

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**“MEDIÇÃO DE MALHA DE TERRA EM SUBESTAÇÕES  
ENERGIZADAS”**

Dissertação submetida à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica (ME).

ALUNO: JULIANO MUNHOZ BELTANI

ORIENTADOR: DR. LUIZ FERNANDO BOVOLATO

ILHA SOLTEIRA  
2007.

## FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação/Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação da UNESP-Ilha Solteira

B453m Beltani, Juliano Munhoz.  
Medição de malha de terra em subestações energizadas /  
Juliano Munhoz Beltani. -- Ilha Solteira : [s.n.], 2007  
81 p. : il. (algumas fotos)

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2007

Orientador: Luiz Fernando Bovolato  
Bibliografia: p. 79-81

1. .Medidas elétricas. 2. Correntes elétricas – Aterramento. 3. Medição. 4. Instrumentos de Medição. 5. Medidores de tensão.

**CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**

**TÍTULO: Medição de Malha de Terra em Subestações Energizadas**

**AUTOR: JULIANO MUNHOZ BELTANI**

**ORIENTADOR: Prof. Dr. LUIZ FERNANDO BOVOLATO**

Aprovada com parte das exigências para obtenção do Título de MESTRE em ENGENHARIA ELÉTRICA pela Comissão Examinadora:

  
Prof. Dr. LUIZ FERNANDO BOVOLATO

Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

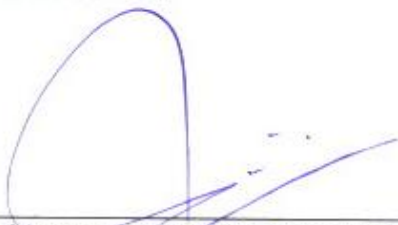
  
Prof. Dr. JOSÉ CARLOS ROSSI

Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

  
Prof. Dr. EDILSON DE ANDRADE BARBOSA

Departamento de Engenharia Elétrica / Universidade de Lins - UNILINS

Data da realização: 02 de fevereiro de 2007.

  
\_\_\_\_\_  
Presidente da Comissão Examinadora  
**Prof. Dr. Luiz Fernando Bovolato**

## DEDICATÓRIA

*À Michelle, meu grande amor, companheira, paciente e compreensiva em todas as horas, um presente que Deus colocou em minha vida.*

*Aos meus pais, Laudelino e Cecília, que Deus tão bem escolheu para dar vida a minha vida, meus maiores educadores.*

*Ao nosso filho Giovane, que veio ao mundo no momento final deste estudo, sendo a inspiração para chegar ao final e o maior presente que Deus podia me dar.*

*A toda minha família, que torcem por mim e estão sempre ao meu lado.*

*Meu amor por vocês é incondicional.*

## AGRADECIMENTOS

*A Deus, pois sem Tê-Lo ao meu lado constantemente, nada seria possível.*

*Todas aquelas pessoas que fazem parte da minha vida, compartilhando todos os momentos juntos. Aos meus familiares, e à família da Michelle, que é minha também. A todos os nossos amigos que estão sempre presentes, e em especial à família vicentina de São Miguel que são muito mais que amigos, sempre rezando e torcendo por cada um.*

*Ao Prof. Dr. Luiz Fernando Bovolato, por ter se disponibilizado em me orientar, foi atencioso e firme quando necessário. À Prof<sup>a</sup>. Dra. Mariângela, sua esposa, pelo apoio e incentivo.*

*Ao Prof. Carlos Alberto Sotille, pela sua objetividade, que com sabedoria e experiência me ajudou a definir exatamente qual o caminho a seguir.*

*Ao Prof. Dr. Edílson de Andrade Barbosa, pelo incentivo, compreensão e apoio na elaboração do Estudo Especial e do trabalho apresentado no Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos.*

*Ao Prof. Plínio Norberto Zorman de Menezes, pelo incentivo no início deste estudo.*

*Ao amigo Anderson pelo auxílio na formatação e na confecção dos slides da apresentação da qualificação e da defesa final.*

*À banca da qualificação, pelas sugestões que auxiliaram no desenvolvimento final do trabalho.*

*A todos os profissionais que estiveram junto comigo na execução deste estudo e pelo incentivo e apoio em especial ao engenheiro e amigo Nemer Paschoal Fioravante Junior.*

*Aos amigos José Aparecido, Adriano Bien e Everaldo que me incentivaram a trilhar este caminho desde o início, acompanhando todos os passos principalmente nas viagens a Ilha Solteira.*

*Ao Tio Jura, pela atenção, amizade e auxílio nas estadias quando necessárias.*

*Aos funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica, da Seção de Pós-graduação e da Biblioteca, que estão sempre prontos a nos ajudar no que for preciso.*

*À Fundação Paulista de Tecnologia e Educação através do seu Centro Universitário e do Centro Tecnológico, pela atenção que disponibilizaram para a realização deste estudo de Mestrado. Aos Diretores, Professores e Colaboradores o meu muito obrigado.*

## RESUMO

Os sistemas de aterramento de subestações exigem uma avaliação permanente devido não só ao envelhecimento das malhas de terra, problemas de corrosão, ocorrência de vandalismo, assim como à ação de pessoas qualificadas ou não. Como as condições de se desligar a energia de uma subestação ficaram cada vez mais difíceis de acontecer, cresceu a necessidade de se buscarem alternativas de medições viáveis, dando-se preferência aos métodos de medição de subestação energizada. Esporadicamente, uma ou outra empresa busca desenvolver técnicas de medições com as instalações energizadas, deparando-se, porém, com obstáculos que comprometem a qualidade dos resultados de ensaios, quais sejam as interferências eletromagnéticas nos instrumentos utilizados e, conseqüentemente, nas leituras realizadas, exposição a riscos (segurança pessoal e aparelhos utilizados), bem como os longos períodos tomados na execução dos ensaios. Este trabalho tem como objetivo a validação de um método existente, por meio de estudos de casos, a qual propicia uma rápida avaliação da malha de forma segura, sem prejudicar tanto a qualidade quanto a continuidade do fornecimento de energia. Esta proposta de validação é baseada nos procedimentos atualmente utilizados na medição de malhas de subestações desenergizadas com experimentos feitos por concessionárias e pesquisadores do país e do exterior, em instalações energizadas, visando contribuir com novos dados, para a discussão de viabilidade de medição de malhas de terra em subestações energizadas.

**Palavras-chave:** Subestação, Aterramentos, Segurança, Tensões Permissíveis, Medições.

## ABSTRACT

The energy substation embankment systems require a permanent assessment due to not only the aging of the land meshes, corrosion problems and vandalism occurrences, but also for the actions of people, being qualified or not. Since the conditions to turn an energy substation off are more and more difficult to cause intentionally for maintenance reasons, a need for practicable measurement alternatives has increased, preferably the methods of measuring energized substations. From time to time a company tries to develop some measurement technique with the installations energized, however it confronts with some various constraints that may be risky for the quality of the test results, such as the electromagnetic interferences in the tools being used, consequently in the readings obtained; exposure to risks (personal safety and devices being used) as well as the fact of a testing accomplishment takes some long periods of time. This work aims, by means of studying some cases, to get some validation for an existing method which provides a rapid assessment of the land meshes in a safety way, with no harmful consequences for both the quality and the continuity of the energy supplying. The validation proposed is based on the procedures used in measuring the land meshes of no-energized substation nowadays, with some experiments carried out by some energy licensee and researchers in energized installations, both in Brazil and abroad, viewing to share some new data on the matter in discussion about the measuring of land meshes being practicable in substations energized.

**Key-words:** Substation, Embankment, Security, Voltage, Practicable, Measurement.



# SUMARIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>12</b>
<b>2. MÉTODOS E CONCEITOS.....</b>	<b>15</b>
2.1. Conceitos de aterramento.....	16
2.2. Resistividade do solo .....	18
2.2.1. Estratificação do solo .....	19
2.2.2. Determinação da resistividade do solo.....	20
2.3. Resistência de aterramento .....	21
2.3.1. Medição de resistência de aterramento .....	21
2.4. Conceitos básicos de segurança em aterramento.....	25
2.4.1. Caracterização de condições de risco.....	26
2.4.2. Efeitos da corrente elétrica no corpo humano .....	30
2.5. Normalização .....	31
<b>3. VIABILIDADE DA MEDIÇÃO DE MALHA DE TERRA EM SUBESTAÇÕES ENERGIZADAS.....</b>	<b>33</b>
3.1. Metodologias utilizadas no estudo de casos .....	35
3.1.1. Medição em alta frequência.....	35
3.1.2. Metodologia convencional reduzida .....	37
3.1.3. Metodologia de diferenças de potencial em pontos próximos ao sistema de aterramento – DDPprox .....	38
<b>4. MODELAGEM E ESPECIFICAÇÃO DO PROTÓTIPO UTILIZADO NO ESTUDO DE CASOS.....</b>	<b>41</b>
4.1. Modelagem de solo utilizada pelo protótipo para estratificação.....	41
4.1.1. Descrição da metodologia de modelagem de solo .....	41
4.1.2. Formulação analítica do método gráfico .....	42
4.1.3. Medição de resistividade .....	43
4.1.4. Aparelho de medição de resistividade.....	43
4.1.5. Método de Wenner .....	44
4.1.6. Estratificação do solo (camadas horizontais) .....	46
4.1.7. Método de estratificação utilizando 16 eletrodos .....	46
4.2. Elementos envolvidos na medição de aterramento com o protótipo de alta frequência .....	47
<b>5. ESTUDOS DE CASOS.....</b>	<b>51</b>
5.1. Metodologia convencional reduzida .....	51
5.1.1. CASO 1 – Malha de subestação 138 kV, com área de 2500 m <sup>2</sup> e com cabo pára-raios conectado.....	51
5.1.2. CASO 2 – Malha de subestação 34,5 kV, com área de 2900 m <sup>2</sup> e sem cabo pára-raios conectado. ....	53
5.1.3. CASO 3 – Malha de subestação 138 kV, com área de 4220 m <sup>2</sup> e com cabo pára-raios conectado à estrutura metálica de entrada e não diretamente à malha de terra.....	56

5.1.4.	CASO 4 – Malha de subestação 138 kV, com área de 1600 m <sup>2</sup> e sem cabo pára-raios conectado.....	58
5.1.5.	CASO 5 – Malha de subestação 34,5 kV, com área de 500 m <sup>2</sup> e sem cabo pára-raios conectado.....	60
5.1.6.	CASO 6 – Malha de subestação 138 kV, com área de 15400 m <sup>2</sup> e com cabo pára-raios da linha de transmissão ligado á malha através de condutor enterrado entre malha e primeira torre.....	62
5.1.7.	CASO 7 – Malha de subestação 138 kV, com área de 15000 m <sup>2</sup> e com cabo pára-raios conectado.....	64
5.2.	Metodologia DDPprox.....	67
5.2.1.	CASO 1 – Malha de subestação 138 kV, com área de 2500 m <sup>2</sup> e com cabo pára-raios conectado.....	68
5.2.2.	CASO 2 – Malha de subestação 34,5 kV, com área de 2900 m <sup>2</sup> e sem cabo pára-raios conectado.....	68
5.2.3.	CASO 3 – Malha de subestação 138 kV, com área de 4220 m <sup>2</sup> e com cabo pára-raios conectado à estrutura metálica de entrada e não diretamente à malha de terra.....	69
5.2.4.	CASO 4 – Malha de subestação 138 kV, com área de 1600 m <sup>2</sup> e sem cabo pára-raios conectado.....	69
5.2.5.	CASO 5 – Malha de subestação 34,5 kV, com área de 500 m <sup>2</sup> e sem cabo pára-raios conectado.....	69
5.2.6.	CASO 6 – Malha de subestação 138 kV, com área de 15400 m <sup>2</sup> e com cabo pára-raios da linha de transmissão ligado á malha através de condutor enterrado entre malha e primeira torre.....	70
5.2.7.	CASO 7 – Malha de subestação 138 kV, com área de 15000 m <sup>2</sup> e com cabo pára-raios conectado.....	70
<b>6.</b>	<b>ANALISE DOS RESULTADOS DO ESTUDO .....</b>	<b>72</b>
6.1.	Da metodologia adotada .....	72
6.2.	Dos resultados esperados.....	72
6.3.	Do aplicativo de análise do solo.....	75
6.4.	Do aplicativo de análise e medição do aterramento .....	75
<b>7.</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>77</b>
<b>8.</b>	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>79</b>

## Lista de Figuras

Figura 2.1 - Constituição de um aterramento.....	16
Figura 2.2 - Componentes de Corrente no solo.....	17
Figura 2.3 - Solo estratificado em várias camadas .....	19
Figura 2.4 - Solo estratificado em duas camadas .....	20
Figura 2.5 - Esquema de medição da resistência de terra.....	23
Figura 2.6 – Curva de resistência aparente em função da distância.....	24
Figura 2.7 - Esquema de ligação com 4 terminais utilizando o Megger .....	25
Figura 2.8 - Demonstração de um indivíduo submetido a uma tensão de passo.....	27
Figura 2.9 - Esquema elétrico para condição de tensão de passo.....	27
Figura 2.10 - Demonstração de um indivíduo submetido a uma tensão de toque.....	28
Figura 2.11 - Esquema elétrico para condição de tensão de toque.....	28
Figura 3.1 - Metodologia DDPprox aplicadas a malhas de aterramento com configuração conhecida .....	39
Figura 3.2 - Metodologia DDPprox aplicada a malhas de aterramento com configuração desconhecida. ....	40
Figura 4.1 - Arranjo geral para medição de resistividade.....	44
Figura 4.2 - Configuração de eletrodos para o Método de Wenner. ....	44
Figura 4.3 - Disposição dos eletrodos para a realização das medidas de estratificação .....	47
Figura 4.4 - Utilização dos eletrodos para a medição.....	47
Figura 4.1 - Vista do painel frontal do protótipo.....	48
Figura 4.3 - Esquema simplificado da medição .....	49
Figura 4.4 - Tendência das curvas “sem e com” compensação de reativos.....	50
Figura 5.1 – Planta da malha de aterramento caso 1 .....	52
Figura 5.2 – Gráfico da medição de campo caso 1.....	53
Figura 5.3 – Planta da malha de aterramento caso 2 .....	54
Figura 5.4 – Gráfico medição de campo caso 2 .....	55
Figura 5.5 - Planta da malha de aterramento caso 3 .....	56
Figura 5.6 – Gráfico medição de campo caso 3 .....	57
Figura 5.7 – Planta da malha de aterramento caso 4 .....	58
Figura 5.8 – Gráfico medição de campo caso 4 .....	59
Figura 5.9 – Planta da malha de aterramento caso 5 .....	60
Figura 5.10 – Gráfico medição de campo solo normal seco caso 5 .....	62
Figura 5.11 – Gráfico medição de campo solo normal úmido caso 5 .....	62
Figura 5.12 – Planta da malha de aterramento caso 6 .....	63
Figura 5.13 – Gráfico medição de campo caso 6 .....	64
Figura 5.14 – Planta da malha de aterramento caso 7 .....	65
Figura 5.15 – Gráfico medição de campo caso 7 .....	66

## Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Resistividade de alguns solos em função da composição .....	18
Tabela 2.2 - Potenciais de toque em função da resistividade do solo .....	29
Tabela 2.3 - Correntes permissíveis do corpo humano.....	30
Tabela 3.1 - Tabela resultante da formulação de Carson para a frequência de 60 Hz .....	36
Tabela 3.2 - Tabela resultante da formulação de Carson para a frequência de 25 kHz.....	36
Tabela 5.1 – Medição de campo caso 1 .....	52
Tabela 5.2 – Medição de campo caso 2 .....	55
Tabela 5.3 – Medição de campo caso 3 .....	57
Tabela 5.4 – Medição de campo caso 4 .....	59
Tabela 5.5 – Medição de campo solo normal seco caso 5 .....	61
Tabela 5.6 – Medição de campo solo normal unido caso 5 .....	61
Tabela 5.7 – Medição de campo caso 6.....	64
Tabela 5.8 – Medição de campo caso 7 .....	66

## 1. INTRODUÇÃO

As restrições ao desligamento de uma rede conquistam mais aliados nos dias de hoje, por razões que vão desde a área técnica à comercial, passando sempre pela questão legal do órgão regulador/fiscalizador.

O objetivo essencial de executar trabalhos sem interrupção do fornecimento de energia, isto é em instalações energizadas, é efetuar intervenções nas instalações elétricas e, ao mesmo tempo manter a continuidade da alimentação. [1]

Dessa forma, um método de medição que propicie uma rápida avaliação da malha, sem prejudicar a qualidade do fornecimento, seria muito bem recebido.

O aperfeiçoamento de um método de medição de malhas de terra, que viesse a melhorar a satisfação do consumidor, reduzindo os custos reais de perda de suprimento e agilizando operacionalmente os programas de manutenções de subestações.

Os métodos aplicáveis às avaliações em malhas de subestações no Brasil e no mundo são compostos por vários procedimentos onde a etapa principal é a obtenção da resistência da malha em ensaio. A partir dos parâmetros resistência, estratificação do solo e localização dos elementos da malha de aterramento da subestação é possível calcular e simular situações de operação do sistema, onde a malha da subestação é solicitada. Estes procedimentos são baseados em experimentos feitos, em instalações desenergizadas e energizadas, por pesquisadores brasileiros e de outros países.

Entre os vários métodos utilizados para análise de sistemas de aterramentos de subestações, destacam-se a seguir:

O método utilizado por um equipamento desenvolvido pela empresa Hood-Paterson & Dewar, denominado Smart Ground Multimeter – SGM, é composto por um instrumento capaz de medir a impedância de terra de um sistema de aterramento com o sistema energizado e utiliza-se do método de queda de potencial, não há informações sobre a frequência que é injetada. Sabe-se, no entanto que o equipamento fornece a impedância do sistema de aterramento através do método de estimativa. [2], [3]

O segundo método estudado foi o desenvolvido pelo Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento - LACTEC em parceria com a Companhia Paranaense de

Energia - COPEL, para subestações de 34,5 kV e 69 kV, que consiste em medir a corrente injetada na malha de terra pelo próprio sistema e medir a tensão da malha com relação a um eletrodo remoto de potencial, dispensando assim uma fonte de corrente e reduzindo o tempo de execução da medição. Este sinal de corrente é medido por meio de transdutores corrente/tensão posicionados nas descidas de aterramento do neutro dos equipamentos de alta tensão (transformadores, reatores, bancos e reguladores de tensão). Para diminuir o número de pontos de medição, e conseqüentemente o número de transdutores instalados, alguns equipamentos ou circuitos podem ser desligados durante as medições. Os valores de cada ponto são somados eletricamente, medidos e colocados junto com o sinal da tensão da malha na tela de um osciloscópio digital (para ver a coerência entre os valores de tensão e corrente). [4]

O terceiro método é o da Eletrosul Centrais Elétricas S.A.; este método injeta uma corrente de frequência próxima de 60 Hz na malha. Precisa de um eletrodo remoto de corrente (normalmente a malha de terra de uma torre de linha de transmissão, situada a uma certa distância da subestação) e de uma fonte com possibilidade de ajustar a frequência, com potência e tensão suficientes para o circuito total de medição. [5]

O quarto método e objeto de estudo deste trabalho foi o desenvolvido pela Fundação Paulista de Tecnologia e Educação - FPTE. Este método denominado Protótipo de Medição de Malha de Terra em Subestações Energizadas é parte integrante do programa anual de Pesquisa e Desenvolvimento - P&D, da Empresa Energética de Mato Grosso do Sul S.A. - ENERSUL Energias do Brasil, ciclo 2003/2005. Este método emprega fonte de corrente adaptada para frequências de 270 Hz, 1,47 kHz e 25 kHz. Uma das vantagens é que precisa de distâncias bastante curtas para o posicionamento dos eletrodos de corrente e tensão com relação às distâncias normalmente necessárias para malhas de grandes dimensões. Também dispensa a desconexão dos cabos pára-raios das linhas de transmissão e a sua influência é compensada por cálculo a partir dos dados de ensaio. [6]

Este estudo se propõe a viabilizar a execução da medição da resistência de aterramento em subestações energizadas e validar um dos métodos por meio de estudos de casos (medições amostrais em subestações dos mais variados arranjos, com alto grau de interferência com centros de distribuição), verificando a aplicabilidade de campo da metodologia e do equipamento desenvolvido. Com base

nos estudos espera-se verificar a segurança operacional das subestações e comunidades circunvizinhas.

O trabalho apresenta além do método de medição de malhas de terra em subestações energizadas, os conceitos envolvidos na medição de malhas de terra de subestações desenergizada.

Pretende-se, mostrar a importância que os sistemas de aterramento têm nas instalações elétricas de alta e de baixa tensão.

Os métodos e os conceitos envolvidos na medição de aterramento elétrico são apresentados no capítulo 2, como a resistividade do solo e a resistência de aterramento. Faz-se também, uma apresentação da aplicação e classificação de aterramento, bem como os conceitos básicos de segurança. Também será abordada a normalização existente no âmbito nacional.

O capítulo 3 apresenta a viabilidade da medição de malha de terra em subestações energizadas, onde são mostradas metodologias: de desenvolvimento do protótipo de medição em alta frequência; a metodologia convencional reduzida e de diferenças de potencial em pontos próximos ao sistema de aterramento.

As especificações, a modelagem, a descrição do software e do hardware do protótipo, utilizado nos estudos de caso, são apresentadas no capítulo 4.

No capítulo 5, apresentam-se os estudos de casos deste trabalho, constituído dos testes de campo, utilizando-se a metodologia convencional reduzida e de diferenças de potencial em pontos próximos ao sistema de aterramento, denominado neste estudo, como DDPprox.

As análises dos resultados dos testes de campo são apresentadas no capítulo 6.

As conclusões obtidas com o estudo são descritas no capítulo 7.

## 2. MÉTODOS E CONCEITOS

Há diversas bibliografias relacionadas ao termo aterramento. Este termo refere-se a terra propriamente dita ou uma grande massa que se utiliza em seu lugar. Quando dizemos que algo está “aterrado”, queremos dizer então que, pelo menos, um de seus elementos está propositalmente ligado a terra. [7]

Em qualquer edificação moderna, encontram-se instalações elétricas, eletrônicas e mecânicas que necessitam de alguma forma de aterramento, seja para uma proteção em caso de eventual falha de algum sistema, para dissipação de eletricidade estática ou ainda proteções contra descargas atmosféricas e surtos de manobra. Isso consiste em uma ligação elétrica proposital de um sistema físico, como elétrico, eletrônico ou corpos metálicos ao solo. [8], [9]

Um sistema elétrico ou eletrônico quando está em operação, fica sujeito a ocorrências internas, por exemplo, transitórios devido a chaveamentos e ocorrências externas, como interferências geradas por fenômenos, equipamentos ou outros sistemas acoplados eletromagneticamente com o primeiro. Essas ocorrências podem perturbar o seu funcionamento e, na maioria das vezes, danificar componentes do sistema. [9]

Os sistemas de aterramento são componentes fundamentais em uma instalação elétrica, seja nos circuitos de potência, no controle de telecomunicações ou na transmissão de dados.

Para que um sistema elétrico opere corretamente, mantendo a continuidade dos serviços e a segurança pessoal, é necessário que todos os equipamentos, bem como o condutor neutro da rede de alimentação, estejam devidamente aterrados. Para tanto, a elaboração de um projeto, baseado no dimensionamento correto dos aterramentos é de suma importância, visto que vantagens técnicas e econômicas são obtidas dessa forma.

A resistência de aterramento oferecida por aterramento simples, na maioria das vezes não é suficientemente baixa, a ponto de se encaixar nos valores máximos preceituados por normas, já que esta depende diretamente do valor da resistividade do solo na profundidade em que se acha enterrado o eletrodo.



## 2.1. Conceitos de aterramento elétrico

Essencialmente, aterramento é uma conexão elétrica a terra, representando o valor da resistência de aterramento, a eficácia desta ligação, ou seja, quanto menor a resistência, melhor o aterramento. [7], [8]

Há várias maneiras para aterrar um sistema elétrico, desde a mais simples esfera, passando por placas de formas e tamanhos diversos, fitas metálicas que se prolongam por faixas de terrenos, chegando as mais complicadas configurações de cabos enterrados no solo.

Existe uma ampla gama de funções que o aterramento pode desempenhar no sistema. O aterramento pode assumir configurações muito diversificadas, conforme a natureza dessa função. Entretanto, as correspondentes aplicações estão sempre associadas a dois fatores fundamentais: o desempenho do sistema ao qual o aterramento será conectado, neste caso, pode-se citar o uso do solo como condutor efetivo de retorno, quando a corrente alternada ou contínua é injetada no aterramento, ou ainda, as funções associadas à proteção do sistema; e as questões de segurança dos seres vivos e proteção de equipamentos, permitindo o escoamento para a terra de cargas ou de correntes de descarga e ainda, ao promover a distribuição segura de potenciais na superfície do solo, quando é injetada corrente em seus eletrodos. [9], [10]

Um aterramento é constituído basicamente de três componentes: as conexões elétricas que ligam um ponto do sistema aos eletrodos, os eletrodos de aterramento e a terra que envolve os eletrodos, como ilustra a figura 2.1.

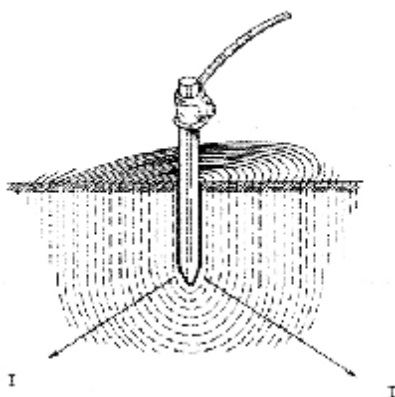


Figura 2.1 - Constituição de um aterramento

O ponto do sistema que se deseja conectar ao solo pode ser de natureza variada. Dependendo da aplicação, este pode constituir-se em uma trilha numa placa de circuito impresso, na carcaça de um motor ou de um computador ou, ainda, no neutro de um sistema elétrico.

Os eletrodos de aterramento, basicamente são constituídos de qualquer corpo metálico enterrado no solo, como por exemplo, barras de material em cobre ou aço cobreado, cantoneiras de ferro galvanizado, sistemas hidráulicos ou malhas de condutores de cobre em reticulado. A disposição geométrica dos eletrodos no solo depende de sua aplicação. O mais comum é a utilização de hastes verticais, usadas principalmente quando as camadas mais profundas do solo têm menor resistividade. [9], [10]

Para se avaliar a natureza dos aterramentos, deve ser considerado que, em geral, uma conexão a terra apresenta resistência, capacitância e indutância, cada qual influenciando na capacidade de condução de corrente para terra. A impedância é a maneira na qual o sistema enxerga o aterramento. Esta impedância, denominada Impedância de Aterramento, pode ser conceituada como a oposição oferecida pelo solo à injeção de corrente elétrica no mesmo, através dos eletrodos, e se expressa quantitativamente por meio da relação entre a tensão aplicada ao aterramento e a corrente resultante. [9]

A figura 2.2 ilustra a natureza dessa impedância, que apresenta uma representação simplificada de aterramento por meio de um circuito equivalente e explica sucintamente a origem da sua configuração.

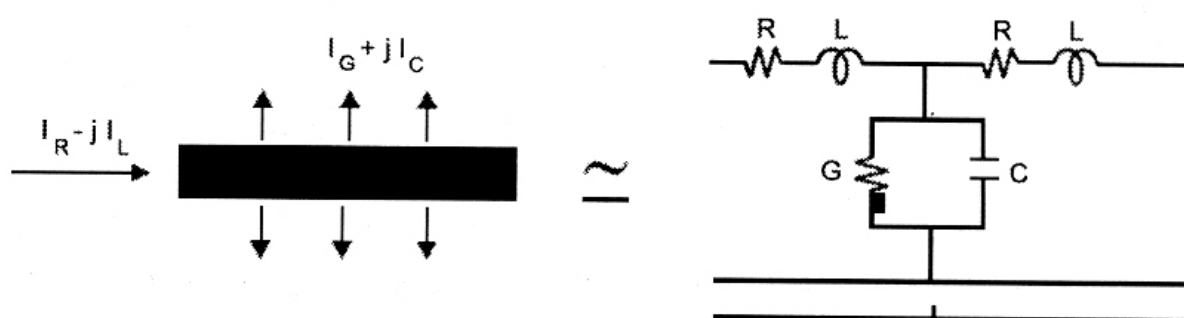


Figura 2.2 - Componentes de Corrente no solo

Se uma porção limitada do eletrodo é considerada, pode-se notar que a corrente dissipada para o solo é composta pelas quatro componentes representadas na figura. A corrente que é injetada no eletrodo é parcialmente dissipada para o solo

e parcialmente transferida para o comprimento restante do eletrodo. No que concerne a essa última parcela, nas correntes longitudinais são observadas perdas internas ao condutor, e um campo magnético é estabelecido na região em volta dos caminhos da corrente, tanto no interior como no exterior do condutor. Em termos de um circuito equivalente, o cômputo das energias correspondentes pode ser feito por meio de uma resistência e uma indutância em série. [9]

## 2.2. Resistividade do solo

A terra, isto é o solo, pode ser considerado como um condutor através do qual a corrente elétrica pode fluir, ou melhor, dissipar-se. [11]

A resistividade do solo pode variar muito através da profundidade, devido as diferenças na porcentagem de umidade, tipo do material que compõe o solo, temperatura, idade de formação geológica, entre outras.

Os solos que apresentam resistividade mais baixa são os que contêm resíduos vegetais, os pantanosos e os situados no fundo de vales e nas margens de rios. Os de maior resistividade são os arenosos, os rochosos e os situados em locais altos e desprovidos de vegetação. [11]

Na Tabela 2.1 são encontrados alguns valores típicos de resistividade em função da composição do solo.

Tabela 2.1 - Resistividade de alguns solos em função da composição

Tipo de Solo	Resistividade ( $\Omega$ m)
Solos aráveis	50 a 500
Argila	300 a 5.000
Areia	1.000 a 8.000
Calcário	500 a 5.000
Granito e Arenito	100 a 10.000
Basalto	10.000 a 20.000

Os solos, na sua maioria, não são homogêneos conforme tabela 2.1 e sim formados de diversas camadas de resistividades diferentes. Estas camadas são

normalmente horizontais e paralelas à superfície do solo. Há casos em que elas se apresentam inclinadas e até verticais devido a alguma falha geológica. Porém, os estudos apresentados para a pesquisa do perfil do solo, consideram as camadas aproximadamente horizontais, uma vez que outros casos são mais raros.

Em consequência da variação de resistividade nas camadas do solo, a uma variação da dispersão de corrente.

### 2.2.1. Estratificação do solo

O solo é constituído, em geral, por várias camadas horizontais com formação geológica diferente, por esta razão o solo é modelado em camadas estratificadas, conforme mostrado abaixo. [10]

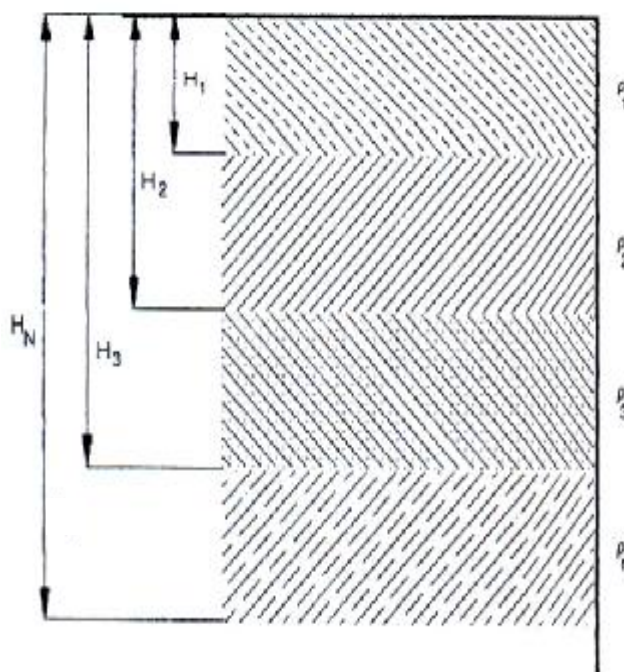


Figura 2.3 - Solo estratificado em várias camadas

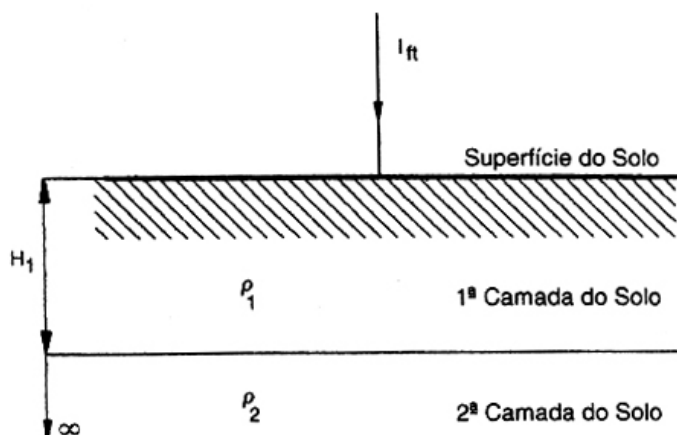


Figura 2.4 - Solo estratificado em duas camadas

### 2.2.2. Determinação da resistividade do solo

A primeira informação necessária para a elaboração de um projeto de aterramento é ter o conhecimento prévio das características do solo, principalmente no que diz respeito à sua constituição. Portanto, conhecer o valor da resistividade do solo é fundamental no início da realização de um projeto de aterramento. [10]

A resistividade do solo ( $\rho$ ) varia bastante de um local para outro e, às vezes, em pontos bem próximos são verificadas alterações razoáveis nos valores medidos.

Para a medição da resistividade do solo, basicamente há duas maneiras:

- Medição por amostragem – esta é realizada em laboratório, ensaiando-se uma amostra de solo coletado no local cuja resistividade se deseja conhecer; entretanto, a medição por amostragem apresenta um grande inconveniente, pois não pode assegurar que a amostra apresente no laboratório exatamente as mesmas características que apresentava no local de origem, principalmente em relação a umidade e compactação. [9]
- Medição local – pela imposição de determinados sinais eletromagnéticos em regiões limitadas do solo, através de eletrodos adequadamente posicionados, sendo possível caracterizar, pela detecção dos potenciais estabelecidos nas imediações, a composição do solo na região, em termos de sua resistividade.

Um método rápido de determinação, porém raramente aplicado, baseia-se na medição da resistência de aterramento de um eletrodo vertical cravado no solo, cuja resistividade se deseja conhecer, através do método da queda de potencial. [9]

O valor da resistência de aterramento de um eletrodo vertical de comprimento “l” e diâmetro “d”, pode ser determinado pela equação 2.1:

$$R = \frac{\rho_a}{2 \pi l} \ln \frac{4l}{d} \quad (\Omega) \quad (2.1)$$

onde:

$\rho_a$ : resistividade aparente do solo no local de fincamento da haste ( $\Omega \cdot m$ );

l: comprimento cravado da haste (m);

d: diâmetro da haste (m).

Consegue-se desta forma obter o valor de  $\rho_a$  na profundidade do eletrodo, uma vez medido o valor de R.

Outro método, que pela sua facilidade operacional e precisão fornecida, é o mais utilizado no âmbito das concessionárias de energia, é o método de Frank Wenner. Em 4.1.5 apresenta-se o desenvolvimento desse método, por estar diretamente ligado à confecção do protótipo.

## 2.3. Resistência de aterramento

Os caminhos de corrente no solo apresentam uma geometria complexa e, assim, ao analisar a terra como um condutor de corrente, não se tem a mesma simplicidade de tratamento existente no caso de condutores metálicos lineares. A corrente ao ser injetada no solo, tende a se dispersar em todas as direções, percorrendo caminhos determinados pelas características do solo.

### 2.3.1. Medição de resistência de aterramento

Para efetuar uma medição de resistência de aterramento, é necessário a obtenção de um circuito elétrico, composto de um ponto onde se injeta uma corrente e um ponto onde se retire essa corrente. A corrente é injetada através do sistema de

aterramento a ser medido e retirada através de um aterramento ou terra auxiliar que poderá ser composto por uma ou mais hastes interligadas.

A quantificação da resistência de um aterramento pode ser realizada por meio da razão entre o potencial do sistema de aterramento em relação a um ponto infinitamente afastado e a corrente que se faz fluir entre o aterramento e tal ponto.

Assim, pela Lei de Ohm, a corrente injetada circulará pela terra e provocará em sua superfície uma tensão, resultante do produto da resistência de terra até o ponto a ser medido, pela corrente injetada.

A medição da resistência de terra de um eletrodo pode ser feita então, utilizando-se um amperímetro e um voltímetro ou, diretamente através do megger terra também denominado terrômetro ou telurímetro. [12]

Em ambos os métodos, a localização do eletrodo de tensão com relação ao terra auxiliar é muito importante na determinação do valor real da resistência a ser medida. Aconselha-se que essa distância não seja inferior a 40 metros para pequenos aterramentos e a 100 metros no caso de malhas. A resistência real do aterramento, para solos homogêneos, se dará quando o eletrodo de potencial, colocado aproximadamente 60% da distância entre o centro elétrico da malha e o eletrodo de corrente e em linha com estes, normalmente está na região do patamar. Este eletrodo tem sua localização gradativamente variada ao longo dessa direção, efetuando-se uma medição para cada posição, de forma a gerar uma curva semelhante à da figura 2.6, da qual obtém-se o valor da resistência do aterramento. [9], [13]

### **2.3.1.1 Método volt – amperimétrico**

Consiste em medir a resistência do aterramento em função da queda de potencial usando um terra auxiliar, criando uma estrutura composta por uma haste de injeção de corrente e uma haste de medição de potencial. [8]

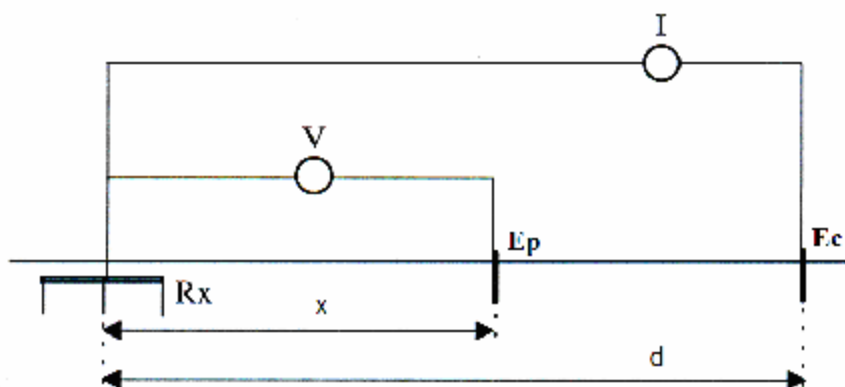


Figura 2.5 - Esquema de medição da resistência de terra

onde:

$R_x$  - sistema de aterramento em ensaio

$E_p$  - eletrodo de potencial

$E_c$  - eletrodo corrente

$x$  - distância do eletrodo de potencial em relação ao sistema a ser medido

$d$  - distância do eletrodo de corrente em relação ao sistema a ser medido

$V$  - voltímetro

$I$  - amperímetro

Este método de análise é baseado na curva de resistência aparente, apresentado na figura 2.6.

O método consiste na aplicação e monitoração de uma determinada corrente no sistema de aterramento em teste ( $R_x$ ) fazendo-a circular através do eletrodo de corrente ( $E_c$ ). A corrente ( $I$ ) injetada em ( $R_x$ ) provocará a aparição de potenciais na superfície do solo. Esses potenciais são medidos através do eletrodo de potencial ( $E_p$ ). Os potenciais ao longo do trecho ( $R_x$ ) a ( $E_c$ ) terão o aspecto da figura 2.6, assumindo, por conveniência, que o potencial em ( $R_x$ ) é zero.

A resistência do sistema de aterramento em teste é o valor em Ohms do trecho da curva que tem valores constantes, constituindo um patamar.

Portanto, para se obter o valor real da resistência é preciso instalar o eletrodo de potencial ( $E_p$ ) fora das zonas de influência do sistema em teste (trecho A da curva) e do eletrodo de corrente (trecho B).



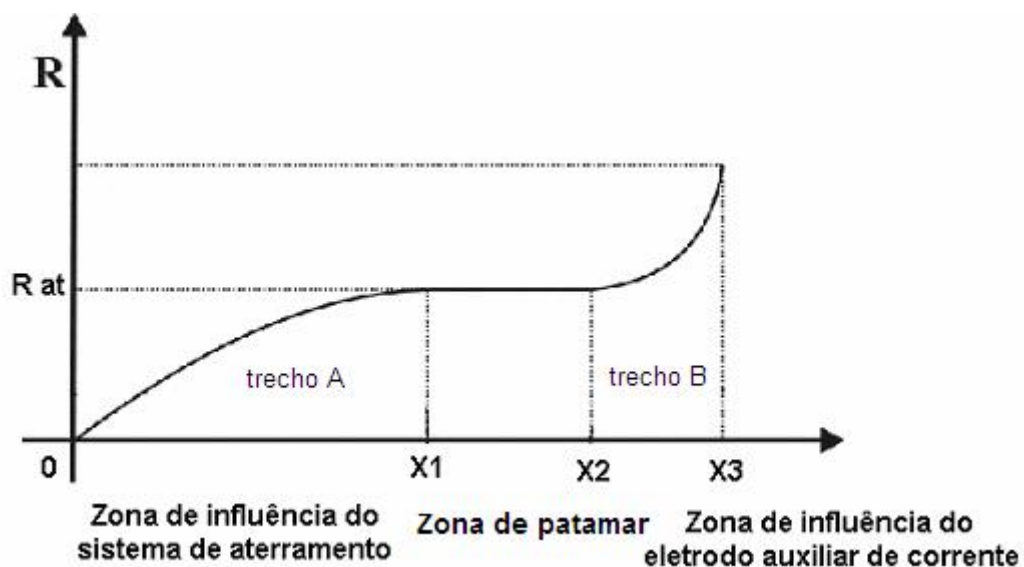


Figura 2.6 – Curva de resistência aparente em função da distância

A distância (d) deverá ser maior possível para que o patamar seja formado com clareza.

Na aplicação deste método, o eletrodo de corrente deve ser colocado a uma distância do centro elétrico do aterramento (aproximadamente igual ao centro geométrico) superior a 3 ou 4 vezes a maior dimensão linear do aterramento. [9]

O resultado da divisão de V por I, de acordo com a equação 2.2, lidos nos respectivos aparelhos nos dará o valor da resistência de terra até o ponto considerado.

$$R = \frac{V}{I} \quad (2.2)$$

Este método apresenta a vantagem de termos correntes injetadas no solo, da ordem de alguns ampéres, o que faz com que a interferência existente no solo seja desprezível.

Normalmente, o que limita a corrente é a resistência do terra auxiliar, que é normalmente alta. Para se obter valores mais altos de corrente, deve-se diminuir a resistência, quer aumentando o número de hastes, quer aplicando ao solo, em volta das hastes do terra auxiliar uma solução de água e sal.

Com isto, se consegue uma redução sensível, porém temporária, pois o efeito da umidificação do solo, principalmente em solos arenosos é de curta duração.

### 2.3.1.2 Método do Megger

A base deste processo de medida é a mesma do método anterior, porém os diversos aparelhos utilizados estão contidos no chamado Megger.

O esquema de ligação é composto pela disposição dos eletrodos de corrente ( $C_1$  e  $C_2$ ) e dos eletrodos internos de potencial ( $P_1$  e  $P_2$ ), onde temos ( $D$ ) como a distância entre o terra auxiliar (eletrodo de corrente  $C_2$ ) e o terra a ser medido e ( $x$ ) que é a distância entre o eletrodo de potencial ( $P_2$ ) e o terra a ser medido, como está indicado na figura a seguir.

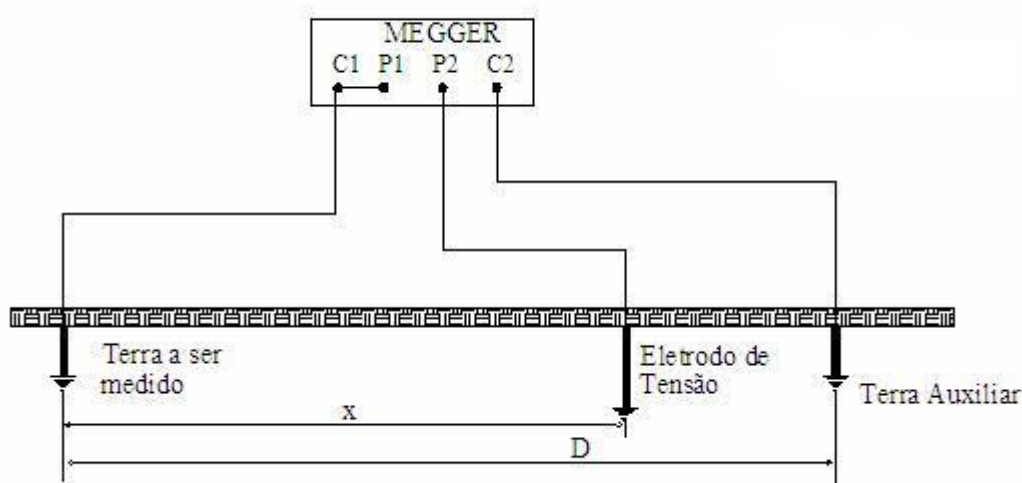


Figura 2.7 - Esquema de ligação com 4 terminais utilizando o Megger

Para que se tenham resultados confiáveis é indicado que o aparelho utilizado seja de corrente alternada e que possua filtro para eliminação de correntes de interferência.

## 2.4. Conceitos básicos de segurança em aterramento

As aplicações dos aterramentos elétricos estão fundamentalmente associadas a manter os valores de potencial dentro de limites que proporcionem

segurança de pessoas e mesmo animais, que porventura venham a tocar ou a pisar próximo a estruturas metálicas aterradas e energizadas acidentalmente.

### 2.4.1. Caracterização de condições de risco

Quando as partes do corpo humano são submetidas a uma diferença de potencial, o mesmo é percorrido por uma corrente elétrica, que pode resultar em diversos efeitos para o indivíduo, configurando-se como uma condição de risco. No que se refere ao aterramento elétrico, é possível caracterizar algumas dessas situações típicas quando flui corrente pelo mesmo, sendo usual classificá-las e referenciá-las como parâmetros de restrição nos projetos elétricos. Estes parâmetros são denominados tensão de passo, tensão de toque e tensão transferida. [9]

#### 2.4.1.1 Tensão de passo

Quando um indivíduo se encontra no interior de uma malha de terra, e através desta está fluindo, naquele instante, uma determinada corrente de defeito, fica submetido a uma tensão entre os dois pés. [8], [12]

A definição clássica do potencial de passo é: a diferença de potencial que aparece entre dois pontos situados no chão e distanciados de 1 (um) metro, para pessoas, devido a passagem de corrente de falha pela terra.

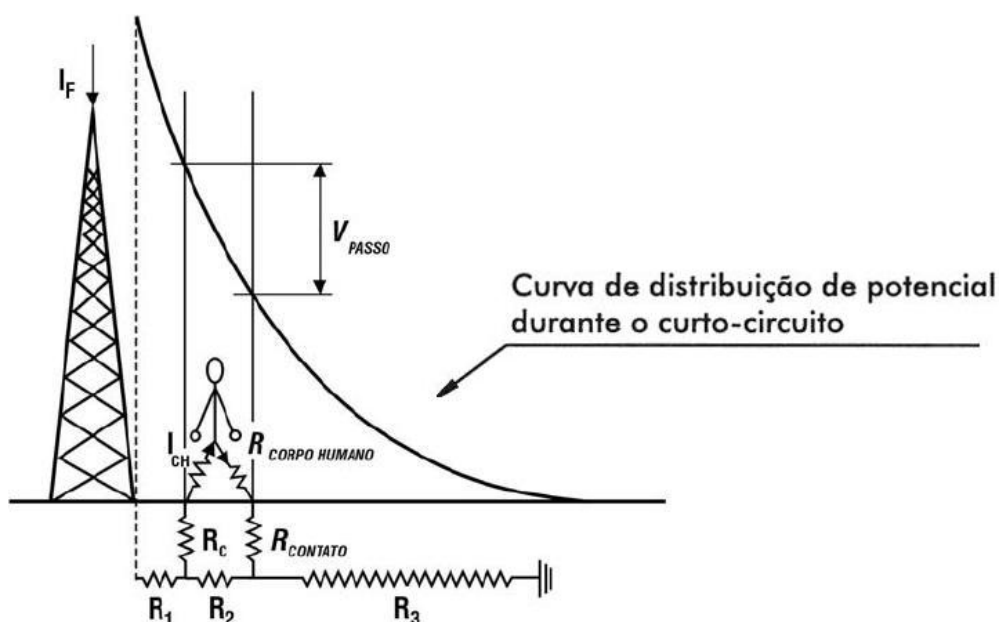


Figura 2.8 - Demonstração de um indivíduo submetido a uma tensão de passo

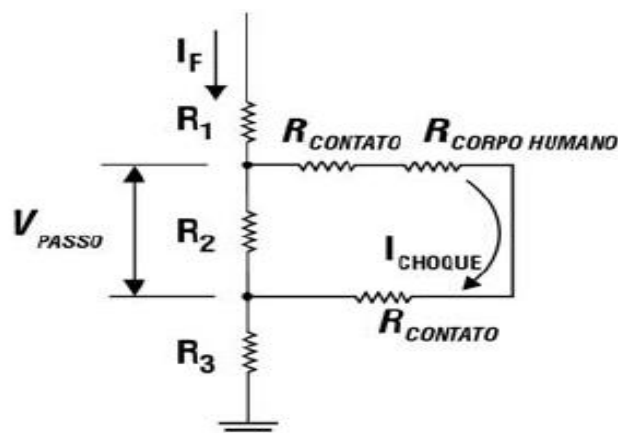


Figura 2.9 - Esquema elétrico para condição de tensão de passo

A equação do potencial de passo é:

$$V_{\text{passo}} = (2R_c + R_{\text{ch}}) I_{\text{ch}}$$

(2..3)

onde:

$R_{\text{ch}}$  = resistência do corpo humano, considerada como 1000  $\Omega$

$R_c$  = resistência de contato, considerada como 3 vezes a resistividade superficial do solo

$I_{\text{ch}}$  = corrente de choque pelo corpo humano

$I_F$  = corrente de falha no sistema

$R_1$ ,  $R_2$  e  $R_3$  são as resistências dos trechos de terra considerados.

#### 2.4.1.2 Tensão de toque

Se uma pessoa toca um equipamento aterrado ou o próprio condutor, pode ser que se estabeleça, dependendo das condições de isolamento, uma diferença de potencial entre as mãos e os pés. Conseqüentemente, teremos a passagem de uma corrente pelo braço, tronco e pernas, que dependendo da duração e intensidade da corrente, pode provocar fibrilação ventricular<sup>1</sup>, com graves riscos à pessoa. [8], [12]

<sup>1</sup> Fibrilação ventricular: é um aceleração anormal dos batimentos cardíacos que dificulta o bombeamento do sangue para o corpo

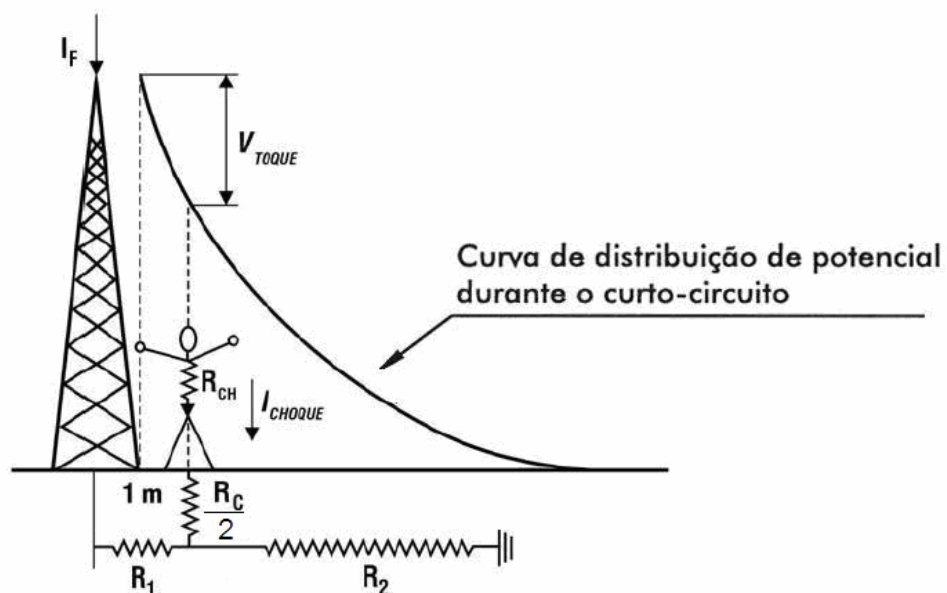


Figura 2.10 - Demonstração de um indivíduo submetido a uma tensão de toque

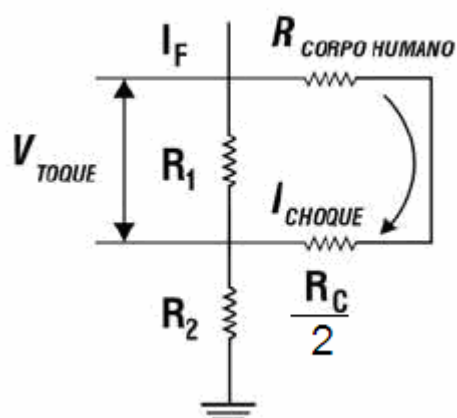


Figura 2.11 - Esquema elétrico para condição de tensão de toque

A equação que nos dá o valor do potencial de toque é:

$$V_t = \left[ R_{ch} + \frac{R_c}{2} \right] I_{ch}$$

(2.4)

onde:

$R_{ch}$  = resistência do corpo humano, considerada como 1000  $\Omega$

$R_C$  = resistência de contato que pode ser considerada 3 vezes a resistividade superficial do solo.

$I_{ch}$  = corrente de choque pelo corpo humano.

$I_F$  = corrente de falha no sistema

$R_1$  e  $R_2$  são as resistências dos trechos de terra considerados.

O quadro a seguir mostra os potenciais de toque toleráveis em função da resistividade do solo considerando  $I_{ch} = 10\text{mA}$  que é o valor de corrente para a qual não se percebe nenhum efeito patofisiológico<sup>2</sup> perigoso. [14], [15]

Tabela 2.2 - Potenciais de toque em função da resistividade do solo

Resistividade ( $\Omega.m$ )	Potencial de toque tolerável (V)
0	10,00
50	10,74
100	11,50
200	13,00
300	14,50
400	16,00
500	17,50
1000	25,00
2000	40,00
3000	55,00

### 2.4.1.3 Tensão de transferência

O termo potencial de terra transferido é a diferença de potencial que aparece devido à passagem de corrente de falha para a terra, entre um ponto do sistema de aterramento e um ponto aterrado remotamente.

<sup>2</sup> efeito patofisiológico: efeito das doenças que altera o estado normal do organismo (fisiológico)

### 2.4.2. Efeitos da corrente elétrica no corpo humano

Os valores permissíveis encontrados na bibliografia existente variam um pouco de um autor para outro, mas todos se baseiam em experiências práticas e em estudos fisiológicos levando-se em consideração os limites do corpo humano de se expor aos efeitos provenientes do choque elétrico.

A avaliação dos efeitos provocados pelo choque elétrico apresenta certa complexidade, pois os mesmos dependem de muitos fatores, como o percurso no corpo, intensidade e tempo de duração do choque, tipo de onda e frequência da corrente, valor da diferença de potencial que gera a corrente e condições orgânicas do indivíduo. [9], [15]

De uma maneira geral a corrente permissível do corpo humano e as sensações causadas pela mesma podem ser resumidas na tabela abaixo:

Tabela 2.3 - Correntes permissíveis do corpo humano

EFEITO FISIOLÓGICO	Corrente (mA)	
	Homem	Mulher
Ausência da sensação das mãos.	1,2	0,6
Nível limiar de percepção.	5,2	3,5
Choque desconfortável, mas não doloroso; controle muscular mantido.	9,0	6,0
Choque doloroso, para 99,5% das pessoas testadas, mas ainda com controle muscular mantido.	62,0	41,0

Valores acima de 62 ou 41mA para homem e mulheres respectivamente, serão fatais, pois a pessoa não terá mais controle muscular e ficará “grudada” à estrutura, além de enrolar a língua, causando asfixia.

Registre-se que os valores de correntes citados na Tabela 2.3 referem-se à corrente alternada. Para uma corrente contínua provocar o mesmo efeito, sua intensidade deverá ser da ordem de 3 vezes os valores referidos.

O valor da corrente máxima admissível através do corpo humano não é rigorosamente definido. Usualmente define-se a corrente máxima admissível através

do corpo humano como a maior corrente que percorrendo um caminho que inclua o coração não provoque o início de fibrilação ventricular ou uma parada cardíaca.

Os efeitos principais que uma corrente elétrica produz no corpo humano são fundamentalmente quatro: tetanização<sup>3</sup> ou contração muscular; parada respiratória; queimadura e fibrilação ventricular. [11].

Dalziel [16] recomenda que se use o valor expresso por:

$$I = \frac{0,116}{\sqrt{t}} \text{ (A)}$$

(2.5)

onde: (I) é a corrente de fibrilação e (t) a duração do choque para tempos superiores a 30 ms e inferiores a 3 segundos.

## 2.5. Normalização

A constante atualização da legislação brasileira e das normas técnicas referentes à prevenção de acidentes do trabalho é uma das principais ferramentas à disposição de trabalhadores e empregadores para garantir ambientes de trabalho seguros e saudáveis.

Os instrumentos jurídicos de proteção ao trabalhador têm sua origem na Constituição Federal que, ao relacionar os direitos dos trabalhadores, incluiu entre eles a proteção de sua saúde e segurança por meio de normas específicas.

Coube ao Ministério do Trabalho estabelecer essas regulamentações (Normas Regulamentadoras – NR) por intermédio da Portaria nº 3214/78. A partir daí, uma série de outras portarias foram editadas pelo Ministério do Trabalho com o propósito de modificar ou acrescentar normas regulamentadoras de proteção ao trabalhador. Sobre a segurança em instalações e serviços em eletricidade, a referência é a NR-10, que estabelece as condições mínimas exigíveis para garantir a segurança dos empregados que trabalham em instalações elétricas, em suas diversas etapas, incluindo elaboração de projetos, execução, operação, manutenção, reforma e ampliação, em quaisquer das fases de geração, transmissão, distribuição e consumo de energia elétrica. A NR-10 exige também que

---

<sup>3</sup> Tetanização: contração muscular generalizada (hipertrofia muscular)



sejam observadas as normas técnicas oficiais vigentes e, na falta destas, as normas técnicas internacionais. [17].

No Brasil, as normas técnicas oficiais são aquelas desenvolvidas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT e registradas no Instituto Nacional de Metrologia e Qualidade Industrial - INMETRO.

Essas normas são resultados de uma ampla discussão de profissionais e instituições, organizados em grupos de estudos, comissões e comitês.

A ABNT é o Fórum Nacional de Normalização e é a representante brasileira no sistema internacional de normalização, o qual é composto por entidades nacionais, regionais e internacionais. Para atividades com eletricidade, há diversas normas que abrangem quase todos os tipos de instalações e produtos.

As normas brasileiras, cujo conteúdo é de responsabilidade dos Comitês Brasileiros – CB, e dos Organismos de Normalização Setorial – ONS, são elaboradas por Comissões de Estudo – CE, formadas por representantes dos setores envolvidos, delas fazem parte: produtores, consumidores, universidades, laboratórios entre outros.

No Brasil, infelizmente, as normas de aterramento encontram-se, no mínimo, defasadas, como a Norma Brasileira Registrada – NBR – 7117. Quanto as exigências de resistência, tem-se referências na NBR-5419 – Proteção contra Descargas Atmosféricas e na NBR-5410 – Instalações Elétricas de Baixa Tensão [8].

Os projetistas do mundo todo por muitos anos se basearam na IEEE-80 atualmente em sua revisão 2000. Há tendência que os principais parâmetros de projeto recomendados neste guia, sejam adotados pela Norma Brasileira em elaboração.

Além das normas referidas de acordo com o assunto, se faz necessário consultar outras normas técnicas. O conhecimento técnico e a tecnologia utilizada por fornecedores de equipamentos, empresas de engenharia de segurança do trabalho e medicina do trabalho, concessionárias de serviços públicos, associações e organizações existentes no Brasil e no mundo, deverão ser consideradas e assimiladas. Trata-se da aquisição dos conhecimentos técnicos acumulados pelas empresas, fabricantes de equipamentos, universidades, e centros de pesquisas, os quais são da mais alta importância em termos da técnica e da segurança.

### 3. VIABILIDADE DA MEDIÇÃO DE MALHA DE TERRA EM SUBESTAÇÕES ENERGIZADAS

Um dos métodos propostos, para realização da medição de malha de terra em subestações energizadas é o da queda de potencial, que consiste em fazer circular uma corrente através do sistema de aterramento sob ensaio por intermédio de um eletrodo auxiliar de corrente e medir a tensão entre o sistema de aterramento e o terra de referência (terra remoto), por meio de um eletrodo auxiliar de potencial. Em determinadas situações torna-se muito difícil ou mesmo impossível à aplicação do método de queda de potencial conforme descrito. Entre estas situações destacam-se as seguintes:

- Em regiões densamente povoadas, freqüentemente é impossível lançar os circuitos de corrente e potencial nas distâncias necessárias para se fazer uma medição confiável. [6]
- Em sistemas de aterramento de grandes dimensões, a dificuldade mais evidente é de se estender os circuitos de corrente e potencial a distâncias muito grandes, às vezes de vários quilômetros, o que dificulta enormemente a medição; outro aspecto importante é que estes sistemas apresentam, usualmente, resistências de aterramento inferiores a 1,0 ( $\Omega$ ), o que traz incerteza quanto aos resultados obtidos em decorrência de fatores como acoplamento, impedâncias de circuito de ensaio, sensibilidade dos instrumentos e outros; além disso, a reatância não é desprezível quando comparada com a resistência, sendo mais adequado falar-se em impedância (que é função da freqüência). [6]
- Em instalações energizadas ou próximas de regiões atravessadas por linhas de transmissão e alimentadores energizados. [6]

No caso das limitações apresentadas nas duas primeiras situações, existe a alternativa de se utilizar como circuito de corrente, uma linha de transmissão desenergizada que chegue à instalação e como circuito de potencial, um circuito de comunicação, ou mesmo uma outra linha de transmissão cuja rota seja afastada do circuito de corrente. [6]

Os cabos pára-raios de todas as linhas de transmissão que chegam à instalação devem ser desconectados do sistema de aterramento sob ensaio, bem

como as blindagens dos cabos isolados, neutros de linhas de distribuição e contrapesos contínuos de linhas de transmissão. Argumenta ainda, que o efeito do acoplamento entre os cabos de interligação dos circuitos de corrente e potencial torna-se um fator importante nas medições de resistência de aterramento com valores muito baixos, particularmente envolvendo sistemas de aterramento de grande porte, que exigem grandes comprimentos de cabos de interligação. [6]

Para a medição de potenciais na superfície do solo, bem como da resistência de um sistema de aterramento global envolvendo cabos pára-raios das linhas de transmissão, neutros de alimentadores e outros, recomenda-se o método de injeção de corrente. Este, de forma semelhante ao método da queda de potencial, consiste em fazer circular uma alta corrente entre o sistema de aterramento sob ensaio e o solo, através de um eletrodo auxiliar de corrente, e medir os potenciais na superfície do solo bem como a resistência de aterramento (a partir da elevação de potencial do sistema) através de um eletrodo auxiliar de potencial. O eletrodo de corrente, de modo geral, é um trecho de uma linha de transmissão, uma malha de aterramento de subestação adjacente, ou uma malha auxiliar construída para este fim. Esse eletrodo deve ter uma resistência de valor compatível com o sistema de medição, baixa o suficiente de modo a não limitar demasiadamente a corrente injetada.

Para evitar distorções na dispersão de corrente pelo solo, a conexão do circuito de corrente com o eletrodo de corrente deve estar a uma distância (de 3 a 4 vezes a maior dimensão) do sistema de aterramento sob ensaio, ou seja, numa região de solo que não receba influência desta. O procedimento usual é utilizar como circuito de corrente as fases de uma linha de transmissão desenergizada pertencente à instalação, ligando-as à estrutura (simulando um curto-circuito) a uma distância adequada do sistema de aterramento. [9]

Consiste o eletrodo de potencial de uma haste metálica cravada firmemente no solo, a qual deve ser deslocada a partir do sistema de aterramento sob ensaio, em intervalos regulares, fazendo-se a leitura da tensão com um voltímetro de alta impedância de entrada. O acoplamento entre circuitos de corrente e potencial pode ser evitado, deslocando-se o de potencial numa direção entre 90 graus e 180 graus em relação ao de corrente.

Observam-se assim, limitações de ordem técnica nas metodologias existentes, sem falar no alto custo do pessoal envolvido com o preparo das torres

(tempo e quantidade de pessoas), associada à impossibilidade de desligar as linhas de transmissão, nos dias de hoje.

Para medir sistemas de aterramento de baixa resistência em grandes subestações são necessários equipamentos especiais. [13]

### **3.1. Metodologias utilizadas no estudo de casos**

#### **3.1.1. Medição em alta frequência**

O princípio da medição em alta frequência é que seu gerador (no protótipo utilizou-se a frequência de 25 kHz) 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 representado por uma espécie de funil em cada um destes dois pontos. Entre ambos os funis de potencial cuja profundidade e extensão ficam determinados pela disposição do eletrodo auxiliar e o aterramento sob medição, existe uma zona neutra que se pode chamar de patamar de potencial, sempre que o eletrodo auxiliar esteja suficientemente distanciado do outro aterramento a medir. [13], [18], [19]

Neste patamar deve-se cravar o eletrodo de potencial com a finalidade de recolher a tensão originada entre este eletrodo e o sistema de aterramento. O valor da resistência de aterramento fica determinado pela relação tensão originada / corrente injetada.

A utilização de uma frequência alta nas medições permite que se teste o aterramento numa condição mais parecida com aquela em que este será chamado para dissipar um surto tipo de chaveamento ou mesmo de descarga atmosférica.

Para a frequência usada no protótipo desenvolvido, a reatância indutiva do(s) cabo(s) pára-raios das linhas de transmissão ligadas à subestação, em um vão de comprimento normal, é razoavelmente alta, o que permite reduzir ou mesmo eliminar o efeito dos aterramentos adjacentes ao que se está medindo.

Citam-se como exemplos, as impedâncias próprias e mutuas dos cabos pára-raios, nas frequências de 60 Hz e 25 kHz. Na tabela 3.1, desenvolvida a partir da formulação de Carson os elementos envolvidos têm os valores calculados: [20]

Tabela 3.1 - Tabela resultante da formulação de Carson para a frequência de 60 Hz

<b>Cálculo de Zmutua entre cabo pára-raios e fases</b>	
$Z_{mutua} = R_e + j \omega \cdot 0,0002 \cdot \ln\{ 659/DMG \cdot \sqrt{\rho_a / f} \} \quad (\Omega/km) =$	
<b><math>Z_{mutua} = 0,060 + j 0,446</math> ou <math>0,450 e^{j 82,34}</math></b>	
Re=	0,06 $\Omega / km$
f =	60 Hz
$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$	= 376,992 rad/s
<b>Cálculo da Zprópria da malha formada pelo cabo pára-raios e retorno pelo solo</b>	
$Z_{própria} = R_{própria} \text{ caboPR} / 2 + R_e + j \omega \cdot 0,0002 \cdot \ln\{ 659/C \cdot \sqrt{\rho_a / f} \} \quad \Omega/km$	
<b><math>Z_{própria} = 1,772 + j 0,770</math> ou <math>1,932 e^{j 23,49}</math></b>	
$C = \sqrt{(RMG \text{ do cabo terra}) \cdot \text{Dist.entre cabos pára-raios}} = 0,086718$	

Tabela 3.2 - Tabela resultante da formulação de Carson para a frequência de 25 kHz

<b>Cálculo de Zmutua entre cabo pára-raios e fases</b>	
$Z_{mutua} = R_e + j \omega \cdot 0,0002 \cdot \ln\{ 659/DMG \cdot \sqrt{\rho_a / f} \} \quad \Omega/km$	
<b><math>Z_{mutua} = 0,060 + j 91,020</math> ou <math>91,020 e^{j 89,96}</math></b>	
Re=	0,06 $\Omega / km$
f =	25000 Hz
$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$	= 157080 rad/s
<b>Cálculo da Zprópria da malha formada pelo cabo pára-raios e retorno pelo solo</b>	
$Z_{própria} = R_{própria} \text{ caboPR} / 2 + R_e + j \omega \cdot 0,0002 \cdot \ln\{ 659/C \cdot \sqrt{\rho_a / f} \} \quad \Omega/km$	
<b><math>Z_{própria} = 1,772 + j 226,060</math> ou <math>226,067 e^{j 89,55}</math></b>	
$C = \sqrt{(RMG \text{ do cabo terra}) \cdot \text{Dist.entre cabosPR}} = 0,086718$	

Sendo DMG a distância média geométrica e RMG o raio médio geométrico

Observa-se que para este exemplo, a impedância mútua aumenta cerca de 200 vezes enquanto que a impedância própria aumenta cerca de 100 vezes, passando o ângulo para próximo de 90°.

Em subestações com entradas e saídas de linhas de transmissão dotadas de cabos pára-raios ligados à malha de terra, estima-se, que um equipamento com tal frequência, meça somente a resistência da malha de terra em estudo. Dessa

forma, o valor obtido tende a ser mais real do que aquele fornecido por equipamentos convencionais de baixa frequência, para os quais se desacoplam os cabos pára-raios das instalações.

Um protótipo para medição em alta frequência deve prever também a compensação das componentes reativas em jogo, caso do protótipo desenvolvido, em que se acoplou um módulo que permite a introdução de capacitâncias com a finalidade de efetuar a compensação dos reativos indutivos presentes na medição.

### **3.1.2. Metodologia convencional reduzida**

Define-se como “convencional reduzida” a metodologia que se aplica a sistemas de aterramento, nas condições de energizados ou não, em locais com poucas e pequenas áreas disponíveis para colocação dos eletrodos de retorno de corrente e de potenciais, tais como áreas em regiões semi-urbanas ou rurais.

Nessa metodologia de medição, se utiliza o método convencional da queda de tensão, aplicado porém, a eletrodos de corrente posicionados “relativamente próximos” do sistema de aterramento em teste com frequência de medição de 25 kHz.

Testes iniciais em aterramentos isolados e subestações pré-selecionadas indicam que o posicionamento do eletrodo de corrente se dará a distâncias próximas de 1,25 vezes a maior dimensão do sistema de aterramento. [6]

Esta metodologia pode ser aplicada em duas situações:

- Metodologia convencional reduzida aplicada a malhas com configuração definida e conhecida - O operador indica ao software a maior dimensão do sistema de aterramento. O software fornece o posicionamento dos eletrodos de corrente e de potencial. São feitas as 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, o software indica um novo posicionamento com acréscimo de 30% das distâncias, repetindo o processo, até se obter desvios dentro do padronizado. [6]
- Metodologia convencional reduzida aplicada a malhas com configuração desconhecida - O operador indica ao software um valor estimado para a maior dimensão do aterramento. A partir daí o procedimento é idêntico ao

descrito para configuração conhecida. A velocidade do ensaio está ligada à qualidade do valor estimado. [6]

### **3.1.3. Metodologia de diferenças de potencial em pontos próximos ao sistema de aterramento – DDPprox**

Neste trabalho a metodologia definida como DDPprox é aquela que se aplica a sistemas de aterramento, energizados ou não, em locais com áreas disponíveis reduzidas (tais como áreas urbanas) para colocação de eletrodos de retorno de corrente e de potenciais. Nesse tipo de medição, utilizaram-se além da frequência de 25 kHz as frequências de 270 Hz, 1,47 kHz, por serem encontradas em equipamentos convencionais existentes no mercado. [6].

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

Nessa metodologia não se utiliza o conceito da queda de potencial em relação a um ponto remoto, o que é feito convencionalmente, e que tem inviabilizado as medições notadamente de sistemas de aterramento de médias e grandes dimensões. São realizadas em espaços bem pequenos, medidas de diferença de potencial em pontos pré-determinados do sistema 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.

Essa metodologia pode ser aplicada em duas situações:

- Metodologia DDPprox aplicada a malhas de aterramento com configuração conhecida - 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 centro de maior e menor quadrícula ou pontos de quina de periferia, a partir de um ponto de referência (centro geométrico do

sistema, neutro de um transformador, entre outros). Feitas as medidas, o software fornece o valor da resistência do aterramento.

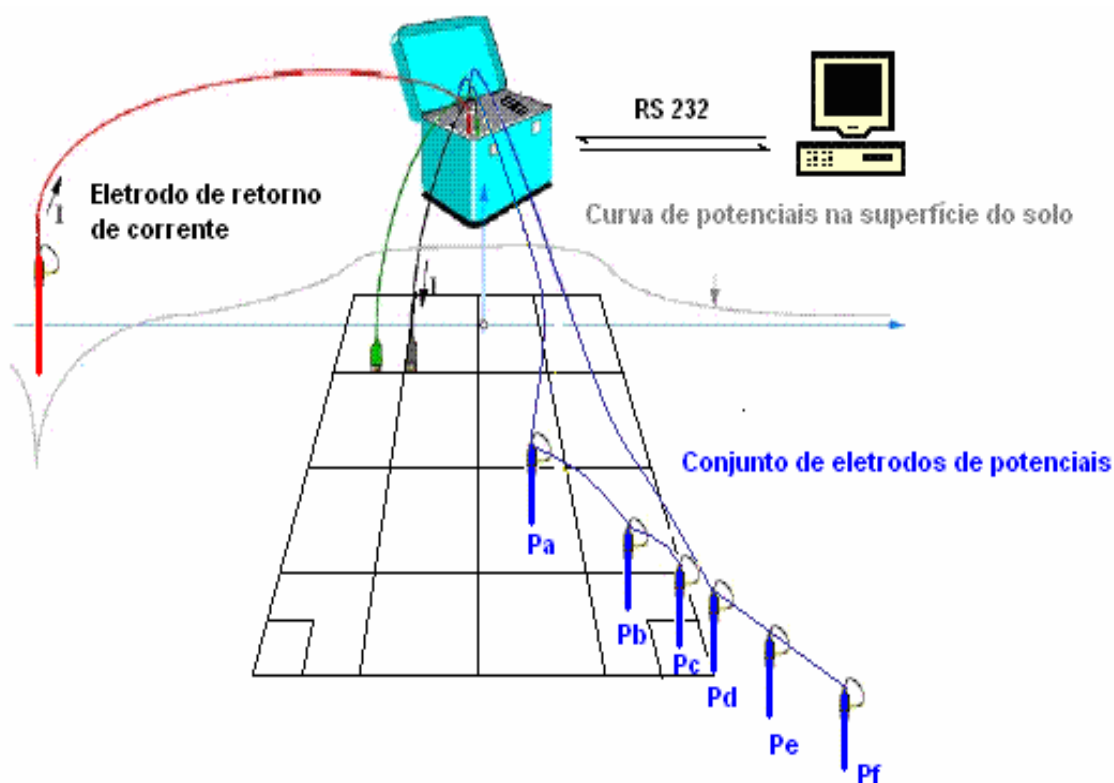


Figura 3.1 - Metodologia DDPprox aplicada a malhas de aterramento com configuração conhecida

- Metodologia DDPprox aplicada a malhas de aterramento com configuração desconhecida – quando não se dispuser de informações do sistema de aterramento (dimensões reais, tamanhos de quadrículas, profundidade de condutores, e outros), 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 da camada de brita ou alambrado divisório de área energizada); o operador efetua o posicionamento do eletrodo de corrente e dos eletrodos de potencial (em número e espaçamentos diferentes e aleatórios, 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 resistência do aterramento, utilizando o algoritmo de estimação.

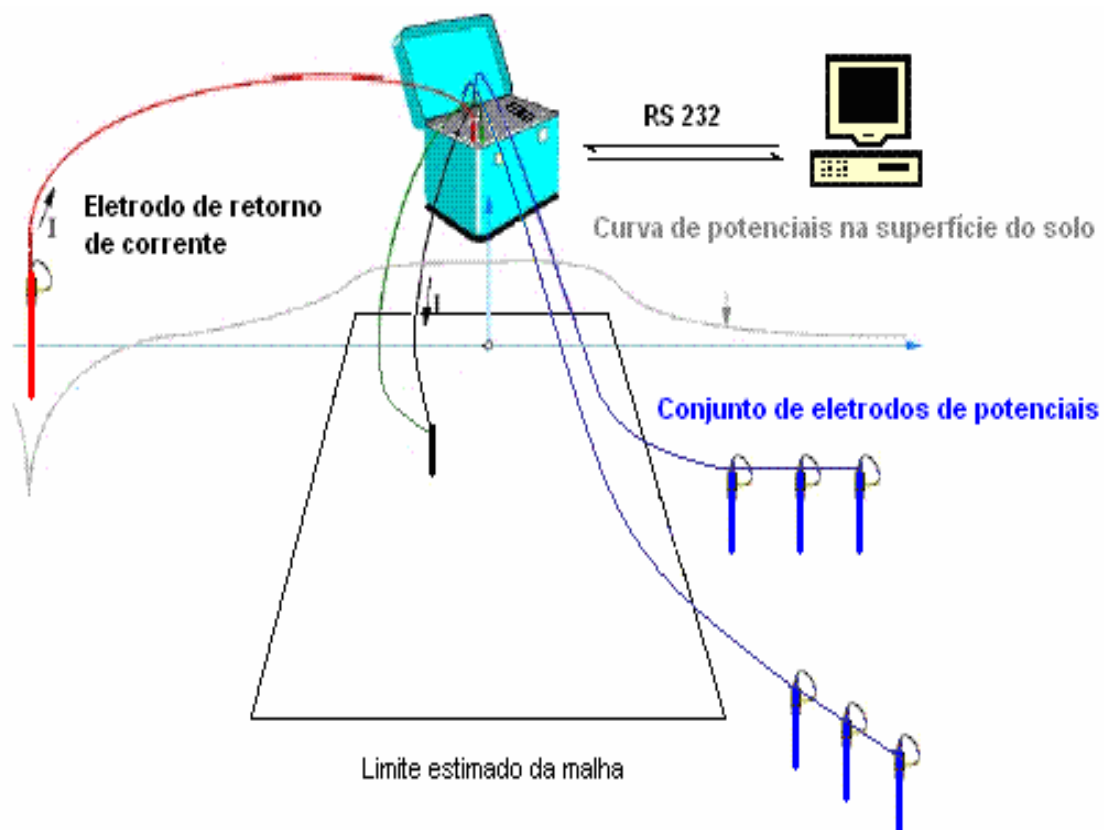


Figura 3.2 - Metodologia DDPprox aplicada a malhas de aterramento com configuração desconhecida.

## 4. MODELAGEM E ESPECIFICAÇÃO DO PROTÓTIPO UTILIZADO NO ESTUDO DE CASOS

### 4.1. Modelagem de solo utilizada pelo protótipo para estratificação

Para efetuar as simulações e definir a resistência das malhas das subestações é necessário à adoção de um método de modelagem de solo. A modelagem de solo utilizada pelo protótipo é a automatização do procedimento gráfico através de um programa de computador. O usuário introduz as resistividades medidas pelo método dos 04 eletrodos de Wenner e o programa apresenta como resultado um modelo de n - camadas do solo, com a resistividade e a profundidade de cada camada. Com isso, evitam-se erros gráficos manuais, acelera o processo de estratificação do solo e obtêm-se resultados mais precisos.

#### 4.1.1. Descrição da metodologia de modelagem de solo

Para efetuar os cálculos de estratificação é necessário que o usuário entre com os dados, distâncias entre eletrodos para o método de Wenner e as resistências aparentes medidas / resistividades aparentes calculadas, após a geração do gráfico pelo programa a partir de uma análise do gráfico o usuário determina os pontos onde o programa irá segmentar a curva.

Por motivo de consistência com os gráficos empregados no procedimento manual, o programa assume que os gráficos estão em escala log-log. Para abcissa  $a/d$ , (a) separação entre eletrodos e (d) profundidade da camada do solo, utiliza-se uma faixa de 0.1 a 100 (três décadas), com precisão de 40 pontos/década. São geradas curvas-padrão com parâmetro  $r_2 / r_1$  entre 0.01 e 100, com 20 curvas por década, resultando num total de 81 curvas-padrão;

Para interpolação da curva de medidas de resistividade, utiliza-se o método de spline cúbica<sup>4</sup>. Além de produzir bons resultados, tal método permite a extrapolação de dados. [21]

---

<sup>4</sup> Spline cúbica é uma técnica de aproximação que consiste em se dividir o intervalo de interesse em vários subintervalos e interpolar, da forma mais suave possível, nestes subintervalos, com polinômios de grau pequeno.

A segmentação da curva de resistividade é realizada a partir de uma análise do gráfico de resistividade. Ao fim do cálculo das resistividades e espessuras das camadas do solo, camadas consecutivas com características próximas poderão ser fundidas.

Para efetuar a estratificação do solo o programa realiza o ajuste de curvas. Cada segmento interpolado da curva de resistividade é deslocado horizontalmente em passos discretos. Para cada passo, determina-se o deslocamento vertical ótimo, de modo a minimizar o erro quadrático total para todos os pontos do segmento. Para ajuste do primeiro segmento (e, conseqüentemente, determinação das características da primeira camada), o procedimento é repetido e os erros quadráticos computados. São descartados resultados com espessura fora dos limites esperados e o resultado com menor erro quadrático é determinado.

Para o cálculo das demais camadas, é determinado o primeiro pólo, desloca-se a curva auxiliar correspondente de modo que passe pelo pólo. Para cada curva-padrão é calculado o erro quadrático em relação ao segundo segmento da curva de resistividade, com a restrição de que o pólo de cada curva-padrão deve estar localizado sobre a curva auxiliar transladada. O procedimento é repetido para todas as camadas restantes.

#### **4.1.2. Formulação analítica do método gráfico**

O método gráfico de estratificação de solo, conhecido como método Yokogawa, tem sido amplamente utilizado devido a sua simplicidade de aplicação e a sua precisão aceitável, quando apropriadamente utilizado. Trata-se, porém, de um método rústico, em que erros gráficos podem passar despercebidos e gerar resultados incorretos, principalmente em condições de campo. [22]

Aborda-se neste estudo somente o método utilizado para obter a estratificação do solo em 02 camadas horizontais, não sendo aplicáveis, portanto, as técnicas aqui desenvolvidas, ao caso de solos com camadas verticais e/ou camadas esféricas.

Através da construção de gráficos de resistividade versus espaçamento dos eletrodos é possível obter um modelo de representação do solo.

Utilizando o equacionamento para o camadeamento de solo horizontalmente estratificado, pode-se obter a curva correspondente e determinar os parâmetros do modelo do solo.

#### **4.1.3. Medição de resistividade**

Considerando-se a heterogeneidade do solo, verificada pela variação de sua resistividade à medida que se pesquisa as suas camadas, há necessidade de se procurar os meios e métodos que determinem estas variações, sem que seja necessário lançar mão de prospecções geológicas, o que de certo inviabilizaria os estudos para a implantação de sistemas de aterramento. Assim sendo, foram desenvolvidos métodos de prospecção geelétricos que se caracterizam pela facilidade operacional e precisão requerida. Pode-se dizer que as técnicas de medição de resistividade do solo são essencialmente as mesmas, qualquer que seja o propósito da medição. Entretanto, a interpretação dos dados registrados pode variar consideravelmente, em especial, em locais onde solos com resistividade não uniformes são encontrados. A complexidade adicional causada pelos solos não uniformes é comum, e apenas em raríssimos casos as resistividades são constantes com o aumento da profundidade.

#### **4.1.4. Aparelho de medição de resistividade**

Na especificação de um equipamento para medição da resistividade do solo, deve-se levar em conta fatores como:

A característica da corrente a ser utilizada;

O esquema de detecção de correntes de interferência presentes no solo, que venham a introduzir erros na medição.

O método prático de medição de resistividade comumente utilizado consiste em introduzir 02 eletrodos de corrente no solo e fazer circular uma corrente entre eles. Mede-se então a diferença de potencial usando outros 02 eletrodos de potencial.

A disposição dos 02 eletrodos de corrente ( $C_1$  e  $C_2$ ) e dos eletrodos internos de potencial ( $P_1$  e  $P_2$ ) sendo espaçados de  $d_1$ ,  $d_2$ , e  $d_3$  está indicada na figura a seguir.

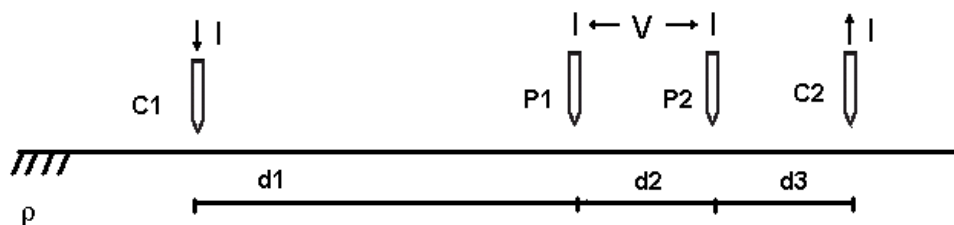


Figura 4.1 - Arranjo geral para medição de resistividade

A equação 4.1 determina o valor da resistividade aparente do solo, caso esta varie com a profundidade, ou ainda o valor real da resistividade para o solo homogêneo.

$$\rho = \frac{2\pi \left( \frac{V}{I} \right)}{\left[ \frac{1}{d_1} - \frac{1}{(d_2 + d_3)} - \frac{1}{(d_1 + d_2)} + \frac{1}{d_3} \right]} \quad (4.1)$$

O método descrito não é usado na prática devido a falta de padronização, mas a sua teoria dá origem ao arranjo de Wenner discutido a seguir.

#### 4.1.5. Método de Wenner

Neste método são utilizados 04 pontos alinhados enterrados a uma profundidade  $H$ , espaçados de uma distância “ $a$ ” entre si. Pode-se observar tal configuração na figura abaixo.

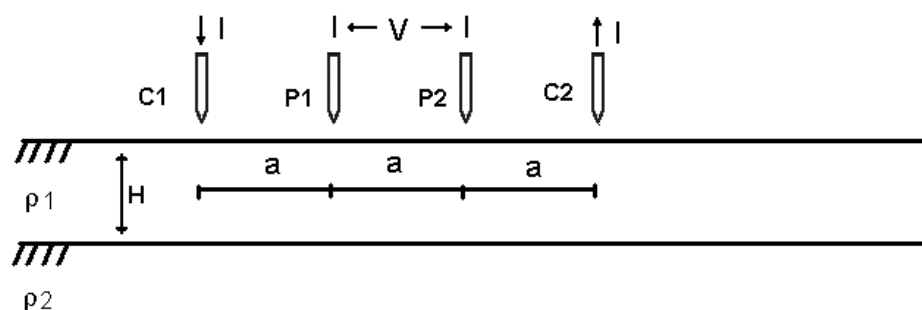


Figura 4.2 - Configuração de eletrodos para o Método de Wenner.

Injeta-se uma corrente pelo ponto  $C_1$ , e coleta-se pelo ponto  $C_2$ . A corrente passando pelo solo entre os pontos  $C_1$  e  $C_2$ , produz uma diferencial de potencial entre os pontos  $P_1$  e  $P_2$ .

A resistividade para este método é calculada pela equação (4.2).

$$\rho = \left[ 2 \times \pi \times H \left( \frac{V}{I} \right) \times \frac{1}{2 \times \ln \left( \frac{2 + \sqrt{4 + \left( \frac{a}{H} \right)^2}}{1 + \sqrt{1 + \left( \frac{a}{H} \right)^2}} \right) + 2 \times \sqrt{1 + \left( \frac{a}{H} \right)^2} - \sqrt{4 + \left( \frac{a}{H} \right)^2} - \frac{a}{H}} \right]$$

(4.2)

O coeficiente de reflexão  $K$  é definido pela equação abaixo:

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1}$$

(4.3)

onde,  $K$  pode assumir valores entre  $-1 < K < 1$

se  $\rho_2 = 0$ :  $K = -1$  solo positivo, 2ª camada condutora perfeita;

se  $\rho_2 = \infty$ :  $K = 1$  solo negativo, 2ª camada isolante;

se  $\rho_2 = \rho_1$ :  $K = 0$  solo homogêneo, 2ª camada = 1ª camada.

A resistividade aparente num solo de 02 camadas é obtida pela equação (4.4):

$$\frac{\rho_a}{\rho_1} = 1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} K^n \left[ \left( 1 + 4n^2 \left( \frac{h}{a} \right)^2 \right)^{-\frac{1}{2}} - \left( 4 + 4n^2 \left( \frac{h}{a} \right)^2 \right)^{-\frac{1}{2}} \right]$$

(4.4)

#### 4.1.6. Estratificação do solo (camadas horizontais)

A resistividade aparente  $\rho_a$  é obtida usando o método de Wenner derivado da condição para 02 camadas. Reagrupando a equação 4.4, tem-se a equação 4.5. [19]

$$\rho_a = \rho_1 \left[ 1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} K^n \left( \frac{1}{\left[ 1 + \left( \frac{2nh}{a} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}} - \frac{1}{\left[ 4 + \left( \frac{2nh}{a} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}} \right) \right] \quad (4.5)$$

onde:

$\rho_a$  = resistividade aparente medida usando o método de Wenner;

$a$  = distância de separação entre os eletrodos de corrente e potencial;

$\rho_1$  = resistividade da primeira camada de profundidade  $h$ ;

$\rho_2$  = resistividade da segunda camada que se estende até a profundidade infinita;

$K$  definido na equação 4.3

#### 4.1.7. Método de estratificação utilizando 16 eletrodos

O método de estratificação que utiliza 16 eletrodos é baseado no método de Wenner. O que justifica sua utilização na obtenção das medidas de resistividade é a redução do tempo de execução destas, então como consequência, a redução do tempo em que a equipe que executa as medidas fica exposta aos riscos de permanência na subestação.

Neste método são utilizados 16 eletrodos alinhados, controlados por uma placa de atuadores que aciona os eletrodos de quatro em quatro; durante a execução das medidas cada eletrodo pode ser utilizado tanto como eletrodo de corrente como eletrodo de tensão.

O cálculo do lugar geométrico dos eletrodos é feito por um algoritmo que utiliza o espaço disponível como dado de entrada e retorna ao usuário o número de eletrodos que será utilizado na medição e sua localização referente ao ponto central da medida.

Na figura 4.3 encontra-se um exemplo de disposição dos eletrodos.

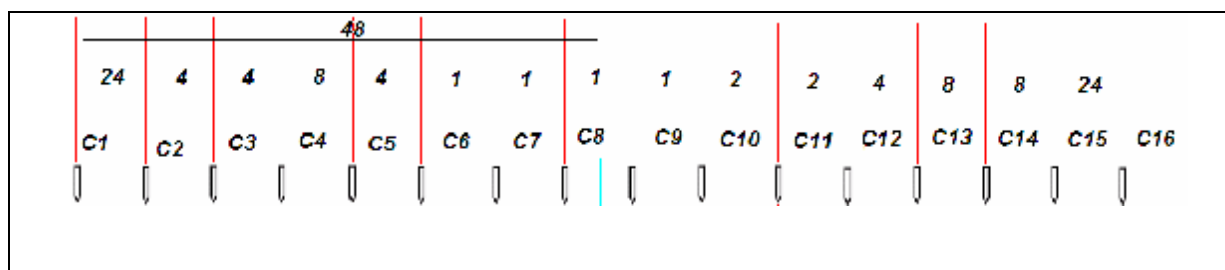


Figura 4.3 - Disposição dos eletrodos para a realização das medidas de estratificação

A seleção e acionamento dos relés que serão utilizados em cada medida é feita pelo algoritmo de medição.

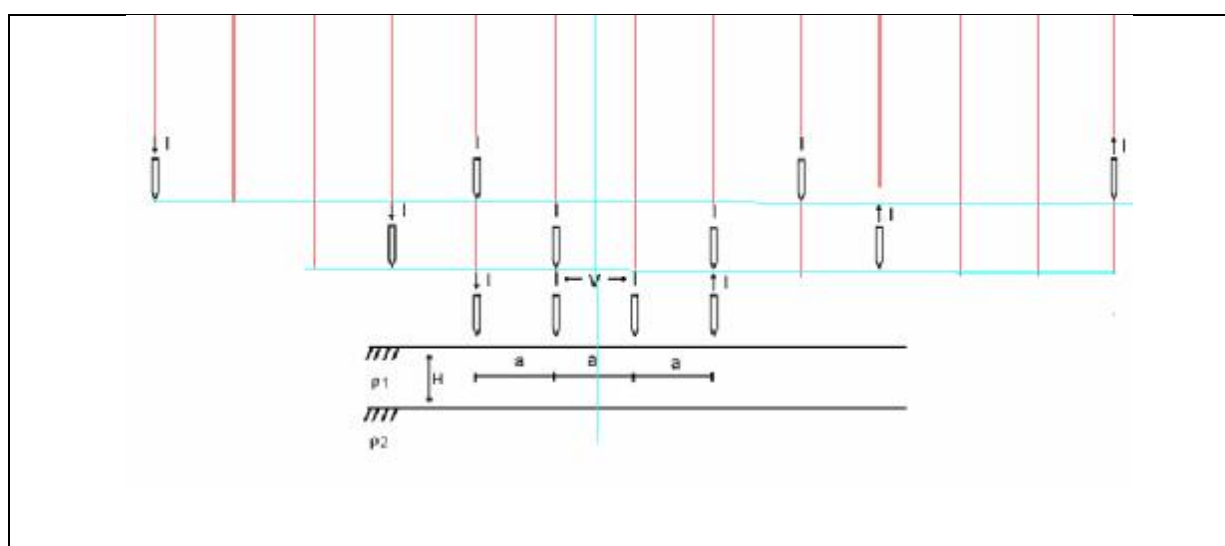


Figura 4.4 - Utilização dos eletrodos para a medição

## 4.2. Elementos envolvidos na medição de aterramento com o protótipo de alta frequência

O equipamento utilizado neste estudo, denominado protótipo, opera com uma corrente elétrica, gerada em diversas frequências. Ela é injetada entre o sistema de aterramento e um eletrodo de terra auxiliar para medir diferença de potenciais em pontos do solo de sua proximidade. Os dados passam por um

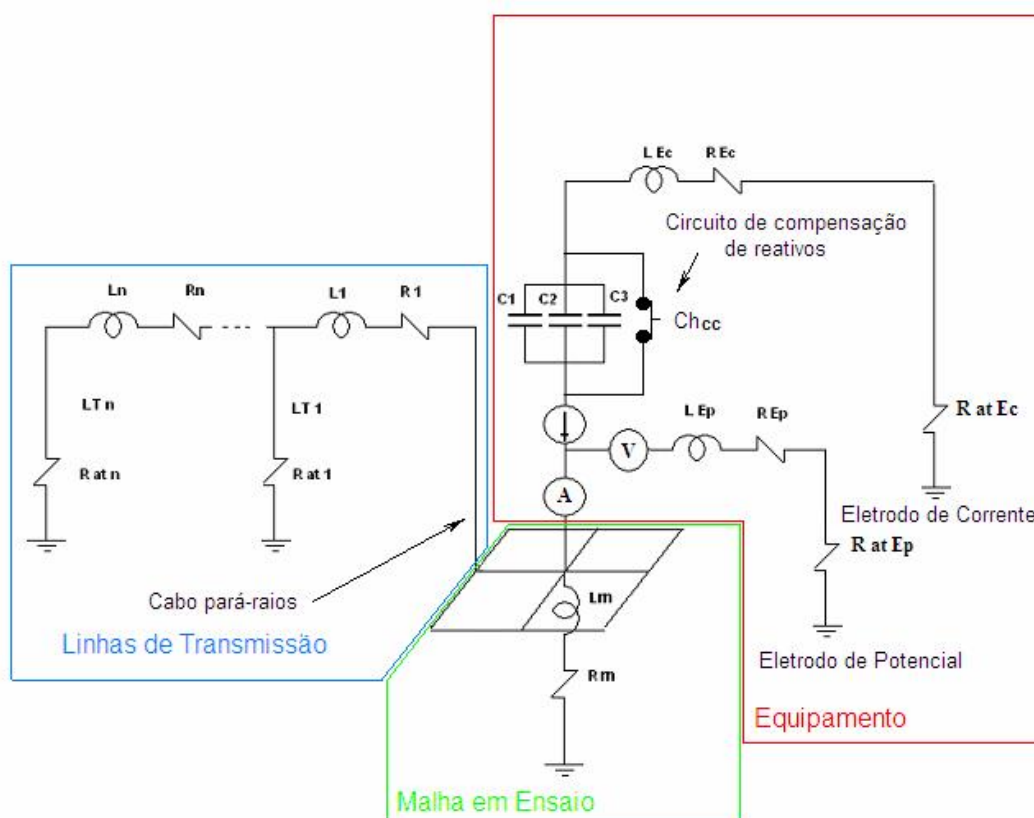


software dotado de interface gráfica para receber, processar, armazenar e apresentar os resultados. [23]



Figura 4.1 - Vista do painel frontal do protótipo

No esquema da Figura 4.3 encontram-se de forma simplificada os parâmetros que compõem a medição em alta frequência realizada pelo protótipo.



### Figura 4.3 - Esquema simplificado da medição

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 pára-raios das linhas de transmissão);
- $R_1... R_n$  representam uma parte da resistência do circuito (cabos pára-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 da impedância do eletrodo de corrente;
- $R_{at_{Ec}}$  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;
- $R_{at_{Ep}}$  representa a resistência de aterramento do eletrodo de potencial;
- $C_1, C_2, C_3$  representam o banco de capacitores utilizado para compensar a parte reativa do circuito.
- $Ch_{cc}$  representa a chave de curto circuito utilizada para fazer a medida sem compensação.

Dessa forma, como exposto no item 3.1.1, os parâmetros (resistência + reatância) dos cabos pára-raios tendem a infinito, ou seja, passam a ser excluídos da medição em alta frequência.

Assim sendo, a corrente de alta frequência tenderá a circular na sua totalidade pelo circuito formado agora, pela malha de terra e o eletrodo auxiliar de corrente, elevando os potenciais de superfície junto aos mesmos.

Em conseqüência, ao se deslocar o eletrodo auxiliar de potencial numa região livre das influências (patamar da curva “com compensação” obtido na região

B) tanto da malha de aterramento sob ensaio quanto do eletrodo auxiliar de corrente, obter-se-á o valor procurado para a resistência da malha.

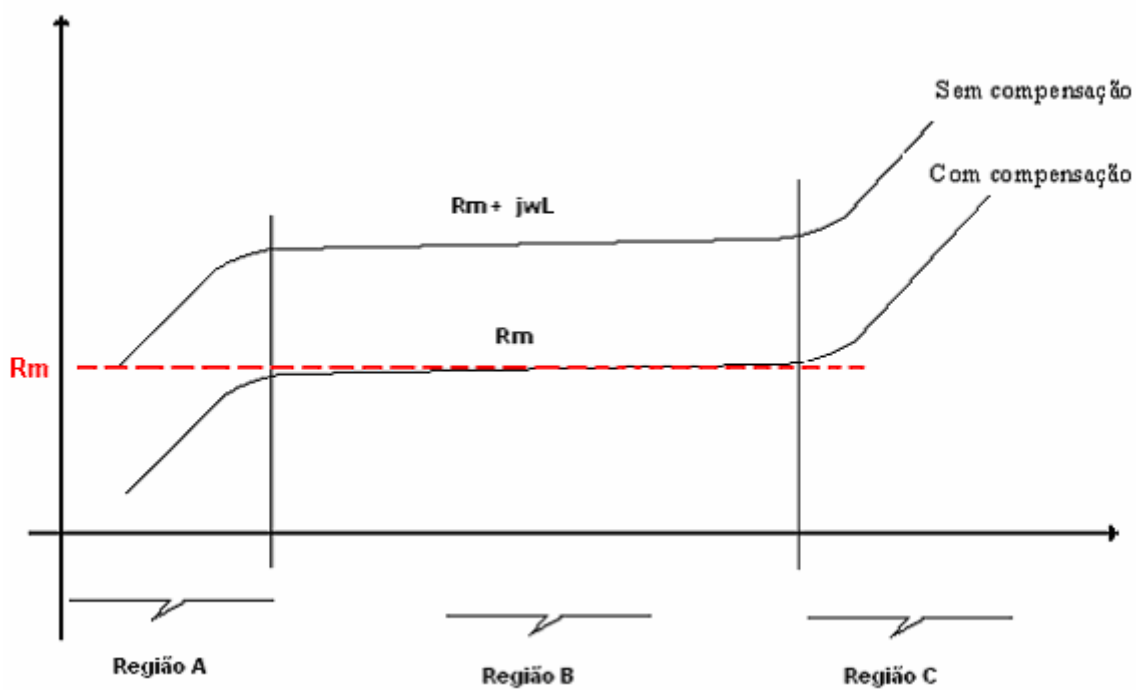


Figura 4.4 - Tendência das curvas "sem e com" compensação de reativos

## 5. ESTUDOS DE CASOS

Efetuarão-se testes de campo em malhas de subestações com configurações e dimensões variadas. A seguir são apresentados os resultados de casos considerados típicos para malhas com pequena, média e grandes dimensões.

### 5.1. Metodologia convencional reduzida

#### 5.1.1. CASO 1 – Malha de subestação 138 kV, com área de 2500 m<sup>2</sup> e com cabo pára-raios conectado

Testou-se o protótipo com a frequência de 25 kHz, na malha de uma subestação 138 / 13,8 kV, 10 -12,5 MVA, em solo com resistividade da camada equivalente 750  $\Omega$ .m, espessura da camada equivalente 3,61 m, resistividade da camada inferior 585  $\Omega$ .m, o que implica num coeficiente de reflexão  $k = - 0,12$ .

Pelo memorial construtivo, a malha de aterramento da subestação é composta de 1761m de cabo de cobre nu de secção 95 mm<sup>2</sup> dispostos numa área de 2484 m<sup>2</sup> (área energizada), com quadrículas de 3m x 3m (dimensões retangulares de 36 m x 69 m). Complementando a malha em pontos críticos (vértices e equipamentos), existem 63 hastes de aço cobreado de 3000 mm x 19 mm. A subestação é alimentada por um vão de 50m derivando de uma linha de transmissão de 138 kV, com 02 cabos pára-raios ligados ao pórtico da mesma.

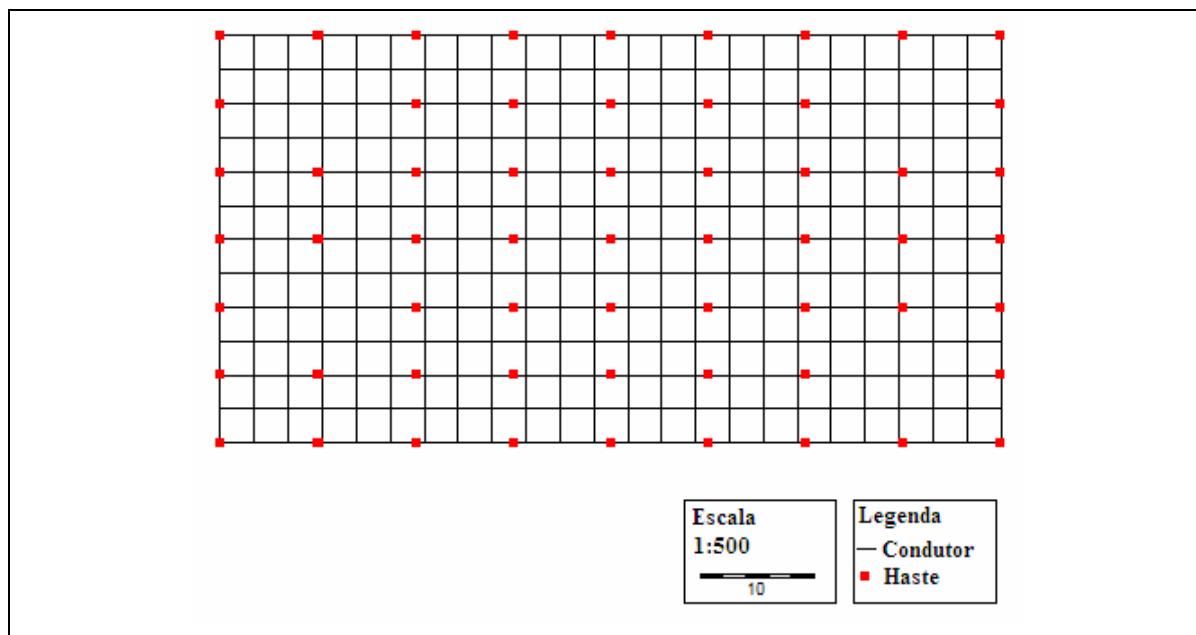


Figura 5.1 – Planta da malha de aterramento caso 1

O processamento em computador forneceu para a malha com condutores superficiais e hastes verticais, uma resistência de aterramento de **5,42  $\Omega$** .

Na Tabela 5.1 e no gráfico da Figura 5.2 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 m do neutro de baixa tensão do transformador de potência (ponto de injeção da corrente de teste). Observa-se a tendência da curva com valores compensados em estabilizar no patamar próximo de **5,4  $\Omega$** .

Tabela 5.1 – Medição de campo caso 1

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

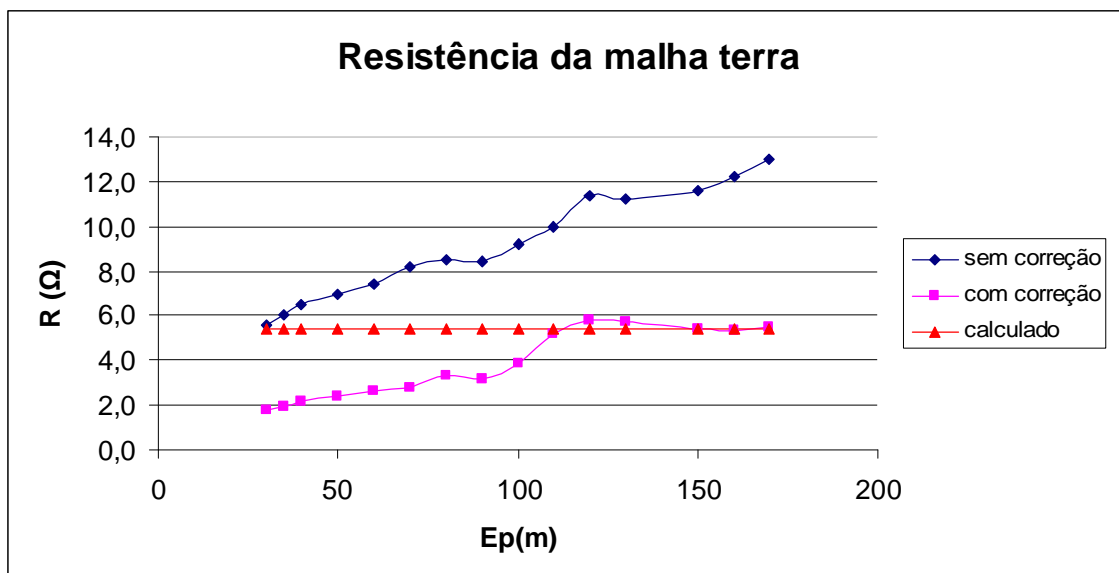


Figura 5.2 – Gráfico da medição de campo caso 1

#### 5.1.2. CASO 2 – Malha de subestação 34,5 kV, com área de 2900 m<sup>2</sup> e sem cabo pára-raios conectado

Testou-se o protótipo com a frequência de 25 kHz, na malha de uma subestação 34,5 kV, 5,0 MVA, em solo com resistividade da camada equivalente 800 Ω.m, espessura da camada equivalente 10 m, resistividade da camada inferior 1600 Ω.m, o que implica num coeficiente de reflexão  $k = + 0,33$ .

Pelo memorial construtivo, a malha de aterramento da subestação é composta de 960m de cabo de cobre nu de secção 70 mm<sup>2</sup> dispostos numa área de 2900 m<sup>2</sup> (área energizada), com quadrículas de dimensões variadas (dimensões da malha trapezoidal 37 m x 61 m x 58 m). Complementando a malha em pontos críticos (vértices e equipamentos), existem 34 hastes de aço cobreado de 3000 mm x 19 mm. A subestação é alimentada por uma linha de transmissão de 34,5 kV, sem cabo pára-raios ligado ao pórtico da mesma.

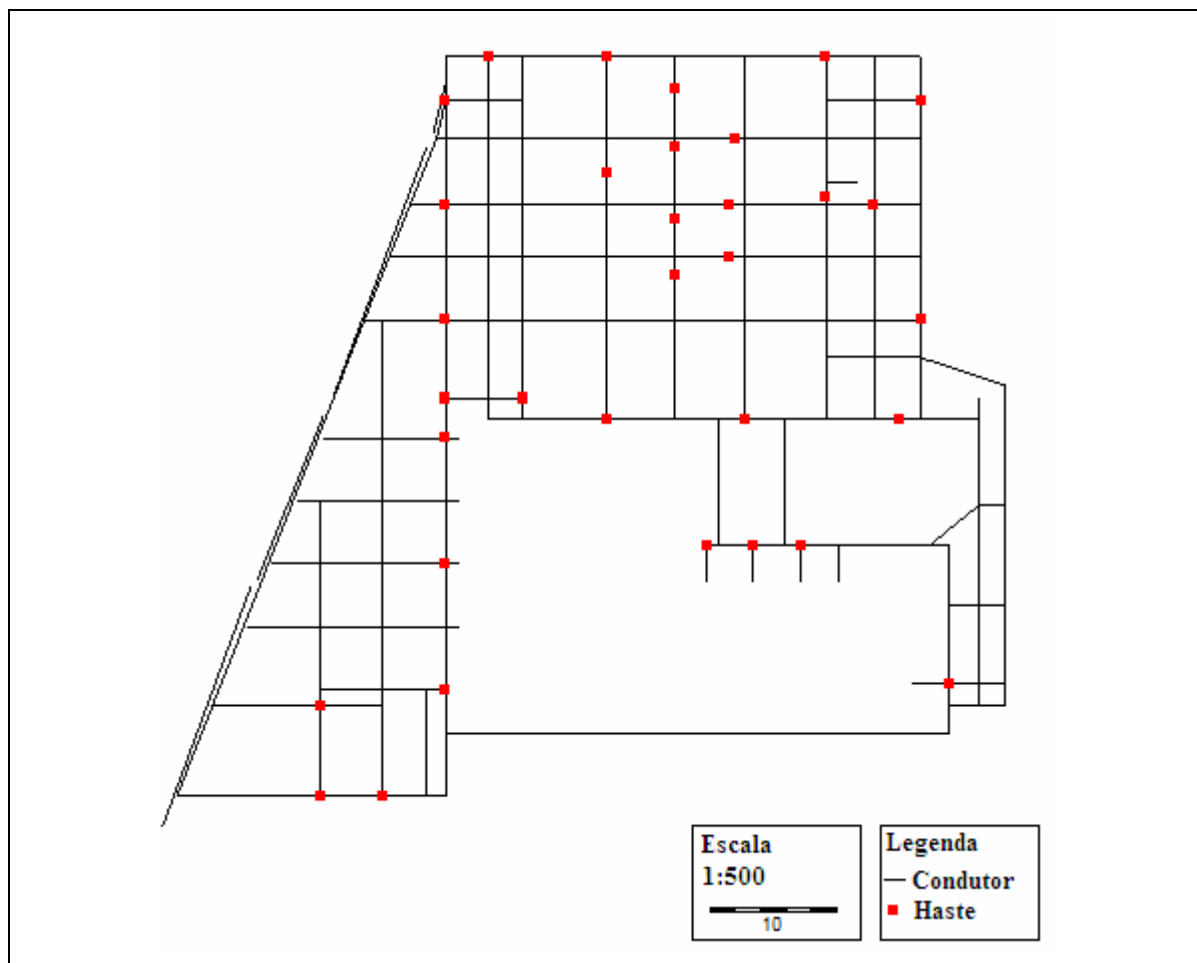


Figura 5.3 – Planta da malha de aterramento caso 2

O processamento em computador forneceu para a malha com condutores superficiais e hastes verticais, uma resistência de aterramento de **9,87  $\Omega$** .

Na Tabela 5.2 e no gráfico da Figura 5.4 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 250 m da periferia da malha (ponto de injeção da corrente de teste). Observa-se a tendência da curva com valores compensados em estabilizar no patamar próximo de **9,50  $\Omega$** .

Tabela 5.2 – Medição de campo caso 2

Ep(m)	Rsc( $\Omega$ )	Rcc( $\Omega$ )	Calculado( $\Omega$ )
-2	6,10	4,25	9,87
-1	5,85	3,45	9,87
0	7,10	4,10	9,87
1	9,12	5,30	9,87
2	9,35	5,25	9,87
3	9,50	5,55	9,87
4	9,95	5,90	9,87
10	10,4	6,90	9,87
15	10,8	7,50	9,87
22	11,6	8,20	9,87
35	12,4	8,90	9,87
40	11,6	9,30	9,87
45	13,1	9,25	9,87
50	12,1	9,65	9,87
55	14,1	9,64	9,87
60	12,5	9,95	9,87
75	15,6	10,7	9,87
95	16,6	10,8	9,87
115	17,5	11,1	9,87
135	18,6	11,5	9,87
155	19,9	12,1	9,87
190	23,1	13,6	9,87

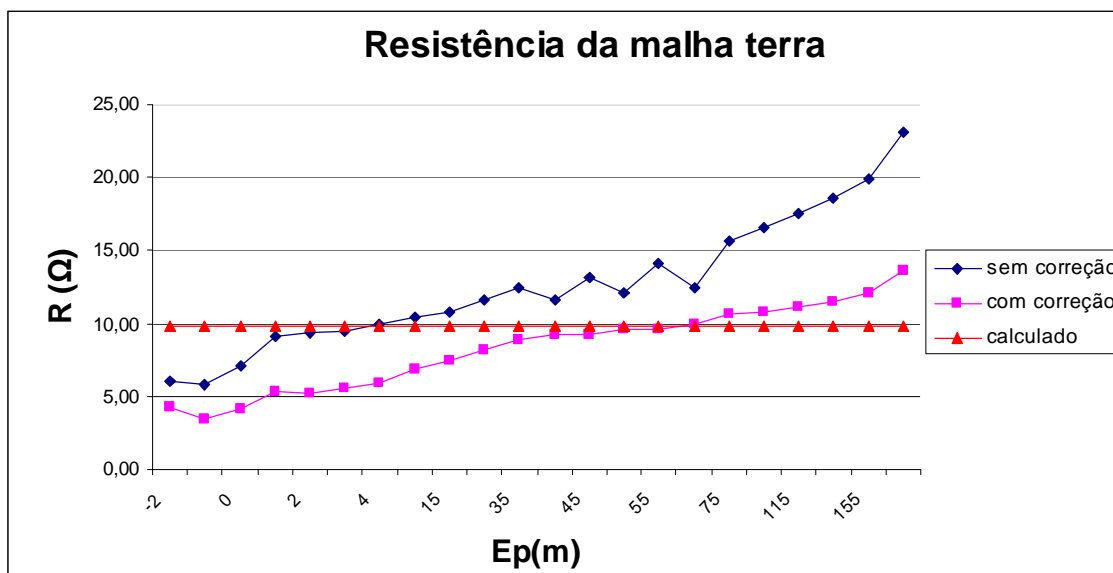


Figura 5.4 – Gráfico medição de campo caso 2



**5.1.3. CASO 3 – Malha de subestação 138 kV, com área de 4220 m<sup>2</sup> e com cabo pára-raios conectado à estrutura metálica de entrada e não diretamente à malha de terra**

Testou-se o protótipo com a frequência de 25 kHz, na malha de uma subestação 138 / 13,8 kV, 2 x 25 MVA, em solo com resistividade da camada equivalente 527  $\Omega$ .m, espessura da camada equivalente 16,8 m, resistividade da camada inferior 1900  $\Omega$ .m, o que implica num coeficiente de reflexão  $k = + 0,57$ .

Pelo memorial construtivo, a malha de aterramento da subestação é composta de 2280 m de cabo de cobre nu de secção 120 mm<sup>2</sup> dispostos numa área de 4220 m<sup>2</sup> (área energizada), com quadrículas de 4m x 4m (dimensões da malha trapezoidal de 82 m x 32 m x 74 m). Complementando a malha em pontos críticos (vértices e equipamentos), existem 58 hastes de aço cobreado de 3000 mm x 19 mm. A subestação é alimentada por um vão de 30m derivando de uma linha de transmissão de 138 kV, com 02 cabos pára-raios ligados ao pórtico da mesma, porém não diretamente à malha de terra.

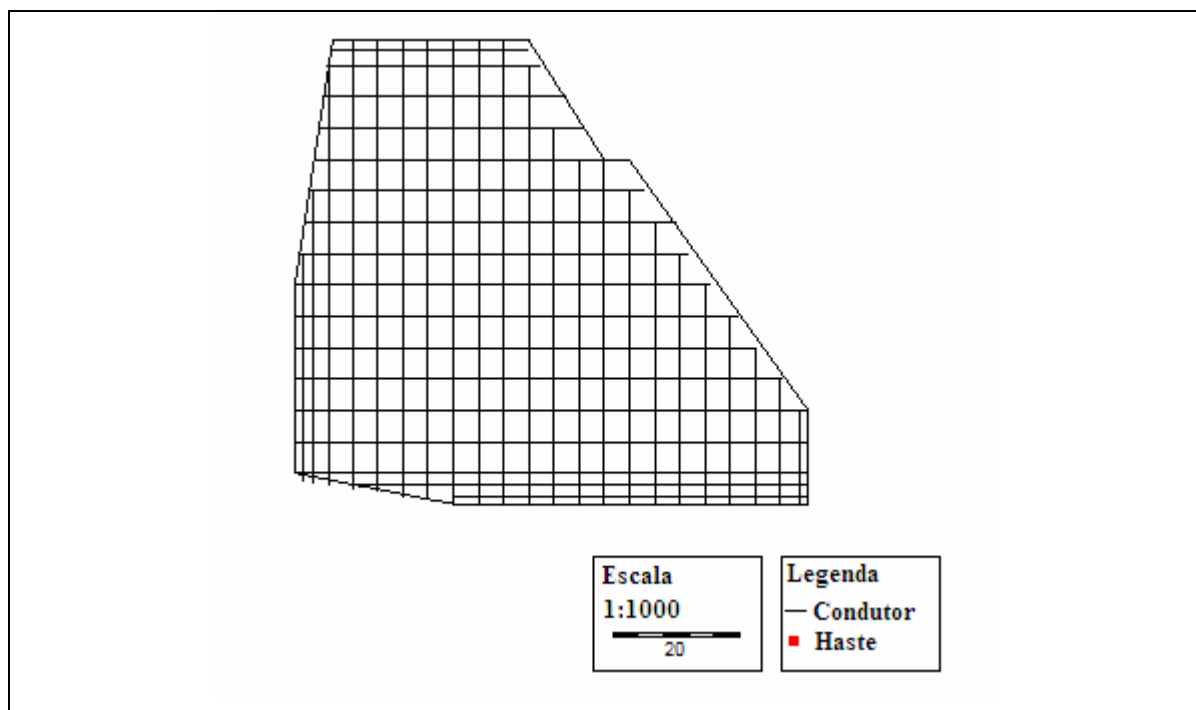


Figura 5.5 - Planta da malha de aterramento caso 3

O processamento em computador forneceu para a malha com condutores superficiais e hastes verticais, uma resistência de aterramento de **6,6  $\Omega$** .

Na Tabela 5.3 e no gráfico da Figura 5.6 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 150 m do condutor periférico (ponto de injeção da corrente de teste). Observa-se a tendência da curva com valores compensados em estabilizar no patamar próximo de **5,7  $\Omega$** .

Tabela 5.3 – Medição de campo caso 3

Ep(m)	Rsc( $\Omega$ )	Rcc( $\Omega$ )	Calculado( $\Omega$ )
0	2,48	1,47	6,6
1	3,3	2,15	6,6
2	3,8	2,6	6,6
3	4,4	3,1	6,6
4	5,0	3,7	6,6
5	5,5	4,2	6,6
6	6,0	4,7	6,6
7	6,4	5,1	6,6
8	6,6	5,3	6,6
9	7,0	5,6	6,6
10	7,3	5,7	6,6
11	7,4	6,4	6,6
12	7,4	5,8	6,6
13	7,5	5,9	6,6
14	7,7	6,1	6,6
15	7,9	6,3	6,6
20	8,1	8,1	6,6
25	8,2	8,2	6,6

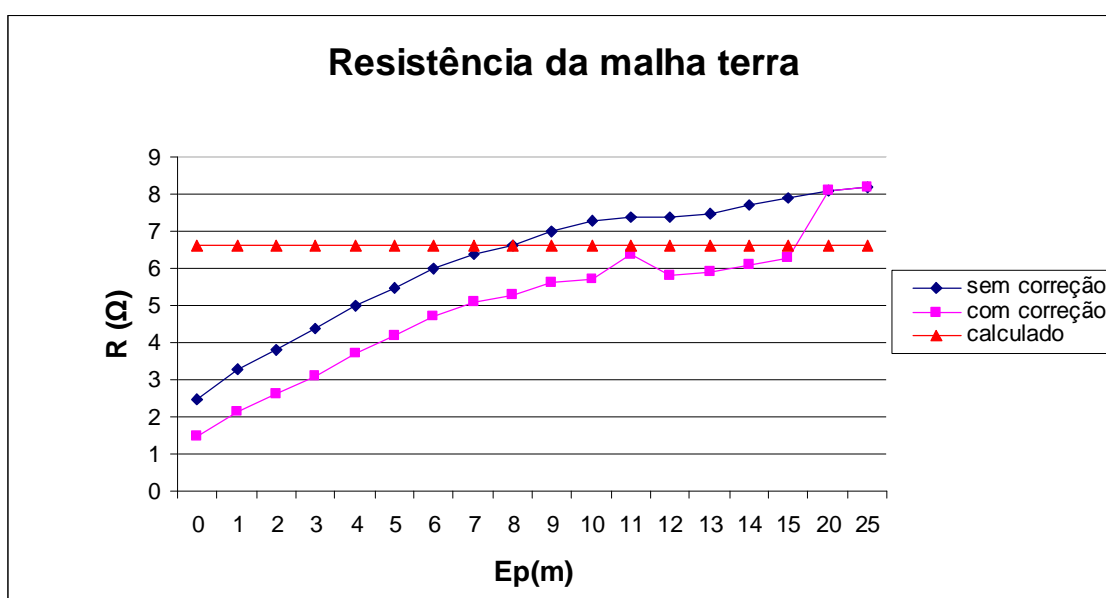


Figura 5.6 – Gráfico medição de campo caso 3

#### 5.1.4. CASO 4 – Malha de subestação 138 kV, com área de 1600 m<sup>2</sup> e sem cabo pára-raios conectado

Testou-se o protótipo com a frequência de 25 kHz, na malha de uma subestação 138 / 13,8 kV, 2 x 25 MVA, em solo com resistividade da camada equivalente 163  $\Omega$ .m, espessura da camada equivalente 10 m, resistividade da camada inferior 1817  $\Omega$ .m, o que implica num coeficiente de reflexão  $k = + 0,83$ .

Pelo memorial construtivo, a malha de aterramento da subestação é composta de 1150 m de cabo de cobre nu de secção 120 mm<sup>2</sup> dispostos numa área de 1600 m<sup>2</sup> (área energizada), com quadrículas de 3m x 3m (dimensões da malha trapezoidal de 36 m x 19 m x 54,6 m). Complementando a malha em pontos críticos (vértices e equipamentos), existem 56 hastes de aço cobreado de 6000 mm x 19 mm, 02 hastes de aço cobreado de 9000 mm x 19 mm e 19 hastes de aço cobreado de 3000 mm x 19 mm. A subestação é alimentada por um vão de 10m derivando de uma linha de transmissão de 138 kV, com 02 cabos pára-raios não ligados ao pórtico da mesma, à época das medições.

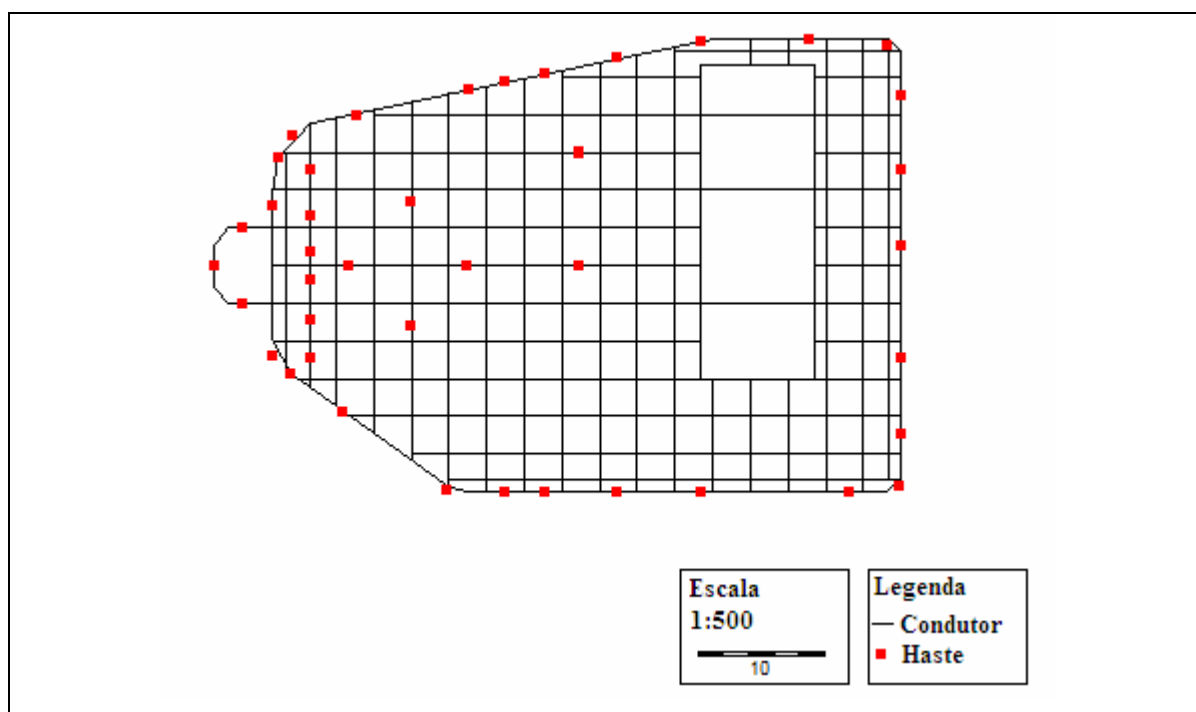


Figura 5.7 – Planta da malha de aterramento caso 4

O processamento em computador forneceu para a malha com condutores superficiais e hastes verticais, uma resistência de aterramento de **4,05  $\Omega$** .

Na Tabela 5.4 e no gráfico da Figura 5.8 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 150 m do pára-raios de entrada de linha (ponto de injeção da corrente de teste). Observa-se a tendência da curva com valores compensados em estabilizar no patamar próximo de **3,6  $\Omega$** .

Tabela 5.4 – Medição de campo caso 4

Ep(m)	Rsc( $\Omega$ )	Rcc( $\Omega$ )	Calculado( $\Omega$ )
0	1,73	0,50	4,05
1	1,85	0,60	4,05
2	1,97	0,72	4,05
3	2,11	1,0	4,05
4	2,8	1,3	4,05
10	3,5	1,6	4,05
15	4,7	2,0	4,05
20	4,9	2,3	4,05
25	5,4	2,5	4,05
30	5,8	2,8	4,05
35	6,6	3,2	4,05
40	6,9	3,4	4,05
45	7,4	3,6	4,05
50	8,1	3,8	4,05
60	8,6	4,6	4,05
70	9,8	5,2	4,05

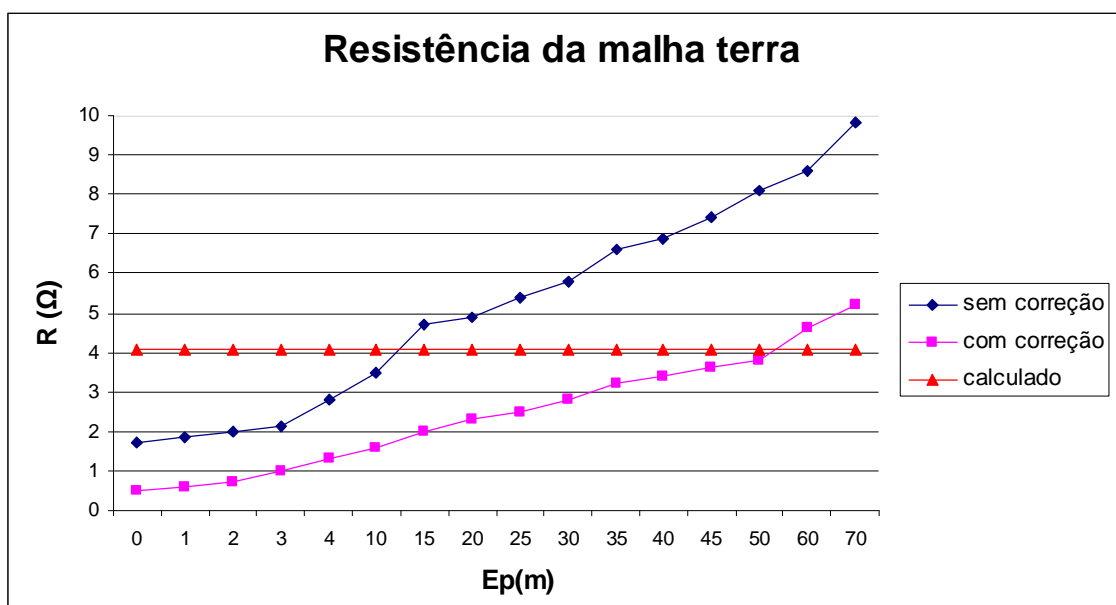


Figura 5.8 – Gráfico medição de campo caso 4

### 5.1.5. CASO 5 – Malha de subestação 34,5 kV, com área de 500 m<sup>2</sup> e sem cabo pára-raios conectado

Testou-se o protótipo com a frequência de 25 kHz, na malha de uma subestação 34,5 / 13,8 kV, 5,0 MVA, em solo com resistividade da camada equivalente 350  $\Omega$ .m, espessura da camada equivalente 12,0 m, resistividade da camada inferior 20  $\Omega$ .m, o que implica num coeficiente de reflexão  $k = -0,90$ .

Pelo memorial construtivo, a malha de aterramento da subestação é composta de 255 m de cabo de cobre nu de secção 35 mm<sup>2</sup> e 250 m de cabo de cobre nu de secção 50 mm<sup>2</sup> dispostos numa área de 461 m<sup>2</sup> (área energizada), com quadrículas de 3m x 3m (dimensões da malha triangular de 27,5 m x 33,5 m). Complementando a malha em pontos críticos (vértices e equipamentos), existem 19 hastes de aço cobreado de 2400 mm x 19 mm. A subestação é alimentada por um vão de 50m derivando de uma linha de transmissão de 34,5 kV, sem cabo pára-raios ligado ao pórtico da mesma.

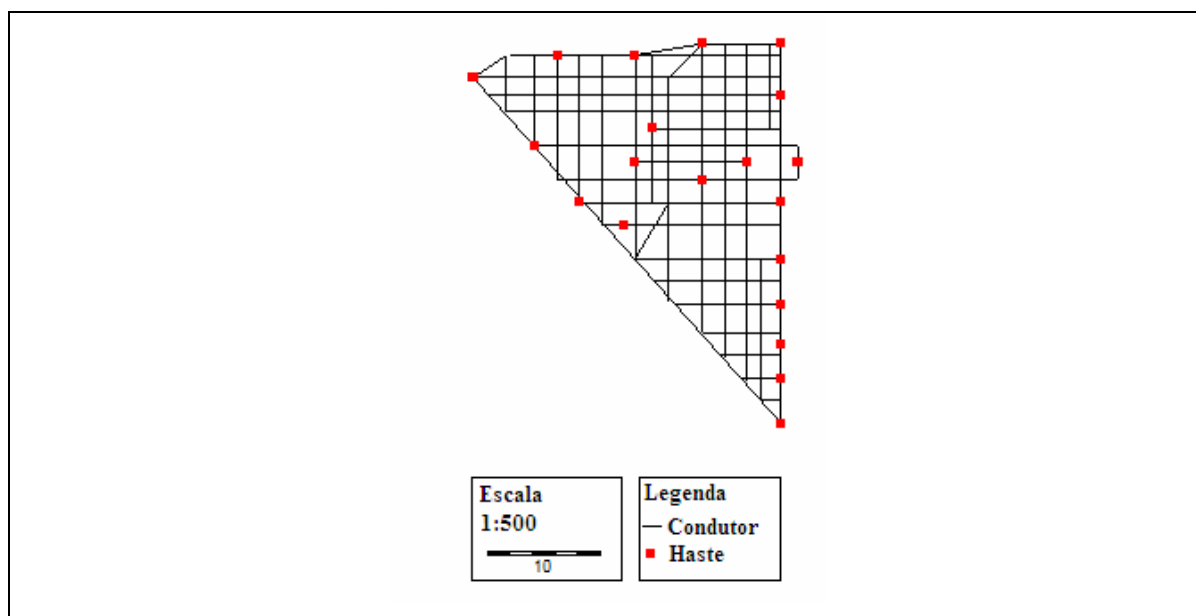


Figura 5.9 – Planta da malha de aterramento caso 5

O processamento em computador forneceu para a malha com condutores superficiais e hastes verticais, uma resistência de aterramento de **3,48  $\Omega$**  em solo normal seco e **3,00  $\Omega$**  em solo úmido.

Nas Tabelas 5.5 e nos gráficos das Figuras 5.10 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 135 m do neutro de baixa

tensão do transformador de potência (ponto de injeção da corrente de teste). Observa-se a tendência da curva com valores compensados em estabilizar no patamar próximo de **4,5  $\Omega$**  ( curva para solo normal seco) e **3,7  $\Omega$**  ( curva para solo úmido).

Efetuiu-se, paralelamente à medição em alta frequência, a medição da tensão para um ponto remoto da subestação, aproveitando-se a alta corrente de neutro injetada pelo transformador de potência na malha. Obteve-se a tensão remota de 110,0 V para uma corrente de neutro de 28,8 A (solo normal seco) resultando numa resistência prevista para a malha de terra de **3,82  $\Omega$** ; para solo úmido obteve-se a tensão remota de 111,6 V para uma corrente de neutro de 30,4 A resultando numa resistência prevista para a malha de terra de **3,67  $\Omega$** , perfeitamente condizentes, assim, com os valores medidos, tanto em solo normal como em solo úmido.

Tabela 5.5 – Medição de campo solo normal seco caso 5

Ep(m)	Rsc( $\Omega$ )	Rcc( $\Omega$ )	Calculado( $\Omega$ )
-4	3,5	3,4	3,48
-2	3,5	3,4	3,48
0	3,9	3,8	3,48
2	4,6	4,4	3,48
3	5,0	4,6	3,48
4	5,2	4,9	3,48
7	7,3	6,3	3,48
9	8,9	7,5	3,48
11	10,5	9,2	3,48
13	16,3	10,7	3,48
17	16,3	11,0	3,48
31	16,5	11,7	3,48

Tabela 5.6 – Medição de campo solo normal úmido caso 5

Ep(m)	Rsc( $\Omega$ )	Rcc( $\Omega$ )	Calculado( $\Omega$ )
-4	2,75	2,70	3,00
-2	2,75	2,70	3,00
0	3,05	3,00	3,00
2	3,55	3,50	3,00
3	4,0	3,70	3,00
4	4,2	4,0	3,00
7	5,8	5,1	3,00
9	7,1	6,2	3,00
11	8,5	7,5	3,00
13	12,0	9,0	3,00
17	12,2	9,5	3,00
31	12,5	10,1	3,00

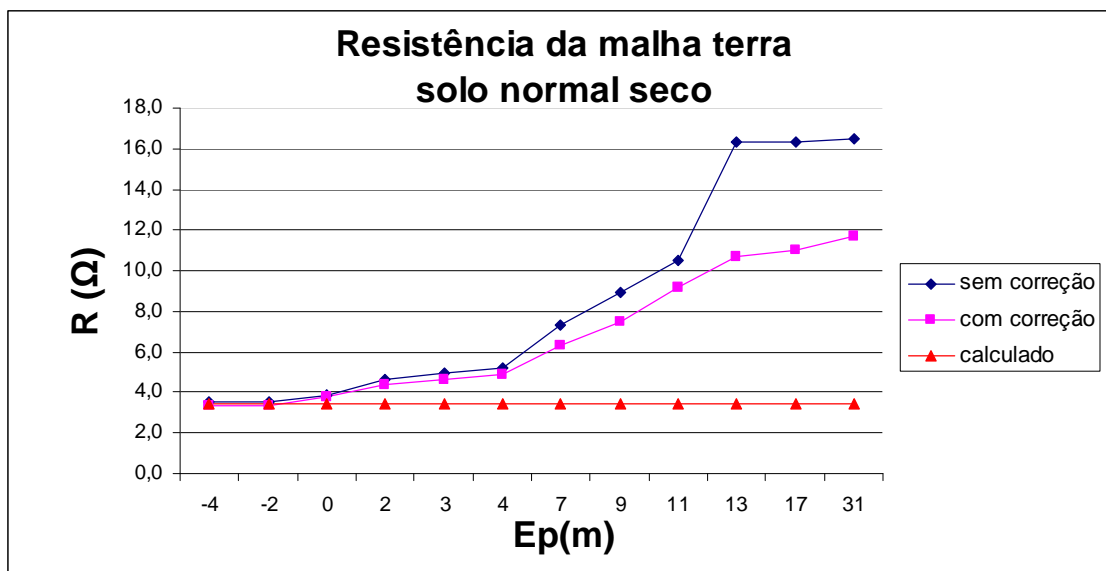


Figura 5.10 – Gráfico medição de campo solo normal seco caso 5

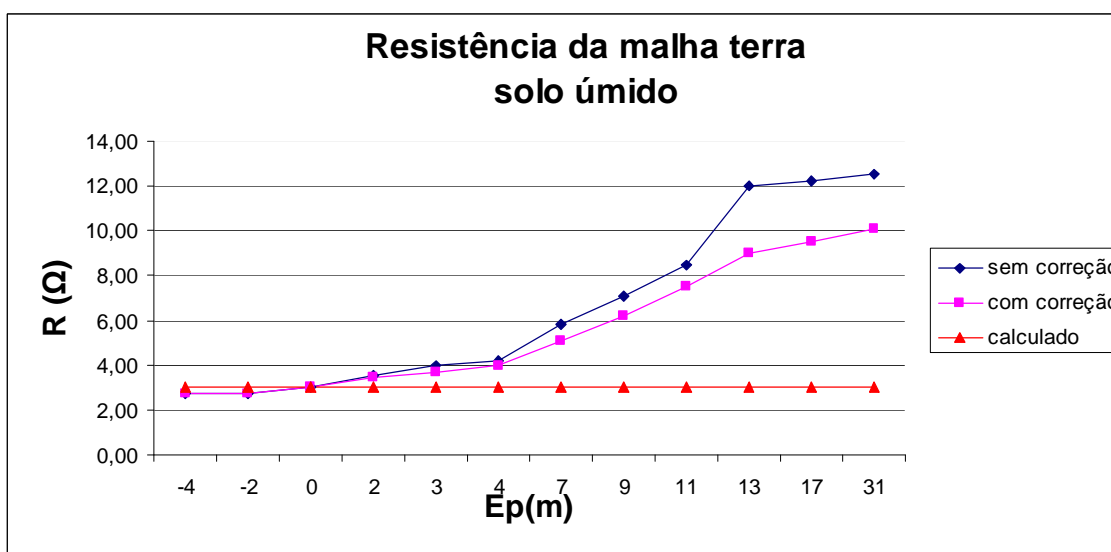


Figura 5.11 – Gráfico medição de campo solo normal úmido caso 5

#### 5.1.6. CASO 6 – Malha de subestação 138 kV, com área de 15400 m<sup>2</sup> e com cabo pára-raios da linha de transmissão ligado á malha através de condutor enterrado entre malha e primeira torre

Testou-se o protótipo com a freqüência de 25 kHz, na malha de uma subestação 138 / 13,8 kV, 10 / 12,5 MVA, em solo com resistividade da camada equivalente 100 Ω.m, praticamente homogêneo (coeficiente de reflexão  $k = -0,01$ ).

Pelo memorial construtivo, a malha de aterramento da subestação é composta de 1000 m de cabo de cobre nu de secção 70 mm<sup>2</sup> referente à malha da Subestação e 960 m de cabo de cobre nu de seção 50 mm<sup>2</sup>, dispostos numa área

de 15400 m<sup>2</sup> (área energizada), com quadrículas grandes de 10m x 14m (dimensões da malha paralelogramo de 140 m x 110 m). Complementando a malha em pontos críticos (vértices e equipamentos), existem 43 hastes de aço cobreado de 3000 mm x 16 mm. A subestação é alimentada por um vão de 30 m derivando de uma linha de transmissão de 138 kV, com cabo pára-raios ligado ao pórtico da mesma e encontra-se interligada a uma usina térmica.

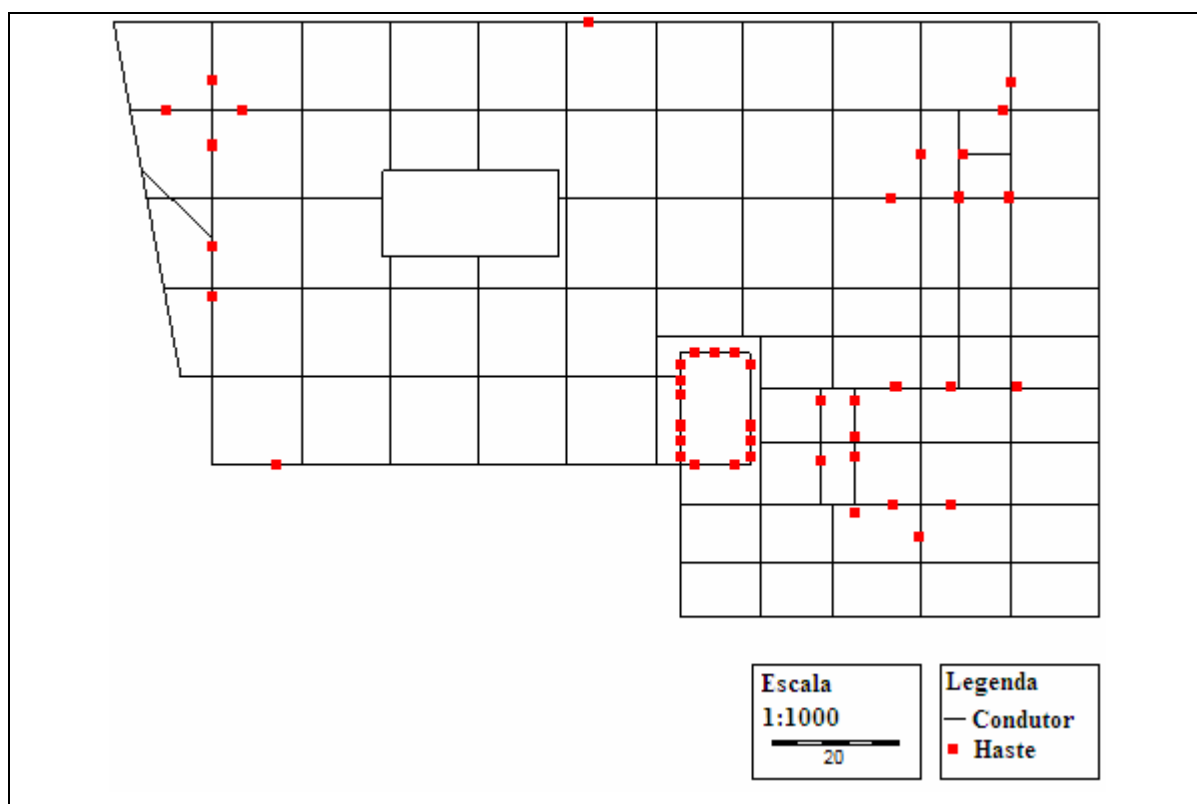


Figura 5.12 – Planta da malha de aterramento caso 6

O processamento em computador forneceu para a malha com condutores superficiais e hastes verticais, uma resistência de aterramento de **0,42 Ω** em solo extremamente úmido.

Na Tabela 5.7 e no gráfico da Figura 5.13 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 250 m do pórtico de entrada da linha próximo da periferia da malha (ponto de injeção da corrente de teste). Observa-se a tendência da curva com valores compensados em estabilizar no patamar próximo de **0,46 Ω**.



Tabela 5.7 – Medição de campo caso 6

Ep(m)	Rsc( $\Omega$ )	Rcc( $\Omega$ )	Calculado( $\Omega$ )
-1	2,30	0,71	0,42
0	2,35	0,92	0,42
1	2,40	0,46	0,42
2	2,40	0,47	0,42
3	2,40	0,48	0,42
4	2,40	0,50	0,42
10	2,40	0,50	0,42
20	2,40	0,46	0,42
40	2,42	0,54	0,42
60	2,57	0,63	0,42
80	2,87	0,73	0,42
100	2,98	0,75	0,42
120	3,01	0,77	0,42
140	3,19	0,80	0,42
160	3,38	0,82	0,42
180	3,71	0,86	0,42
200	3,92	0,87	0,42

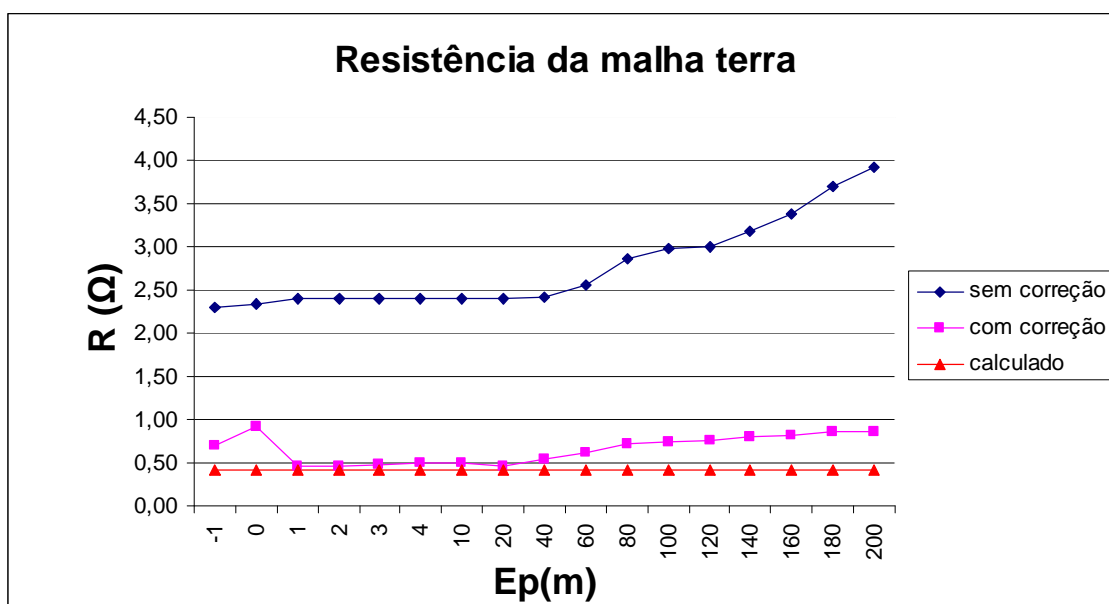


Figura 5.13 – Gráfico medição de campo caso 6

### 5.1.7. CASO 7 – Malha de subestação 138 kV, com área de 15000 m<sup>2</sup> e com cabo pára-raios conectado

Testou-se o protótipo com a frequência de 25 kHz, na malha de uma subestação 138 / 13,8 kV, em solo com resistividade da camada equivalente 341  $\Omega$ .m, espessura da camada equivalente 15,85 m, resistividade da camada inferior 1130  $\Omega$ .m, o que implica num coeficiente de reflexão  $k = + 0,54$ .

Pelo memorial construtivo, a malha de aterramento da subestação é composta de 6490 m de cabo de cobre nu de secção  $70 \text{ mm}^2$  dispostos numa área de  $15000 \text{ m}^2$  (área energizada), com quadrículas de  $4,5\text{m} \times 4,5\text{m}$  (dimensões da malha retangular de  $150 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ ). Complementando a malha em pontos críticos (vértices e equipamentos), existem 44 hastes de aço cobreado de  $3000 \text{ mm} \times 16 \text{ mm}$  e 36 poços com hastes de  $12000 \text{ mm} \times 16 \text{ mm}$ . A subestação é alimentada por um vão de  $50 \text{ m}$  derivando de uma linha de transmissão de  $138 \text{ kV}$ , com cabo pára-raios ligado ao pórtilco da mesma.

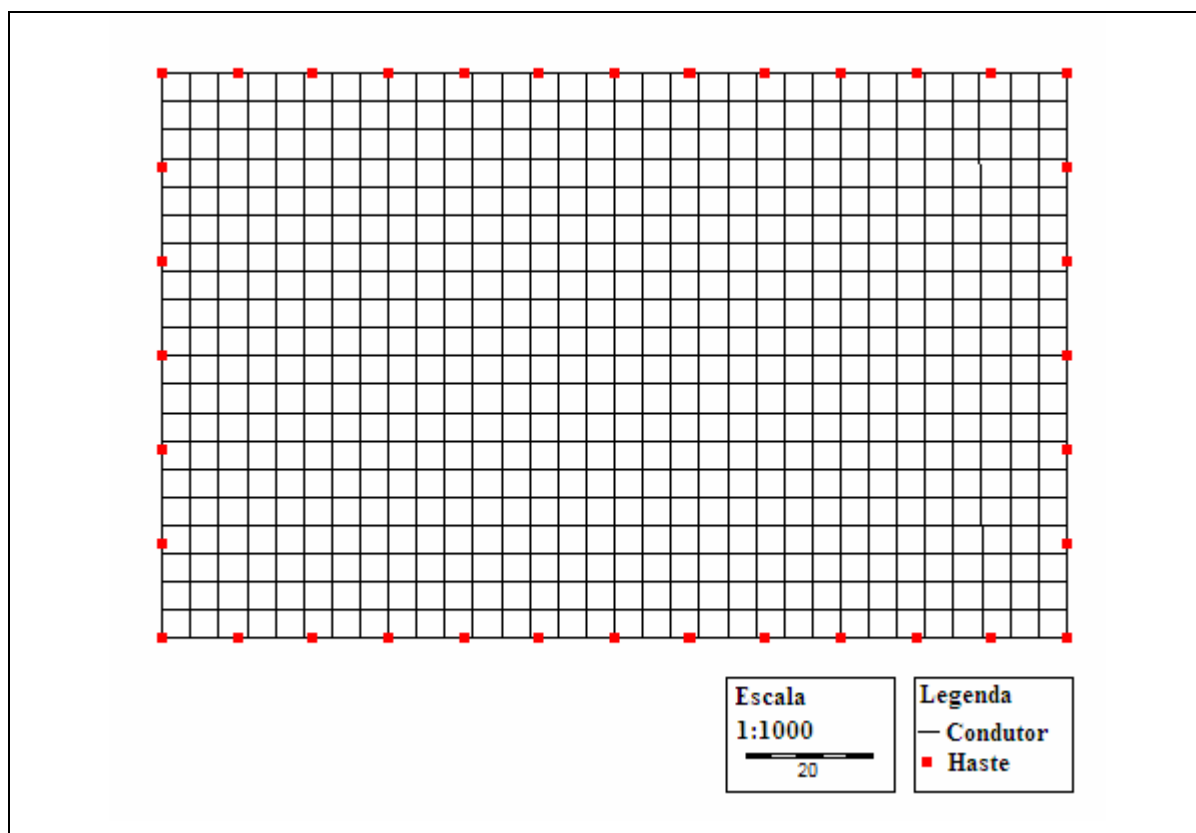


Figura 5.14 – Planta da malha de aterramento caso 7

O processamento em computador forneceu para a malha com condutores superficiais e hastes verticais, uma resistência de aterramento de  **$2,63 \Omega$**  em solo úmido.

Na Tabela 5.8 e no gráfico da Figura 5.15 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  $200 \text{ m}$  do pórtilco de entrada de linha próximo da periferia da malha (ponto de injeção da corrente de teste). Observa-se a

tendência da curva com valores compensados em estabilizar no patamar próximo de **2,60  $\Omega$** .

Tabela 5.8 – Medição de campo caso 7

Ep(m)	Rsc( $\Omega$ )	Rcc( $\Omega$ )	Calculado( $\Omega$ )
-2	2,55	2,25	2,63
-1	2,75	2,35	2,63
0	2,72	2,35	2,63
1	2,85	2,45	2,63
2	3,00	2,60	2,63
3	3,00	2,55	2,63
4	3,20	2,67	2,63
6	3,20	2,72	2,63
8	3,35	2,82	2,63
9	3,35	2,95	2,63
10	3,35	2,95	2,63
15	3,95	3,40	2,63
20	4,30	3,75	2,63
30	4,35	3,80	2,63
40	4,65	3,95	2,63
50	4,95	4,20	2,63
60	5,15	4,35	2,63
70	5,30	4,45	2,63
90	5,60	4,60	2,63
110	5,75	4,60	2,63
130	5,90	5,00	2,63
170	6,30	5,30	2,63

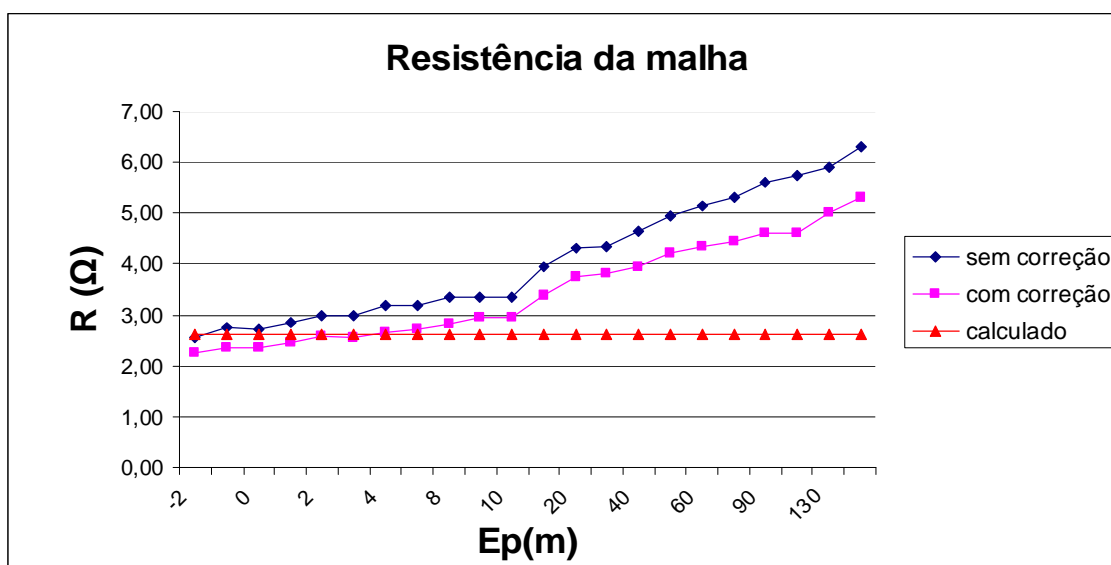


Figura 5.15 – Gráfico medição de campo caso 7

## 5.2. Metodologia DDPprox

A metodologia aqui definida como DDPprox, 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, via, por exemplo, cabo(s) pára-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.
- 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-se :

- a resistência específica da malha de terra (valor sem compensação);
- 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 conseqüentemente 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 seguir, apresenta-se uma análise dos mesmos casos apresentados na metodologia convencional reduzida (item 5.1.), sob a ótica agora, da metodologia DDPprox, para malhas com e sem sistemas externos acoplados à malha em estudo.

#### **5.2.1. CASO 1 – Malha de subestação 138 kV, com área de 2500 m<sup>2</sup> e com cabo pára-raios conectado**

O valor mínimo da curva sem compensação (obtido nas proximidades da malha) tende ao valor da resistência da malha. Na malha do Caso 1 observa-se o valor 5,6  $\Omega$ , bastante próximo do valor esperado para a resistência da malha que é de 5,4  $\Omega$  (diferença de + 3,7%).

O valor mínimo da curva compensada tende ao valor da impedância do sistema. Na malha do Caso 1 obteve-se o valor 1,75  $\Omega$ .

Para comprovar-se a expectativa, efetuou-se a medição da tensão para um ponto remoto (eletrodo situado a 400 m da subestação), obtendo-se 0,30 V para uma corrente de neutro injetada na malha de 0,17 A. A relação entre esses valores fornece 1,76  $\Omega$ , muito próximo, assim, do valor 1,75  $\Omega$ .

Pela metodologia DDPprox bastaria então medir-se o valor da ddp entre malha e um ponto a 1m de sua periferia, referenciar-se à corrente de medição, para obter-se :

- a resistência específica da malha de terra, pela curva sem compensação;
- a impedância do sistema, pela curva com compensação.

#### **5.2.2. CASO 2 – Malha de subestação 34,5 kV, com área de 2900 m<sup>2</sup> e sem cabo pára-raios conectado**

Os valores de resistência de aterramento obtidos da curva sem compensação, para pontos externos, porém próximos da periferia da malha (1m a 4 m conforme Tabela 5.2), aproximam-se dos valores obtidos no patamar da curva com compensação, oscilando entre -4% e +4,7%.

Sem importância direta na determinação do valor da resistência, mas como informação interessante em situações que não se conhece a geometria da malha sob medição, os valores sem compensação medidos dentro da malha giraram entre 60% e 75% do valor do patamar com compensação. Esses percentuais alterarão de

malha para malha, função ainda do tipo de solo e de suas condições (seco, úmido, muito úmido).

**5.2.3. CASO 3 – Malha de subestação 138 kV, com área de 4220 m<sup>2</sup> e com cabo pára-raios conectado à estrutura metálica de entrada e não diretamente à malha de terra**

Neste caso específico, pelo fato de os cabos pára-raios encontrarem-se ligados no topo da estrutura metálica do pórtico de entrada e não diretamente à malha de terra, para efeitos da frequência de 25 kHz é como se a malha não estivesse acoplada a nenhum sistema, o que modifica o comportamento das curvas (compensada e não compensada), tornando-o semelhante ao de malha desacoplada.

Os valores de resistência de aterramento obtidos da curva sem compensação, para pontos externos, porém próximos da periferia da malha (1m a 5 m conforme Tabela 5.3), aproximam-se dos valores obtidos no patamar da curva com compensação, oscilando entre -16,7% e +10,0%, explicando-se o maior percentual pela incerteza no posicionamento do condutor periférico.

**5.2.4. CASO 4 – Malha de subestação 138 kV, com área de 1600 m<sup>2</sup> e sem cabo pára-raios conectado**

Os valores de resistência de aterramento obtidos da curva sem compensação, para pontos externos, porém próximos da periferia da malha (1m a 5 m conforme Tabela 5.4), aproximam-se dos valores obtidos no patamar da curva com compensação, oscilando entre -22,2% e -2,8%, explicando-se o maior percentual pela incerteza no posicionamento do condutor periférico.

**5.2.5. CASO 5 – Malha de subestação 34,5 kV, com área de 500 m<sup>2</sup> e sem cabo pára-raios conectado**

Os valores de resistência de aterramento obtidos da curva sem compensação, para pontos externos, porém próximos da periferia da malha (1m e 2 m conforme Tabela 5.5), aproximam-se dos valores obtidos no patamar da curva com compensação, oscilando entre +1,7% e +18,3%, explicando-se o maior valor

pela heterogeneidade na umidificação provocada na área da malha durante as medições, para se verificar a diferença de comportamento dos valores em solo seco e solo úmido.

**5.2.6. CASO 6 – Malha de subestação 138 kV, com área de 15400 m<sup>2</sup> e com cabo pára-raios da linha de transmissão ligado á malha através de condutor enterrado entre malha e primeira torre**

O valor mínimo da curva sem compensação (obtido nas proximidades da malha), neste caso específico, sofre a ação do condutor de interligação malha – primeira torre, o qual eleva os potenciais nas proximidades da periferia da malha, somando-se aos potenciais gerados pela própria malha, não fornecendo, por consequência a tendência do valor da resistência da malha.

O valor mínimo da curva compensada obtido dentro e nas proximidades da periferia da malha, neste caso específico, também sofre a ação do condutor de interligação malha – primeira torre, o qual eleva os potenciais nas proximidades da periferia da malha, somando-se aos potenciais gerados pela própria malha, não fornecendo, por consequência a tendência do valor da impedância do sistema.

Não foi possível comprovar-se o valor da impedância do sistema, com a injeção de alta corrente, dada a impossibilidade de desconectar-se a linha de transmissão do sistema subestação / usina térmica acoplada.

Particularmente, neste caso, por se tratar de solo extremamente úmido em todo o contorno da malha e se estendendo pela região, obteve-se um patamar muito longo (1 a 20 m) com o valor da resistência da malha, até as proximidades da primeira torre.

**5.2.7. CASO 7 – Malha de subestação 138 kV, com área de 15000 m<sup>2</sup> e com cabo pára-raios conectado**

O valor mínimo da curva sem compensação (obtido nas proximidades da malha) tende ao valor da resistência da malha. Na malha do Caso 7 observa-se o valor 2,72  $\Omega$ , bastante próximo do valor esperado para a resistência da malha que é de 2,63  $\Omega$  (diferença de +3,42%).

O valor mínimo da curva compensada tende ao valor da impedância do sistema. Na malha do Caso 7 obteve-se valores entre 2,25  $\Omega$  e 2,35  $\Omega$ .

Assim como no Caso 1, conclui-se que, pela metodologia DDPprox bastaria então medir-se o valor da ddp entre malha e um ponto a 1m de sua periferia, referenciar-se à corrente de medição, para obter-se :

- a resistência específica da malha de terra, pela curva sem compensação;
- a impedância do sistema, pela curva com compensação.



## 6. ANALISE DOS RESULTADOS DO ESTUDO

### 6.1. Da metodologia adotada

Os objetivos propostos neste estudo, com relação à utilização da metodologia, foram alcançados, tais como:

- Efetuaram-se pesquisas de tecnologias existentes e em publicações científicas oficiais (periódicos, anais de seminários e outros), de equipamentos disponíveis nos níveis nacional e internacional que viessem a fornecer a medição desejada.
- Novos conceitos como a metodologia de diferença de potencial em pontos próximos ao sistema de aterramento – DDPprox, foram introduzidos no âmbito de análise de performance de malha de terra.
- Com a nova técnica, se normalizada, será possível reduzir os custos de avaliação das malhas de terra em instalações de potência, seja pela praticidade do método (redução dos homens hora de medição) como e principalmente por não ser necessário efetuar os desligamentos das instalações para efetuar a medição (eliminação das perdas de faturamento por falta de fornecimento e cumprimento da legislação).

### 6.2. Dos resultados esperados

- **Aplicabilidade em campo:** foram efetuados testes em subestações com os mais variados tipos de arranjos, desde os mais simples e de tensões variadas com submalhas interligadas e a grandes distâncias. Apesar de não previstos, os resultados podem ser considerados satisfatórios, mesmo levando em conta o sério problema relativo ao acoplamento dos circuitos de medição com as instalações.
- **Parâmetro de medição (distâncias de medição):** verificou-se que com a aplicação do método, as distâncias dos eletrodos de corrente e potencial, chegaram a “1,25 vezes” a maior dimensão da malha de

aterramento, contra até “4 vezes” da método em vigor; isso fez e fará com que boa parte das medições que venham a ser executadas no futuro, sejam praticamente dentro da área das subestações, evitando que se extrapole os eventuais “perigos” desse tipo de medição às instalações e pessoas vizinhas.

- **Parâmetro de medição (resistência):** observou-se que é possível o desacoplamento das linhas de transmissão / distribuição presentes nas subestações analisadas, de forma a se obter a resistência específica da malha de terra em paralelo com parcelas diminutas relativas às contribuições das partes resistivas puras das linhas bem como dos circuitos de medição (patamar da curva “resistência x distância eletrodo de potencial” com correção de reativos).
- **Parâmetro de medição (impedância):** com o desacoplamento obtido do efeito das linhas de transmissão / distribuição presentes nas subestações analisadas, detectou-se em campo, que as medições feitas nas proximidades da malha, sem a correção dos reativos, leva a um valor muito próximo da resistência da malha (adicionadas as pequenas resistências dos eletrodos de medição); agora, com a correção dos reativos presentes, levam a um valor de impedância fortemente dependente dos comprimentos dos circuitos auxiliares de medição. A técnica de estimação de estado para a impedância, desenvolvida em [2] e [3], poderá confirmar a tendência da curva com a correção de reativos.
- **Resistência dos eletrodos de corrente e potencial:** as áreas pesquisadas tiveram como resistividade característica de solo, valores elevados, o que faz com que eletrodos enterrados nesse tipo de solo, apresentem elevadas resistências de aterramento; equipamentos como o protótipo, que efetuam medições utilizando-se de retorno pelo solo, sofrem com o problema da sensibilidade de suas medições ao valor destas resistências dos eletrodos auxiliares; uma preocupação constante durante o período de ensaios em campo com o protótipo, foi torná-lo menos sensível a esses altos valores de resistência, seja pelo aumento de

eletrodos formando pequenas malhas, ou mesmo, reduzindo as resistividades locais com a adição de água, procurando sempre que possível manter a relação 100:1; como proposta para os próximos desenvolvimentos, sugere-se um estudo para ampliação dessa relação, tendo sempre em mente o custo x benefício dessas alterações.

- **Acoplamento dos circuitos de medição:** os experimentos de campo mostraram razoável influência do acoplamento entre os circuitos de corrente e potencial, sobre o valor final medido; cuidados à parte, tomados em função de cada medição específica, o resultado foi satisfatório para o escopo deste trabalho, levando em conta a diversidade de situações; não se considera, no entanto, que esse assunto esteja definido, muito pelo contrário, entende-se ser essa, uma área de pesquisa futura, em que se poderá abordar os mais variados tipos de cabos a serem utilizados, as distâncias de separação e seu caminhamento durante o ensaio, função da frequência de medição (diferente das frequências utilizadas), da resistividade do solo e do arranjo e dimensões do sistema.
- **Estimativa no domínio da frequência:** das 03 frequências utilizadas no protótipo, a de 25 kHz mostrou-se extremamente útil, permitindo a avaliação de todas as malhas em que se atuou; o mesmo não se pode dizer dos geradores de mais baixa frequência utilizados (270 Hz e 1,47 kHz), os quais não apresentaram repetibilidade nos ambientes ruidosos testados, o que impediu de ser feito o estudo da resposta no domínio da frequência, como se planejava, a partir dessas 03 frequências; as alterações feitas nesse sentido, no protótipo final, vieram a melhorar os resultados de imunidade, porém carecem de maiores testes em campo.
- **Gerador de corrente:** um questionamento que pode ser feito ao desenvolvimento neste estudo refere-se à dúvida sobre a legitimidade dessa frequência e dos valores que ela tenha propiciado, para a “saúde” da malha em análise; em função disso, se abre para um novo estudo, a possibilidade de se construir um gerador randômico, com alternativas de análises de frequências da ordem de 50 kHz, 100 kHz, 200 kHz, 500 kHz e

1MHz, atendendo às solicitações de transitórios de chaveamentos de equipamentos, bem como de surtos de origem atmosférica.

### **6.3. Do aplicativo de análise do solo**

Os casos de solos analisados no aplicativo Estrat.D.01, utilizado neste estudo, mostraram um bom comportamento em relação à técnica manual de análise das curvas, assim como comparativamente às respostas de softwares reconhecidos no mercado.

Instabilidades nas análises de curvas apresentando trechos de inversões íngremes (ascendentes e/ou descendentes) apesar de também serem detectadas (com maior ou menor frequência) em softwares de uso no mercado, faz com que se proceda a uma depuração do tratamento das medições no aplicativo Estrat.

### **6.4. Do aplicativo de análise e medição do aterramento**

Para as medições efetuadas em campo o aplicativo mostrou-se correto, não apresentando nenhuma falha de importação, sequer incompatibilidade com as leituras importadas.

Com relação à simulação dos aterramentos, o ATERRAD.04 tem como suporte o aplicativo ATERRA, utilizado desde a década de 80 por várias concessionárias de energia em seus aterramentos de sistemas de distribuição e malhas de subestações, confeccionado com base nos parâmetros de cálculo permissíveis adotados pelo IEEE-80 e normas IEC. [24]

O ATERRA é composto de algoritmos que se utilizam de métodos numéricos para o cálculo de aterramentos, envolvendo configurações elementares como hastes verticais, condutores horizontais, condutores em anel e associações destas, de forma a se conhecer e permitir alterar valores de resistência de aterramento e potenciais na superfície do solo. A idéia básica de formulação do ATERRA é exprimir-se cada configuração elementar através das suas coordenadas, num sistema de eixos x, y e z. Com a configuração ou associação delas, presa aos eixos de referência, parte-se para uma subdivisão de cada configuração elementar em pequenos elementos, de tal modo que a corrente seja considerada constante em toda a sua superfície. As análises e os resultados do ATERRA são confinados ao

caso de eletrodo enterrado na camada superior (equivalente) de um solo estratificado em duas camadas. A estratificação do solo é levada em conta através do método das sucessivas imagens. [24]

As adaptações realizadas no ATERRA para este estudo tornaram-no uma ferramenta valiosa na análise dos potenciais de passo, toque e transferência, permitindo uma comparação com os valores medidos em campo e uma rápida formulação de alternativa para melhoria das condições de segurança do sistema de terra ensaiado.

## 7. CONCLUSÃO

É de suma importância o tratamento dos dados coletados, o que influencia diretamente nos resultados. No protótipo utiliza-se a modelagem de solo em duas camadas, que tem se mostrado eficiente para as características das malhas testadas (pequenas a médias dimensões), tal como observado por, com erros inferiores a 3%. [25].

Para casos de mais alta frequência, como a ocorrência de uma descarga atmosférica (1 MHz) ou o chaveamento transitório de um equipamento (200 kHz a 500 kHz), somente os métodos de tensão variável ao longo dos condutores e/ou da teoria de campos, sem considerar o conceito de estrutura eqüipotencial poderiam ser utilizados, residindo aqui, uma limitação do protótipo.

De modo a prever o acoplamento entre condutores da malha e elementos extras em suas proximidades, o método de modelagem do software de cálculo de parâmetros do aterramento através da teoria das imagens, utilizado no protótipo, não é aconselhável, pois não se aplica o conceito de eqüipotencialidade do elemento extra. Essa conclusão atinge basicamente a função de transferência de potenciais do protótipo, caso em que os resultados devam merecer uma melhor análise.

O método de estimação da impedância pelo tratamento das medidas de diferenças de potenciais entre pontos próximos da malha, em substituição à medição direta da queda de potencial em relação ao ponto remoto, apresenta um conceito que necessita de mais ampla confirmação em campo. Primeiramente, porque no protótipo, a estimação é feita, numa fase inicial de experimentos, com fontes discretas. Os resultados desses experimentos indicarão a necessidade ou não da utilização de uma fonte geradora de sinais randômicos aleatórios. Numa ou noutra situação, fica nítido que, se aprovado, o método será de grande utilidade na busca por uma avaliação rápida e segura de malhas de aterramento energizadas.

A definição sobre o posicionamento ideal dos eletrodos de corrente e de potencial, bem como das características finais do hardware destes, independentemente do tipo do solo, requer uma quantidade maior de ensaios, em tipos variados de configurações de malha e sistema; nota-se, no entanto, uma tendência de convergência de posicionamento para distâncias da ordem de 1,25 vezes a maior dimensão da malha, o que se traduz num ganho imediato se

comparado com as dificuldades de medição convencional. O teste da metodologia convencional reduzida do item 5.1 mostra essa tendência.

Ainda para a metodologia convencional reduzida, os casos analisados mostraram um bom comportamento entre os valores esperados para a resistência de aterramento das malhas e os respectivos valores medidos.

Em relação à metodologia DDPprox, os casos analisados, na condição de malhas com cabos pára-raios e/ou cabos de aterramento de outros sistemas interconectados, atestam (com erros da ordem de 3,5 %) que por essa metodologia bastaria 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-se a resistência específica da malha de terra (valor sem compensação) e a impedância do sistema (valor com compensação).

Para malhas desacopladas (isoladas) de outros sistemas de aterramento, os casos analisados na frequência de 25 kHz, atestaram a tendência de os valores sem compensação, das resistências de aterramento, para pontos externos, porém próximos da periferia da malha, aproximar-se dos valores obtidos no patamar da curva com compensação (valor esperado da resistência específica da malha).

Dessa forma, quando não se dispõe das condições ideais para o levantamento completo da curva de variação da resistência em função do posicionamento do eletrodo de potencial, a utilização da metodologia DDPprox pode transformar-se em útil ferramenta operacional na avaliação rápida das condições da malha. A precisão da metodologia nessa condição depende muito do grau de conhecimento da geometria da malha e das condições de solo na periferia da mesma, notadamente grau de umidade e relevo, dada a característica de penetração superficial das correntes de 25 kHz.

Este estudo proporcionou um campo para futuros desenvolvimentos nesta área de aplicação; como por exemplo, uma melhor análise deve ser feita com os valores não compensados.

Novas idéias surgiram e deverão surgir, desde o tipo de detecção de sinal (analógico ou digital), até o tipo de fonte de corrente a ser utilizada (frequências, intensidade da corrente aplicada, nível de imunidade aos ruídos, entre outros).

## 8. REFERÊNCIAS

1. RÉMOND, C. Serviços em instalações elétricas energizadas: requisitos para sua execução. **Eletricidade Moderna**, São Paulo, v.34, n. 383, p. 56-69, 2006.
2. MELIOPOULOS, A.S., et al, A PC based ground impedance measurement instrument, **IEEE trans. on Power Delivery**, v. 8, n. 3, 1993.
3. MELIOPOULOS, A.S., et al, A new method and Instrument for touch and step voltage measurements, **IEEE trans. on Power Delivery**, v. 9, n. 4, 1994.
4. GAMBOA, L.R.A.; SILVA, J.M.; RIBAS, C.E. et al. Medição da resistência de malhas de terra energizadas, em SES 34,5/13,8 kV e obtenção da resistividade de solos de SES, em laboratório. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE PROTEÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 18, 2005, Curitiba. **Anais**, GSE-04.
5. GALVANI, L.V.; MAGUERROSKI D.; BESEN C. et al. Avaliação de malhas de terra em subestações energizadas através de medições seletivas em frequência diferente de 60 Hz. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE PROTEÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 18, 2005, Curitiba. **Anais**, GSE-06.
6. SOTILLE, C.A.; BELTANI, J.M.; NONATO, G.A.C. et al. Protótipo de medição de malha de terra em subestações energizadas, Programa anual de Pesquisa e Desenvolvimento Ciclo 2003/2005, Empresa Energética de Mato Grosso do Sul S.A. e Fundação Paulista de Tecnologia e Educação, Campo Grande, 2005.
7. MORENO, H.; COSTA, P.F. **Aterramento elétrico**. São Paulo: Procobre, 1999. 39 p.



8. LEITE, C.M.; PEREIRA FILHO, M.L. **Técnicas de aterramentos elétricos: cálculos, projetos e softwares para aterramentos elétricos**. 2.ed. São Paulo: Oficina de Mydia, 1996. 215 p.
9. VISACRO FILHO, S. **Aterramentos elétricos: conceitos básicos, técnicas de medição e instrumentação, filosofias de aterramento**. São Paulo: Artliber, 2002. 159 p.
10. MAMEDE FILHO, J. Sistemas de aterramento. In: \_\_, **Instalações elétricas industriais**. 6.ed. Rio de Janeiro: LTC. 2001. p. 497-533.
11. COTRIM, A.A.M.B. Proteção contra choques elétricos. In: \_\_. **Instalações elétricas**. 3.ed. São Paulo: Makron Books, 1992. p. 130-202.
12. MAMEDE FILHO, J. **Proteção de equipamentos eletrônicos sensíveis: aterramento**. São Paulo: Érica, 1997. 317p.
13. TAGG, G. F. Measurement of earth-electrode resistance with particular reference to earth-eletrode systems covering a large area. **Proceedings IEE**, New York, v. 3, n. 12, p. 2118-2130, 1964.
14. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 6533 - Estabelecimento de Segurança aos Efeitos da Corrente Elétrica Percorrendo Corpo Humano - especificação**. Rio de Janeiro: ABNT, 1981.
15. IEC 60479-1 **Effects of current passing through the human body – General Aspects**.
16. DALZIEL, C.S. Electric Shock Hazard, **IEEE – Spectrum**, p. 41– 50, February, 1972.
17. BRASIL. **SEGURANÇA EM INSTALAÇÕES E SERVIÇOS EM ELETRICIDADE – NR 10**. Ministério do Trabalho e Emprego. Portaria nº 3214/78, 2004.

18. TAGG, G.F. **Earth resistances**. New York: Ptiman Pub, 1964. 258p.
19. SUNDE, E.D. **Earth conduction effects in transmission systems**. 2.ed. New York: Book Dover, 1968.
20. CARSON, J.R. **Wave Propagation in Overhed Wires whith Ground Return**, Bell Syst. J., Vol.5 pp. 539-554. 1926.
21. PRESS, W.H. et al. **Numerical recipes in C**. 2.ed. Cambridge Univ. Press, 1992.
22. DAWALIBI, F.P.; BLATTNER, C.J. Earth resistivity measurement interpretation techniques. **IEEE Transactions On PAS**, New York, v. 103, n. 2, 1984.
23. EMPRESA ENERGÉTICA DO MATO GROSSO DO SUL. Aterramento seguro. **Revista P&D**, Brasília. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br>>. Acesso em: 9 fev 2007.
24. SOTILLE, C.A. **Linha de distribuição econômica para área rural: sistema monofilar com retorno pelo solo e emprego do aço como condutor**. 1983. Tese (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1983.
25. DAWALIBI, F.P.; MA, J. Modern computational methods for the design and analysis of power system grounding. **IEEE Transactions On PAS**, New York, p. 122-126, 1998.