO

Um dos fatores mais importantes para o projeto de uma rede de terra é o conhecimento das características do solo, principalmente da sua resistividade elétrica. O solo pode ser considerado como um condutor através da qual a corrente elétrica pode dissipar-se.

A resistividade do solo pode variar muito de acordo com as características principais de cada solo (conforme exemplificado no quadro 1).

Entre os fatores, destacam-se:

- tipo de solo;
- mistura de diversos tipos de solo;
- solos compostos por camadas estratificadas com profundidade e materiais diferentes;
- teor de umidade;
- temperatura;
- compactação e pressão;
- composição química e concentração de sais dissolvidos na água.

TIPO DE SOLO	RESISTIVIDADE (Ωm)
Lama	5 a 100
Solos aráveis	50 a 500
Argila	300 a 5000
Areia	1000 a 8000
Calcário	500 a 5000
Granito e Arenito	100 a 10000
Basalto	10000 a 20000

Quadro 1 : Tipos de solo e resistividade [1]

As diversas combinações acima resultam em solos com características diferentes e, assim, com valores de resistividade diferentes.

Para determinar a resistividade do solo é necessário fazer medições no terreno, para depois obter a resistividade aparente do solo através da estratificação dele, e assim, ter os dados necessários para projetar a rede de terra. A resistividade aparente (ρ_a) é a resistividade vista pelo sistema de aterramento em integração com o solo, considerada a profundidade atingida pelo escoamento das correntes elétricas.

3.1.1 Influência da Umidade

A umidade do solo faz com que a resistividade dele sofra alterações. Esta variação ocorre, pois uma umidade maior faz com que os sais presentes no solo se dissolvam, formando um meio eletrolítico favorável à passagem de corrente iônica. Assim, um mesmo tipo de solo, com uma concentração de umidade diferente, apresenta uma grande variação em sua resistividade.

Pode-se notar que a resistividade varia bastante com a umidade no solo. Com isso conclui-se que a resistividade acompanha os períodos de chuva e seca das regiões, melhorando consideravelmente em períodos chuvosos, conforme se verifica no quadro que segue.

Índice de Umidade (% por peso)	RESISTIVIDADE (Ωm) (solo arenoso)
0,0	10000000
2,5	1500
5,0	430
10,0	185
15,0	105
20,0	63
30,0	42

Quadro 2 : Resistividade de um solo pela umidade [1]

3.1.2 Influência da Temperatura

A diferença da temperatura do solo também influencia na resistividade do solo, mas a temperatura não é tão direta como a variação na umidade. As maiores diferenças na resistividade por causa da temperatura acontecem quando esta se encontra próxima dos 100°C, ou seja, em estado de vaporização, deixando o solo mais seco, e assim elevando o valor de sua resistividade.

A outra grande influência, conforme quadro 3 e figura 2, é quando a temperatura atinge um valor próximo ou abaixo de 0°C (por ser quando a água se transforma em gelo), tendo uma mudança brusca no estado de suas ligações com uma maior concentração molecular, tornando o solo mais seco e aumentando a sua resistividade.

Temperatura (°C)	RESISTIVIDADE (Ωm) (solo arenoso)
20	72
10	99
0 (água)	138
0 (gelo)	300
-5	790
-15	3300

Quadro 3 : Variação da resistividade pela temperatura [1]

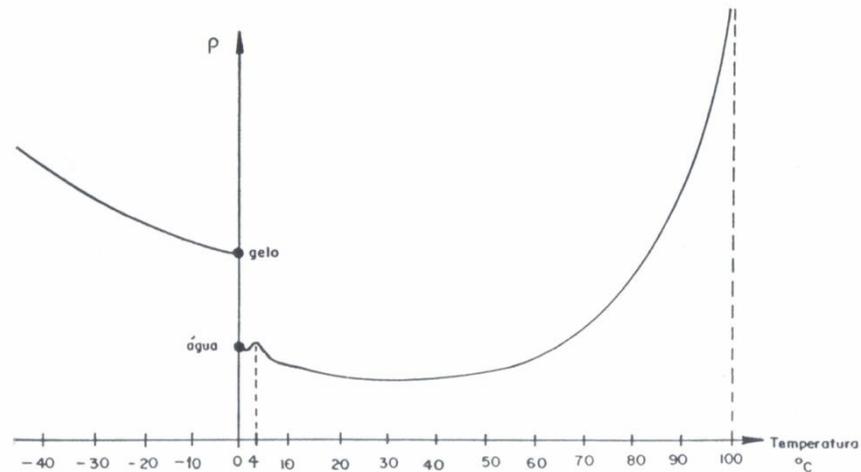


Figura 2: Resistividade X Temperatura [1]

3.1.3 Influência da Estratificação

Os solos, normalmente, não são homogêneos, mas constituídos por várias camadas de resistividade e profundidade diferentes, bem como diversas formações geológicas que são, em geral, horizontais e paralelas a superfície do solo.

Com isso é feita a estratificação do solo em camadas horizontais, na maioria das vezes em duas (representação gráfica a seguir). Assim podemos saber o comportamento dos fluxos de dispersão das correntes em um solo heterogêneo em torno do aterramento.

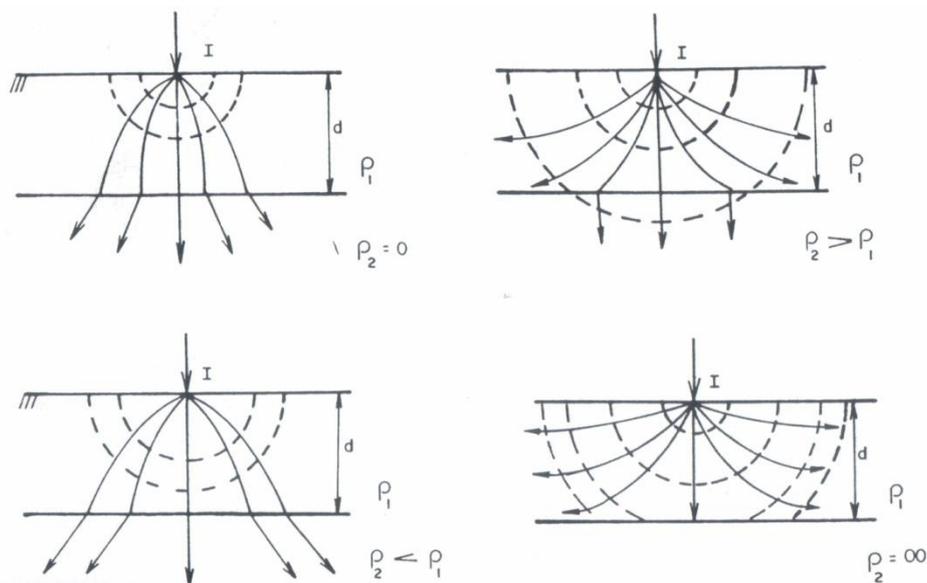


Figura 3 : Estratificação do solo em duas camadas [1]

3.2 RESISTIVIDADE APARENTE DO SOLO

A resistividade aparente é aquela vista pelo sistema de aterramento em integração com o solo, considerada a profundidade atingida pelo escoamento das correntes elétricas. Assim, colocando o mesmo sistema de aterramento em solos distintos, ele terá resistências elétricas diferentes.

O escoamento da corrente elétrica do sistema de aterramento para o solo depende principalmente da composição deste e das suas respectivas camadas, bem como da geometria e do tamanho do sistema de aterramento.

Como pode-se notar, a resistividade do solo depende de muitos fatores, sendo alguns envolvendo outras áreas além da engenharia elétrica, como geologia e clima. Ter o conhecimento da influência destes fatores na resistividade do solo é de suma importância para a realização de um projeto de aterramento eficiente.

3.3 NÍVEIS DE SEGURANÇA

O principal objetivo de um sistema de aterramento de uma subestação é de manter os níveis de segurança para os equipamentos e principalmente para as pessoas. Esses níveis são as diferenças de potenciais que podem ocorrer na subestação devido a um curto-circuito. O aterramento deve ser dimensionado para manter esses níveis num limite suportável pelo ser humano e, assim, evitar a fibrilação ventricular do coração que pode levar uma pessoa à morte. Os potenciais considerados são o Potencial de Toque e o Potencial de Passo.

O choque elétrico em uma pessoa causa-lhe várias perturbações, que dependem de:

- percurso da corrente elétrica;
- intensidade da corrente elétrica;
- tempo de duração do choque elétrico;
- frequência da corrente elétrica;
- tensão elétrica;
- estado da umidade da pele;
- condições orgânicas do indivíduo.

Já as perturbações são:

- parada respiratória;
- fibrilação ventricular e conseqüente parada cardíaca;
- queimaduras profundas causando necrose do tecido;
- morte.

Por isso é muito importante o cálculo das diferenças de potencial de passo e de toque que podem ocorrer numa subestação para assim ter um nível de segurança para as pessoas. Após pesquisa, Charles Dalziel concluiu que 99,5% das pessoas com peso de 50 kg ou mais podem suportar, sem a ocorrência de fibrilação ventricular, a corrente elétrica determinada pela expressão [1] [7]:

$$I_{choque} = \frac{0.116}{\sqrt{t}}$$

Sendo:

$$0.03s \leq t \leq 3s$$

I_{choque} = Corrente pelo corpo humano, limite para não causar fibrilação (ampéres)

t = Tempo de duração do choque (segundos)

Esta expressão é usada para a obtenção do limite permissível e aceitável de corrente, para que não ocorra fibrilação, durante o tempo em que a pessoa fica submetida à tensão de toque ou passo.

3.3.1 Potencial de Toque

É a diferença de potencial entre o ponto da estrutura, situado ao alcance da mão de uma pessoa e um ponto no chão situado a 1 metro da base da estrutura. O potencial de toque máximo permissível entre a mão e o pé para não causar fibrilação ventricular é o produzido pela corrente limite de Dalziel. Assim, obtém-se [1] [7]:

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

Onde:

ρ_s = Resistividade da brita (Ωm)

C = fator de redução que depende da camada de recobrimento

3.3.2 Potencial de Passo

Potencial de passo é a diferença de potencial existente entre os dois pontos situados no chão e distanciados de 1 metro (para pessoas), devido à passagem de corrente de curto-circuito pela terra. As tensões de passo ocorrem quando aparecem diferenças de potencial entre os membros de apoio (pés). Isto pode acontecer quando os membros se encontrarem sobre linhas equipotenciais diferentes. A expressão para o potencial de passo máximo suportado pelo ser humano é [1] [7]:

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

Onde:

ρ_s = Resistividade da brita (Ωm)

C = fator de redução que depende da camada de revestimento

Como a área da subestação é a mais perigosa, o solo é revestido por uma camada de brita, normalmente de 10 cm. Esta camada confere maior qualidade no nível de isolamento dos contatos dos pés com o solo, pois apresenta uma resistividade alta. Para o cálculo dos potenciais é usado o valor da resistividade da brita (ρ_s) úmida.

$$\rho_s = 3000\text{m}\Omega$$

Esta camada de brita representa uma estratificação adicional com a camada superficial do solo. Portanto deve-se fazer uma correção, utilizando o fator de redução, que é dado, de forma simplificada, por [1] [7]:

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

Onde:

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

ρ_1 = resistividade da primeira camada (Ωm)

ρ_s = resistividade do revestimento da camada superficial (Ωm)

h_s = espessura da camada de revestimento superficial (m)

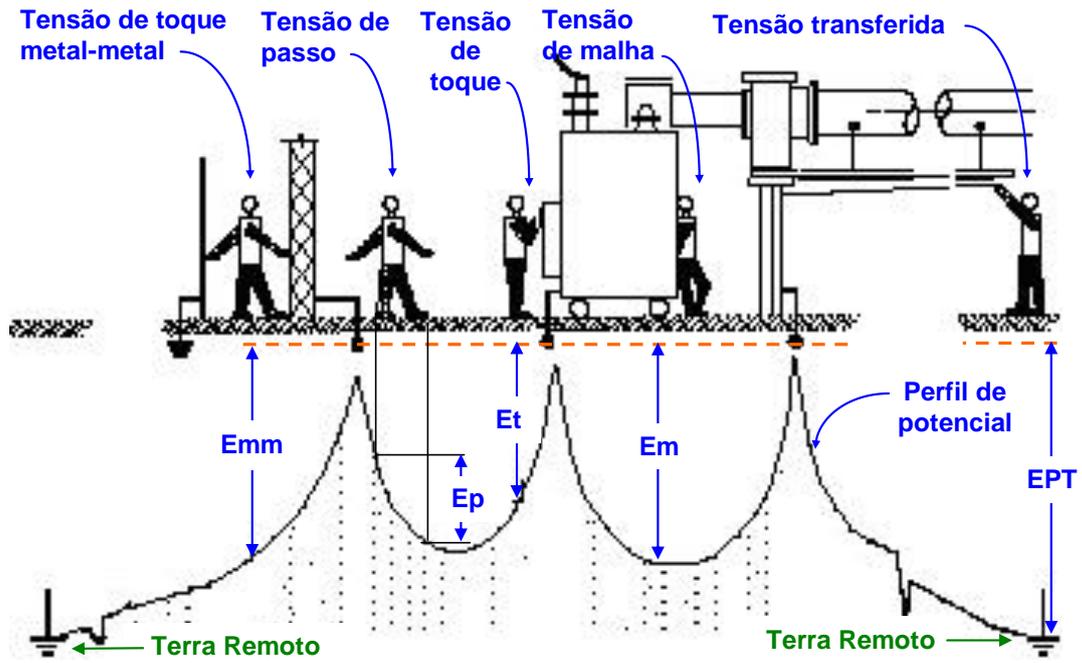


Figura 4 : Exemplo de um perfil do potencial no solo [9]

4 CARACTERÍSTICAS GERAIS

Por ser um sistema complexo, o aterramento de uma subestação é constituído por vários tipos de materiais diferentes. Para a realização de um projeto de boa qualidade é necessário ter conhecimento de todos os tipos de materiais, peças e equipamentos utilizados.

4.1 TIPOS DE CABOS

A rede de aterramento é composta principalmente por um quadriculado de cabos de cobre nu (representado na figura 5). É utilizado este tipo de cabo, pois ele apresenta ótima condutividade elétrica, boa resistência mecânica e também é resistente à corrosão.

Em relação ao cabo, é muito importante dimensionar adequadamente seu diâmetro, para que ele suporte adequadamente as altas correntes de um possível curto-circuito na subestação.

Segundo as normas técnicas brasileiras, o diâmetro mínimo de um cabo de aterramento de uma subestação deve ser de 50 mm^2 , mesmo que os cálculos indiquem um diâmetro menor. Mas mesmo assim, algumas concessionárias de energia possuem normas mais rígidas para garantir os níveis de segurança, como por exemplo a CEEE (Companhia Estadual de Energia Elétrica), que utiliza como diâmetro mínimo o valor de 70 mm^2 .



Figura 5 : Cabo de cobre nu [21]

4.2 TIPOS DE SOLDA

Todos os cruzamentos dos cabos da rede de terra, as ligações com as hastes e com os cabos que fazem conexão com os equipamentos devem ser soldados. A escolha do tipo de solda a ser utilizada é muito importante, pois se for feita uma solda de má qualidade pode haver o comprometimento da circulação de corrente, alterando os valores das tensões de passo e toque na subestação.

A principal característica a ser observada na solda é a temperatura máxima que ela suportaria durante um surto de corrente. Por questões de segurança, normalmente é usado o tipo de solda exotérmica, que resiste a uma temperatura máxima de até 850°C, sendo suficiente para suportar elevados surtos de correntes sem se romper [1] [21].

A soldagem exotérmica é uma técnica usada para criar uma conexão permanente entre dois componentes metálicos, Tratando-se de uma reação química que gera calor, conhecida como uma reação exotérmica. Este processo é muito bom para a durabilidade do vínculo produzido e para a preservação da boa condutividade elétrica entre os cabos [21].

Soldas formadas por esse método apresentam características particularmente úteis, como o método de solda exotérmica que forma ligações moleculares permanentes entre os materiais. Estas ligações não se soltam com o tempo, nem se corroem a uma taxa diferente do que os componentes unidos. Outros tipos de solda por pressão, por outro lado, são altamente suscetíveis ao afrouxamento e à corrosão.

Este tipo de solda normalmente apresenta boa resistência mecânica. Por estas razões a solda exotérmica é recomendada e usada para realizar as conexões entre os elementos de um sistema de aterramento de uma subestação. A seguir, verifica-se uma imagem de como fica uma solda exotérmica na prática.



Figura 6 : Solda Exotérmica [21]

4.3 LIMITES DA SUBESTAÇÃO

Os limites do terreno da subestação devem ter uma atenção grande, pois pode haver a circulação de pessoas sem conhecimento técnico junto às mesmas. A área do terreno normalmente é separada por grade ou muros, pois tanto em subestação no meio rural, como nas cidades pode ocorrer a curiosidade de pessoas passando pelo local, a tentativa de atos de vandalismo ou mesmo algum tipo de reparo ou manutenção de trabalhadores da concessionária da subestação.

O cercamento da área por cerca metálica é a maneira mais rápida e barata a ser feita. A existência de material condutor na cerca pode ocasionar o risco de tensão de toque na mesma, motivo pelo qual deve-se incluí-la no sistema de aterramento de subestação.

Existem algumas alternativas para o aterramento da cerca, que depende da escolha do projetista e da sua localização, que pode ser dentro ou fora do limite da malha de terra. Caso esteja dentro dos limites da malha de terra, ela pode ser aterrada ligando-se diretamente à malha de terra, mantendo assim os níveis de segurança para potencial de toque na cerca metálica, como se pode ver na figura 7 [7].

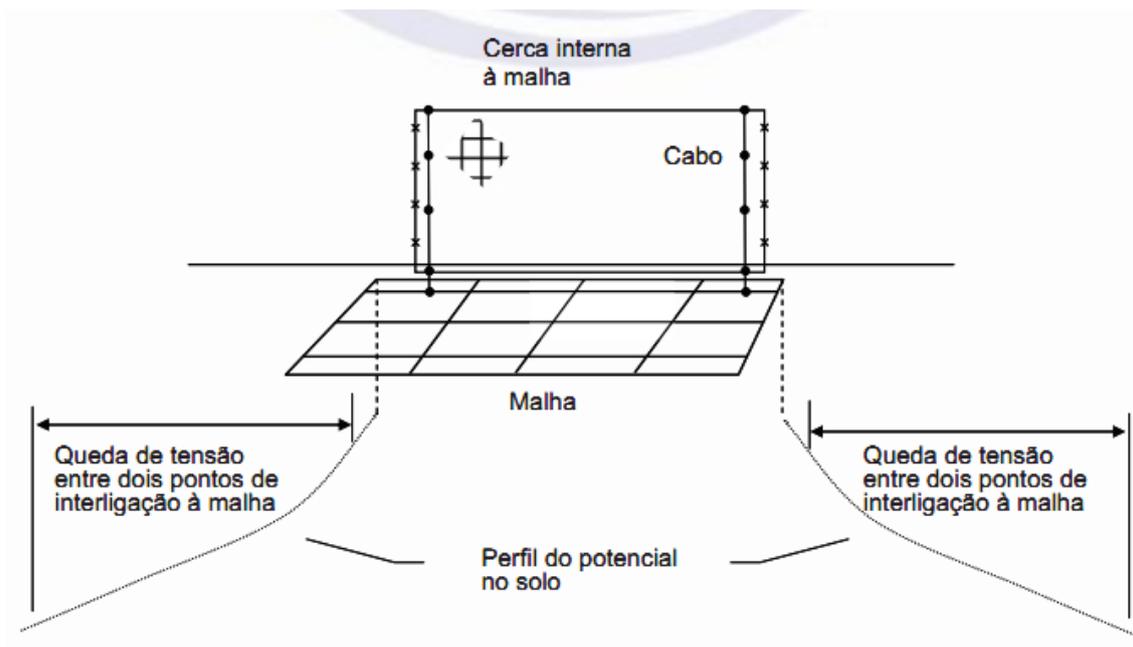


Figura 7 : Cerca metálica nos limites da malha de terra [7]

Nos casos em que se encontra fora dos limites da rede de terra, a cerca deve ser aterrada diretamente usando hastes de aterramento e posteriormente seccionada. Cada seção deve ser aterrada por duas hastes, conforme mostrado na figura 8, evitando a transferência de potenciais a pontos distantes. O aterramento feito desta maneira faz com que os potenciais de toque fiquem reduzidos, pois praticamente acompanham o perfil de potencial do solo da região [7].

Deve-se também sempre fazer o seccionamento e aterramento da cerca ao cruzar sob linhas de baixa e alta tensão, pois caso um cabo se rompa e caia energizado em cima da cerca metálica, o potencial gerado nesta área da cerca não irá dissipar-se para o restante da mesma, mantendo assim o nível de segurança ao redor de subestação [7].

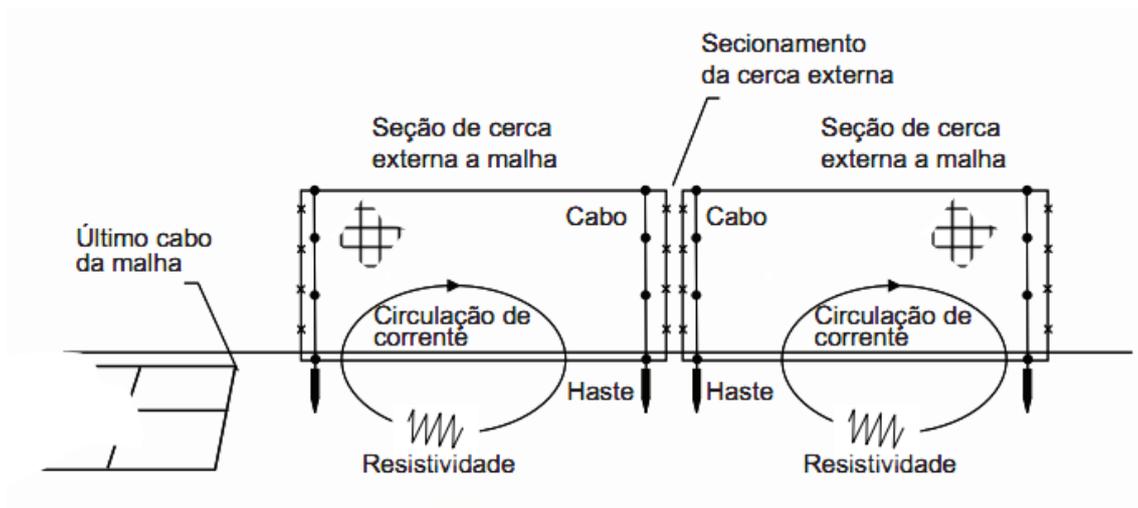


Figura 8 : Cerca metálica fora dos limites da malha de terra [7]

No caso de uso de muros de concreto para o cercamento do terreno da subestação a situação é mais simples e segura, pois o concreto não é um material condutor. Com isso não há o risco da ocorrência de tensão de toque. Além disso, o muro também melhora o nível de segurança da área da subestação, pois fica mais difícil o ato de vandalismo. O único ponto negativo do seu uso é o maior custo em relação à cerca metálica.

Mesmo tendo um custo inicial maior, é recomendado o uso de muros de concreto nos limites das subestações. Além de evitar o risco de tensão de toque, também tem muito importância a sua eficiência em evitar que pessoas (vândalos, ladrões e curiosos) invadam a área da subestação.

Nos dias de hoje é elevado a incidência de roubo de cabos e fios de cobre, em razão do seu alto valor de mercado. Por ter quilômetros de cabos de cobre, são muito visadas para este tipo de roubo, apesar dos riscos envolvidos, que na maioria das vezes não são conhecidos pelas pessoas. Justamente por criar maior dificuldade para invasores, o uso de muros torna-se mais interessante em relação ao uso de cercas metálicas.

4.4 HASTES DE ATERRAMENTO

Para uma maior segurança, principalmente em lugares onde o escoamento de corrente elétrica pode ser mais crítico, usa-se hastes de aterramento enterradas no solo e ligadas à malha de terra para auxiliar o escoamento da corrente. Os locais recomendados para o uso de hastes são sempre na periferia da malha de terra, no aterramento dos transformadores de força, nos para-raios e também junto aos transformadores de corrente. A necessidade de utilização de hastes em outros equipamentos é verificada após todos os cálculos da rede de terra, pois ao indicar níveis críticos de corrente nos mesmos é conectada uma haste no aterramento do equipamento e à malha de terra[7].

Estes são os pontos mais críticos, já que a corrente escoando pela malha de aterramento tem tendência a ir para a periferia desta. E também os transformadores de força e os transformadores de corrente são equipamentos de suma importância no funcionamento e na proteção das subestações, precisando assim de proteção extra [9].

As hastes de aterramento usadas normalmente são do tipo Copperweld, que é uma barra de aço com secção circular revestida por cobre que usualmente tem um comprimento de 2,5 m. Ela é uma boa condutora de eletricidade, com boa resistência mecânica e é praticamente imune à ação de corrosão. A figura 9 apresenta a imagem de uma haste.



Figura 9 : Haste de aterramento [21]

4.5 SUB-MALHA

Existem algumas situações em que uma proteção maior contra tensão de toque e passo é exigida para maior segurança da pessoa que vai operar algum equipamento da subestação. Um exemplo é a operação manual de uma seccionadora, na qual a sua operação pode resultar em arcos voltaicos de alta tensão.

Em situações como esta é recomendada a instalação de uma sub-malha de aterramento no solo, no local de operação da seccionadora, consistente em cabo de cobre colocado em forma de espiral, enterrado no solo e ligado diretamente à malha de terra. Abaixo, está um exemplo de como fica a instalação da mesma em projeto de aterramento.

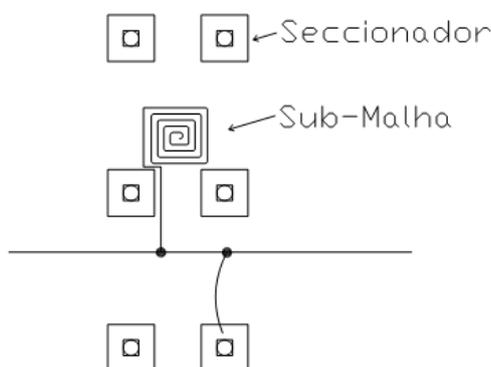


Figura 10 : Sub-Malha

4.6 PROGRAMAS COMPUTACIONAIS

Existem vários programas computacionais (*softwares*) para o cálculo de malha de terra, sendo a maioria deles de propriedade privada, ou seja, foram desenvolvidos por empresas e são de uso exclusivo das mesmas. Também existem alguns programas comerciais, os quais é necessário comprar a sua licença de uso. A seguir, serão citados alguns *softwares*, a título de exemplo, do que está sendo disponibilizado no mercado atualmente para o cálculo de redes de terra de subestação [13].

4.6.1 CYMEGRD [16]

O CYMEGRD é um *software* de origem americana (EUA) desenvolvido para projetos e simulações de malhas de terra em ambiente próprio. Posteriormente foi anexada uma atualização neste programa chamada de CADGRD.

O CYMEGRD é o programa principal e executa as funções de projeto e simulação em ambiente próprio. Ele tem como principais funções a análise, modelamento e estratificação do solo; entrada de arranjos de malha de terra; cálculo de potenciais de toque e passo; geração dos resultados em forma numérica e gráfica (2D e 3D); importação e exportação de arquivos gerados em AutoCad.

O CADGRD é um aplicativo desenvolvido para AutoCad, que possibilita o desenho da malha de terra diretamente no AutoCAD. Uma vez elaborado o desenho, deve-se entrar no módulo principal do CYMEGRD, importando o arquivo gerado no AutoCad. A verificação final dos dados informados durante o projeto é analisada dentro destes métodos, onde o projetista será alertado quando algum valor entrado não estiver de acordo com os padrões e definições corretas estipuladas pelo programa.

A saída de dados é bastante rica, mas limita-se ao ambiente próprio do CYMEGRD, não sendo possível a exportação dos resultados para o AutoCad. Uma vantagem é que a CYME INTERNATIONAL INC. possui outros programas computacionais de cálculo destinados a subestações de energia e sistemas elétricos, o que possibilita uma integração muito boa com todo o desenvolvimento do projeto elétrico de uma subestação.

4.6.2 TECAT V PRO

O TecAt é um *software* nacional desenvolvido pela Officina de Mydia. Ele é um dos poucos programas comercializados com valores bastante acessíveis [15].

O programa realiza, a partir de dados medidos em campo, a estratificação do solo em 2, 3 ou 4 camadas e, posteriormente, o projeto da malha de aterramento. Ele calcula a resistência de aterramento, os potenciais de toque e passo de qualquer malha de terra.

Este *software* fornece relatórios numéricos e gráficos. Nos relatórios numéricos é possível verificar os resultados analíticos, enquanto os gráficos permitem visualizar os resultados em duas ou três dimensões através de perfis de superfícies de potencial de tensão. Os relatórios são gerados em forma de tabelas e memórias de cálculos que podem ser impressas ou exportadas para editores de texto.

O ambiente do programa é bastante intuitivo, porém não possui nenhum tipo de interface desenvolvida para troca de dados com programas CAD. Possibilita a entrada de eletrodos horizontais, verticais e inclinados. Uma vantagem neste programa é a contagem de materiais usados nas malhas de terra, através da definição dos componentes na hora de entrada de dados.

4.6.3 CDEGS

Este *software* é um dos mais completos no que se refere a cálculo de redes de terra de subestações. Ele foi desenvolvido pela empresa canadense SAFE ENGINEERING SERVICES & TECHNOLOGIES LTD [20].

O programa é extremamente completo, abrangendo desde a estratificação do solo (multicamadas) até a modelagem dos condutores da malha de terra que serão utilizados. A utilização deste é mais complexa do que os outros programas citados anteriormente, sendo necessário um entendimento maior dos modelos de cálculos para a configuração das malhas de terra.

A interface é de fácil manipulação e ricamente ilustrada. Possui um módulo de desenho que possibilita importar e exportar os dados para o formato .DXF, compatível com a maioria dos programas de CAD (como o AutoCad) [20].

Ele possibilita fazer uma análise completa dos parâmetros necessários para o correto dimensionamento da malha de terra. Permite a visualização dos gradientes de potencial em forma de perfil em duas e três dimensões. Os relatórios são gerados e podem ser impressos diretamente e/ou exportados para editores de texto.

Observa-se que a grande maioria dos *softwares* para o cálculo da rede de terra são de outros países, tendo sido encontrado apenas um programa nacional, o TecAt. Este programa é de boa qualidade, pois com ele pode-se fazer o cálculo da rede de aterramento em qualquer tipo de subestação, com a estratificação do solo em 2, 3 ou 4 camadas. Por ser um programa nacional, o custo de sua licença de uso é mais barato em comparação com os outros, podendo chegar a metade do valor de um *software* internacional.

5 MEDIÇÃO DE RESISTIVIDADE DO SOLO

O primeiro passo para projetar um sistema de aterramento de uma subestação é a medição da resistividade do solo. Existem diferentes métodos para a medição da mesma. A escolha dos equipamentos e métodos depende principalmente se esta vai ser feita num terreno vazio, ou seja, sem subestação ativa, ou em um terreno onde te uma subestação ativa.

Abaixo, segue exemplificação de como é feita a medição e quais os equipamentos necessários para fazê-la em ambos os casos, para depois ser feito o projeto de aterramento.

5.1 ÁREAS SEM SUBESTAÇÃO

Definido o local da instalação do sistema de aterramento, deve-se efetuar levantamento através de medições para obter-se as informações necessárias à elaboração do projeto.

O levantamento dos valores da resistividade é feito através de medições em campo, utilizando-se métodos de prospecção geométricos, dentre os quais o mais conhecido e utilizado é o Método de Wenner [1] [4].

O método utiliza um medidor de resistência de terra, o qual fornece o valor da resistência elétrica do solo (exemplo na figura 10). Para obtenção de um valor mais exato deve-se fazer várias medidas, em todas as direções do terreno, com as hastes do aparelho afastadas em diversas distâncias.

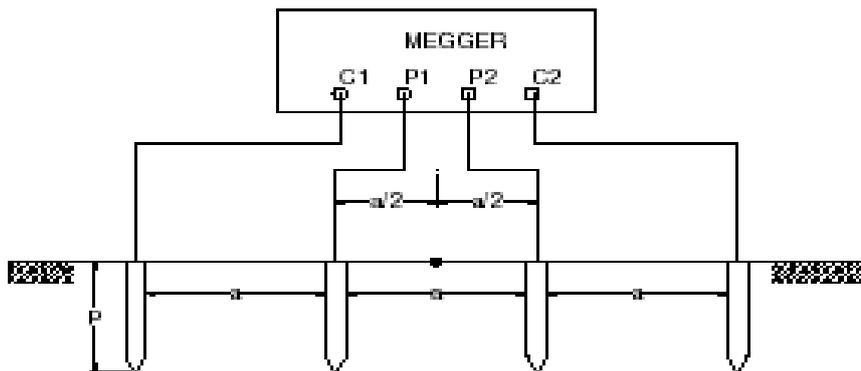


Figura 11 : Método de Wenner [5]

Durante a medição devem ser observados os itens abaixo [1] [4] [5]:

- As hastes devem estar alinhadas e igualmente afastadas;
- As hastes devem estar cravadas no solo a uma mesma profundidade;
- O aparelho deve estar posicionado simetricamente entre as hastes;
- As hastes devem estar bem limpas, principalmente sem óxidos e gorduras, para possibilitar bom contato com o solo;
- A condição do solo (seco, úmido, etc.) deve ser anotada;
- Não devem ser feitas medições com condições atmosféricas adversas, tipo chuvas ou raios;
- É recomendado utilizar como espaçamento das hastes os seguintes valores (em metros): 1, 2, 4, 6, 8, 16 e 32.

Após serem feitas as medidas no solo, uma análise dos resultados deve ser realizada para que os mesmos possam ser avaliados em relação a sua aceitação ou não. Esta avaliação é feita da seguinte forma [1] [4] [5]:

- Calcular a média aritmética dos valores da resistividade elétrica para cada espaçamento adotado;
- Fazer o cálculo do desvio padrão de cada medida em relação ao valor médio. Deve-se desprezar todos os valores de resistividade que tenham um desvio maior que 50% em relação à média. Caso ocorra um acentuado número de medidas com desvios acima de 50%, recomenda-se executar novas medidas no local;

- Com as resistividades médias de cada espaçamento, deve-se traçar a curva $\rho \times a$.

A(m)	R(Ω)	$\rho(\Omega\text{m})$
1		
2		
4		
6		
8		

$$\rho = \frac{4\pi a R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + (2p)^2}} - \frac{2a}{\sqrt{(2a)^2 + (2p)^2}}}$$

R= Leitura da resistência em Ω no Megger, para uma profundidade “a”

a = Espaços das hastas cravadas no solo

p = Profundidade da haste cravada no solo

É muito importante realizar estas medidas com precisão, utilizando os equipamentos necessários e em boas condições. Também se deve ter atenção quanto às condições do tempo, sendo recomendado realizar o trabalho com tempo seco, com calor e sem que tenha chovido no mínimo nos três dias anteriores à medição. Também é importante realizar a medição no momento da obra correto, pois se feito muito cedo ou muito tarde pode fornecer dados alterados. Ela deve ser feita após o terreno ter sido aplainado ou aterrado, quando ele está pronto para começar a obra. E antes de começar a obra em si, ou seja, antes que comecem a construir as fundações para os equipamentos ou qualquer outra obra [1] [4] [5].

A medição da resistividade do solo é um trabalho feito em campo, sob condições climáticas fortes (sol e calor) e muito desgaste físico. Ela deve ser feita por profissionais capacitados e com precisão, pois caso acontece algum erro durante o processo pode ocasionar um valor de resistividade do solo errôneo. Este erro pode resultar em um sistema de aterramento pouco eficiente ou mesmo superdimensionado.

5.2 ÁREAS COM SUBESTAÇÃO

Existem situações em que já existe uma rede de terra enterrada no solo, no caso de locais em que já existe uma subestação no local. Em casos como este, às vezes é preciso medir a resistividade do solo, resistência de terra, entre outros parâmetros para realizar a ampliação ou a manutenção da malha de terra existente.

Nesses casos é muito importante ter os dados originais da elaboração do projeto de aterramento da subestação. E em alguns casos de subestações mais antigas, não se obtêm todos os dados da medição do projeto. O mais comum é obter somente o valor da resistência da malha de terra ou o valor da resistividade do solo. É difícil obter valores da estratificação do solo e resistividade aparente.

Mesmo em casos de ampliação da malha de terra é recomendado realizar uma medição atual de todos os parâmetros, inclusive da resistividade do solo. A existência de uma malha de terra no solo muda a distribuição da corrente, ou seja, uma medição pelo método de Wenner resultaria em dados irrealis em relação à verdadeira resistividade do solo. Mesmo tendo os dados originais das características do solo, é sempre recomendado refazer essas medições, pois o solo pode ter alguma alteração em suas características ao passar dos anos.

Deve-se, então, procurar alternativas para a obtenção dos dados necessários para fazer o projeto de ampliação da malha de terra. Cada situação deve ser cuidadosamente analisada, para assim saber qual a melhor alternativa a ser buscada.

Se a ampliação da malha for em uma subestação em uma área pouco povoada, como em meio rural ou com terrenos baldios do lado, pode ser feita uma medição alternativa. Essa alternativa consiste em fazer a medição da resistividade do solo pelo método de Wenner em um terreno ao lado, ou o mais perto possível, da subestação. Assim obtêm-se alguns dados reais e com uma boa aproximação para a realização do projeto. O grande problema desse tipo de medição é que o terreno em que foi construída a subestação deve ter sido aterrado ou aplainado.

Nestas duas situações os valores da resistividade do solo devem ter sido alterados, de modo que os dados obtidos no terreno próximo podem não ter os valores iguais ao terreno da subestação. Mas mesmo assim, podem ser usados como uma base inicial, já que fornecem as principais características do solo. Ao usar esses dados no terreno da subestação deve-se fazer uma aproximação destes dados para pior, ou seja, usar uma resistividade maior da medida para ter segurança no projeto da malha.

Quando o terreno da subestação for grande em relação à área ocupada pela malha de terra, ou seja, com espaços grandes sem cabos enterrados no solo, pode-se fazer a medição da resistividade do solo pelo método de Wenner em um canto do terreno, afastado da área do aterramento. Esta medição pode ser feita, desde que a distância entre os eletrodos seja pequena em relação à distância para a malha de terra. A distância entre os eletrodos do medidor de resistência de terra deve ser menor que a distância do eletrodo mais próximo da malha e a malha de aterramento.

Caso se tenha os dados originais, deve-se compará-los para analisar se as características do solo foram mantidas ou não. Ao executar a medição com distâncias pequenas não há como medir a resistência do solo em profundidades maiores e com isso, não é possível fazer uma estratificação do solo em duas camadas com precisão. Mas mesmo assim, os dados da resistividade do solo em pequenas profundidades serão os mais próximos da realidade que se pode obter. A seguir está uma figura que exemplifica o espaçamento na medição.

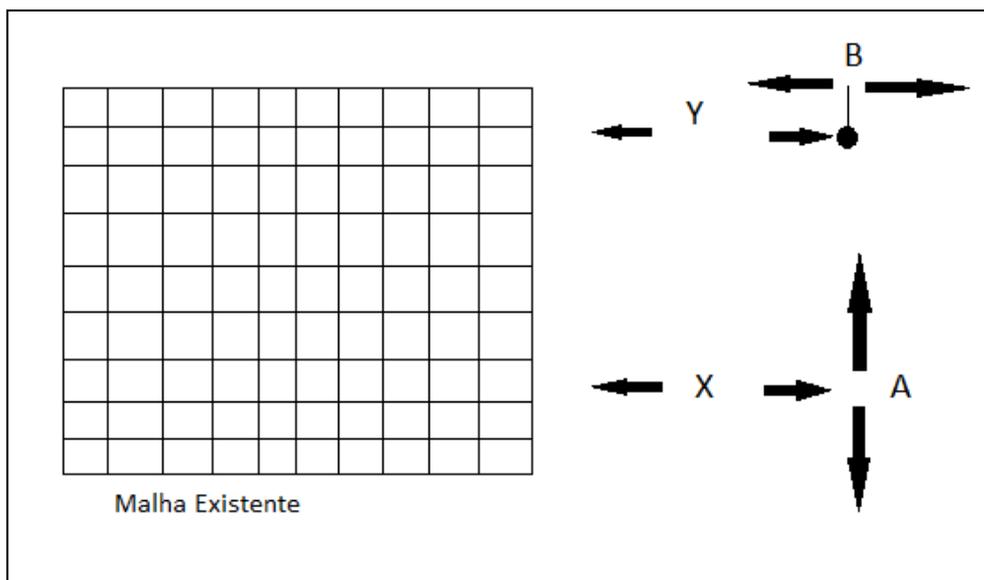


Figura 12 : Dimensões de medição próxima à malha de terra

Onde:

A e B são os sentidos da medição

$D_{\text{máx}}$ = espaçamento máximo entre os eletrodos

$X > D_{\text{máx}}$

$Y > 1,5 D_{\text{máx}}$

Outra alternativa para determinar algum dado real e atual sobre as características do solo é fazer uma medição da resistência de aterramento da subestação. Em casos que não se dispõe de nenhum dado anterior, a resistência de aterramento pode ser utilizada como dado inicial para projeto de ampliação da malha de terra. Essa medição pode ser feita com um medidor comum, mas apenas em subestações pequenas, de distribuição, e desligadas. Caso contrário deve ser feita por injeção de altas correntes. Esse método deve ser feito utilizando um gerador ou transformador, dentre outros equipamentos, além de demandar grandes distâncias entre os eletrodos ou até uma ou mais fases de uma linha de transmissão desenergizada que sai da subestação. Por ser um método extremamente complexo, demorado e caro para realizar, ele dificilmente é feito pelas concessionárias de energia.

Uma última alternativa, que não é muito usual, mas experimentos indicam a sua eficiência, é a medição da resistividade do solo em laboratório. Algumas são as vantagens de realizar medições de resistividade em amostras de solo em laboratório. A primeira é que a amostra do solo pode ser retirada com a subestação energizada. Outra vantagem, detalhada a seguir, é que se pode obter um valor que representa o comportamento mais estável do terreno ao longo do tempo. Este método pode ser mais um recurso a ser utilizado como auxílio durante análise dos resultados encontrados pelo método de Wenner [10] [5].

Nas curvas de resistividade em função da umidade, verifica-se que quando o solo está seco a resistividade é muito alta, decrescendo rapidamente com o aumento de água no solo até alcançar o ponto de saturação. Após o ponto de saturação a resistividade permanece constante. O decréscimo da resistividade está relacionado com a condutividade do material, que é função do teor de água, fator diretamente relacionado com a solubilidade dos sais existentes. Com isto pode ser esperado um valor mínimo de resistividade no gráfico em questão. Também é preciso realizar ensaios de retenção de água do solo, cujos valores são característicos para cada tipo de solo [10].

O método consiste em coletar amostra do solo da subestação a uma profundidade de 70 cm. Seca-se o material numa estufa e pulveriza-se em moinho. O valor da resistividade é medido em caixa padrão *Soil Box* com voltímetro de alta impedância e fonte de corrente alternada. Adiciona-se água destilada à amostra na proporção de 5% em volume, em relação ao volume do solo seco e mede-se novamente a resistividade. Efetua-se adições sucessivas de água destilada com incremento de 5% ou 10%, medindo-se os valores de resistividade para cada teor de água e, por fim, gera-se um gráfico com os valores da resistividade obtidos, em função do teor de umidade [10].

A capacidade de retenção de água representa a umidade que o solo terá, na sua maior parte do tempo, pois este fator está relacionado com a penetração de água no solo pelo efeito de capilaridade. Assim a resistividade nessa porcentagem é a mais representativa do solo [10].

Com isso é observado que os valores da resistividade do solo em laboratório, a partir do ponto de retenção de água em amostras com a subestação energizada, são coerentes com os valores encontrados aplicando o método de Wenner. Foram obtidas diferenças entre 13% e 21% entre os dois métodos [10].

Como pode-se observar, existem algumas alternativas para a medição da resistividade do solo quando já existe uma rede de aterramento. Mas cabe resaltar que estes valores obtidos não são exatos. Eles não devem ser usados como valores finais para a realização de um projeto de ampliação da rede de aterramento.

Estes valores devem ser utilizados somente como referência inicial da qualidade do solo. Para a realização do projeto é necessário ter os dados da resistividade do solo quando da construção da subestação, junto com os valores da resistência de terra, cujos métodos de medição serão explanados no Capítulo 7.

6 ESTRATIFICAÇÃO DO SOLO

Com as medidas efetuadas pelo Método de Wenner e a curva $\rho \times a$ é possível fazer a estratificação do solo em duas ou mais camadas. Assim poderemos encontrar a resistividade do solo de cada camada e a sua respectiva profundidade [1] [4] [5].

O método mais comum é o Método Simplificado para a Estratificação do Solo em Duas Camadas. Este método oferecerá resultados razoáveis quando o solo puder ser estratificável em duas camadas e a curva $\rho \times a$ tiver umas das curvas típicas indicadas abaixo [1] [4] [5].

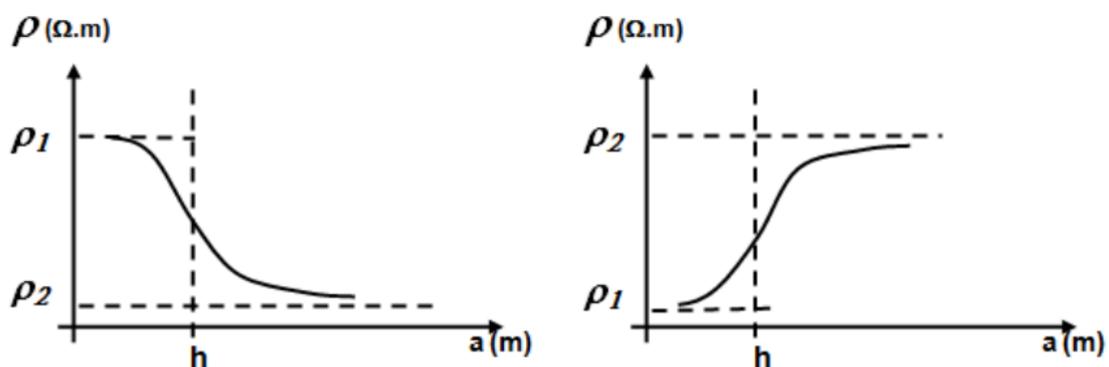


Figura 13 : Curva $\rho \times a$ [5]

A seguir estão os passos para obter a estratificação do solo em duas camadas [4] [5]:

- I. Traçar a curva $\rho \times a$;
- II. Prolongar a curva $\rho \times a$ até interceptar o eixo das ordenadas e determinar o valor de ρ_1 ;
- III. Traçar a assíntota no final da curva $\rho \times a$ e prolongá-la até o eixo das ordenadas, o que indicará o valor de ρ_2 da segunda camada do solo;
- IV. Através da relação ρ_2/ρ_1 determinar o valor de M_0 na figura 14;
- V. Calcular $\rho(a=h) = \rho_1 \times M_0$.
- VI. Com o valor de $\rho(a=h)$ entrar na curva de resistividade e determinar a profundidade de h

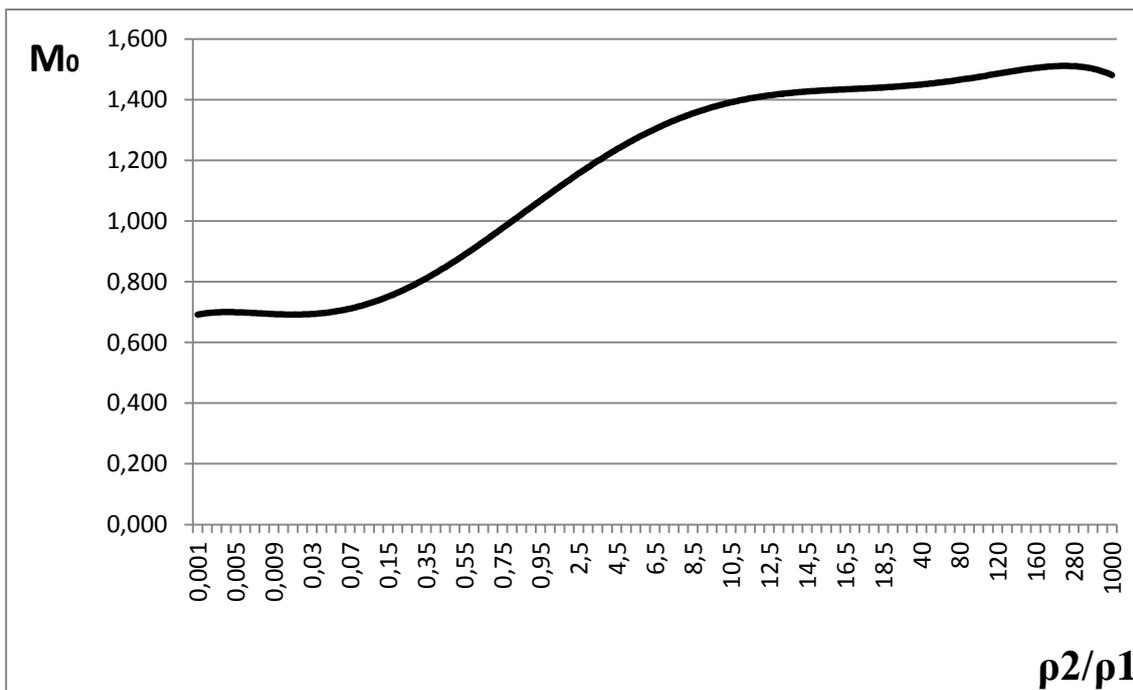


Figura 14 - M_0 em função de ρ_2/ρ_1

Com isso obtém-se a resistividade do solo e o mesmo estratificado em duas camadas, conhecendo assim os valores da resistividade elétrica de cada camada do solo e de suas respectivas profundidades. Esses dados são fundamentais para o cálculo da resistividade aparente do solo e consequentemente o projeto da malha de terra.

O terreno ficará estratificado em duas camadas como mostra a figura abaixo:

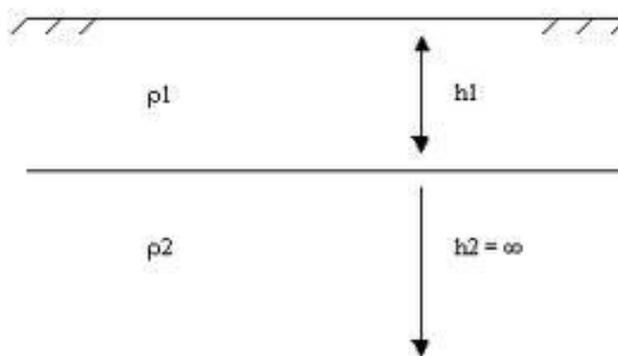


Figura 15 : Solo estratificado em duas camadas [1]

Após a estratificação do solo e a obtenção da resistividade e da profundidade das suas camadas deve-se calcular o coeficiente de penetração (α) e o coeficiente de divergência (β), para assim obter a resistividade aparente do solo $\rho(a)$. Para isto são usadas as seguintes fórmulas:

$$\alpha = \frac{r}{h} \quad r = \frac{A}{D} \quad \beta = \frac{\rho_2}{\rho_1}$$

α = Coeficiente de penetração, indica o grau de penetração das correntes escoadas pelo aterramento no solo equivalente

r = Raio do anel equivalente do sistema de aterramento

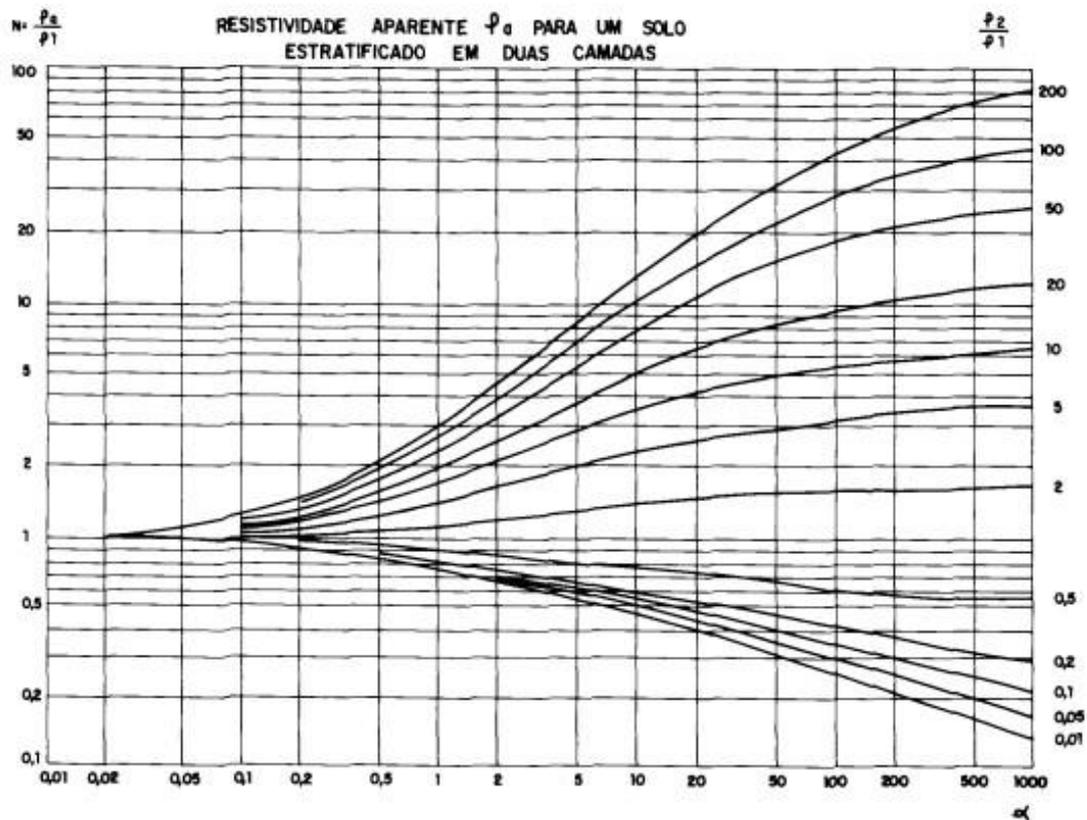
β = Coeficiente de divergência, definido pela relação entre a resistividade da última camada e a resistividade da primeira camada

A = Área abrangida pelo aterramento

D = Maior dimensão do aterramento

h = Profundidade da primeira camada

Com o α e β obtidos, pode-se determinar a resistividade aparente (ρ_a) do aterramento especificado em relação ao solo de duas camadas. Usando as curvas da figura 16, pode-se obter o valor de N .



E assim tem-se:

$$\rho_a = N \times \rho_1$$

Onde:

ρ_a = resistividade aparente do solo (Ωm).

ρ_1 = resistividade de primeira camada do solo (Ωm).

Com isto obtém-se a resistividade aparente do solo (ρ_a) e assim pode-se fazer os cálculos da malha de terra.

7 RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO

Como foi dito anteriormente, o conhecimento do valor da resistência de aterramento é muito importante para a ampliação ou manutenção da malha de terra de uma subestação. Ao obter o valor de resistência de aterramento pode-se comparar ele com os dados originais do projeto, analisando assim a sua qualidade. Caso o valor da resistência de aterramento seja maior do que o calculado no projeto há um indicativo de mau dimensionamento da rede de terra ou mesmo algum defeito no sistema de aterramento, como o rompimento de algum cabo de aterramento, falhas nas soldas, etc.

No caso de não se ter algum dado do projeto original, o valor da resistência de aterramento pode ser usado como um valor inicial para uma ampliação ou modificação na malha de terra.

O valor da resistência de aterramento é sempre calculado ao realizar o projeto da malha de terra e é recomendado que se meça em campo ao fazer o comissionamento da subestação. Como o valor dela pode variar ao longo do ano, é recomendado programar adequadamente medições ao longo do tempo para manter um histórico do perfil de seu comportamento.

Para fazer a medição da resistência de aterramento é preciso montar um circuito elétrico (figura 17), onde se tem um ponto no sistema de aterramento em que se injeta uma corrente e outro ponto onde é retirada esta corrente, através de uma ou mais hastes interligadas.

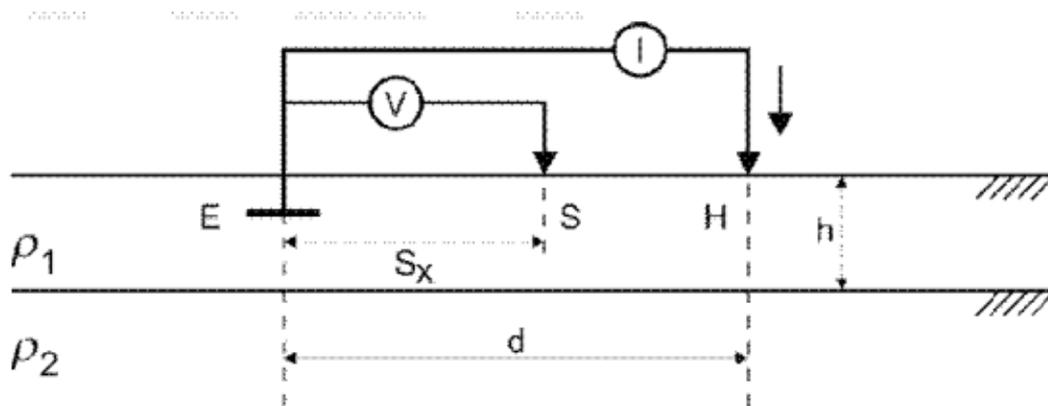


Figura 17 : Circuito para medição da resistência de aterramento [6]

O valor da resistência de aterramento pode ser obtido pela razão entre o potencial do sistema de aterramento em relação a um ponto infinitamente afastado e a corrente que flui entre o aterramento e este ponto. Pela Lei de Ohm, a corrente injetada irá circular pela terra, provocando uma tensão em sua superfície. A tensão é o resultado do produto da resistência de aterramento até o ponto medido pela corrente injetada.

Existem alguns métodos mais conhecidos para a medição da resistência de aterramento, cuja escolha depende se a subestação está energizada ou não. O tamanho da subestação também influencia na escolha. Para cada método existem aparelhos específicos para a sua medição.

7.1 SUBESTAÇÃO DESERNEGIZADA

Para a medição da resistência de aterramento em subestações desenergizadas pode ser usado o método volt-amperímetro (queda de potencial) usando um equipamento comum, de baixa frequência (60Hz). Neste método pode ser usado um medidor de resistência de terra, que injeta uma corrente no sistema de aterramento a ser medido por um de seus terminais. Esta corrente retorna por outro terminal do aparelho. A circulação desta corrente gera potenciais na superfície do solo que são medidos através de um eletrodo de potencial [6].

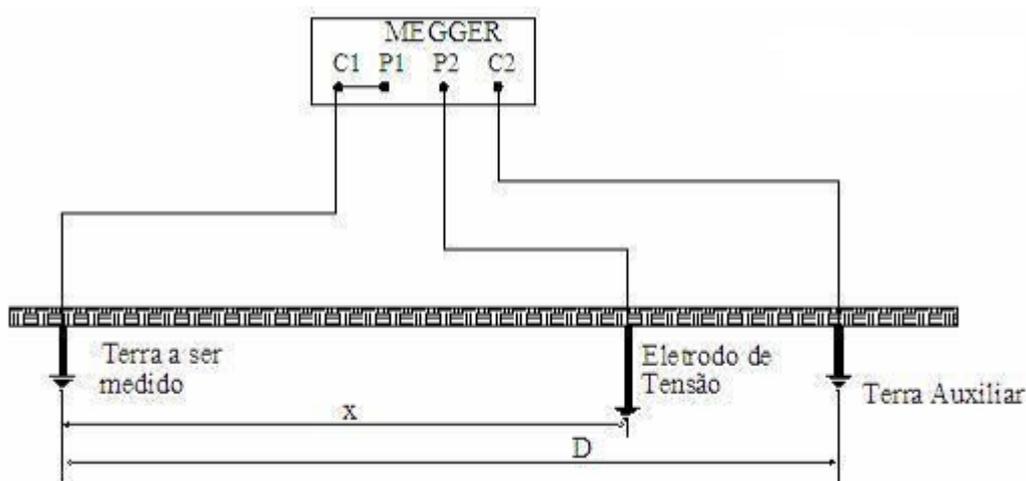


Figura 18 - Modelagem do circuito para medição [9]

Este método de medição é eficaz quando a subestação está desenergizada e em subestações pequenas, como as de distribuição. Outros procedimentos também devem ser seguidos para a obtenção de dados corretos: é necessário fazer o desacoplamento dos cabos para-raios da subestação e das linhas de transmissão que chegam e saem dela.

Outro ponto importante é a distância de colocação dos eletrodos. A distância entre o centro elétrico do sistema de aterramento e o eletrodo de corrente é em torno de 3 a 4 vezes da maior dimensão linear do sistema de aterramento.

Pode-se notar a dificuldade deste método de medição a partir da exigência de que a subestação esteja desenergizada e também com a distância necessária para a colocação dos eletrodos.

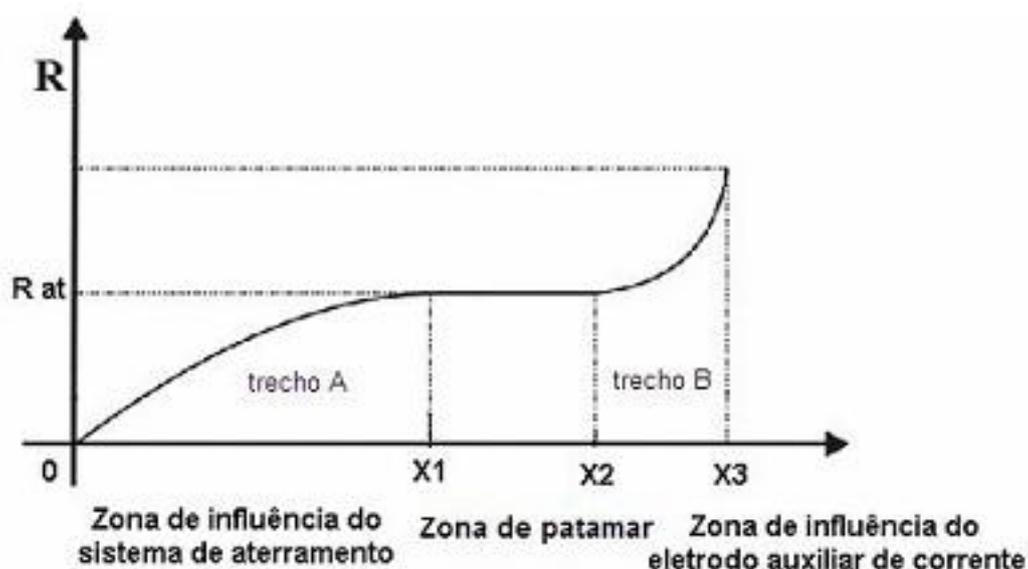


Figura 19 : Curva do potencial de patamar do solo [6]

7.2 SUBESTAÇÃO ENERGIZADA

A medição da resistência de aterramento em subestações energizadas é mais complexa do que em subestações desligadas. Isto acontece, pois com a subestação energizada ocorrem correntes parasitas, interferência eletromagnética entre outros fatores, que podem dificultar a obtenção das medidas.

Por causa da interferência do funcionamento da subestação são necessários métodos e equipamentos mais complexos e específicos para a medição da resistência de aterramento (figura 20).

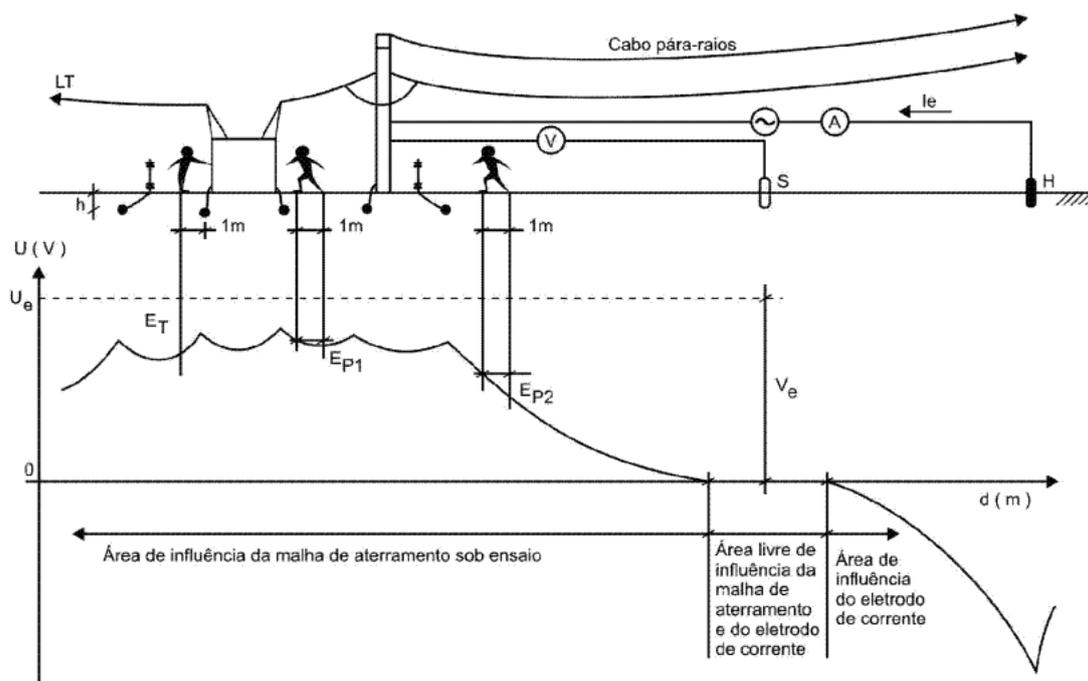


Figura 20 : Influência da malha na medição da resistividade do solo [6]

7.2.1 Altas Correntes

O método mais comum, mas também um dos mais complexos, é o de injeção de altas correntes, mais de 30 ampéres. O circuito montado, representado na figura a seguir, é semelhante ao usado em subestações desenergizadas, injetando corrente no sistema de aterramento e medindo a tensão entre o sistema de aterramento e um terra remoto [6] [10] [12].

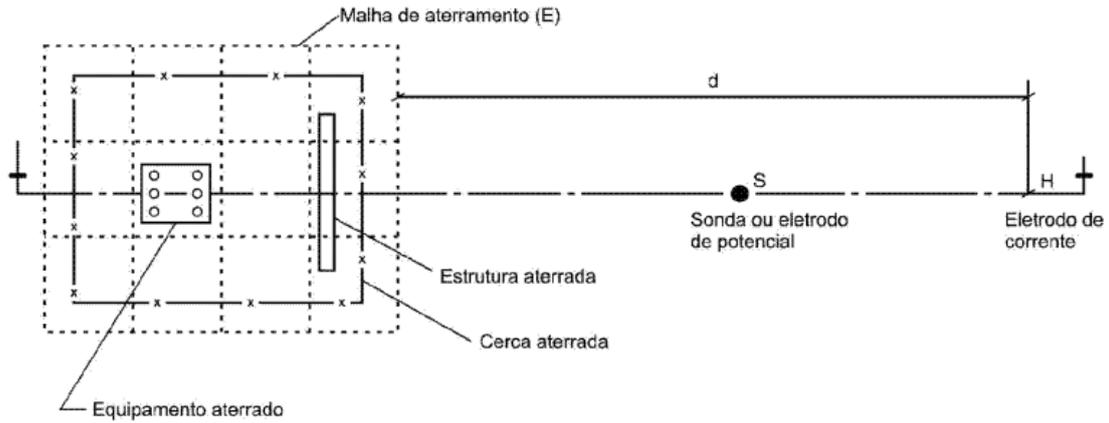


Figura 21 : Circuito de injeção de corrente [12]

Para a realização deste método são necessários vários equipamentos, como um gerador ou transformador monofásico, transformador de corrente, amperímetros, voltímetros, entre outros. Além da necessidade do uso de muitos equipamentos, existem outras situações que dificultam a aplicação deste método. Uma delas é a distância necessária para lançar os circuitos de corrente e potencial, que são grandes, ainda mais se for em áreas urbanas.

Para esta situação uma linha de transmissão desernegizada pode ser usada para o circuito de corrente. E um circuito de comunicação ou mesmo outra linha de transmissão desernegizada, cuja rota seja afastada da linha de transmissão do circuito de corrente, podem ser utilizados.

Além disso, deve-se desconectar todos os cabos para-raios das linhas de transmissão que chegam e saem da subestação, as blindagens de cabos isolados, neutros de linhas de distribuição e contrapesos contínuos de linha de transmissão.

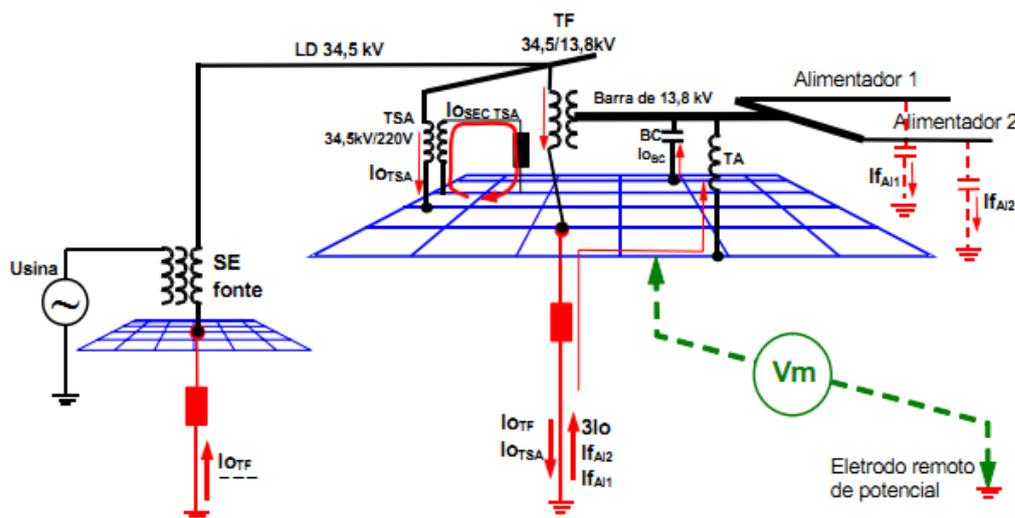


Figura 22 : Componentes das ligações para medições em alta corrente [10]

Percebe-se assim a dificuldade técnica, de equipamentos e custos neste tipo de medição, além de ser necessário considerar o preparo das torres de linha de transmissão e também na dificuldade ou impossibilidade no desligamento de alguma linha de transmissão.

7.2.2 Alta Frequência

Uma alternativa para a medição da resistência de aterramento encontrada recentemente, especialmente com o desenvolvimento de novos equipamentos, é a medição com altas frequências. O princípio desta medição é que um gerador, que opera em 25 kHz, é conectado entre o aterramento a ser medido e o eletrodo auxiliar de corrente faz circular uma corrente de medição que produz a distribuição de potencial, representada por uma espécie de cone em cada um destes pontos.

Entre os dois cones existe uma onda neutra que se pode chamar de patamar de potencial, no qual deve-se cravar o eletrodo de potencial, para assim medir a tensão originada entre este eletrodo e o sistema de aterramento. O valor da resistência de aterramento é determinada pela relação entre tensão originada e corrente injetada [2] [6] [11] [12] [22].

O uso de altas frequências nas medições permite que se teste o sistema de aterramento em uma condição mais parecida com a que ele será usado para dissipar uma corrente de curto-circuito ou mesmo uma descarga atmosférica.

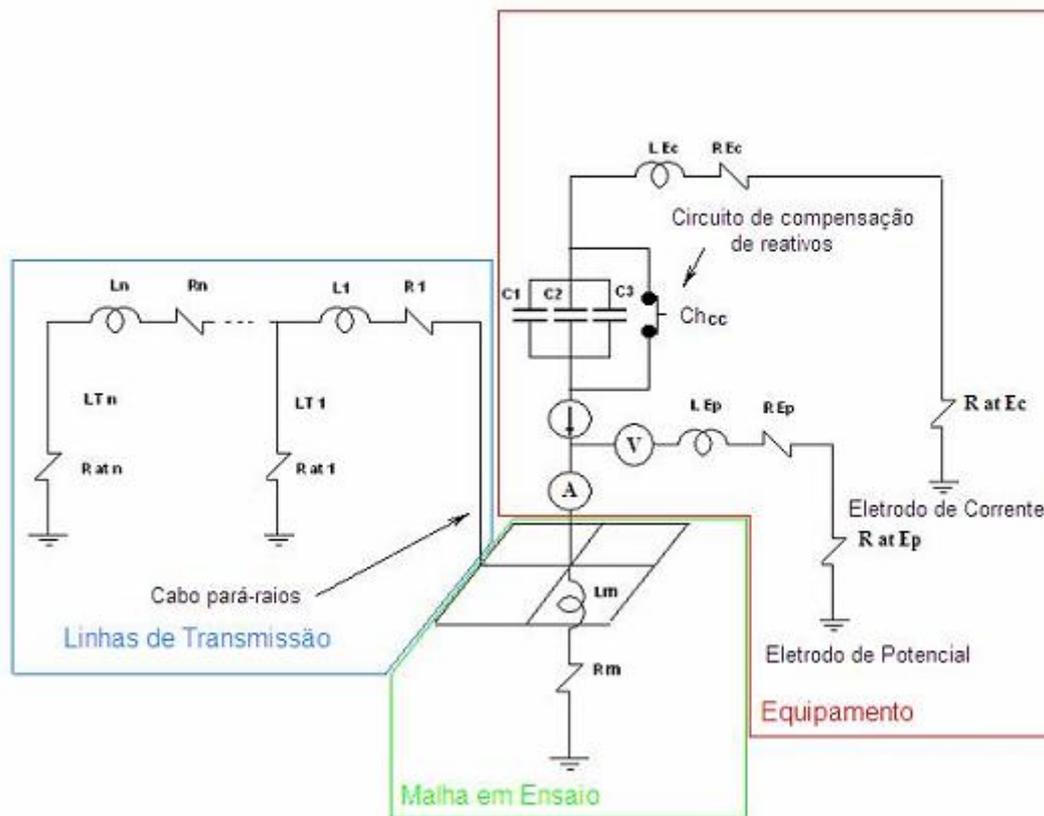


Figura 23 - Esquema simplificado da medição [6]

Neste esquema é possível identificar os parâmetros envolvidos na medição, sendo que:

- $L_1...L_n$ representam a parte indutiva da impedância do circuito formada pelas torres (cabos para-raios das linhas de transmissão);
- $R_1...R_n$ representam uma parte da resistência do circuito (cabos para-raios das linhas de transmissão);
- $R_{at1}...R_{atn}$ representam as resistências dos aterramentos de cada torre das linhas de transmissão;

- L_m representa a parte indutiva da impedância da malha de aterramento sob ensaio;
- R_m representa a parte resistiva da impedância da malha de aterramento sob ensaio;
- L_{Ec} representa a parte indutiva da impedância do eletrodo de corrente;
- R_{Ec} representa a parte resistiva do eletrodo de corrente;
- R_{atEc} representa a resistência de aterramento do eletrodo de corrente;
- L_{Ep} representa a parte indutiva da impedância do eletrodo de potencial;
- R_{Ep} representa a parte resistiva da impedância do eletrodo de potencial;
- R_{atEp} representa a resistência de aterramento do eletrodo de potencial;
- $C1$, $C2$ e $C3$ representam o banco de capacitores utilizado para compensar a parte reativa do circuito;
- Ch_{cc} representa a chave do circuito utilizada para fazer a medida sem compensação.

Em medições feitas na frequência de 25 kHz, em subestações com entradas e saídas de linhas de transmissão dotadas de cabos para-raios conectados a rede de terra, estima-se que a medição obtenha valores relativos somente à resistência da malha de terra. Assim, o valor obtido tende a ser mais real do que os fornecidos em medidas com equipamentos mais comuns, em baixa frequência (60 Hz), mesmo com os cabos para-raios desacoplados das instalações.

Na sequência é dado o exemplo de cálculo das impedâncias próprias, mútuas dos cabos para-raios, comparando as frequências de 60 Hz e 25 kHz a partir da formulação de Carson [23]. É utilizado no cálculo o cabo para-raios de aço HS 3/8, com resistividade aparente (ρ_a) e resistência do cabo (R_e) permanecem constantes para as duas frequências [24].

- Para frequência de 60 Hz:

$$Z_{mútua} = R_e + j\omega \times 0,0002 \ln \left(\frac{659}{DMG} \times \sqrt{\frac{\rho_a}{f}} \right) [\Omega/Km]$$

$$Z_{mútua} = 0,060 + j0,446 \quad \text{ou} \quad Z_{mútua} = 0,450e^{j82,34}$$

$$Z_{própria} = \frac{R_{própria.cabo PR}}{2} + R_e + j\omega \times 0,0002 \times \ln\left(\frac{659}{C} \times \sqrt{\frac{\rho_a}{f}}\right) \quad [\Omega/Km]$$

$$Z_{própria} = 1,772 + j0,770 \quad \text{ou} \quad Z_{própria} = 1,932e^{j23,49}$$

Sendo:

$$\rho_a = 100 \Omega m$$

$$R_e = 0.060 \Omega$$

$$C = \sqrt{(RMG \text{ do cabo terra}) \times (\text{dist. entre cabos para} - \text{raios})} = 0,086718$$

DMG = a distância média geométrica

RMG = 0.8949 (raio médio geométrico)

- Para frequência de 25 kHz:

$$Z_{mútua} = R_c + j\omega \times 0,0002 \ln\left(\frac{659}{DMG} \times \sqrt{\frac{\rho_a}{f}}\right) \quad [\Omega/Km]$$

$$Z_{mútua} = 0,060 + j91,020 \quad \text{ou} \quad Z_{mútua} = 91,020e^{j89,96}$$

$$Z_{própria} = \frac{R_{própria.cabo PR}}{2} + R_e + j\omega \times 0,0002 \times \ln\left(\frac{659}{C} \times \sqrt{\frac{\rho_a}{f}}\right)$$

$$Z_{própria} = 1,772 + j226,060 \quad \text{ou} \quad Z_{própria} = 226,067e^{j89,55}$$

Sendo:

$$\rho_a = 100 \Omega m$$

$$R_e = 0.060 \Omega$$

$$C = \sqrt{(RMG \text{ do cabo terra})} \times (\text{dist. entre cabos para} - \text{raios}) = 0,086718$$

DMG = a distância média geométrica

RMG = o raio médio geométrico

Observa-se que, para este exemplo, a impedância mútua aumente cerca de 200 vezes, enquanto que a impedância própria aumenta cerca de 100 vezes, passando o ângulo para próximo de 90°. Desta forma, os parâmetros (resistência e reatância) dos cabos para-raios tendem ao infinito, ou seja, passam a ser excluídos da medição em alta frequência.

Foi utilizado um protótipo de MEDIÇÃO DE MALHA DE TERRA EM SUBESTAÇÕES ENERGIZADAS (MMTE) para fazer medições e avaliar a rede de aterramento de uma subestação energizada. Ele opera injetando uma corrente elétrica (em diferentes frequências) entre o sistema de aterramento e um eletrodo auxiliar, medindo as diferenças de potências em pontos do solo próximos ao sistema de aterramento a ser avaliado [11].

Os valores obtidos passam por um *software* que utiliza uma interface gráfica para receber, processar, armazenar e apresentar os dados. O MMTE tem como uma de suas funções básicas a medição da resistência de aterramento da malha de subestação pelo método de queda de potencial [11].

O *software* possui um módulo de coleta de dados, responsável pela extração dos dados recebidos pelo equipamento externo e armazenamento desses na memória de um computador. Também possui uma interface homem-máquina que controla a operação do MMTE, fazendo a interação com os aplicativos para modelar o sistema de aterramento e obter dados adicionais como a localização dos eletrodos de potencial e de corrente, além de mostrar os potenciais de superfície medidos e a resistência em função da frequência. E por último, um módulo de estimativa de impedância de aterramento em função da frequência, com base nos dados medidos e no modelo estipulado para o aterramento [11].

O MMTE realiza a medição e determinação da resistência ou impedância de malhas de aterramento tanto em subestações energizadas como em desenergizadas. A configuração para esta medição é similar à medição de resistência de aterramento de um sistema qualquer, com a vantagem de que os pontos de fixação dos eletrodos serão mais próximos do sistema de aterramento, podendo ser em regiões limítrofes da rede de aterramento. Não será necessário especificar a quantidade e o tipo dos aterramentos de sistemas interconectados, visto que a corrente em alta frequência injetada garante o desacoplamento das demais instalações, e para o cálculo da resistência da malha, o *software* tratará destes elementos através do algoritmo de estimação [11].

7.2.2.1 Método convencional reduzido [11]

A grande vantagem do uso da frequência de 25 kHz é a aplicação do método convencional, mas de forma reduzida. Esta metodologia se aplica em subestações energizadas ou não, em locais com poucas e pequenas áreas disponíveis para colocação dos eletrodos de retorno de corrente e de potencial, como em áreas urbanas.

Neste método de medição, é utilizada a queda de tensão, mas com os eletrodos de corrente posicionados mais próximos do sistema de aterramento. Testes feitos neste método indicam que o eletrodo de corrente se posicionaria a distâncias em torno de 1,25 vezes a maior dimensão do sistema de aterramento.

Esta metodologia pode ser usada nas seguintes situações:

- Metodologia convencional reduzida aplicada a malhas de terra com configuração definida e conhecida – o operador indica ao *software* a maior dimensão do sistema de aterramento e este fornece o posicionamento dos eletrodos de corrente e de potencial. São feitas leituras de 03 eletrodos de potencial; o *software* analisa os desvios entre as leituras e compara com um padrão estabelecido; se inferior, a medição estará completada; se superior, indica um novo posicionamento com acréscimo de 30% das distâncias, repetindo-se o processo até obter-se desvios dentro do padronizado;
- Metodologia convencional reduzida aplicada a malhas com configuração desconhecida – o operador indica ao *software* um valor estimado para a maior dimensão

do aterramento e, a partir daí, o procedimento é idêntico ao descrito para configuração conhecida. A velocidade do ensaio está ligada à qualidade do valor estimado.

7.2.2.2 Método DDPprox [11]

Outra metodologia para medir a resistência de aterramento em altas frequências é a chamada Metodologia DDPprox (diferenças de potenciais em pontos próximos ao sistema de aterramento). Esta metodologia se aplica a sistemas de aterramento, energizados ou não, em locais com áreas disponíveis reduzidas (áreas urbanas) para a colocação de eletrodos de retorno de corrente e de potenciais. Nessas medições são usadas as frequências de 270Hz, 1470Hz e 25kHz, por serem encontradas em equipamentos disponíveis no mercado.

Pretende-se fazer com que esta metodologia tenha o seu ponto alto de aplicação, em sistemas energizados e localizados principalmente em áreas de nenhuma disponibilidade (densamente edificadas) para a colocação dos eletrodos de corrente e potencial, a não ser aquela imediatamente adjacente a do sistema em teste.

Nesta metodologia não se aplica o conceito da queda de potencial em relação a um ponto remoto, o que é feito convencionalmente e que tem inviabilizado as medições de sistemas de aterramento de médias e grandes dimensões. São realizadas medidas de diferença de potencial, em espaços bem pequenos e em pontos pré-determinados dos sistemas de aterramento, dependendo do grau de conhecimento que se tenha de sua configuração, relativamente ao ponto de injeção de corrente. A determinação dos parâmetros do aterramento é feita, então, por método de estimação.

Esta metodologia baseia-se nas medições de diferença de potenciais entre pontos próximos às extremidades das malhas de terra, de forma a se conhecer a resistência específica da malha e/ou a impedância do sistema formado pela malha e suas interconexões.

Os resultados variam de acordo com a existência ou não de outros sistemas de aterramento interconectados ao aterramento sob medição. Para malhas conectadas a outros sistemas de aterramento, por exemplo, cabos para-raios de linhas de transmissão

o valor mínimo da curva sem compensação (obtido nas proximidades da periferia da malha) tende ao valor da resistência da malha. Enquanto o valor mínimo da curva com compensação (obtido nas proximidades da periferia da malha) tende ao valor da impedância do sistema.

Pela metodologia DDPprox basta então medir-se o valor da diferença de potencial entre malha e um ponto a 1m de sua periferia, referenciar-se à corrente de medição, para obter a resistência específica da malha de terra (valor sem compensação) ou a impedância do sistema (valor com compensação).

Para malhas desacopladas (isoladas) de outros sistemas de aterramento, na frequência de 25 kHz, os valores sem compensação, das diferenças de potenciais em relação à malha, e consequentemente os valores de resistência de aterramento, para pontos externos, porém próximos da periferia da malha, aproximam-se dos valores obtidos no patamar da curva com compensação, caso fosse efetuado o levantamento pelo método convencional reduzido.

Dessa forma, na metodologia DDPprox não há necessidade do levantamento completo da curva de variação da resistência em função do posicionamento do eletrodo de potencial até a obtenção do patamar característico da inexistência de influência da malha (resistência de aterramento constante).

Basta efetuarem-se algumas medições próximas à periferia da malha, notadamente em uma de suas quinas, caso haja simetria na mesma, por apresentarem essas regiões, as maiores concentrações de potenciais.

A metodologia DDPprox pode ser aplicada a malhas de aterramento com configuração conhecida (figura 24) – informadas pelo operador as coordenadas limítrofes da configuração, o *software* indica o posicionamento do eletrodo de corrente e dos eletrodos de potencial em pontos notáveis como o centro de maior e menor quadricula, pontos de quina de periferia, etc., a partir de um local de referência (centro geométrico do sistema, neutro de um transformador, etc.). Feitas as medidas, o *software* fornece o valor da impedância do aterramento.

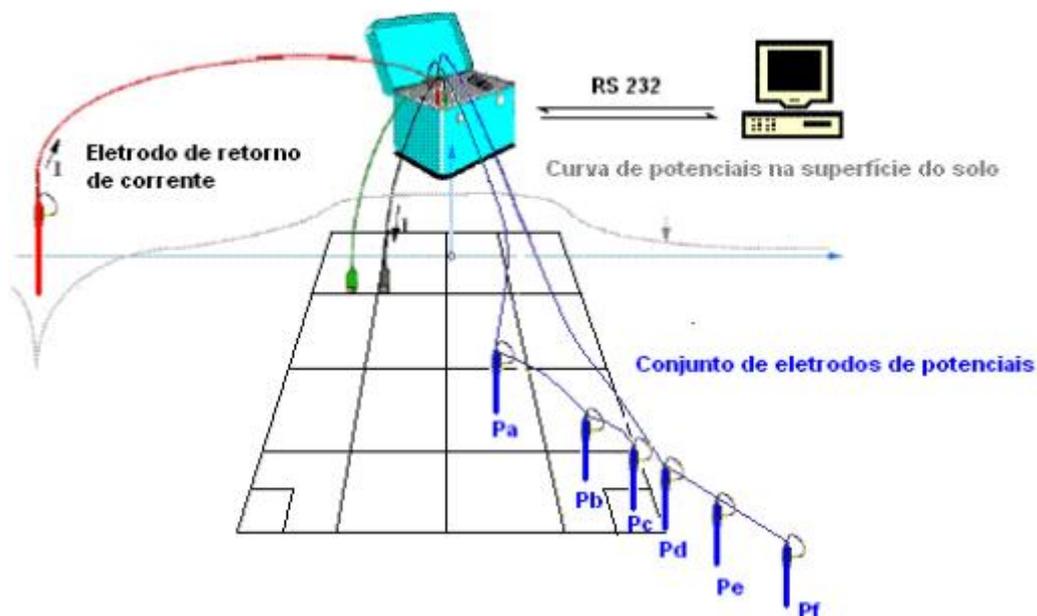


Figura 24 : Metodologia DDpprox aplicada a malhas de aterramento com configuração conhecida [11]

Esta metodologia também pode ser aplicada em malhas de aterramento com configuração desconhecida, conforme figura 25 – quando não se dispuser de informações do sistema de aterramento (dimensões reais, tamanhos de quadrículas, profundidade de condutores, etc.), o operador informa as coordenadas do ponto de injeção de corrente escolhido (provavelmente o neutro de um transformador) e as coordenadas de um provável condutor periférico previsto a partir da presença de algum elemento (final de camada de brita, alambrado divisório de área energizada, etc.).

O operador efetua o posicionamento do eletrodo de corrente e dos eletrodos de potencial (em números e espaçamentos diferentes e aleatórios em função das características da planta do local), independentemente de se conhecer a posição relativa do sistema de aterramento. Feitas as medidas, o *software* fornece o valor da impedância do aterramento, utilizando o algoritmo de estimação.

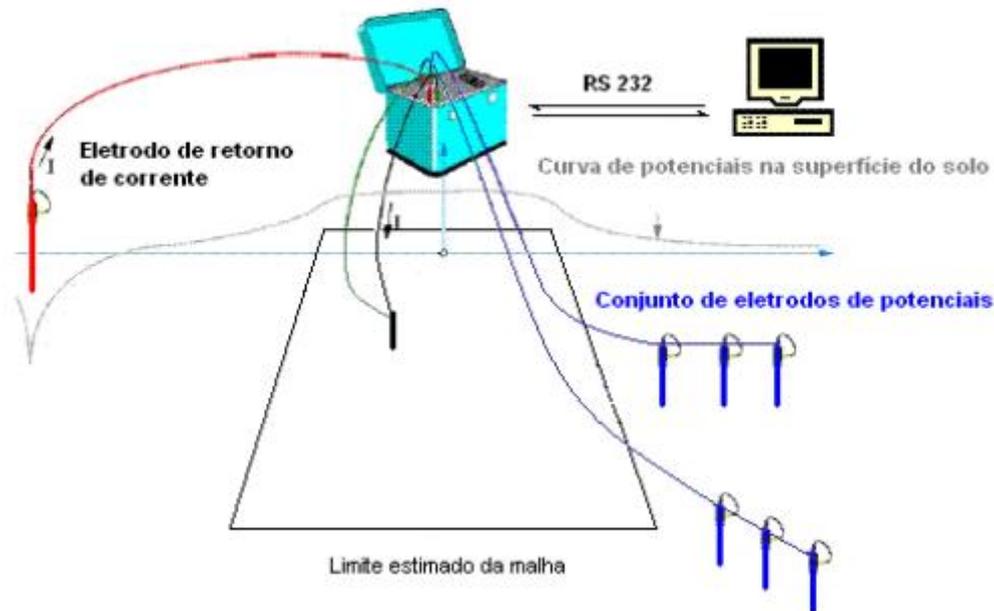


Figura 25 : Metodologia DDpprox aplicada a malhas de aterramento com configuração desconhecida [11]

7.3 TESTES EM CAMPO [11]

Foi realizado um teste em campo, a partir da metodologia convencional reduzida para verificar a eficiência dos métodos. Testou-se o sistema com a frequência de 25kHz, na malha de terra de uma subestação 138 / 13,8 kV, 10-12,5 MVA, em solo com resistividade da camada equivalente de 780 ohm.m, espessura da camada equivalente de 3,61 m, resistividade da camada inferior de 585 ohm.m, o que indica um coeficiente de reflexão $k = -0,12$ [11].

Pelo memorial construtivo, a malha de aterramento da SE é composta de 1761 metros de cabo de cobre nu de secção 95 mm², dispostos numa área de 2484 m² (área energizada), com quadrículas de 3m x 3m (dimensões retangulares de 36 m x 69 m). Complementando a rede em pontos críticos (vértices e equipamentos) existem 63 hastes de aço acobreado de 3000 mm x 19 mm. A subestação é alimentada por um vão de 50m derivando de uma linha de transmissão 138kV, com 2 cabos guarda ligados ao seu pórtico.

O processamento em computador forneceu para a malha uma resistência de aterramento de 5,42 ohm. No quadro e no gráfico a seguir mostram-se os valores obtidos (com e sem compensação reativa) pelo deslocamento do eletrodo de potencial, a partir de um eletrodo de corrente instalado a 270 metros do neutro de baixa tensão do transformador de força (ponto de injeção de corrente de teste). Observa-se a tendência da curva com valores compensados em estabilizar no patamar próximo a 5,4 ohm.

EP (m)	Rsc (Ω)	Rcc (Ω)	Calculado (Ω)
170	5,50	13,0	5,4
160	5,30	12,2	5,4
150	5,40	11,6	5,4
130	5,70	11,2	5,4
120	5,80	11,4	5,4
110	5,20	10,0	5,4
100	3,90	9,2	5,4
90	3,20	8,4	5,4
80	3,30	8,5	5,4
70	2,80	8,2	5,4
60	2,60	7,4	5,4
50	2,40	7,0	5,4
40	2,20	6,5	5,4
35	1,90	6,0	5,4
30	1,75	5,6	5,4

Quadro 4 : : Dados obtidos em campo e calculados [11]

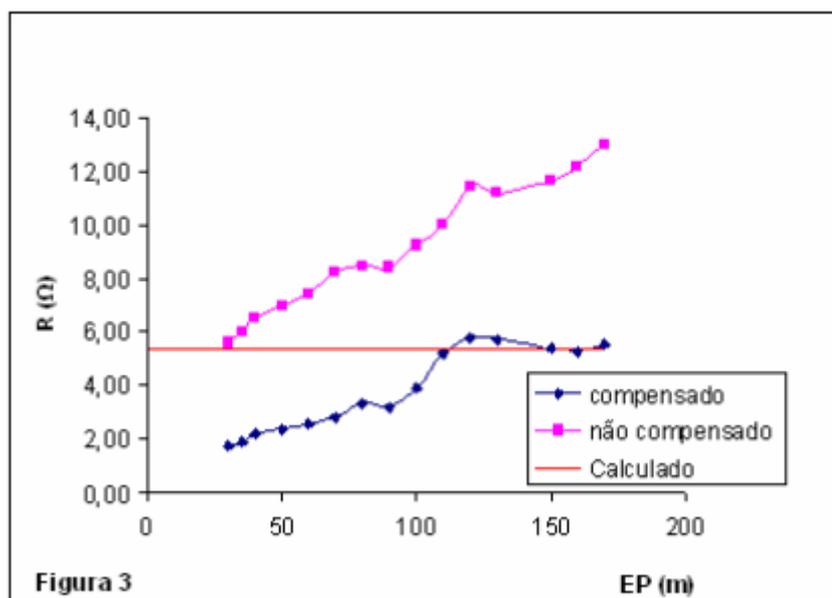


Figura 26 : Curvas obtidas em medições no campo [11]

Para a Metodologia DDPprox deve ser feita uma melhor análise com os valores não compensados. A expectativa é de que o valor mínimo da curva não compensada (obtido nas proximidades da malha) tenda ao valor da resistência da malha, enquanto que o valor mínimo da curva compensada tenda ao valor da impedância do sistema, nesta situação estimado em 1,76 ohm.

Estes métodos para a medição da resistência de aterramento de uma subestação energizada necessitam ser desenvolvidos, fazendo-se mais testes e aperfeiçoando o programa para análise dos dados. Isto é de suma importância, pois nota-se uma tendência de convergência de posicionamento para distância da ordem de 1,25 vezes a maior dimensão da malha, o que se traduz em um ganho imediato se comparado com as dificuldades de medição convencional.

Já existem equipamentos que podem ser adquiridos no mercado que fazer medidas em altas frequências (25 kHz). Um exemplo é o medidor de resistência de terra da marca Megabras, modelo TM-25m, desenvolvido para medições de resistência de aterramento em torres de transmissão de energia e em malhas de aterramento de subestações. O equipamento funciona com correntes na frequência de 25 kHz, e indica diretamente em seu display o valor da resistência do aterramento em Ohms [22].

Algumas concessionárias de energia elétrica já estão utilizando como normas técnicas o uso do método de medição em alta frequência para a resistência de aterramento em subestações energizadas ou não, como por exemplo a CELG Distribuição S.A., que junto com a CELG Geração e Transmissão S.A. formam a *holding* Companhia Celg de Participações (Celpar), que opera no Estado de Goiás [2].

A aplicabilidade destes métodos em alta frequência está se mostrando muito eficiente, tendo como resultados valores coerentes com os medidos em campos por métodos mais tradicionais. A comprovação da eficiência destes métodos teria uma grande influência nas técnicas de medições usadas atualmente, pois ao poder utilizar o método de alta frequência para a medição da resistência de aterramento em subestações energizadas ou não, com pequenas e grandes dimensões e com qualquer geometria,

facilitaria o desenvolvimento de ampliações e manutenção das redes de terra de subestações.

Essas melhorias e facilidades aconteceriam, pois assim poderia ter a padronização de um método único para essas medições, não importando o tamanho e configuração do sistema de aterramento. Com isso pode-se fazer medições mais eficientes e precisas, realizá-las mais rapidamente, além de proporcional em economia de custos em todo o processo de um projeto de aterramento de uma subestação.

8 ANÁLISE DAS METODOLOGIAS

A explanação e análise das metodologias para medição de dados de redes de aterramento em subestações energizadas é de grande importância para dar continuidade aos estudos nestas metodologias.

Neste trabalho foram realizadas pesquisas de técnicas existentes em artigos, anais de seminários e convenções, livros e de equipamentos e programas existentes nos mercados nacionais e internacionais que podem realizar as medições realizadas.

Foram vistos dois métodos, que utilizam altas frequências (método convencional reduzido e DDPprox), sendo analisadas as suas eficiências e aplicabilidade.

Com esta metodologia de altas frequências normalizada, será possível reduzir os custos da avaliação das malhas de terra em subestações, seja pela praticidade do método, seja por não ser necessário efetuar o desligamento das mesmas.

Foi visto que este método pode ser aplicado em campo, podendo ser utilizado em redes de aterramento com os mais variados arranjos. Verificou-se que com a utilização deste método, as distâncias dos eletrodos de corrente e potencial podem ser na razão de 1,25 vezes a maior dimensão da malha de terra, em contrapartida do valor de 4 a 5 vezes da distância necessária para medições nos métodos convencionais. Isto pode fazer com que grande parte das medições sejam feitas dentro ou muito próximas dos limites das subestações.

Deixa-se como sugestão a realização de mais medições utilizando os métodos convencionais e os métodos de alta frequência, fazendo a comparação dos dados obtidos. Somente assim, esta nova metodologia poderá ser aperfeiçoada, comprovada e normalizada.

CONCLUSÃO

O sistema de aterramento de uma subestação de energia é complexo, pois envolve a maioria das técnicas mais usuais (cabos, hastes, placas, etc.) em um único sistema.

Por ser um sistema complexo, envolvendo tensões e correntes elevadas, o aterramento de uma subestação exige um conhecimento profundo dos materiais necessários para a sua construção, das técnicas e equipamentos utilizados para a obtenção dos dados necessários.

É muito importante ter uma rede de aterramento eficiente em uma subestação, pois somente assim é possível manter os níveis de segurança para as pessoas que trabalham nela. Assim como manter a segurança em áreas próximas às subestações, pois muitas delas estão em áreas densamente povoadas. Apesar de ter um elevado custo para a sua construção, é fundamental ter um sistema de aterramento eficiente, pois não pode-se colocar preço no que se refere à segurança das pessoas.

A partir da realização deste trabalho pode-se sugerir que seja dada uma maior importância na preservação dos dados e desenhos dos projetos dos sistemas de aterramento das subestações. A preservação destes dados é de grande importância, pois ao não se ter eles, pode dificultar a manutenção ou ampliação do rede de aterramento, assim aumentando os custos envolvidos neste processo.

Também sugere-se uma maior fiscalização na realização da obra da rede de aterramento pela empresa responsável pela subestação. Este item é importante para ter a certeza que o projeto foi executado corretamente, garantido assim a eficácia do sistema de aterramento. Outro quesito muito importante é a realização de medidas de resistência de aterramento ao longo dos anos, por exemplo, a cada 5 anos em grandes subestações e a cada 10 anos em pequenas subestações, para verificar a eficácia do sistema de aterramento.

O desenvolvimento de novas técnicas e equipamentos para realizar medidas em subestações energizadas é de grande importância, pois assim pode-se padronizar as técnicas envolvidas. Deste modo, pode-se melhorar todo o processo ao se obter dados confiáveis, poucos riscos às pessoas envolvidas, menor tempo para realizá-las e uma economia no custo final. Por isso, deve-se continuar o desenvolvimento do método de medição em altas frequências. Com isto, é visto como muito importante a realização de mais testes e a comprovação da eficácia da medição em altas frequências, pois este método pode trazer grandes ganhos para todos os profissionais e empresas do ramo. Deste a facilidade e agilidade nas medições, até a segurança dos profissionais envolvidos e a diminuição dos custos.

O Curso de Engenharia Elétrica abre uma gama de alternativas voltadas as diversas frente de trabalho, como, por exemplo, os sistema de aterramento, o qual é o enfoque do trabalho aqui apresentado. Buscou-se apresentar o trabalho para um entendimento imediato, facilitando os esclarecimentos das ocorrências envolvendo aterramentos. Portanto, ao longo do desenvolvimento do trabalho apresentado, houve um esforço para que o mesmo apresentasse uma comunicação clara possibilitando ao leitor um aprendizado claro sobre o sistema de aterramento em uma subestação.

REFERÊNCIAS

1. KINDERMANN, G.; CAMPAGNOLO, J. M. **Aterramento Elétrico**. Porto Alegre: Sagra Luzzatto, 1998.
2. MAMEDE FILHO, J. **Proteção de equipamentos eletrônicos sensíveis: aterramento**. São Paulo: Érica, 1997.
3. CELG DISTRIBUIÇÃO S.A. **Norma Técnica: Critérios para Projetos e Procedimentos para Execuções de Aterramento de Redes Aéreas e Subestações de Distribuição**. [S.l.], p. 112. 2008.
4. ABNT, A. B. D. N. T.-. **NBR 7117: Medição da resistividade do solo pelo método dos quatro pontos (Wenner)**. [S.l.], p. 15. 1981.
5. ABNT, A. B. D. N. T.-. **NBR 7117: 1º Projeto de revisão**. [S.l.], p. 66. 2011.
6. ABNT, A. B. D. N. T.-. **NBR 15748: Medição de resistência de aterramento e de potenciais na superfície do solo em sistemas de aterramento**. [S.l.], p. 49. 2009.
7. ABNT, A. B. D. N. T.-. **NBR 15751: Sistemas de aterramento de subestações - Requisitos**. [S.l.], p. 47. 2009.
8. IEEE, T. I. O. E. A. E. E.-. **IEEE Std 81: IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Ground System**. [S.l.], p. 7-42. 1983.
9. IEEE, T. I. O. E. A. E. E.-. **IEEE Std 80: IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding**. [S.l.], p. 192. 2000.
10. 04, G. D. S. E. E. E.-. **Medição da resistência de malhas de terra energizadas, em SE's 34,5/13,8 kV e obtenção da resistividade de solos de SE's, em laboratório**. XVIII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica - SNPTEE. Curitiba, p. 8. 2005.
11. 05, G. D. E. D. S. E. E. E.-. **Protótipo de medição de malha de terra em subestações energizadas**. XVIII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica - SNPTEE. Curitiba, p. 8. 2005.
12. 06, G. D. E. D. S. E. E. E.-. **Avaliação de malhas de terra em subestações energizadas através de medições seletivas em frequências diferentes de 60 Hz**. XVIII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica - SNPTEE. Curitiba, p. 8. 2005.
13. FILIPPON, D. G. **Cálculo de Potenciais em Malhas de Aterramento Utilizando o AutoCad**. Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul - PUCRS. Porto Alegre, p. 139. 2003.
14. INTERNATIONAL, C. **CYMGD FOR WINDOWS - USER'S GUIDE AND REFERENCE MANUAL**.

- Burlington. 2000.
15. MYDIA, O. D. **TecAt V PRO/PLUS - Manual do Usuário Versão 2.0**. [S.l.]. 2011.
 16. DAWALIB, F. . B. N. **Measeurements and computations os the performance of grounding systems buried in multilayer soils**. IEEE Transactions on Power Delivery. [S.l.]. 1991.
 17. DAWALIBI, F. . M. D. **Optimun Design of Substation Grounding In a Two Layer Earth Structure Part I - Analytical Study**. IEEE Transactions on Power Apparatus Systems. [S.l.]. 1975.
 18. DAWALIBI, F. . M. D. **Optimun Design of Substation Grounding In a Two Layer Earth Structure Part II - Comparison Between Theoretical and Experimental Results**. IEEE Transactions on Power Apparatus Systems. [S.l.]. 1975.
 19. DAWALIBI, F. . M. D. **Optimun Design of Substation Grounding In a Two Layer Earth Structure Part III - Study of Grounding Grids Performance and New Electrodes Configuration**. IEEE Transactions on Power Apparatus Systems. [S.l.]. 1975.
 20. TECHNOLOGIES, S. E. S. &. **How to. Engineering guide. A simple substation grounding analysis**. Quebec. 2000.
 21. SOLDAGEM exotérmica. **Met@lica**. Disponível em:
<<http://www.metallica.com.br/soldagem-exotermica>>. Acesso em: 07 jun. 2012.
 22. EQUIPAMENTOS Eletrônicos de Medição. **Megabras**. Disponível em:
<http://www.megabras.com/portugues/produtos/terrometros/TM_25m.htm>. Acesso em: 07 jun. 2012.
 23. CARSON, J. R. **Wave Propagation in Overhed Wires with Ground Return**. [S.l.]: Bell Syst, v. 5, p. 539-554, 1926.
 24. BELTANI, J. M. **Medição de Malha de Terra em Subestações Energizadas**. Universidade Estadual Paulista. Ilha Solteira, p. 81. 2007.