

Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

MALHAS DE ATERRAMENTO EM
SUBESTAÇÕES ENERGIZADAS:
MEDIÇÕES E ANÁLISES

Proponente:
André Dantas Dias

Campina Grande, junho de 2011.

Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

**MALHAS DE ATERRAMENTO EM
SUBESTAÇÕES ENERGIZADAS:
MEDIÇÕES E ANÁLISES**

*Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina
Grande em cumprimento às exigências para obtenção do
Grau de Mestre em Engenharia Elétrica.*

Orientador:

Prof. Edson Guedes da Costa, D. Sc.

Campina Grande, junho de 2011.



D541m Dias, Andre Dantas
Malhas de aterramento em subestacoes energizadas :
medicoes e analises / Andre Dantas Dias. - Campina Grande,
2011.
13 f. : il.

Dissertacao (Mestrado em Engenharia Eletrica) -
Universidade Federal de Campina Grande, Centro de
Engenharia Eletrica e Informatica.

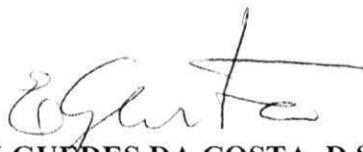
1. Aterramentos Eletricos 2. Malha de Aterramento 3.
Potenciais na Superficie do Solo 4. Subestacoes Energizadas
5. Dissertacao I. Costa, Edson Guedes da, Dr. II.
Universidade Federal de Campina Grande - Campina Grande
(PB) III. Título

CDU 621.316.9(043)

**MALHAS DE ATERRAMENTO EM SUBESTAÇÕES ENERGIZADAS:
MEDIÇÕES E ANÁLISES**

ANDRÉ DANTAS DIAS

Dissertação Aprovada em 22.06.2011



EDSON GUEDES DA COSTA, D.Sc., UFCG
Orientador



BENEMAR ALENCAR DE SOUZA, D.Sc., UFCG
Componente da Banca



DAMÁSIO FERNANDES JÚNIOR, D.Sc., UFCG
Componente da Banca



TARSO VILELA FERREIRA, D.Sc., UFCG
Componente da Banca

CAMPINA GRANDE - PB
JUNHO - 2011

Aos meus familiares, noiva e amigos que sempre
me incentivaram e torceram pelo meu sucesso;
em especial aos meus pais, meus eternos professores.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela minha vida, e por ter me concedido inteligência e perseverança necessárias para a realização deste trabalho.

Ao professor Edson Guedes da Costa, cujos ensinamentos, orientações e incentivo foram de vital importância para a elaboração desta dissertação.

A Gilvan Vieira de Andrade Júnior, pela sua valiosa contribuição e auxílio permanente em todas as etapas da realização deste trabalho.

Aos professores, funcionários, amigos e colegas do Laboratório de Alta Tensão (LAT) que direta ou indiretamente colaboraram para a realização deste trabalho, em especial a Luana de Vasconcelos Gomes e Francisco Paulo Ferreira de Sousa pela valiosa colaboração.

A Energisa Paraíba que viabilizou a realização do Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento que deu suporte ao trabalho desenvolvido, e disponibilizou suas subestações para a realização de medições.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de estudos concedida.

RESUMO

Durante anos, a maioria das técnicas de medição aplicadas a malhas de aterramento só eram possíveis de serem utilizadas em subestações desenergizadas. No entanto, nas últimas décadas, várias técnicas de medição aplicáveis a subestações energizadas têm sido desenvolvidas, cujo objetivo principal é executar medições que propiciem uma rápida avaliação da malha, de forma segura, sem prejudicar a qualidade e o fornecimento de energia. Neste trabalho, foram estudadas malhas de aterramento de seis subestações. Várias técnicas de análise das condições de malha de aterramento foram aplicadas visando à obtenção de diagnósticos mais precisos e confiáveis. Para isso, foram empregadas técnicas conhecidas como: medição de resistividade do solo, medição de potencial de toque e medição de potencial de passo; e técnicas inovadoras como: medição de resistência de aterramento em instalações energizadas e medição de potenciais de superfície, com seus dados tratados e analisados por uma rotina computacional desenvolvida, baseada no Método das Diferenças Finitas (MDF). Os resultados das medições de resistência de malhas de aterramento, utilizando-se o método proposto, foram comparados com os resultados obtidos através do método de medição tradicional (subestação desenergizada), como também, com os obtidos a partir de simulações via software. A partir das comparações de resultados a técnica proposta apresentada foi validada. A rotina computacional desenvolvida foi capaz de calcular e mostrar, em formato gráfico bidimensional e tridimensional, a distribuição dos potenciais na superfície do solo. A análise gráfica dos potenciais de superfície no tempo é capaz de proporcionar o monitoramento e a análise do estado de conservação de malhas de aterramento. O diagnóstico obtido a partir da utilização do conjunto de técnicas de medição mostrou-se efetivo. Recomendam-se medições periódicas (semestrais) das malhas de aterramento a fim de se monitorar e analisar o seu envelhecimento no decorrer do tempo.

Palavras-chave: Aterramentos elétricos, malha de aterramento, potenciais na superfície do solo, subestações energizadas.

ABSTRACT

For many years, most of the measurement techniques applied to grounding grids were only possible to be used in de-energized substations. However, in the recent decades, several measurement techniques applicable to energized substations have been developed, whose main goal is to perform measurements that provide a fast grid evaluation, safely and without harming quality and continuity of power supply. In this work, six substations grounding grids were studied. Several analysis techniques of grounding grid conditions were applied in order to obtain more accurate and reliable diagnosis. For this, were applied known techniques, such as: measurement of ground resistivity, touch voltage and step voltage; and proposed techniques like: measurement of grounding resistance in energized installations and measurement of surface potentials, having their data treated and analyzed by a developed computational routine, based on the Finite Difference Method (FDM). The results of grounding grids resistance measurement, using the proposed method, were compared to results obtained through a traditional measurement method (de-energized substation) as well as those obtained through software simulation. Through the comparison of these results, the proposed technique was validated. The developed computational routine was able to calculate and display, through two-dimensional and three-dimensional graphics, the potentials distribution on the ground surface. The graphic analysis of the surface potentials through time allows monitoring and analysis of grounding grids conservation status. The diagnosis obtained from the set of used measurement techniques proved to be effective. Periodic measurements (semiannual) of grounding grids are recommended, in order to monitor and analyze its aging over time.

Keywords: Electrical grounding, grounding grid, potentials on ground surface, energized substations.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Esquema das quatro hastes usadas no método de <i>Wenner</i> .	07
Figura 2.2	Distribuição de corrente na profundidade a .	09
Figura 2.3	Ilustração de medição de resistividade do solo em seis direções diferentes.	09
Figura 2.4	Solo equivalente com duas camadas.	12
Figura 2.5	Curva de resistividade aparente.	14
Figura 2.6	Ilustração da distribuição de potencial no interior e no entorno de uma malha de aterramento retangular simples, em um solo homogêneo.	15
Figura 2.7	Ilustração da variação de potencial em relação à dimensão da malha básica.	16
Figura 2.8	Esquema do potencial de toque.	17
Figura 2.9	Potencial de passo devido à ocorrência de uma descarga elétrica diretamente no solo.	18
Figura 2.10	Esquema do potencial de passo.	19
Figura 2.11	Esquema para a medição da resistência de terra em instalações desenergizadas.	21
Figura 2.12	Curva característica da resistência de aterramento.	22
Figura 2.13	Metodologia DDPprox aplicadas a malhas de aterramento com configuração conhecida.	30
Figura 2.14	Metodologia DDPprox aplicada a malhas de aterramento com configuração desconhecida.	31
Figura 2.15	Discretização do domínio.	36
Figura 3.1	Terrômetro digital, modelo 6472 da AEMC Instruments [®] .	41
Figura 3.2	Esquema de medição de resistividade do solo utilizando-se o terrômetro digital.	42
Figura 3.3	Massas metálicas utilizadas nas medições de potencial de toque.	44
Figura 3.4	Esquema da medição de potencial de toque.	45
Figura 3.5	Esquema de medição de potencial de passo.	47
Figura 3.6	Esquema de medição de resistência de terra em instalações desenergizadas utilizando-se o terrômetro digital.	48
Figura 3.7	Pinça amperimétrica da AEMC Instruments [®] utilizada nas medições de resistência de malha de aterramento em instalações energizadas.	50

Figura 3.8	Esquema de medição de resistência de terra em instalações energizadas com uso do terrômetro digital e da pinça amperimétrica.	51
Figura 3.9	Fotografia do medidor de potenciais de superfície.	53
Figura 3.10	Diagrama de blocos funcionais do sistema.	53
Figura 3.11	Esquema de medição de potencial de superfície.	54
Figura 3.12	Pontos escolhidos para a medição de potencial de superfície.	56
Figura 3.13	Localização da malha no terreno amplo.	59
Figura 4.1	Esquema da disposição dos pontos de medição de resistividade do solo na SE Aroeiras.	63
Figura 4.2	Resultado da estratificação do solo fornecida pelo software TecAt Plus 5.2 [®] .	64
Figura 4.3	Esquema de medição de resistência de malha de terra na SE Aroeiras desenergizada.	65
Figura 4.4	Curva de resistência de terra versus distância para medições na SE Aroeiras desenergizada.	66
Figura 4.5	Curva de resistência de terra versus distância obtida através de uma simulação pelo software TecAt Plus 5.2 [®] .	67
Figura 4.6	Esquema de medição de resistência de malha de terra na SE Aroeiras energizada.	68
Figura 4.7	Esquema de medição de resistência de malha de terra na SE Patos.	70
Figura 4.8	Esquema de medição de resistência de malha de terra na SE Jatobá.	72
Figura 4.9	Esquema de medição de resistência de malha de terra na SE São Gonçalo.	73
Figura 4.10	Esquema da disposição dos pontos de medição de resistividade do solo na SE Mataraca.	75
Figura 4.11	Resultado da estratificação do solo fornecida pelo software TecAt Plus 5.2 [®] .	76
Figura 4.12	Esquema de medição do potencial de toque na carcaça do transformador.	77
Figura 4.13	Esquemas de medição do potencial de passo na SE Mataraca.	79
Figura 4.14	Esquema de medição de resistência de malha de terra na SE Mataraca.	81
Figura 4.15	Esquema da disposição dos pontos de medição de resistividade do solo na SE Alto Branco.	84
Figura 4.16	Resultado da estratificação do solo fornecida pelo software TecAt Plus 5.2 [®] .	85

Figura 4.17	Esquema de medição do potencial de toque na carcaça do transformador.	86
Figura 4.18	Esquemas de medição do potencial de passo na SE Alto Branco.	88
Figura 4.19	Esquema de medição de resistência de malha de terra na SE Alto Branco.	91
Figura 4.20	Medição de potencial de superfície na SE Alto Branco (Primeira Campanha de Medição).	93
Figura 4.21	Medição de potencial de superfície na SE Alto Branco (Segunda Campanha de Medição).	94
Figura 4.22	Mapeamento dos níveis de potencial superficial em regime permanente (Primeira campanha de medição).	98
Figura 4.23	Mapeamento dos níveis de potencial superficial na ocorrência de um curto-circuito (Primeira campanha de medição).	99
Figura 4.24	Mapeamento dos níveis de potencial superficial em regime permanente (Segunda campanha de medição).	101
Figura 4.25	Mapeamento dos níveis de potencial superficial na ocorrência de um curto-circuito (Segunda campanha de medição).	102
Figura 4.26	Variação dos potenciais de passo com a sazonalidade climática.	105

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Variação da resistividade em função do tipo de solo.	07
Tabela 2.2	Evolução dos métodos de medição de resistência de malha em instalações energizadas.	34
Tabela 2.3	Algumas pesquisas voltadas a malhas de aterramento elétrico nos últimos anos.	39
Tabela 4.1	Valores de resistividade do solo obtidos na SE Aroeiras.	63
Tabela 4.2	Medição da resistência da malha de terra com SE Aroeiras desenergizada.	66
Tabela 4.3	Valores de resistência de aterramento medidos com a subestação energizada.	69
Tabela 4.4	Resistência de malha de terra através da conexão das chaves.	71
Tabela 4.5	Resistência da malha de terra através da conexão das chaves.	72
Tabela 4.6	Resistência da malha de terra através da conexão de equipamentos.	74
Tabela 4.7	Resistência da malha de terra medida através das caixas de inspeção de malha.	74
Tabela 4.8	Valores de resistividade do solo obtidos na SE Mataraca.	75
Tabela 4.9	Limites de potenciais de segurança na ocorrência de curto-circuito (Potencial de Toque).	77
Tabela 4.10	Potenciais de toque no transformador da subestação.	77
Tabela 4.11	Potenciais de toque no transformador da subestação no momento de curto-circuito.	78
Tabela 4.12	Limites de potenciais de segurança na ocorrência de curto-circuito (Potencial de Passo).	78
Tabela 4.13	Potenciais de passo medidos na SE Mataraca.	80
Tabela 4.14	Potenciais de passo na SE Mataraca no momento de curto-circuito.	80
Tabela 4.15	Resistência da malha de terra medida em vários pontos.	82
Tabela 4.16	Valores de resistividade do solo obtidos pela concessionária na SE Alto Branco.	85
Tabela 4.17	Limites de potenciais de segurança na ocorrência de curto-circuito (Potencial de Toque).	86
Tabela 4.18	Potenciais de toque no transformador da subestação.	87
Tabela 4.19	Potenciais de toque no transformador da subestação no momento de curto-circuito.	87

Tabela 4.20	Limites de potenciais de segurança na ocorrência de curto-circuito (Potencial de Passo).	88
Tabela 4.21	Potenciais de passo medidos na SE Alto Branco.	89
Tabela 4.22	Potenciais de passo na SE Alto Branco no momento de um curto-circuito.	89
Tabela 4.23	Resistência da malha de terra medida em vários pontos.	91
Tabela 4.24	Medição de potencial de superfície na SE Alto Branco (Primeira Campanha de Medição).	93
Tabela 4.25	Medição de potencial de superfície na SE Alto Branco (Segunda Campanha de Medição).	95
Tabela 4.26	Coordenadas e potenciais de passo superiores a 1,0 kV.	100
Tabela 4.27	Coordenadas e potenciais de passo superiores a 1,8 kV.	103

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

LAT	Laboratório de Alta Tensão
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
UFMG	Universidade Federal de Campina Grande
PaqTc-PB	Fundação Parque Tecnológico da Paraíba
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
MDF	Método das Diferenças Finitas
FDM	Finite Difference Method
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
NBR	Norma Brasileira
NR	Norma Regulamentadora
MQP	Método da Queda de Potencial
NEC	National Electrical Code
EPI	Equipamentos de Proteção Individual
SGM	Smart Ground Multimeter
MCR	Metodologia Convencional Reduzida
DDPprox	Metodologia de Diferenças de Potencial em Pontos Próximos ao Sistema de Aterramento
EDP	Equações Diferenciais Parciais
FDTD	Finite Difference Time Domain
MRT	Monofásico com Retorno pela Terra

LISTA DE SÍMBOLOS

h	Profundidade das hastes
a	Espaçamento entre as hastes
π	Constante matemática, pi
ρ	Resistividade elétrica
ρ_a	Resistividade aparente
N	Fator multiplicativo obtido através das curvas de Endrenyi
α	Coefficiente de penetração
r	Raio do anel equivalente do sistema de aterramento considerado
S	Área abrigada pelo aterramento
D	Maior diagonal da malha de aterramento
β	Coefficiente de divergência
k	Constante relacionada à energia de choque elétrico
t	Tempo em segundos da duração do choque elétrico
ρ_s	Resistividade superficial do solo (brita)
C_s	Fator de correção
h_s	Espessura da camada superficial do solo (brita)
∇	Operador Nabla
\vec{D}	Vetor densidade de fluxo elétrico
ϵ	Permissividade elétrica do meio
\vec{E}	Vetor intensidade do campo elétrico
ρ_v	Densidade volumétrica de carga
∂	Operador diferencial
i	Incremento espacial na direção x
j	Incremento espacial na direção y
Δx	Comprimento infinitesimal na direção x
Δy	Comprimento infinitesimal na direção y
φ	Comprimento infinitesimal nas direções x e y
XL	Limite do terreno amplo no eixo x
YL	Limite do terreno amplo no eixo y

X_m	Dimensão da malha de aterramento no eixo x
Y_m	Dimensão da malha de aterramento no eixo y
d_{ref}	Distâncias entre as bordas da malha de aterramento e os limites do terreno amplo

SUMÁRIO

Capítulo 1 – INTRODUÇÃO	1
1.1. Considerações Iniciais	1
1.2. Objetivo da Dissertação	3
1.3. Estrutura da Dissertação	4
Capítulo 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1. Medição de Resistividade do Solo – Conceitos Básicos	5
2.1.1. Fatores que Influenciam a Resistividade do Solo	6
2.1.2. O Método de Wenner	7
2.1.3. Resistividade Aparente do Solo	11
2.2. Potenciais de Segurança	15
2.2.1. Potencial de Toque	16
2.2.2. Potencial de Passo	18
2.2.3. Correção dos Potenciais de Toque e de Passo Máximos Admissíveis.....	20
2.3. Medição de Resistência de Terra em Instalações Desenergizadas	21
2.3.1. Recomendações Técnicas nas Medições.....	23
2.3.2. Recomendações de Segurança nas Medições.....	24
2.4. Medições de Resistência de Terra em Instalações Energizadas	25
2.4.1. Método de Queda de Potencial	26
2.4.2. Método de Injeção de Corrente de Baixa Frequência	27
2.4.3. Método de Injeção de Corrente de Altas Frequências	27
2.4.4. Método de Medição Simultânea de Correntes do Sistema	32
2.5. Método das Diferenças Finitas	34
Capítulo 3 – MATERIAL E MÉTODOS	40
3.1. Medição de Resistividade do Solo.....	40
3.1.1. Material Utilizado	40
3.1.2. Método de Medição	42
3.2. Medição de Potencial de Toque	43
3.2.1. Material Utilizado	43
3.2.2. Método de Medição	44

3.3.	Medição de Potencial de Passo	46
3.3.1.	Material Utilizado	46
3.3.2.	Método de Medição	46
3.4.	Medição de Resistência de Terra em Instalações Desenergizadas	47
3.4.1.	Material Utilizado	47
3.4.2.	Método de Medição	48
3.5.	Medição de Resistência de Terra em Instalações Energizadas	49
3.5.1.	Material Utilizado	49
3.5.2.	Método de Medição	50
3.6.	Medição de Potencial de Superfície.....	52
3.6.1.	Material Utilizado	52
3.6.2.	Método de Medição	54
3.7.	Rotina Computacional para Diagnóstico de Potenciais de Superfície.....	56
3.7.1.	Preenchimento dos Dados de Entrada da Rotina	58
 Capítulo 4 – RESULTADOS E ANÁLISE		62
4.1.	Caso 1 – SE Aroeiras	62
4.1.1.	Medição de Resistividade do Solo	62
4.1.2.	Medição de Resistência de Terra em Instalações Desenergizadas	64
4.1.3.	Medição de Resistência de Terra em Instalações Energizadas	68
4.2.	Caso 2 – SE Patos	69
4.2.1.	Medição de Resistência de Terra em Instalações Energizadas	70
4.3.	Caso 3 – SE Jatobá	71
4.3.1.	Medição de Resistência de Terra em Instalações Energizadas	71
4.4.	Caso 4 – SE São Gonçalo	73
4.4.1.	Medição de Resistência de Terra em Instalações Energizadas	73
4.5.	Caso 5 – SE Mataraca	74
4.5.1.	Medição de Resistividade do Solo	74
4.5.2.	Medição de Potencial de Toque	76
4.5.3.	Medição de Potencial de Passo	78
4.5.4.	Medição de Resistência de Terra em Instalações Energizadas	81
4.6.	Caso 6 – SE Alto Branco	83
4.6.1.	Medição de Resistividade do Solo	84
4.6.2.	Medição de Potencial de Toque	85
4.6.3.	Medição de Potencial de Passo	87
4.6.4.	Medição de Resistência de Terra em Instalações Energizadas	90

4.6.5. Medição de Potencial de Superfície	92
4.6.6. Tratamento e Análise dos Dados Via Rotina Computacional	96
Capítulo 5 – CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	106
5.1. Conclusões	106
5.2. Sugestões de Trabalhos Futuros	107
5.3. Trabalho Publicado	108
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	109

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

1.1. Considerações Iniciais

Um sistema de aterramento elétrico, ou, simplesmente, aterramento, consiste em uma ligação elétrica proposital de um sistema físico (elétrico, eletrônico ou corpos metálicos) ao solo. O aterramento elétrico é constituído basicamente de três componentes: eletrodos de aterramento, conexões elétricas que ligam um ponto do sistema aos eletrodos, e a terra que envolve os eletrodos (VISACRO FILHO, 2002).

Os eletrodos de aterramento, basicamente, são constituídos de qualquer corpo metálico enterrado no solo, como por exemplo, barras de material em cobre ou aço revestido por cobre, cantoneiras de ferro galvanizado, sistemas hidráulicos ou malhas de condutores de cobre em reticulados. 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 apresentam menor resistividade (MAMEDE FILHO, 2001).

Os sistemas de aterramento desempenham um papel importante na proteção dos sistemas de potência. O principal objetivo deles é assegurar a segurança pessoal, prevenir danos a equipamentos instalados, permitir a operação automática, rápida e segura do sistema de proteção, estabelecer um ponto de tensão de referência para todo o sistema elétrico interligado, como também fornecer um caminho de baixa impedância para correntes oriundas de descargas atmosféricas, de curtos-circuitos e de cargas estáticas acumuladas nas carcaças dos equipamentos, além das correntes elétricas decorrentes do desbalanço de cargas alimentadas pela fonte de tensão (MORENO et al., 1999).

Aterramentos exercem uma variedade de funções nos sistemas elétricos podendo assumir configurações diversificadas dependendo da sua aplicação. Contudo, as aplicações estão sempre associadas a dois fatores fundamentais: desempenho do sistema ao qual o aterramento está conectado, e questões de segurança (de seres vivos) e proteção de equipamentos (VISACRO FILHO, 2002; BELTANI 2007). Por estes motivos, algumas normas técnicas, tais como a NBR 14039 e a NR 10 (2004), exigem que toda instalação elétrica tenha um aterramento.

Para grandes instalações, como as subestações, os sistemas de aterramento merecem um cuidado especial, o qual deve ser traduzido na elaboração de projetos específicos, com base em dados disponíveis e parâmetros pré-fixados, sendo importante considerar todas as possíveis condições em que o sistema possa ser submetido.

Entretanto, por mais que a elaboração do projeto obedeça a padrões normatizados, há sempre alguns fatores que influenciam no desempenho do sistema de aterramento. Muitas vezes, na montagem das instalações, o mau contato entre eletrodos acarreta no aumento da resistência, dificultando assim o escoamento das correntes. Outro fator relacionado ao mau desempenho de um sistema de aterramento é o processo de corrosão das hastes e dos cabos, devido à ação química do solo, chegando a níveis avançados que podem ocasionar a inviabilidade do sistema de aterramento. Em ambos os fatores, os potenciais da malha de aterramento e das localidades próximas a ela podem atingir valores fora dos padrões estabelecidos por norma, causando situações de risco tanto ao sistema elétrico quanto a pessoas. Dessa maneira, torna-se imprescindível analisar o comportamento das malhas de aterramento em subestações ao longo do tempo, a fim de detectar possíveis falhas ou alterações e, conseqüentemente, aplicar técnicas que possam mitigá-las ou solucioná-las.

Muitas das técnicas aplicadas a estudos de aterramentos elétricos, embora sejam relativamente antigas, apresentam resultados extremamente satisfatórios como, por exemplo, o Método de Medição de Resistência da Malha de Terra descrito em IEEE-81.2 (1991) e IEEE-80 (2000) e o Método de Medição de Resistividade do Solo descrito em IEEE-81 (1983) e na NBR 7117, entre outros. Entretanto, a maioria dos métodos desenvolvidos e aplicados a estudos de sistemas de aterramento só podem ser executados em instalações desenergizadas, por motivos de segurança, conforme recomendado na NR 10 (2004).

Contudo, devido às várias restrições impostas, pelo órgão regulador/fiscalizador, ao desligamento de uma subestação, muitas têm sido as pesquisas voltadas ao desenvolvimento de métodos de medição em instalações energizadas. O objetivo principal destes novos métodos é executar medições que propiciem uma avaliação rápida da malha de aterramento, sem prejudicar a qualidade e o fornecimento de energia.

Neste contexto, um projeto de pesquisa foi desenvolvido com o objetivo desenvolver uma técnica de monitoramento e análise das condições operacionais de

malhas de aterramento, a partir da utilização de um software de análise. Esta dissertação é um dos frutos do Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento Energisa Paraíba – UFCG/PaqTc-PB, Código ANEEL 0377-001/2007.

Além da dissertação de mestrado, o Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento teve como produtos: uma técnica de medição de potenciais de superfície desenvolvida; um equipamento de medição de potenciais de superfície desenvolvido; um software de análise da distribuição dos potenciais de superfície medidos em campo; a produção e publicação de artigos científicos; a participação em congressos e/ou simpósios; a capacitação da equipe envolvida para a realização de novos projetos de pesquisa, como também para a realização de consultorias referentes ao tema abordado no projeto.

Como pode ser visto, esta dissertação de mestrado foi desenvolvida a partir de um trabalho de pesquisa maior. Embora o autor tenha participado direta ou indiretamente de todas as atividades realizadas durante a pesquisa, apenas parte dessas atividades foram selecionadas como objetivo para a elaboração deste trabalho de dissertação.

1.2. Objetivo da Dissertação

O trabalho aqui proposto tem como objetivo estabelecer algumas técnicas de medição que possam ser utilizadas em conjunto no monitoramento e análise do estado de conservação de malhas de aterramento em subestações energizadas. Para isso, serão utilizadas técnicas conhecidas e outras propostas, a fim de que se obtenha uma análise mais completa possível do estado de conservação da malha e, conseqüentemente, possa-se evidenciar as condições operacionais atuais da malha de terra.

Um método de medição de resistência de aterramento em instalações energizadas será apresentado e os resultados de suas medições serão comparados com os resultados obtidos através do método tradicional de medição de resistência de aterramento em instalações desenergizadas, como também, através de simulações via software, na tentativa de validá-lo.

Além da metodologia de medição a ser validada, será apresentada uma técnica de medição de potenciais de superfície desenvolvida, a qual terá seus dados tratados e analisados através de uma rotina computacional desenvolvida, baseada no Método das Diferenças Finitas (MDF). A rotina será capaz de mapear a distribuição dos potenciais na superfície do solo, tanto para condições de regime permanente, como também fazer

uma estimativa quando da ocorrência de um curto-circuito, evidenciando possíveis regiões críticas no terreno em que a subestação está instalada. Uma vez localizadas as regiões críticas, faz-se necessária a realização de medições mais apuradas no local, utilizando-se de técnicas de medição consolidadas, a fim de se obter um diagnóstico mais exato a respeito do possível problema.

1.3. Estrutura da Dissertação

Esta dissertação está dividida em cinco capítulos.

No Capítulo 2 realiza-se a revisão bibliográfica acerca dos vários temas abordados no trabalho.

No Capítulo 3 são apresentados os materiais e métodos utilizados na realização de medições essenciais ao escopo do trabalho.

No Capítulo 4 são expostos e analisados os resultados obtidos a partir das medições realizadas.

No Capítulo 5 tem-se a apresentação das principais conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O aterramento elétrico é parte fundamental para o bom funcionamento do sistema elétrico. O acompanhamento contínuo do comportamento da malha de terra, como também do seu estado de envelhecimento ou degradação no decorrer do tempo é essencial para a funcionalidade, proteção e segurança do sistema elétrico e das pessoas.

Para os grandes sistemas elétricos, a maior atenção está voltada às malhas de aterramento, as quais se encontram enterradas a uma determinada profundidade e por esse motivo, não é possível saber com precisão o verdadeiro estado de conservação da malha, como também saber se ela está desempenhando suas funções da forma desejada. Com base nisso, muitas têm sido as pesquisas realizadas para se analisar o estado de conservação das malhas de aterramento ao longo do tempo, em que se podem citar as técnicas de medição de resistência de aterramento em subestações energizadas como as abordadas na norma NBR 15749, em MELIOPOULOS et al. (1993) e MELIOPOULOS et al. (1994), em GALVANI et al. (2005), em GAMBOA et al. (2005) e em BELTANI (2007). O desenvolvimento de mecanismos que venham a diminuir a resistência da malha de aterramento e/ou a resistividade do solo ao seu redor são abordados em MENG et al. (1999), em ZENG et al. (2002), em DE SOUZA et al. (2007), SILVA et al. (2009), em BEZERRA et al. (2010).

Alguns métodos de medição fundamentais ao entendimento do trabalho proposto serão apresentados. Dentre os métodos estão: método de medição de resistividade do solo, métodos de medição de potenciais de toque e de passo, métodos de medição de resistência de terra aplicados a malhas de subestação, como também, o método das diferenças finitas que é usado extensamente em aplicações práticas para determinar a distribuição de potencial em uma determinada região, desde que se conheçam os valores dos potenciais em alguns pontos dessa região (condições de contorno).

2.1. Medição de Resistividade do Solo – Conceitos Básicos

Na escolha de um terreno para a implantação de um aterramento de subestação, devem-se considerar alguns fatores como: o centro geométrico das cargas, disponibilização de terreno acessível economicamente, como também o terreno ser

seguro a inundações. Uma vez definido o local das instalações do sistema de aterramento, devem-se efetuar medições no intuito de se obter as informações necessárias à elaboração do projeto (KINDERMANN et al., 2002).

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 (MAMEDE FILHO, 2001).

2.1.1. Fatores que Influenciam a Resistividade do Solo

Vários fatores influenciam na resistividade do solo, que quando combinados resultam em solos com características diferentes, e conseqüentemente com resistividades diferentes. Assim, solos aparentemente iguais podem apresentar resistividades distintas. Conforme mencionados em CAVALCANTI (1991), vários são os fatores que influenciam a resistividade do solo, dentre os quais se pode citar:

- Tipo de solo;
- Combinação de diversos tipos de solo;
- Estrutura geológica – solos constituídos por camadas estratificadas com profundidades e materiais diferentes;
- Umidade do solo;
- Temperatura;
- Compactação do solo;
- Concentração e tipos de sais dissolvidos na água retida no solo;
- Sazonalidade.

Embora a resistividade do solo sofra influência de vários fatores, é possível caracterizar faixas de valores característicos para diferentes tipos de solo, nas suas condições usuais de umidade, conforme apresentado na Tabela 2.1.

A determinação da resistividade através do estudo da estratificação do solo tem grande importância neste trabalho, visto que, em sua grande maioria, os solos não são homogêneos, e sim formados por diversas camadas de resistividades e espessuras diferentes. Geralmente as camadas são aproximadamente horizontais e paralelas a superfície do solo.

Tabela 2.1 – Variação da resistividade em função do tipo de solo (CAVALCANTI, 1991).

Tipo de solo	Resistividade ($\Omega.m$)
Lama	5 a 100
Húmus	10 a 150
Limo	20 a 100
Argila com 40% de umidade	80
Argila com 20% de umidade	330
Argila seca	1.500 a 5.000
Terra de jardim com 50% de umidade	140
Terra de jardim com 20% de umidade	480
Calcário fissurado	500 a 1.000
Calcário compacto	1.000 a 5.000
Granito	1.500 a 10.000
Areia com 90% de umidade	1300
Areia comum	3.000 a 8.000
Basalto	10.000 a 20.000

O levantamento dos valores da resistividade do solo é feito através de medições em campo, utilizando-se métodos de prospecção geométricos, dentre os quais, o mais utilizado é o *Método de Wenner*.

2.1.2. O Método de Wenner

Este método foi criado pelo físico norte-americano *Frank Wenner*, em 1915, e consiste em cravar quatro hastas cilíndricas no solo a uma mesma altura h , igualmente espaçadas por uma distância a e dispostas em linha, no intuito de se obter a resistividade das diversas camadas que compõem o solo (WENNER, 1915 apud NASCIMENTO, et al., 2004, p. 385). Na Figura 2.1 é mostrado um esquema da disposição das hastes usadas no método de *Wenner*.

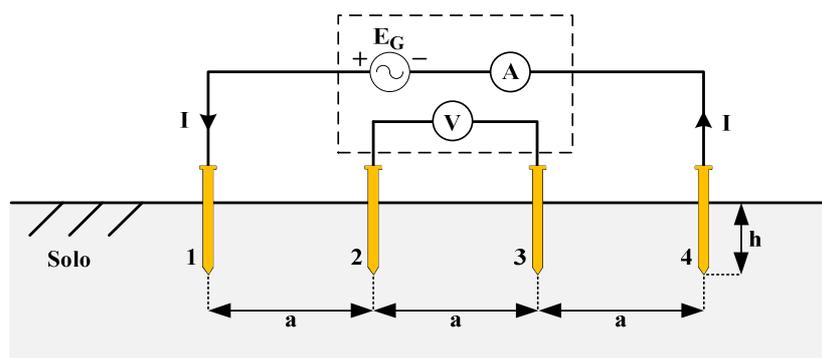


Figura 2.1 – Esquema das quatro hastes usadas no método de *Wenner*.

Através de uma fonte de corrente, injeta-se uma corrente elétrica I na Haste 1, e essa retorna pela Haste 4. A corrente elétrica, passando pelo solo, produz uma diferença de potencial entre os pontos 2 e 3 a qual pode ser facilmente medida com o auxílio de

um voltímetro. Conhecendo-se os valores da corrente injetada e da diferença de potencial entre as Hastes **2** e **3**, calcula-se o valor da resistência elétrica do solo, **R**. Com o valor de **R** estabelecido, calcula-se a resistividade elétrica do solo a partir da Equação 2.1. Para tanto, recomenda-se que o diâmetro da haste seja menor ou igual a $10^{-2}a$.

$$\rho = \frac{4\pi \cdot a \cdot R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4h^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + h^2}}} \quad [\Omega.m]. \quad (2.1)$$

Para um afastamento entre as hastes relativamente grande, isto é, $a > 20h$, a Equação 2.1 reduz-se a Equação 2.2, a qual fornece, aproximadamente, a resistividade média do solo para uma profundidade semelhante ao espaçamento **a** (IEEE-81, 1983).

$$\rho = 2\pi \cdot a \cdot R \quad [\Omega.m]. \quad (2.2)$$

Devido às características anisotrópicas e heterogêneas do solo, para se obter a resistividade do solo em determinada região é necessário efetuar-se vários grupos de medições sucessivas (com espaçamentos **a** diferentes), cobrindo toda a área de interesse. Dessa forma, serão obtidos valores de resistividade distintos para cada valor de **a** utilizado. A norma NBR 7117 recomenda a utilização de espaçamentos de 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64 metros, e assim por diante, a depender das dimensões do terreno, com a preocupação de manter as hastes sempre alinhadas.

Segundo KINDERMANN et al. (2002), o método de *Wenner* considera que praticamente 58% da distribuição de corrente que passa entre as Hastes **1** e **4** ocorre a uma profundidade igual ao espaçamento entre as hastes, conforme está ilustrado na Figura 2.2. A corrente elétrica injetada atinge uma profundidade maior do que **a**, entretanto, com uma área de dispersão grande, a qual causa um efeito que pode ser desconsiderado. Dessa forma, considera-se que a resistividade elétrica do solo obtida corresponde a uma profundidade **a** no solo.

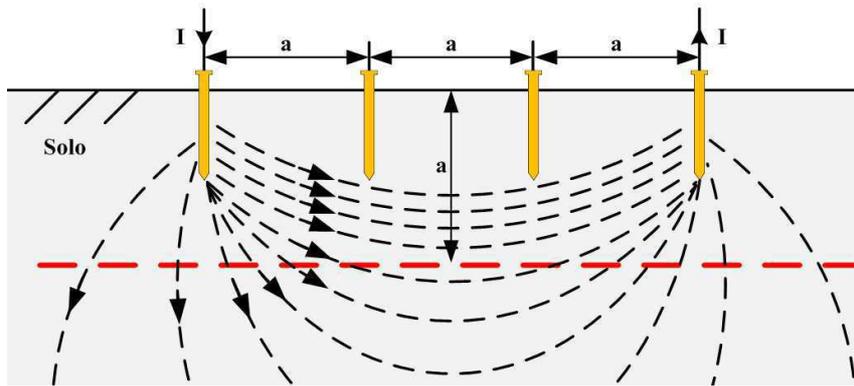


Figura 2.2 – Distribuição de corrente na profundidade a .

O número de direções em que as medições deverão ser realizadas depende da importância do local do aterramento, da dimensão do sistema de aterramento, como também da variação acentuada nos valores medidos para os respectivos espaçamentos (SOUZA JÚNIOR, 2007). Em VISACRO FILHO (2002) é recomendado que sejam feitas no mínimo seis medições sucessivas para o caso de áreas retangulares, conforme ilustrado na Figura 2.3.

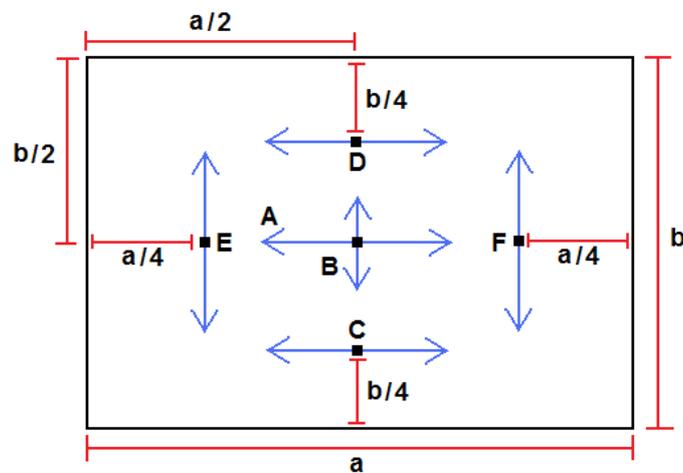


Figura 2.3 – Ilustração de medição de resistividade do solo em seis direções diferentes.

Com os valores de resistividade calculados e os respectivos espaçamentos utilizados nas medições, é possível traçar a curva da resistividade elétrica do solo em função do espaçamento entre as hastes, a qual apresentará um comportamento diferente para tipos de solos diferentes.

Uma vez traçada a curva da resistividade elétrica do solo é possível realizar a sua modelagem, estratificando-o em camadas horizontais. A estratificação do solo pode ser feita a partir de várias metodologias que se utilizam de conjuntos de curvas

auxiliares para a determinação da estratificação do solo. O que se procura com estas metodologias é a identificação de uma configuração de solo que gere os mesmos resultados que aqueles obtidos na medição. Existem várias técnicas de modelagem do solo, dentre as quais se destacam o Método de Estratificação de Duas Camadas, Método de *Pirson* e o Método Gráfico. O estudo de tais técnicas não faz parte do objetivo principal do trabalho proposto. Maiores detalhes a respeito de técnicas de modelagem do solo podem ser encontrados em TAGG (1964), CAVALCANTI (1991), KINDERMANN et al., (2002) e CALIXTO et al., (2010).

Outra maneira de se realizar a estratificação do solo em camadas horizontais é por meio de softwares existentes no mercado. Os softwares se utilizam dos valores de resistividade obtidos na medição em campo e automaticamente calculam e modelam o solo em camadas horizontais, com suas respectivas resistividades e espessuras.

Para o caso de altas resistividades, detectadas a partir dos dados medidos, é possível realizar o tratamento químico do solo visando à diminuição da resistividade e, conseqüentemente a diminuição da resistência de aterramento. O tratamento químico do solo deve ser empregado somente quando o local destinado a instalação do sistema de aterramento apresentar alta resistividade e não houver a possibilidade de mudança de local, como também no caso de sistemas de aterramento já existentes que possuam uma resistência elétrica acima da desejada, e que não possam ser alterados por algum motivo. Segundo CAPELLI (2000) e KINDERMANN et al. (2002), os materiais a serem utilizados para um bom tratamento químico do solo devem ter as seguintes características:

- Baixa resistividade elétrica;
- Propriedade higroscópica – reter umidade;
- Ter pH alcalino – não ser corrosivo;
- Quimicamente estável no solo;
- Não deve ser solúvel em água;
- Não ser tóxico.

Os produtos mais usados nos diversos tipos de tratamento do solo são a Bentonita, o Gel e o Earthron (KINDERMANN et al., 2002). Após a execução do tratamento químico do solo, deve-se fazer um acompanhamento com medições periódicas para analisar o efeito e a estabilidade do tratamento.

2.1.3. Resistividade Aparente do Solo

A resistividade aparente ρ_a é o valor de uma resistividade equivalente das diversas camadas, de diferentes resistividades e espessuras, que compõem um solo não homogêneo, i.e., trata-se da resistividade relativa a um solo heterogêneo, vista por um sistema de aterramento como sendo a resistividade de um solo homogêneo que produza o mesmo efeito (FRAGA, 2008).

A resistência elétrica de um sistema de aterramento depende fundamentalmente da resistividade aparente que o solo apresenta, além da geometria e da forma como o sistema de aterramento está enterrado no solo. Dessa maneira, um mesmo sistema de aterramento quando exposto a solos distintos apresentará resistências elétricas diferentes, visto que a resistividade que cada tipo de solo apresenta a este aterramento é diferente.

O cálculo da resistividade aparente, vista pela malha de aterramento, é realizado a partir das dimensões da mesma, e de um fator N obtido através de curvas desenvolvidas por ENDRENYI (1963). O cálculo é efetuado considerando o nível de penetração da corrente de escoamento num solo de duas camadas. Portanto, um solo estratificado em muitas camadas deve ser reduzido a um solo equivalente com apenas duas camadas.

O procedimento de redução de camadas é feito utilizando-se a equação de *Hummel*, a qual transforma diretamente o solo estratificado em várias camadas para apenas duas camadas equivalentes. A redução é feita a partir da superfície, considerando-se que as camadas do solo se apresentam paralelas uma com relação à outra (KINDERMANN et al., 2002).

A equação de *Hummel* é dada pela Equação 2.3, enquanto que a Equação 2.4 apresenta a profundidade equivalente da primeira camada após a redução.

$$\rho_{eq} = \frac{d_1 + d_2 + d_3 + \dots + d_n}{\frac{d_1}{\rho_1} + \frac{d_2}{\rho_2} + \frac{d_3}{\rho_3} + \dots + \frac{d_n}{\rho_n}} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{\rho_i}}, \quad (2.3)$$

$$d_{eq} = d_1 + d_2 + d_3 + \dots + d_n = \sum_{i=1}^n d_i. \quad (2.4)$$

Em que:

- d_i – representa a espessura da i -ésima camada;
- ρ_i – representa a resistividade da i -ésima camada;

- n – representa o número de camadas reduzidas.

Na Figura 2.4 está ilustrado um solo estratificado em várias camadas sendo reduzido a apenas duas camadas equivalentes.

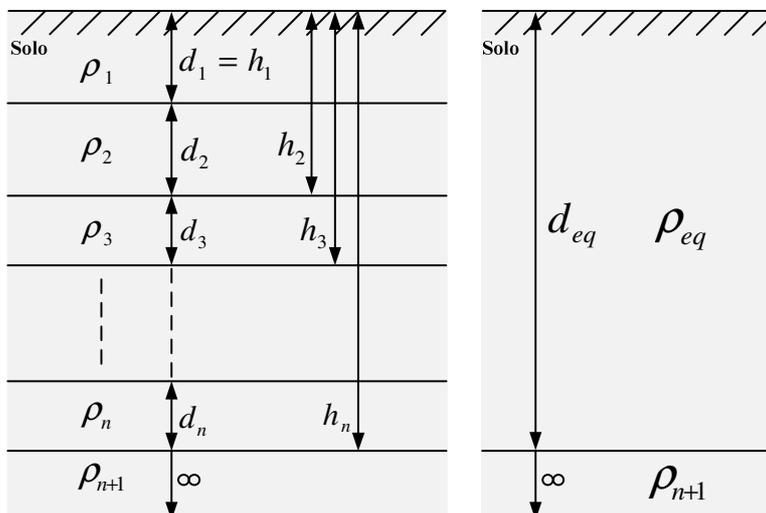


Figura 2.4 – Solo equivalente com duas camadas.

Após a estratificação do solo e a redução deste em duas camadas equivalentes, calcula-se o coeficiente de penetração α , dado pela Equação 2.5. Ele indica o grau de penetração das correntes escoadas pelo aterramento no solo equivalente.

$$\alpha = \frac{r}{d_{eq}}. \quad (2.5)$$

A variável r é o raio do anel equivalente do sistema de aterramento considerado. Para o caso de malhas de aterramento de subestações, r é calculado a partir da Equação 2.6.

$$r = \frac{S}{D}. \quad (2.6)$$

Em que:

- S – representa a área abrigada pelo aterramento;
- D – representa a maior diagonal da malha de terra.

Com o valor do coeficiente de penetração α obtido, calcula-se o coeficiente de divergência β que é definido pela relação entre a resistividade da última camada e a resistividade da primeira camada equivalente, conforme apresentado na Equação 2.7. O

coeficiente de divergência é similar ao coeficiente de reflexão entre duas camadas do solo.

$$\beta = \frac{\rho_{n+1}}{\rho_{eq}}. \quad (2.7)$$

Após obter o coeficiente de penetração α e o coeficiente de divergência β , pode-se determinar a resistividade aparente ρa do aterramento especificado em relação ao solo de duas camadas, utilizando um conjunto de curvas desenvolvidas por ENDRENYE (1963). Entretanto, neste trabalho, o cálculo da resistividade aparente será realizado a partir do conjunto de curvas apresentados em KINDERMANN et al. (2002), um vez que neste se apresenta de forma mais didática. O conjunto de curvas utilizado é análogo ao desenvolvido por ENDRENYI (1963).

Na Figura 2.5 está ilustrado o conjunto de curvas necessário para o cálculo da resistividade aparente ρa , onde α é o eixo das abscissas e β é a curva correspondente. Com α e β especificados no conjunto de curvas, obtém-se o fator N que é definido pela relação entre a resistividade aparente e a resistividade da primeira camada equivalente conforme apresentado pela Equação 2.8.

$$N = \frac{\rho a}{\rho_{eq}}. \quad (2.8)$$

Conforme apresentado na Equação 2.9, a resistividade aparente é obtida pela multiplicação entre a resistividade da primeira camada equivalente e o fator N encontrado utilizando-se as curvas ilustradas na Figura 2.5.

$$\rho a = N \cdot \rho_{eq}. \quad (2.9)$$

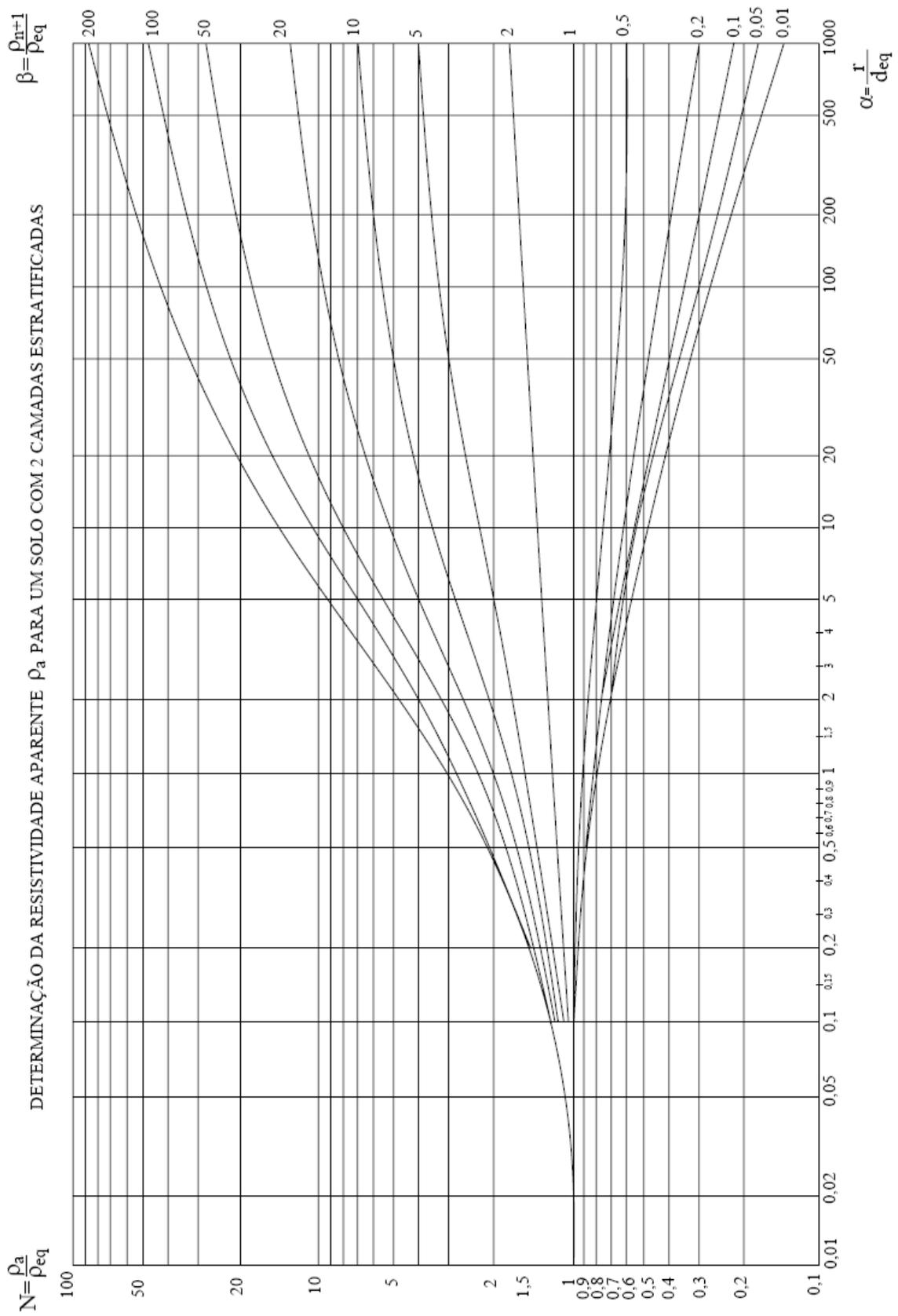


Figura 2.5 – Curva de resistividade aparente (KINDERMANN et al., 2002).

2.2. Potenciais de Segurança

Embora malhas de aterramento sempre visem proporcionar uma condição de potenciais equilibrados na superfície do solo de uma subestação, sempre irão ocorrer gradientes de potencial quando da existência de correntes escoando pelo solo. Entretanto, desde que a malha de aterramento tenha sido apropriadamente dimensionada, os máximos valores de gradiente não serão excedidos quando da ocorrência de um curto-circuito (CUNHA, 2003). A distribuição de potencial no interior e no entorno de uma malha de aterramento retangular simples, em um solo homogêneo, está ilustrada na Figura 2.6.

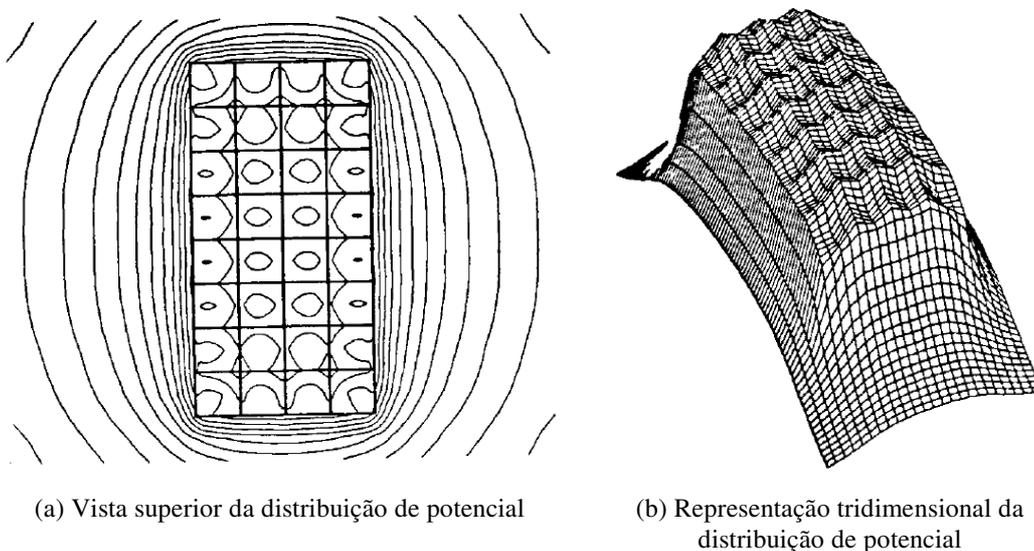


Figura 2.6 – Ilustração da distribuição de potencial no interior e no entorno de uma malha de aterramento retangular simples, em um solo homogêneo (IEEE-80, 2000).

No interior da malha de aterramento, onde estão os equipamentos e, possivelmente, pessoas, os valores de elevação de potencial deverão permanecer dentro de limites aceitáveis. Um parâmetro importante no projeto das malhas de aterramento, para que os máximos valores de gradiente não sejam excedidos, é a dimensão das malhas básicas (i.e. reticulados), visto que, quanto maior for a malha básica, maior será a elevação de potencial no interior da malha (CUNHA, 2003). Na Figura 2.7 está ilustrada a variação de potencial em relação à dimensão da malha básica.

Dessa maneira, 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, em diversas situações, condições de risco (VISACRO FILHO, 2002).

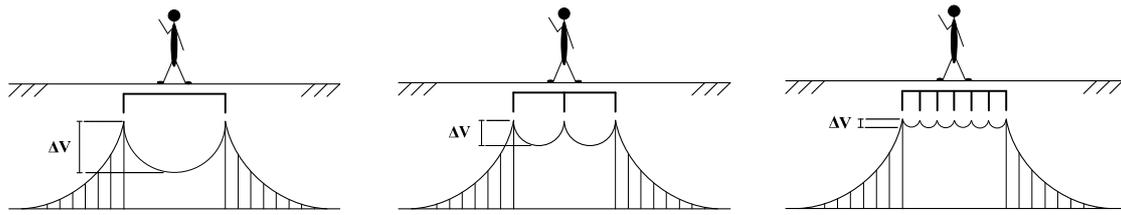


Figura 2.7 – Ilustração da variação de potencial em relação à dimensão da malha básica.

Segundo pesquisas realizadas por DALZIEL (1941), 99,5% das pessoas podem suportar, sem a ocorrência de fibrilação ventricular, a passagem de uma corrente elétrica de amplitude e duração determinada pela Equação 2.10. A expressão é usada para obtenção do limite permissível e aceitável de corrente, para que não ocorra fibrilação, durante o tempo que a pessoa fica submetida a uma diferença de potencial.

$$I_{choque} = \frac{k}{\sqrt{t}} \quad [\text{A}]. \quad (2.10)$$

Em que:

- I_{choque} – Corrente elétrica (em Ampères) passando pelo corpo humano, limite para não causar fibrilação.
- k – É uma constante relacionada à energia de choque elétrico tolerada por percentual da população com uma determinada massa corpórea. Em IEEE-80 (2000) são apresentados alguns valores padrões, tais como, $k = 0,116$ (para pessoas com 50 kg) e $k = 0,157$ (para pessoas com 70 kg).
- t – Tempo (em segundos) da duração do choque ($0,03s \leq t \leq 3s$).

As mais importantes diferenças de potenciais que são aplicadas ao ser humano, no interior de uma subestação, são denominadas de Potencial de Toque, Potencial de Passo e Potencial de Transferência, conforme mencionadas em IEEE-81.2 (1991) e IEEE-80 (2000). Contudo, neste trabalho serão evidenciados apenas os assuntos referentes ao Potencial de Toque e ao Potencial de Passo, os quais são referenciados como parâmetros críticos na elaboração de projetos de malha de aterramento.

2.2.1. Potencial de Toque

O potencial de toque é a diferença de potencial existente entre um determinado ponto de uma estrutura metálica, situada ao alcance da mão de uma pessoa, e um ponto no chão situado a 1 m da base da estrutura em questão (IEEE-81.2, 1991; IEEE-80,

2000; FRAGA, 2008). Trata-se de um potencial muito perigoso, visto que o caminho da corrente elétrica, através do corpo do indivíduo, inclui o coração (CAVALCANTI, 1991; SOUZA JÚNIOR, 2007).

Por motivo de segurança, o potencial máximo gerado por um aterramento durante o período de defeito, não deve produzir uma corrente de choque superior à limitada pela Equação 2.10.

Na Figura 2.8 está representada um esquema de como se obter a expressão do potencial de toque em relação à corrente de choque, em que:

- R_{ch} – Resistência do corpo humano, que é considerada de $1,0\text{ k}\Omega$, conforme mencionado em IEEE-81.2 (1991) e IEEE-80 (2000).
- R_c – Resistência de contato que pode ser considerada igual a $3\rho_s$ (resistividade superficial do solo), conforme citado em IEEE-80 (2000).
- R_1 e R_2 – Resistências dos trechos de terra considerados.
- I_{choque} – Corrente que percorre o corpo humano.

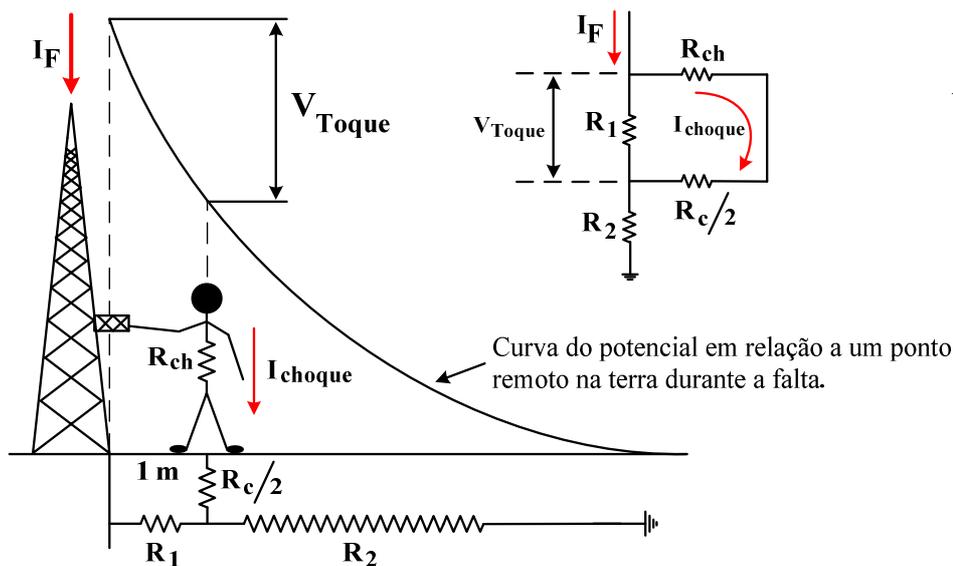


Figura 2.8 – Esquema do potencial de toque (adaptada de KINDERMANN et al., 2002).

Para o esquema apresentado acima, tem-se que a expressão para o potencial de toque será dado pela Equação 2.11, em que I_{choque} é dada pela Equação 2.10 a fim de que o potencial de toque máximo permissível não cause fibrilação ventricular. Na prática, os valores medidos devem ser menores do que os valores determinados pelos limites de segurança.

$$V_{toque} = \left(R_{ch} + \frac{R_c}{2} \right) \cdot I_{choque} \quad [\text{Volts}],$$

$$V_{toque \text{ máximo}} = (1000 + 1,5 \cdot \rho_s) \cdot \frac{k}{\sqrt{t}} \quad [\text{Volts}]. \quad (2.11)$$

2.2.2. Potencial de Passo

A circulação de corrente pelo solo, proveniente de um curto-circuito, por exemplo, provoca o surgimento de superfícies equipotenciais na superfície do mesmo. Sendo assim, os potenciais de passo ocorrerem quando um indivíduo encontra-se com os pés sobre linhas equipotenciais diferentes. Na Figura 2.9 está ilustrado o potencial de passo devido à ocorrência de uma descarga elétrica diretamente no solo.

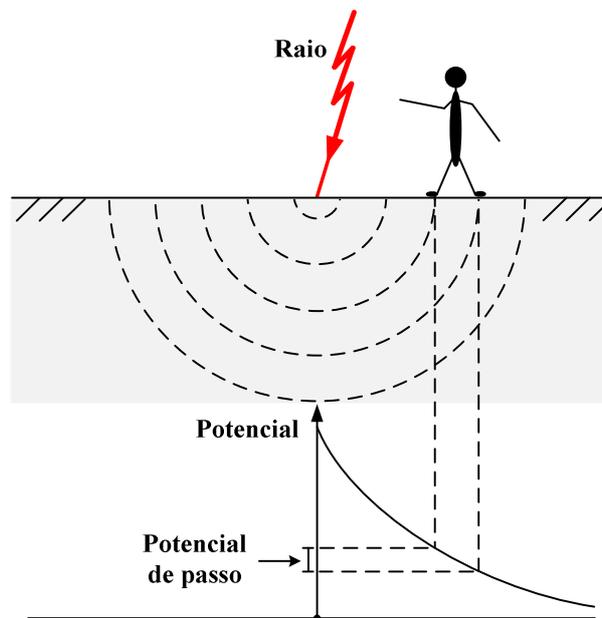


Figura 2.9 – Potencial de passo devido à ocorrência de uma descarga elétrica diretamente no solo (adaptada de KINDERMANN et al., 2002).

O potencial de passo é a diferença de potencial existente entre dois pontos situados no solo e distanciados de 1 m (para pessoas), devido à passagem de corrente de curto-circuito pela terra (IEEE-81.2, 1991; IEEE-80, 2000; FRAGA, 2008). O potencial de passo não é tão perigoso quanto o potencial de toque, posto que o caminho da corrente elétrica, através do corpo do indivíduo, não inclui, necessariamente, o coração (CAVALCANTI, 1991; SOUZA JÚNIOR, 2007).

Na Figura 2.10 é apresentado um esquema de como se obter a expressão do potencial de passo em relação à corrente de choque, em um procedimento semelhante ao apresentado no cálculo do potencial de toque, em que:

- R_{ch} – Resistência do corpo humano, que é considerada de $1,0 \text{ k}\Omega$, conforme mencionado em IEEE-81.2 (1991) e IEEE-80 (2000).
- R_c – Resistência de contato que pode ser considerada igual a $3\rho_s$ (resistividade superficial do solo), conforme citado em IEEE-80 (2000).
- R_1, R_2 e R_3 – Resistências dos trechos de terra considerados.
- I_{choque} – Corrente que percorre o corpo humano.

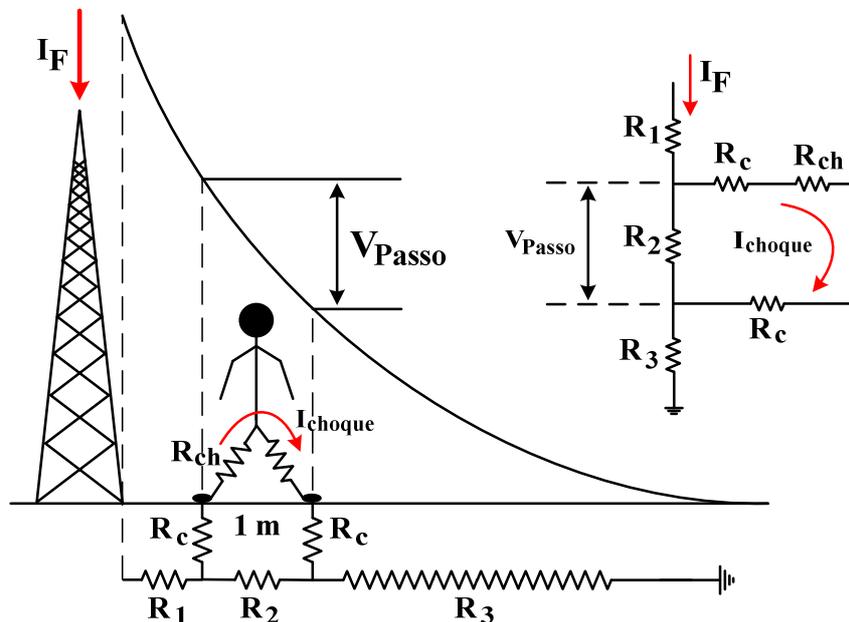


Figura 2.10 – Esquema do potencial de passo (adaptada de KINDERMANN et al., 2002).

Para o esquema apresentado acima, tem-se que a expressão para o potencial de passo máximo permissível será dada pela Equação 2.12, em que I_{choque} é dada pela Equação 2.10 a fim de que o potencial de passo máximo não cause fibrilação ventricular. Na prática, os valores medidos devem ser menores do que os valores determinados pelos limites de segurança.

$$V_{passo} = (R_{ch} + 2 \cdot R_c) \cdot I_{choque} \quad [\text{Volts}],$$

$$V_{passo \text{ máximo}} = (1000 + 6 \cdot \rho_s) \cdot \frac{k}{\sqrt{t}} \quad [\text{Volts}]. \quad (2.12)$$

2.2.3. Correção dos Potenciais de Toque e de Passo Máximos Admissíveis

Em subestações, devido ao seu grau de periculosidade, é comum colocar-se uma camada de brita revestindo toda a superfície do solo na área correspondente à malha de aterramento. Tal procedimento garante uma maior qualidade no nível de isolamento dos contatos dos pés com o solo, diminuindo os níveis dos potenciais de passo e de toque (KINDERMANN et al., 2002).

A camada de brita representa uma estratificação adicional além das camadas estratificadas do solo. Dessa forma, segundo IEEE-80 (2000), devem ser feitas correções nas Equações 2.11 e 2.12, acrescentando-se um fator de correção C_s dado pela Equação 2.13.

$$C_s = 1 - \frac{0,09 \cdot \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right)}{2 \cdot h_s + 0,09} \quad (2.13)$$

Em que:

- ρ – É a resistividade do solo. Em DE ARAÚJO (2007) é atribuído a ρ o valor correspondente à resistividade aparente do solo ρ_a calculada seguindo a metodologia apresentada na seção 2.1.3.
- ρ_s – É resistividade da brita, considerada igual a 3.000 $\Omega \cdot m$, conforme citado em IEEE-80 (2000).
- h_s – É a espessura da camada de brita. Em IEEE-80 (2000) e FRAGA (2008) é atribuído o valor de 0,1 m à espessura da camada de brita.

Desse modo, após o acréscimo do fator de correção nas Equações 2.11 e 2.12, tem-se que o potencial de toque máximo e o potencial de passo máximo serão representados pelas Equações 2.14 e 2.15, respectivamente.

$$V_{toque\ máximo} = (1000 + 1,5 \cdot C_s \cdot \rho_s) \cdot \frac{k}{\sqrt{t}} \quad [\text{Volts}] \quad e \quad (2.14)$$

$$V_{passo\ máximo} = (1000 + 6 \cdot C_s \cdot \rho_s) \cdot \frac{k}{\sqrt{t}} \quad [\text{Volts}]. \quad (2.15)$$

2.3. Medição de Resistência de Terra em Instalações Desenergizadas

O método, também conhecido por Método da Queda de Potencial (MQP), consiste em medir, a resistência do aterramento em função da queda de potencial usando um eletrodo de terra auxiliar. O método é constituído por um eletrodo auxiliar de corrente, um eletrodo auxiliar de potencial e o aterramento a ser medido (malha de aterramento), conforme esquematizado na Figura 2.11. A medição da resistência de terra pode ser realizada utilizando-se um amperímetro e um voltímetro ou, diretamente através do equipamento específico, megger também denominado terrômetro ou telurímetro (MAMEDE FILHO, 1997).

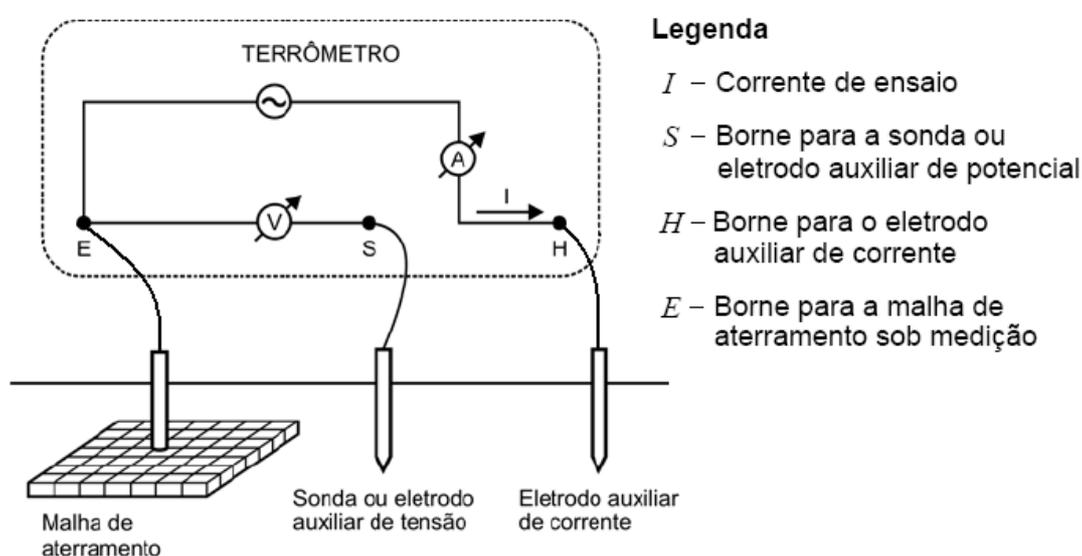


Figura 2.11 – Esquema para a medição da resistência de terra em instalações desenergizadas (NBR 15749).

Na execução deste método, faz-se circular uma corrente através da malha de aterramento sob ensaio por intermédio do eletrodo auxiliar de corrente, e mede-se o potencial entre a malha de aterramento e o terra de referência (terra remoto) por meio do eletrodo auxiliar de potencial. Sendo assim, com o valor de potencial medido e o valor da corrente injetada na malha, é possível calcular a resistência elétrica do aterramento, referente à distância entre a malha e o eletrodo auxiliar de potencial, através da Equação 2.16.

$$R = \frac{V}{I} \quad [\Omega]. \quad (2.16)$$

No ensaio de resistência de terra, o eletrodo auxiliar de corrente é fixado a uma distância relativamente grande em relação ao posicionamento da malha de aterramento. TELLÓ et al. (2007) sugere que o eletrodo auxiliar de corrente deva estar situado a uma distância de pelo menos dez vezes a maior dimensão da malha, com o objetivo de evitar superposição das áreas de influência dos potenciais provocados no solo pela malha de aterramento e pelo eletrodo auxiliar de corrente. Entretanto, segundo a norma NBR 15749, qualquer distância maior do que três vezes a maior dimensão do sistema de aterramento sob ensaio, já é o suficiente para evitar a superposição das áreas de influência. Em medições em campo, costuma-se adotar uma distância de cinco vezes a maior diagonal da malha.

Também no ensaio de resistência de terra, o eletrodo auxiliar de potencial é cravado entre a malha de aterramento e o eletrodo de corrente, percorrendo esta distância em intervalos regulares de 10% do valor total da distância entre a malha e o eletrodo auxiliar de corrente (CEPEL, 1994 apud TELLÓ et al., 2007, p. 111). Em contrapartida, na norma NBR 15749 é sugerido que estes intervalos regulares de medição sejam de 5% do valor total da distância adotada.

A partir dos valores obtidos no ensaio, pode-se desenhar a curva de resistência de terra em função da distância, conforme pode ser visto na Figura 2.12.

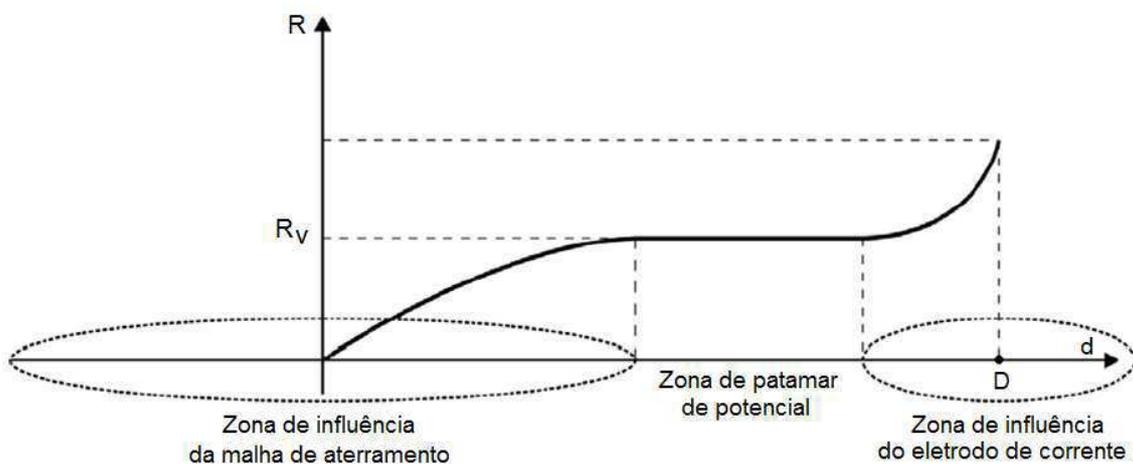


Figura 2.12 – Curva característica da resistência de aterramento (NBR 15749).

Na região de patamar, tem-se o valor R_v , que é o valor verdadeiro da resistência de terra do sistema de aterramento medido. No ponto **D**, tem-se a resistência de terra acumulada do aterramento medido e da haste auxiliar de corrente o que explica a ascensão da curva neste ponto (SOUZA JÚNIOR, 2007).

Como o objetivo principal da medição é obter o valor da resistência de terra do sistema de aterramento submetido ao ensaio, existe a possibilidade de deslocar, diretamente, a haste auxiliar de potencial para uma posição correspondente a aproximadamente 62% da distância entre o aterramento ensaiado (malha de aterramento) e a haste auxiliar de corrente (GILL, 1942; IEEE-81, 1983). Assim, teoricamente, estar-se-ia posicionando a haste auxiliar de potencial diretamente na região de patamar e a resistência de terra R_V seria encontrada, sem que houvesse a necessidade de se obter a curva de resistência de terra em função da distância.

Para tanto, devem ser feitas verificações, variando a posição do eletrodo de potencial para esquerda e para a direita em 10% da distância total entre a malha e o eletrodo de corrente, para garantir que as medições estão sendo executadas sem sobreposição das áreas de influência do sistema de aterramento sob ensaio e o eletrodo de corrente. Segundo GILL (1942), não há sobreposição entre as áreas de influência se a porcentagem entre a diferença dos valores medidos com o eletrodo de potencial não ultrapassar 10% do valor medido a 62% da distância total. Resultados mais precisos são encontrados para solos homogêneos e sistemas de aterramento de pequenas dimensões.

Outra prática comum está relacionada ao fato de não se conseguir visualizar a região de patamar na curva de resistência de terra em função da distância, obtida a partir das medições em campo. Neste caso, embora com certa imprecisão, ao invés de se repetir o procedimento de medição em outra direção ou para uma distância maior entre a malha de terra e o eletrodo de corrente, costuma-se calcular a média dos valores medidos entre os pontos a 40%, 50%, 60% e 70% da distância total adotada na medição.

Em GILL (1942) é mencionado que de acordo com a norma americana *National Electrical Code* (NEC) a resistência de terra de um sistema de aterramento não deve exceder o valor de 25 Ω , embora que, na maioria das aplicações seja necessária uma resistência de terra muito menor. GILL (1942) enfatiza que malhas de terra de subestações de transmissão devem ser projetadas de modo a não exceder a resistência de 1 Ω , enquanto que em subestações de distribuição a resistência máxima recomendada é de 5 Ω .

2.3.1. Recomendações Técnicas nas Medições

Durante a medição de resistência de terra pelo método tradicional de queda de potencial deve-se atentar para alguns procedimentos conforme descritos abaixo:

- Alinhamento do sistema de aterramento sob ensaio (malha) com os eletrodos de potencial e de corrente (KINDERMANN et al., 2002);
- A distância entre o sistema de aterramento sob ensaio e o eletrodo auxiliar de corrente deve ser suficientemente grande, para que o eletrodo de potencial atinja a região plana do patamar. A injeção de correntes em alta frequência permite a obtenção da região de patamar em distâncias menores do que obtidas para frequências próximas à industrial (NBR 15749);
- O eletrodo auxiliar de corrente deve estar posicionado, em relação ao sistema de aterramento sob ensaio, de tal modo que entre eles não haja tubulações metálicas, contrapesos de torres de linhas de transmissão, outros sistemas de aterramento ou materiais metálicos, para que não se tenha distorções nas medições realizadas (TELLÓ et al., 2007);
- Os cabos de interligação dos circuitos de corrente e de potencial devem estar afastados fisicamente um do outro para evitar os efeitos de acoplamento entre eles, visto que o acoplamento pode provocar um crescimento na curva de resistência de aterramento versus distância, na região onde ela deveria ter uma inclinação zero, dificultando a interpretação dos resultados (NBR 15749);
- As medições devem ser feitas em dias em que o solo esteja seco, para se obter o maior valor de resistência de terra do aterramento. Se não for o caso, devem-se anotar as condições do solo (VISACRO FILHO, 2002);
- Se houver oscilação da leitura, durante a medição, significa existência de interferência. Deve-se, então, deslocar os eletrodos de potencial e de corrente para outra direção, de modo a contornar o problema (KINDERMANN et al., 2002).

2.3.2. Recomendações de Segurança nas Medições

A fim de se realizar adequadamente a medição da resistência de terra, levando em consideração a segurança humana, e conforme especificado na NR 10 (2004), sugere-se que alguns itens sejam observados, tais como:

- Não devem ser feitas medições sob condições atmosféricas adversas, tendo-se em vista a possibilidade de ocorrência de raios;
- Não tocar nas hastes e na fiação;
- Não deixar que pessoas ou animais se aproximem do local;

- Utilizar calçados e luvas de isolamento para executar as medições;
- O aterramento a ser medido deve estar desconectado do sistema elétrico.

Conforme exposto, o método tradicional de medição de resistência de aterramento apresenta algumas dificuldades para a sua realização, dentre os quais podem-se citar:

- A necessidade de longas distâncias para o posicionamento dos eletrodos. Na maioria das vezes as subestações se encontram em áreas urbanizadas que não dispõem de terrenos disponíveis para a execução do método.
- A depender das dimensões da malha de aterramento e, conseqüentemente, da distância entre o aterramento sob ensaio e o eletrodo auxiliar de corrente, a execução desse método só será possível com a utilização de torres, cabos pára-raios, linhas de transmissão desenergizadas ou até circuitos de comunicação, que venham a substituir os eletrodos e os cabos de ligação usados no método.
- A necessidade de se deslocar os eletrodos em outra direção, caso ocorram oscilações nas medições.
- Por motivos de segurança, as medições só poderão ser realizadas em instalações desenergizadas, o que implica que o monitoramento das condições da malha de aterramento não poderá ser realizado com frequência.

As dificuldades impostas pelo método tradicional de medição de resistência de aterramento motivaram uma série de pesquisas a fim de se desenvolver novas técnicas de medição que pudessem contornar tais problemas, em especial a questão da desenergização da subestação. A seguir serão apresentadas algumas técnicas desenvolvidas para medição de resistência de aterramento em subestações energizadas

2.4. Medição de Resistência de Terra em Instalações Energizadas

A realização de medições em instalações energizadas tem como principal objetivo manter a continuidade do serviço, ou seja, manter o fornecimento de energia aos consumidores. Para tanto, a fim de que seja possível a realização das medições, faz-se necessário adotar uma série de providências com relação à segurança dos equipamentos e profissionais envolvidos, como também, com relação à legitimidade dos valores medidos.

No que diz respeito à segurança, toda instalação energizada está sujeita a eventos tais como curtos-circuitos, elevação de potenciais e sobretensões transitórias, sendo assim, todos os equipamentos e seres humanos envolvidos no processo de medição estarão sujeitos aos mesmos eventos (NBR 15749). Desse modo, os profissionais envolvidos na medição devem utilizar equipamentos de proteção individual (EPI) obedecendo a critérios estabelecidos pela norma NR 10 (2004), sendo também, aconselhável que os equipamentos utilizados na medição disponham de sistemas de proteção para garantir que os mesmos não sejam danificados na ocorrência de um desses eventos.

No que diz respeito à legitimidade dos valores medidos, faz-se necessário que os equipamentos utilizados ou o método de medição adotado seja capaz de anular ou minimizar as interferências causadas por ruídos e/ou harmônicos presentes no aterramento sob ensaio, garantindo que os valores obtidos na medição sejam exatos.

A escolha do método de medição deve levar em consideração todos os critérios citados. Os métodos de queda de potencial, de injeção de corrente em altas frequências ou de medição simultânea de correntes do sistema, além de outros que obedeçam aos critérios citados são possibilidades a serem consideradas para realização destes ensaios. Cada método possui características adequadas ao seu escopo final e possuem facilidades e dificuldades que devem ser avaliadas quando do planejamento da medição (NBR 15749).

2.4.1. Método de Queda de Potencial

Conforme o próprio nome sugere, baseia-se no método da queda de potencial descrito na seção 2.3. Contudo, a realização das medições a partir dessa metodologia só é possível com a utilização de equipamentos específicos, como, por exemplo, o *Smart Ground Multimeter* (SGM) desenvolvido pela empresa *Hood-Paterson & Dewar*.

O SGM é composto por dispositivos capazes de medir a impedância de terra de um sistema de aterramento em instalações energizadas, entretanto, não há informações sobre a frequência da corrente que é injetada no solo. Sabe-se, no entanto, que o tratamento e a análise dos dados obtidos na medição são realizados por um software próprio que fornece a impedância do sistema de aterramento através do método de estimativa (MELIPOULOS et al., 1993; MELIPOULOS et al., 1994).

2.4.2. Método de Injeção de Corrente de Baixas Frequências

O método de injeção de corrente de baixas frequências se baseia no método da queda de potencial, descrito em 2.3, para se obter a resistência do sistema de aterramento sob ensaio.

O processo de medição se dá através da injeção de altas correntes, da ordem de até dezenas de ampères, ou baixas correntes, da ordem de dezenas de miliampères, desde que ela possua uma frequência diferente da frequência do sistema, e que o equipamento utilizado na medição possua filtros adequados para selecionar os resultados advindos apenas do sinal injetado, filtrando os ruídos e tensões presentes na instalação sob ensaio (NBR 15749).

O equipamento normalmente utilizado neste tipo de medição é composto por uma fonte de corrente, que mantém o módulo da corrente constante, utilizando uma forma de onda não senoidal e com frequência diferente, porém próxima a 60 Hz. Outra forma de se realizar a medição é utilizando um gerador, desde que ele possua as mesmas características do equipamento de medição.

Uma desvantagem do método é que a realização das medições só é possível com a desconexão entre o aterramento sob ensaio e os demais elementos do sistema de aterramento como: cabos pára-raios, contrapesos, neutros, blindagens, etc (NBR 15749). Além disso, por se basear no método da queda de potencial, está sujeito a todas as desvantagens descritas na seção 2.3. Este método pode ser aplicado em instalações energizadas ou não.

A Eletrosul Centrais Elétricas S. A. utiliza um método de medição de resistência de terra em que é injetada uma baixa corrente com frequência de 70 Hz. Para a realização da medição se faz necessário o uso de um eletrodo remoto de corrente (normalmente o aterramento de uma torre de linha de transmissão, distante da subestação cinco vezes a maior diagonal da malha de terra) e de uma fonte com possibilidade de ajustar a frequência, com potência e tensão suficientes para o circuito total de medição (GALVANI et al., 2005).

2.4.3. Método de Injeção de Corrente de Altas Frequências

Da mesma forma que o método anterior, este método deve permitir a determinação da resistência do aterramento sob ensaio através do método convencional da queda de potencial, descrito em 2.3, entretanto com a particularidade de que, os

pontos de fixação dos eletrodos de potencial estarão nas regiões limítrofes da malha e o eletrodo de corrente será posicionado relativamente próximo ao sistema de aterramento em teste.

O equipamento utilizado para a execução das medições deverá possuir um módulo gerador de sinal de alta frequência (algumas dezenas de kHz), com sinais de corrente da ordem de algumas dezenas de miliampères, como também, possuir filtros altamente seletivos capazes de eliminar o efeito das correntes parasitas de frequência industrial presentes no solo (NBR 15749).

Diferentemente do método descrito na seção anterior, no método de injeção de corrente de altas frequências não se faz necessária a desconexão entre o aterramento sob ensaio e os demais elementos do sistema de aterramento, muito menos especificar a quantidade e os tipos dos aterramentos dos sistemas interconectados, posto que, para altas frequências a impedância indutiva dos demais elementos do sistema de aterramento será razoavelmente alta a ponto de se reduzir o efeito dos aterramentos adjacentes ao que se está medindo. Dessa forma, a corrente tenderá a circular na sua totalidade pela malha de aterramento e o eletrodo auxiliar de corrente, elevando os potenciais de superfície junto aos mesmos. Sendo assim, ao se deslocar o eletrodo auxiliar de potencial na região livre de influências do eletrodo auxiliar de corrente e do aterramento sob ensaio (i.e. na região de patamar) obter-se-á o valor procurado para a resistência da malha (NBR 15749). Esta metodologia se aplica a instalações energizadas ou desenergizadas, em locais com poucas e pequenas áreas disponíveis para colocação dos eletrodos de corrente e de potencial.

Em BELTANI (2007) são apresentadas duas metodologias que se utilizam do método de injeção de corrente de altas frequências para obtenção da resistência da malha de terra: a Metodologia Convencional Reduzida (MCR) e a Metodologia de Diferenças de Potencial em Pontos Próximos ao Sistema de Aterramento (DDPprox).

O equipamento utilizado para a execução das medições em ambas as metodologias foi desenvolvido pela Fundação Paulista de Tecnologia e Educação, e é denominado de Protótipo de Medição de Malha Terra em Subestações Energizadas (ou simplesmente Protótipo), o qual dispõe de uma fonte de corrente adaptada para frequências de 270 Hz, 1,47 kHz e 25 kHz. Os valores das medições realizadas com este equipamento são processados e analisados por um software próprio que se utiliza de uma interface gráfica (BELTANI, 2007).

a) Metodologia Convencional Reduzida (MCR)

Esta metodologia se utiliza do método de injeção de corrente de altas frequências permitindo a determinação da resistência do aterramento sob ensaio através do método convencional da queda de potencial, entretanto com a particularidade de que o eletrodo de corrente será posicionado relativamente próximo ao sistema de aterramento. Testes realizados com o Protótipo, para uma frequência de 25 kHz, indicaram que o posicionamento do eletrodo de corrente se dará a distâncias próximas a 1,25 vezes a maior dimensão do sistema de aterramento (BELTANI, 2007).

A Metodologia Convencional Reduzida pode ser aplicada a duas situações distintas, levando-se em consideração o grau de conhecimento da configuração do aterramento:

- Malhas de aterramento com configuração conhecida – a partir do valor da maior dimensão do sistema de aterramento informado pelo usuário, o software indicará o posicionamento dos três eletrodos de potencial e do eletrodo de corrente. Após os eletrodos terem sido corretamente posicionados e a medição executada, o software calculará os desvios entre os valores obtidos nos três eletrodos de potencial e os comparará com um padrão estabelecido. A medição estará completa se os desvios forem inferiores ao padrão estabelecido, entretanto, se os desvios forem superiores, o software indicará um novo posicionamento com acréscimo de 30% das distâncias, repetindo o processo até que se obtenham os desvios desejados. Realizadas as medições, o software fornecerá o valor da resistência do aterramento sob ensaio.
- Malhas de aterramento com configuração desconhecida – quando não se dispuser de informações a respeito das configurações do sistema de aterramento, o usuário deverá informar ao software um valor estimado para a maior dimensão da malha. A partir daí o procedimento será idêntico ao descrito para configuração conhecida. O tempo necessário à execução deste ensaio está diretamente relacionado à qualidade do valor estimado.

b) Metodologia DDPprox

Esta metodologia se utiliza do método de injeção de corrente de altas frequências, entretanto, sem a utilização do conceito queda de potencial com relação a

um ponto remoto, o que pode inviabilizar as medições notadamente de sistemas de aterramento de médias e grandes dimensões, realizadas convencionalmente.

A metodologia apresentada se baseia nas medições de diferença de potenciais entre pontos próximos às extremidades das malhas de aterramento, de forma a se obter a resistência específica da malha e/ou a impedância do sistema formado pela malha e suas interconexões. A escolha dos pontos de medição está diretamente ligada ao grau de conhecimento que se tenha da configuração do aterramento sob ensaio (BELTANI, 2007).

A Metodologia DDPprox é aplicada a duas situações distintas, levando-se em consideração o grau de conhecimento da configuração do aterramento:

- Malhas de aterramento com configuração conhecida – a partir das coordenadas limítrofes da malha informadas pelo usuário, o software indicará o posicionamento do eletrodo de corrente e dos eletrodos de potencial em pontos 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). Realizadas as medições, o software fornecerá o valor da resistência do aterramento sob ensaio. Na Figura 2.13 é ilustrado o esquema de medição aplicado a malhas de aterramento com configuração conhecida.

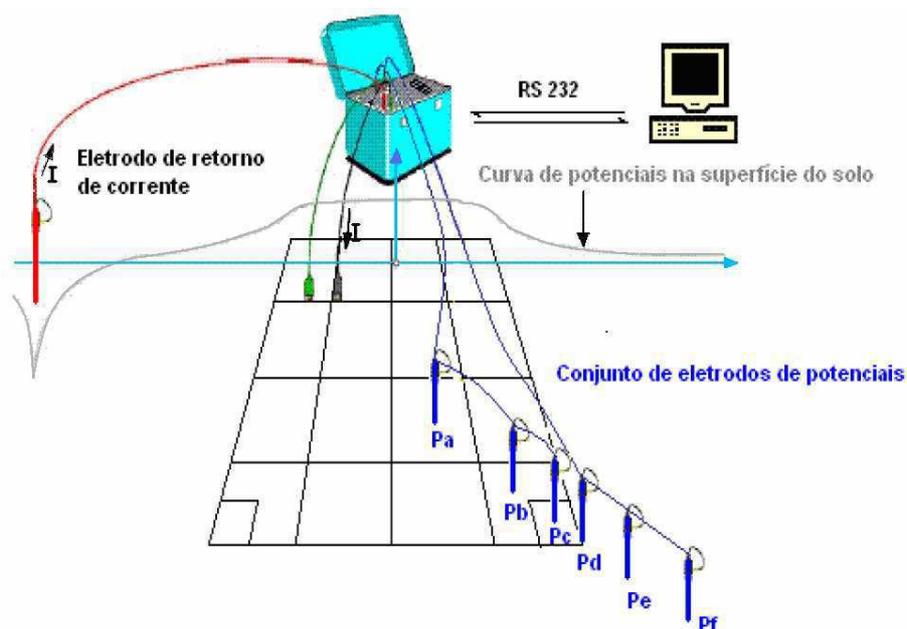


Figura 2.13 - Metodologia DDPprox aplicada a malhas de aterramento com configuração conhecida (BELTANI, 2007).

- Malhas de aterramento com configuração desconhecida – quando não se dispuser de informações a respeito das configurações do sistema de aterramento (as dimensões da malha, as dimensões dos reticulados, a profundidade de condutores, entre outros), o usuário informará ao software 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 tal como o final da camada de brita ou alambrado divisório de área energizada. O usuário posicionará o eletrodo de corrente e os eletrodos de potencial (em número e espaçamentos diferentes e aleatórios). Realizadas as medições, o software fornecerá o valor da resistência do aterramento, utilizando o algoritmo de estimação. Na Figura 2.14 é ilustrado o esquema de medição aplicado a malhas de aterramento com configuração desconhecida.

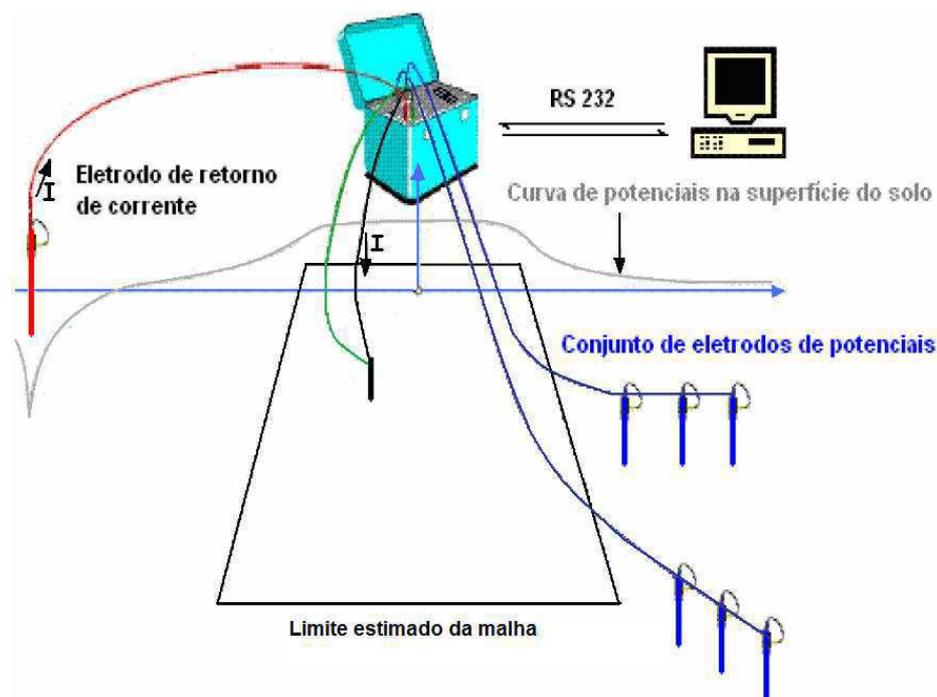


Figura 2.14 - Metodologia DDPprox aplicada a malhas de aterramento com configuração desconhecida (BELTANI, 2007).

Medições realizadas em malhas de aterramento de diferentes configurações mostraram que os resultados obtidos, através da metodologia DDPprox, 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, através, por exemplo, de cabos pára-raios de linhas de transmissão, concluiu-se que, o

valor mínimo da curva de resistência versus a distância (obtido nas proximidades da periferia da malha) tende ao valor da resistência da malha, quando a medição é realizada sem o circuito de compensação de reativos do Protótipo. Por outro lado, quando a medição é realizada com o circuito de compensação de reativos, o valor mínimo da curva tende ao valor da impedância do sistema.

Dessa forma, pela metodologia DDPprox, basta então medir o valor da diferença de potencial entre a malha de aterramento e um ponto a 1 m de sua periferia, e referenciá-la à corrente de medição, para se obter a resistência específica da malha de aterramento (para um circuito de medição sem compensação de reativos) ou a impedância do sistema (para um circuito de medição com compensação de reativos), não havendo a necessidade de se obter um levantamento completo da curva de variação da resistência em função do posicionamento dos eletrodos de potencial, até a obtenção da região de patamar.

Em BELTANI (2007) é aconselhado que as medições, utilizando-se a metodologia DDPprox, sejam realizadas nas proximidades da malha, preferencialmente em uma de suas quinas, tendo em vista que nessa região estão presentes as maiores potenciais devido à maior concentração do campo elétrico.

2.4.4. Método da Medição Simultânea de Correntes do Sistema

O método de medição simultânea de corrente consiste em medir a corrente injetada na malha de terra pelo próprio sistema, através do neutro do transformador, e simultaneamente, medir a tensão da malha com relação a um eletrodo remoto de potencial localizado relativamente próximo (NBR 15749). Embora a distância de posicionamento do eletrodo remoto de potencial seja menor do que a distância abordada em outros métodos, por exemplo, o método convencional, ela é proporcional às dimensões da malha.

A corrente de desequilíbrio é medida e somada através de transdutores corrente/tensão, do tipo alicate, em pontos relevantes da instalação sob teste. Os sinais de corrente e de tensão medidos são observados através de um osciloscópio digital, de modo a verificar a coerência entre os valores obtidos e, em seguida, calcula-se o valor da resistência do aterramento. Pontas de prova de alta tensão devem ser utilizadas a fim de minimizar riscos ao equipamento e aos profissionais envolvidos na medição (GAMBOA et al., 2005).

O método de medição simultânea de correntes apresenta algumas vantagens tais como não ser necessárias grandes distâncias entre o eletrodo remoto de potencial e o aterramento sob ensaio, como também não ser necessário o uso de fonte de corrente para a realização da medição. Em contrapartida, diferentemente do método de injeção de correntes de alta frequência, deve-se desconectar o aterramento sob ensaio dos demais elementos do sistema de aterramento como: cabos pára-raios, neutros, blindagens, contrapeso, etc. Além disso, o número de transdutores utilizados na medição está diretamente ligado a quantidade de fontes de corrente de sequência zero presentes na instalação, ou seja, serão necessários tantos transdutores quantas forem as fontes de corrente de sequência zero. Desse modo, a fim de diminuir o número de pontos de medição, e, conseqüentemente, o número de transdutores instalados, alguns equipamentos ou circuitos podem ser desligados durante as medições (GAMBOA et al., 2005).

Este método de medição de resistência de terra não se aplica, portanto, a instalações que não possuam fontes de corrente de sequência zero, como no caso de subestações de seccionamento de circuitos sem transformadores de potência, como também, não se aplica a instalações desenergizadas (NBR 15749).

Todos os métodos de medição de resistência de aterramento apresentados, sejam eles para medições em instalações energizadas ou não, apresentaram vantagens e desvantagens quando comparados entre si. Na Tabela 2.2 é apresentada a evolução, e as respectivas características, dos métodos de medição de resistência de malha de terra em instalações energizadas apresentados.

Neste trabalho será utilizado e validado um método de medição de resistência de aterramento, capaz de medir não só a resistência da malha de aterramento de instalações energizadas, como também medir a resistência de conexão dos vários elementos conectados a malha. Além da metodologia de medição validada, será apresentada uma técnica de medição de potenciais de superfície em instalações energizadas, capaz de analisar as condições da malha de aterramento tanto em condições de regime permanente como fazer uma estimativa quando da ocorrência de um curto-circuito.

Para o desenvolvimento da técnica de análise das condições da malha de aterramento foi necessário o estudo e o desenvolvimento de uma rotina computacional baseada no Método das Diferenças Finitas.

Tabela 2.2 – Evolução dos métodos de medição de resistência de malha em instalações energizadas.

Ano	Pesquisadores	Método	QP ¹	IC ²	LD ³	DX ⁴	ST ⁵
1993	MELIOPOULOS <i>et al.</i>	MQP usando o SGM	•	•	•	Δ^6	•
1994							
2005	GALVANI <i>et al.</i>	Baixas Frequências	•	•	•	•	
2005	GAMBOA <i>et al.</i>	Medição Simultânea de Corrente				•	
2007	BELTANI	Altas Frequências	MCR	•	•		•
			DDPprox		•		•

2.5. Método das Diferenças Finitas

O Método das Diferenças Finitas (MDF), desenvolvido por A. Thom em 1920, é uma técnica numérica que possibilita resolver Equações Diferenciais Parciais (EDP) através de aproximações que transformam estas equações em diferenças finitas discretizadas. As aproximações são realizadas algebricamente em uma região discretizada, que relaciona os valores das variáveis independentes e dependentes da equação com pontos dentro da região de análise, chamados nós (SADIKU, 1992; THOM *et al.*, 1961 apud SOUZA JÚNIOR, 2007, p. 32).

Segundo YEE (1966), WEXLER (1969), DE ARAÚJO (2007) e SOUZA JÚNIOR (2007); as soluções de problemas através do MDF envolvem, basicamente, quatro passos:

- Discretização do domínio (i.e. região de análise);
- Imposição de condições de contorno;
- Aproximação numérica da equação diferencial de interesse em uma equação por diferenças finitas equivalentes, relacionando as variáveis independentes e dependentes com os nós na região; e
- Resolução das equações discretizadas, considerando-se as condições de contorno impostas.

¹ QP – conceito de queda de potencial.

² IC – injeção de corrente.

³ LD – necessidade de longas distâncias.

⁴ DX – necessidade de desconexão dos demais elementos do sistema de aterramento.

⁵ ST – utilização de software para cálculo da resistência.

⁶ Δ – Não especificado.

O MDF é o princípio básico para a aplicação do método das Diferenças Finitas no Domínio do Tempo ou método FDTD (*Finite Difference Time Domain*), desenvolvido por *Kane Yee* em 1966. O FDTD foi inicialmente desenvolvido para o cálculo de campos eletromagnéticos a partir de equações diferenciais dependentes do espaço e do tempo. A base de cálculos são as equações diferenciais de *Maxwell* que relacionam o campo elétrico e o campo magnético variantes no tempo (YEE, 1966; WEXLER, 1969).

O método FDTD é normalmente utilizado para a solução de problemas eletromagnéticos, onde soluções analíticas são inviáveis e o uso de um método numérico de cálculo é necessário. Esses problemas podem incluir regiões onde existam condições de contorno mistas, meios não homogêneos, anisotrópicos, não lineares e dispersivos, como, por exemplo, em sistemas de aterramento (SOUZA JÚNIOR, 2007).

Com o decorrer dos anos, o método FDTD tem se tornado cada vez mais difundido e utilizado na solução de problemas da área de eletromagnetismo. Desde sua primeira aplicação em 1980, por *Allen Taflove* (TAFLOVE, 1980), o método tem sido abordado em diversos trabalhos. O pesquisador japonês *K. Tanabe* se tornou pioneiro ao utilizar o método FDTD na análise de sistemas de aterramento (TANABE, 2001), e a partir de então muitos têm sido os trabalhos publicados envolvendo aplicação deste método na análise de problemas relacionados a aterramentos elétricos. Dentre os trabalhos publicados no Brasil podem-se citar, por exemplo, PUSTILNICK (2004), BARBERINI (2005), DE ARAÚJO (2007) e SOUZA JÚNIOR (2007).

Através do MDF e com auxílio de recursos computacionais disponíveis torna-se possível simular, por exemplo, o comportamento do potencial elétrico em uma determinada região, desde que se conheçam as condições de contorno. Para isso a equação de *Laplace* pode ser utilizada.

A equação de *Laplace* é um caso particular da equação de *Poisson*, sendo esta obtida a partir da equação de *Gauss*, que é dada pela Equação 2.17 (SADIKU, 1992; HAYT JUNIOR et al., 2003).

$$\nabla \cdot \vec{D} = \nabla \cdot \epsilon \vec{E} = \rho_v . \quad (2.17)$$

Sabendo-se que $\vec{E} = -\nabla V$, a Equação 2.17 é transformada para a Equação 2.18, que para um meio homogêneo equivale à equação de *Poisson*, dada pela Equação 2.19.

$$\nabla \cdot (-\epsilon \nabla V) = \rho_v . \quad (2.18)$$

$$\nabla^2 V = -\frac{\rho_v}{\epsilon} . \quad (2.19)$$

Nos casos em que a densidade volumétrica de carga ρ_v , em uma dada região, for nula, porém permitindo a existência de cargas pontuais, linhas de cargas e densidades superficiais de cargas em posições singulares como fontes de campo, a equação de *Poisson* será dada pela Equação 2.20 e passará a ser chamada de equação de *Laplace* (WEXLER, 1969; SADIKU, 1992; HAYT JUNIOR et al., 2003). A forma expandida da equação de *Laplace* no âmbito bidimensional é dada pela Equação 2.21.

$$\nabla^2 V = 0 . \quad (2.20)$$

$$\nabla^2 V = \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} = 0 . \quad (2.21)$$

A fim de se obter o mapeamento dos potenciais de superfície em uma área de interesse, a equação de *Laplace* pode ser resolvida, através do MDF, seguindo os quatro passos já mencionados. O primeiro passo consiste em discretizar o domínio, i.e., dividir a região de interesse, em uma grade de nós como ilustrado na Figura 2.15.

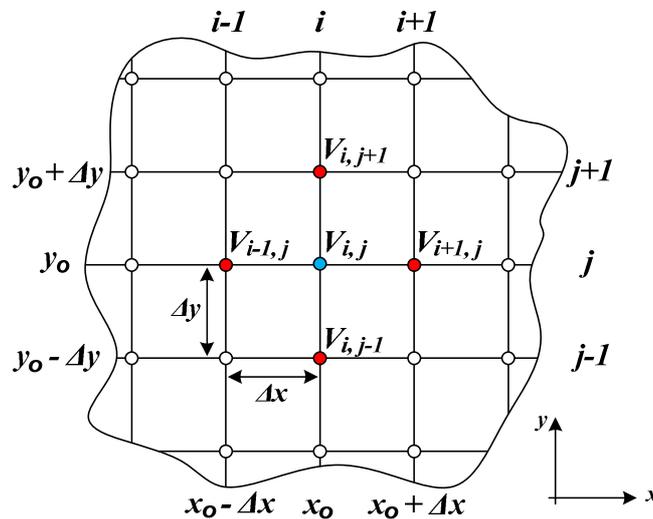


Figura 2.15 - Discretização do domínio.

O segundo passo consiste em estabelecer as condições de contorno, atribuindo valores de potenciais fixos a seus respectivos nós, chamados nós fixos. Os demais nós,

denominados de nós livres, são calculados a partir dos valores de potenciais dos nós fixos utilizando-se a equação de diferenças finitas obtida no passo seguinte.

O terceiro passo consiste em obter a equação de diferenças finitas equivalente à equação de *Laplace*. A equação de diferenças finitas pode ser obtida através da diferença à frente (derivada à frente), diferença atrás (derivada atrás) e diferença central (derivada centrada), conforme mencionado em WEXLER (1969). Contudo, segundo TAFLOVE et al. (1975), a diferença central é a que conduz, em geral, a uma melhor aproximação, posto que, apresenta precisão de segunda ordem em Δx (o erro da aproximação decresce com Δx^2). Por este motivo, a diferença central costuma ser utilizada em diversas aplicações e trabalhos, como, por exemplo, em DE ARAÚJO (2007); SOUZA JÚNIOR (2007). Desse modo, a derivada de $V(x, y)$ em um ponto (x_0, y_0) , a partir da diferença central, é dada pela Equação 2.22, de forma que Δx seja um incremento suficientemente pequeno ao longo do eixo x .

$$\left. \frac{\partial V}{\partial x} \right|_{x=x_0} \approx \frac{V(x_0 + \Delta x, y_0) - V(x_0 - \Delta x, y_0)}{2\Delta x} = \frac{V_{i+1,j} - V_{i-1,j}}{2\Delta x}. \quad (2.22)$$

Para se obter a derivada segunda, repete-se o procedimento na Equação 2.23, obtendo-se Equação 2.24.

$$\left. \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} \right|_{x=x_0} \approx \frac{V_{i+1,j} - 2V_{i,j} + V_{i-1,j}}{\Delta x^2}. \quad (2.24)$$

Seguindo a mesma linha de raciocínio utilizada na obtenção das derivadas de primeira e de segunda ordem correspondentes ao eixo x , obtém-se a derivada de segunda ordem correspondente ao eixo y , a qual é dada pela Equação 2.25.

$$\left. \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \right|_{y=y_0} \approx \frac{V_{i,j+1} - 2V_{i,j} + V_{i,j-1}}{\Delta y^2}. \quad (2.25)$$

Fazendo-se $\Delta x = \Delta y = \phi$ e substituindo-se as Equações 2.24 e 2.25 na Equação 2.21, pode-se reescrever a equação de *Laplace* conforme apresentada na Equação 2.26. Assim, o valor do potencial em qualquer nó livre da grade poderá ser calculado utilizando-se a Equação 2.27.

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} = \frac{V_{i+1,j} + V_{i-1,j} + V_{i,j+1} + V_{i,j-1} - 4V_{i,j}}{\phi^2} = 0, \quad (2.26)$$

$$V_{i,j} = \frac{1}{4}(V_{i+1,j} + V_{i-1,j} + V_{i,j+1} + V_{i,j-1}). \quad (2.27)$$

A Equação 2.27 se torna exata à medida que ϕ tende a zero. A equação encontrada afirma que, sob certas condições, o potencial de um dado ponto pode ser calculado como a média aritmética dos potenciais de quatro outros pontos tomados a uma mesma distancia radial. O atrativo da equação de *Laplace* é que ela continua sendo válida mesmo para diferentes campos, com diferentes intensidades e diferentes razões de variação espacial (HAYT JUNIOR et al., 2003).

Após obter a equação de diferenças finitas aproximada, o quarto passo consiste em calcular o valor do potencial em todos os nós livres da grade, o qual pode ser executado de duas maneiras: solução direta e solução iterativa.

- Solução direta – a partir dos n valores de potencial que se deseja calcular, monta-se e resolve-se um sistema de equações de ordem n , baseado na Equação 2.27.
- Solução iterativa – atribuem-se valores aproximados aos potenciais não conhecidos (nós livres) e os refina realizando-se várias iterações. O procedimento é executado até que se obtenham valores de potencial dentro de uma precisão desejada. O número de cálculos necessários aumenta muito à medida que a precisão requerida aumenta. Desse modo, computadores digitais auxiliados por rotinas computacionais, podem ser utilizados.

É importante ressaltar que valores pequenos para o incremento espacial resultam em uma melhor aproximação da derivada, entretanto, valores muito pequenos do incremento espacial implicam em um maior número de nós e conseqüentemente em um maior número de equações, exigindo maior esforço e tempo computacional, aumentando a possibilidade de introdução de erros de arredondamento (OZISIK, 1990; PUSTILNICK, 2004; DE ARAÚJO, 2007).

Em OZISIK (1990) é sugerido que, antes que se escolha a dimensão do incremento espacial, os cálculos sejam realizados primeiramente em grades com incremento espacial relativamente grande e gradualmente diminua-se a dimensão do incremento observando-se a convergência da solução do problema. Sugere-se também, que sejam utilizados grades com incremento espacial menores nas regiões onde as condições de contorno apresentem variações bruscas.

Embora se trate de um tema antigo e com algumas técnicas de medição consolidadas, pesquisas voltadas a malhas de aterramento elétrico vêm sendo desenvolvidas no decorrer dos anos. Estas pesquisas têm como intuito uma maior compreensão do funcionamento das malhas de aterramento mediante a ocorrência de eventos distintos, a partir de simulações em softwares; um melhor monitoramento e análise do estado de conservação e das condições operacionais da malha, a partir de medições em campo; como também a aplicação de mecanismos que aumentem o desempenho da malha, a partir da utilização, por exemplo, de aditivos químicos que reduzem a resistividade do solo, e, conseqüentemente, reduzem a resistência da malha de terra. Na Tabela 2.3 estão apresentadas algumas das técnicas que foram desenvolvidas nos últimos anos e seus respectivos pesquisadores.

Ainda na Tabela 2.3 está mencionada a técnica proposta neste trabalho, a qual se utiliza de simulações, a partir de medições de potenciais de superfície realizadas em campo, sendo capaz de evidenciar possíveis regiões críticas no terreno em que a subestação está instalada. Uma vez localizadas as regiões críticas, faz-se necessária a realização de medições mais apuradas no local, utilizando-se das técnicas de medição consolidadas e/ou recém desenvolvidas, a fim de se obter um diagnóstico mais exato a respeito dos possíveis problemas, e, conseqüentemente, aplicar técnicas que possam mitigá-los ou solucioná-los.

Tabela 2.3 – Algumas pesquisas voltadas a malhas de aterramento elétrico nos últimos anos.

Técnica	Ano	Pesquisadores
Medição de resistência de terra em instalações energizadas.	1993 / 1994	MELIOPOULOS <i>et al.</i>
	2005	GALVANI <i>et al.</i>
	2005	GAMBOA <i>et al.</i>
	2007	BELTANI <i>et al.</i>
Mecanismos de diminuição da resistência da malha e/ou da resistividade do solo.	1999	MENG <i>et al.</i>
	2002	ZENG <i>et al.</i>
	2007	DE SOUZA <i>et al.</i>
	2009	SILVA <i>et al.</i>
	2010	BEZERRA <i>et al.</i>
Simulações: Análise de malhas de aterramento em ambiente computacional (casos teóricos).	2004	PUSTILNICK
	2005	BARBERINI
	2007	DE ARAÚJO
	2007	SOUZA JÚNIOR
	2008	FRAGA
Medições e Simulações: Análise de malhas de aterramento a partir de medições de potenciais de superfície realizadas em campo (casos reais).	2011	DIAS

Capítulo 3

MATERIAL E MÉTODOS

Neste capítulo serão descritos os métodos empregados nas medições em campo, apresentando os principais instrumentos e ferramentas utilizados, a fim de avaliar o comportamento de malhas de aterramento em subestações ao longo do tempo.

3.1. Medição de Resistividade do Solo

3.1.1. Material Utilizado

As medições de resistividade do solo serão realizadas utilizando-se um terrômetro digital modelo 6472 da AEMC *Instruments*[®]. O terrômetro, que pertence ao Laboratório de Alta Tensão (LAT) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), foi adquirido por recursos do Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento Energisa Paraíba – UFCG/PaqTc-PB, Código ANEEL 0377-001/2007.

O terrômetro digital utilizado dispõe de uma fonte de corrente interna além de um software que realiza internamente os cálculos necessários para obtenção do valor da resistividade do solo. O terrômetro possui, também, a capacidade de armazenamento em memória interna e apresentação das medições armazenadas através de software do próprio equipamento. Trata-se de um equipamento que possui características diferenciadas em relação a outros terrômetros, sendo a principal delas a possibilidade de medições em instalações energizadas.

Por ser capaz de realizar medições em instalações energizadas, o terrômetro dispõe de um sistema de proteção contra sobretensões para casos de conexões errôneas ou acidentes, além de possuir isolamento óptico para comunicação USB, já que tem a capacidade de ser operado remotamente via computador. Ele possui uma opção de varredura, onde são executadas automaticamente várias medições em várias frequências diferentes, numa faixa de 41 a 5.078 Hz, a fim de verificar como os resultados variam em função da frequência. Essa opção é possível no modo automático e o processo de medição só é encerrado quando todas as frequências são injetadas. Além de medir a resistividade do solo, o terrômetro digital também é projetado para medir:

- Resistência de conexão;
- Resistência da malha de terra desenergizada;

- Resistência de acoplamento da malha de terra;
- Resistência seletiva da malha de terra;
- Potencial de aterramento;
- Resistência de malha de terra energizada;
- Resistência de malha de terra em pés de torre.

Na Figura 3.1 são apresentadas fotografias do terrômetro digital, modelo 6472 da AEMC Instruments®.



Figura 3.1 – Terrômetro digital, modelo 6472 da AEMC Instruments®

O terrômetro digital citado faz parte de um conjunto de materiais que compõem um kit de medição. Desse modo, juntamente com o terrômetro, também foi adquirido um kit contendo todos os materiais necessários para a execução das medições. Nele estão contidos quatro rolos de cabos isolados com comprimentos distintos (10 m, 32 m, 170 m e 180 m) e com bitolas de 2,5 mm², além de quatro hastes de aço, revestidas por cobre, com 0,50 m de comprimento e 11 mm de diâmetro cada.

Uma trena com capacidade de medição de 30 m será utilizada para posicionar corretamente cada haste, as quais serão cravadas no solo utilizando-se uma marreta.

As medições de resistividade do solo serão realizadas para três subestações da Energisa-PB:

- SE Aroeiras – subestação de distribuição com transformador na configuração delta/estrela-aterrado (69/13,8 kV) e potência nominal de 10 MVA. A área efetiva da malha de aterramento é de 1.668,45 m².

- SE Mataraca – subestação de distribuição com transformador na configuração delta/estrela-aterrado (69/13,8 kV) e potência nominal de 10 MVA. A área efetiva da malha de aterramento é de 2.364,70 m².
- SE Alto Branco – subestação de distribuição com dois transformadores na configuração delta/estrela-aterrado (69/13,8 kV) cada, e potências nominais de 10 MVA. A área efetiva da malha de aterramento é de aproximadamente 1.600 m².

Por motivos de segurança, nas realizações de ensaios em subestações, serão utilizados equipamentos de proteção individual como capacete, botas (com capacidade isolante de 1 kV) e luvas de borracha (com máxima tensão de uso de 500 V).

3.1.2. Método de Medição

A medição de resistividade do solo será realizada através do método de *Wenner*, por ser um método largamente usado e apresentar alta confiabilidade nos resultados obtidos.

O procedimento para a realização do ensaio está descrito na seção 2.1 da Revisão Bibliográfica, entretanto, no lugar de se utilizar um voltímetro e uma fonte de corrente, utilizar-se-á o terrômetro digital apresentado na Figura 3.1. Na Figura 3.2 é apresentado um esquema da medição de resistividade de terra pelo método de *Wenner* utilizando-se o terrômetro digital, em que $H(Z)$ e $E(X)$ são as hastes de corrente, e $S(Y)$ e $ES(Xv)$ são as hastes de potencial.

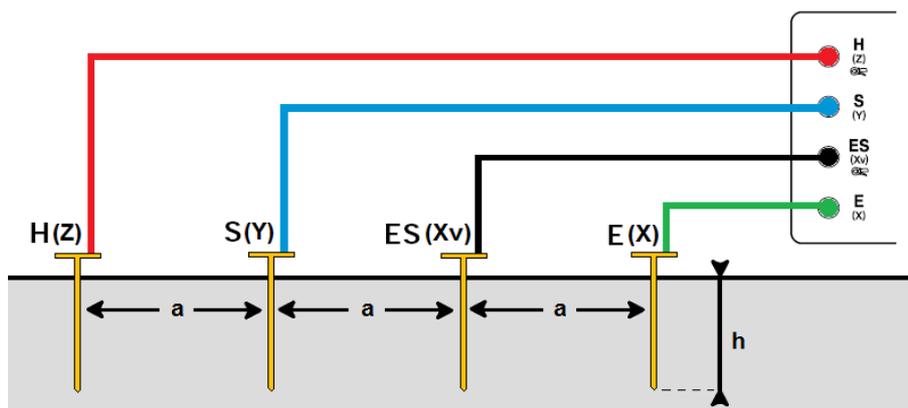


Figura 3.2 – Esquema de medição de resistividade do solo utilizando-se o terrômetro digital.

O terrômetro digital modelo 6472 da AEMC *Instruments*[®] permite a injeção de correntes no solo em várias frequências distintas, numa faixa de 41 a 5.078 Hz. As correntes serão injetadas pela haste $H(Z)$ e retornarão ao terrômetro através da haste $E(X)$. Com os valores das correntes injetadas e os respectivos potenciais medidos entre as hastes $S(Y)$ e $ES(X_v)$, o terrômetro calculará e analisará, automaticamente, as resistividades para cada corrente injetada. O terrômetro, utilizando filtros seletivos internos, disponibilizará no seu *display* o valor mais preciso.

Com os valores de resistividade medidos e os respectivos espaçamentos utilizados nas medições em campo, será desenhada a curva da resistividade elétrica do solo em função do espaçamento entre as hastes e, em seguida, realizar-se-á o processo de modelagem do solo em camadas estratificadas.

Conforme mencionado na seção 2.1 da Revisão Bibliográfica, a estratificação do solo em camadas horizontais pode ser realizada a partir de diversas metodologias que se utilizam de conjuntos de curvas auxiliares, entretanto, neste trabalho será utilizado o software TecAt Plus 5.2[®] para a estratificação do solo.

A partir dos dados de resistividade do solo medidos em campo ou fornecidos via projeto, o TecAt Plus 5.2[®] tem a capacidade de modelar o solo em camadas estratificadas tanto de modo automático, como também no número de camadas desejadas pelo usuário.

Os resultados fornecidos pelo TecAt Plus 5.2[®], para a estratificação de solo, serão utilizados como parte de um conjunto de dados de entrada de uma rotina computacional desenvolvida neste trabalho.

3.2. Medição de Potencial de Toque

3.2.1. Material Utilizado

As medições de potencial de toque serão realizadas utilizando-se duas massas metálicas de 25 kg cada, a fim de simular uma pessoa de 50 kg. As massas têm a finalidade de aumentar o contato com o solo, e, no intuito de facilitar o escoamento da corrente elétrica da estrutura metálica para o solo, utilizar-se-ão panos umedecidos nas bases das massas metálicas.

Na Figura 3.3 está apresentada uma fotografia das massas metálicas, as quais são divididas em duas partes distintas, compostas internamente por concreto e revestidas externamente por material condutor.



Figura 3.3 – Massas metálicas utilizadas nas medições de potencial de toque.

No processo de medição de potencial de toque também serão utilizados uma resistência de $1\text{ k}\Omega$, a qual simulará a resistência do corpo humano, um voltímetro digital ICEL, modelo MD6110, e cabos isolados com bitolas de $2,5\text{ mm}^2$ para realizar a conexão entre os materiais necessários à execução das medições.

Um amperímetro do tipo alicate amperimétrico digital SMART, modelo FT-266C, será utilizado para medir a corrente de desequilíbrio no neutro do transformador no momento da medição de potencial de toque.

Por motivos de segurança, nas realizações de ensaios em subestações, serão utilizados equipamentos de proteção individual como capacete, botas (com capacidade isolante de 1 kV) e luvas de borracha (com máxima tensão de uso de 500 V).

As medições de potencial de toque serão realizadas em duas subestações da Energisa-PB:

- SE Mataraca – subestação de distribuição com transformador na configuração delta/estrela-aterrado ($69/13,8\text{ kV}$) e potência nominal de 10 MVA .
- SE Alto Branco – subestação de distribuição com dois transformadores na configuração delta/estrela-aterrado ($69/13,8\text{ kV}$) cada, e potências nominais de 10 MVA .

3.2.2. Método de Medição

Na realização da medição do potencial de toque, utilizar-se-ão as duas massas metálicas interligadas, as quais deverão ser posicionadas a 1 m de distância da base da

estrutura metálica sob estudo (torre, transformador, etc.), distância esta correspondente a uma pessoa com o braço estendido em direção à estrutura. A ligação entre as massas metálicas e a estrutura será feita através de uma resistência de $1\text{ k}\Omega$, e paralelamente à resistência conectar-se-á um voltímetro. O esquema do ensaio de medição de potencial de toque está ilustrado na Figura 3.4.

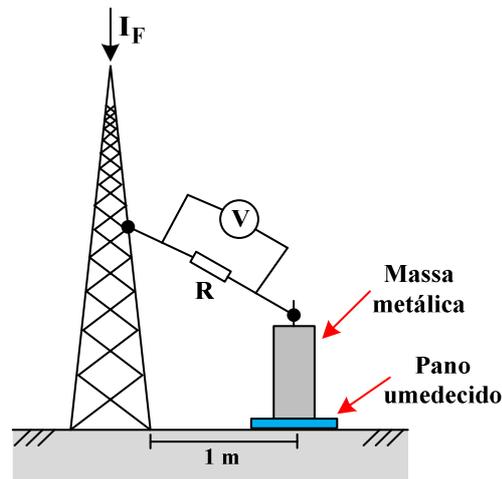


Figura 3.4 – Esquema da medição de potencial de toque.

Os pontos onde as conexões serão realizadas deverão estar limpos, livres de pinturas, óxidos, ou qualquer fator que venha a causar algum tipo de imprecisão à medição. Se possível, a realização da medição deverá ocorrer em todos os quadrantes do solo ao redor da estrutura sob estudo.

Os valores dos potenciais medidos corresponderão ao potencial de toque referente à corrente de desbalanceamento do transformador no instante da medição, a qual deverá ser medida com o auxílio de um amperímetro.

Conforme mencionado em IEEE-81.2 (1991), o potencial de toque aproximado, no instante de curto-circuito, poderá ser obtido através de uma extrapolação linear entre a corrente medida no neutro do transformador e a corrente circulante na malha de terra no momento do curto-circuito. A extrapolação será válida supondo-se que a terra mantenha as características resistivas invariáveis para altas correntes.

A corrente circulante na malha, no momento de um curto-circuito, é menor que a corrente de curto-circuito propriamente dita. Isto ocorre porque parte da corrente retorna à malha pelo cabo-guarda entrando diretamente no cabo da malha e retornando ao sistema elétrico pelo terra do “Y” do transformador ou do gerador síncrono. Desse modo, a corrente circulante na malha corresponde, apenas, à parte da corrente de curto-

circuito que retorna à malha pelo solo. A corrente circulante na malha é a corrente que contribui efetivamente para o surgimento de potenciais perigosos na superfície do solo, sendo assim, somente esta corrente deverá ser considerada nos cálculos dos potenciais de toque e de passo.

A depender de alguns fatores, a corrente circulante na malha de terra, no momento de um curto-circuito, pode variar de 10% a 64% do valor da corrente de curto-circuito fase-terra (KINDERMANN et al., 2002). Em projetos de malhas de aterramento de subestação é comum atribuir-se um valor de 50% da corrente de curto-circuito fase-terra para a corrente circulante na malha de terra no momento de um curto-circuito.

3.3. Medição de Potencial de Passo

3.3.1. Material Utilizado

Para a realização das medições de potencial de passo serão utilizadas as mesmas subestações e os mesmos materiais apresentados no método de medição de potencial de toque, os quais se encontram descritos na seção 3.2.1 deste capítulo.

3.3.2. Método de Medição

O escoamento da corrente elétrica pelo solo, proveniente de um curto-circuito, por exemplo, provoca o surgimento de diferentes potenciais na superfície do solo. Sendo assim, os potenciais de passo ocorrem quando um indivíduo encontra-se com os pés sobre potenciais diferentes.

Na realização da medição do potencial de passo, utilizar-se-ão as duas massas metálicas interligadas, as quais deverão ser posicionadas a 1 m de distância uma da outra, simulando uma pessoa com as pernas abertas. A ligação entre as massas metálicas será feita através de uma resistência de 1 k Ω , e paralelamente à resistência conectar-se-á um voltímetro. O esquema do ensaio de medição de potencial de passo está ilustrado na Figura 3.5.

Os valores dos potenciais medidos corresponderão ao potencial de passo referente à corrente de desbalanço do transformador no instante da medição, a qual deverá ser medida com o auxílio de um amperímetro.

Da mesma forma que no método de medição de potencial de toque, e conforme mencionado em IEEE-81.2 (1991), o potencial de passo aproximado, no instante de

curto-circuito, poderá ser obtido através de uma extrapolação linear entre a corrente medida no neutro do transformador e a corrente circulante na malha de terra no momento do curto-circuito. A extrapolação será válida supondo-se que a terra mantenha as características resistivas invariáveis para altas correntes.

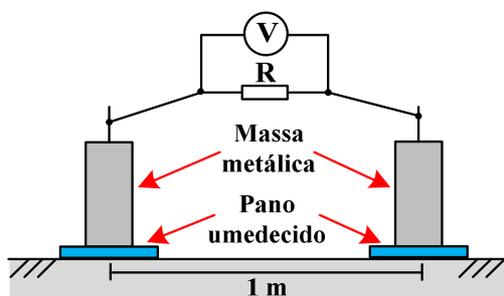


Figura 3.5 – Esquema de medição de potencial de passo.

A medição de potencial de passo requer tempo e esforço físico. Por estes motivos, costumam-se selecionar regiões preferenciais a serem investigadas, dando-se preferência às regiões periféricas dos sistemas de aterramento, visto que, os maiores potenciais na superfície do solo surgem nestes locais. Naturalmente, o fato das regiões periféricas serem selecionadas como preferenciais não significa que a região central deva ser ignorada, tendo em vista a degradação da malha. O método proposto neste trabalho não negligencia os potenciais das regiões centrais das malhas de terra.

3.4. Medição de Resistência de Terra em Instalações Desenergizadas

3.4.1. Material Utilizado

As medições de resistência de terra em malhas de subestações desenergizadas serão realizadas utilizando-se o terrômetro digital descrito na seção 3.1.1 deste capítulo. Além do terrômetro serão utilizados três rolos de cabos isolados, pertencentes ao kit do terrômetro, com comprimentos de 10 m, 170 m e 180 m, todos com bitolas de 2,5 mm². Além dos cabos, serão utilizadas duas hastes de aço, revestidas por cobre, com 0,50 m de comprimento e 11 mm de diâmetro cada.

Uma trena com capacidade de medição de 30 m será utilizada para posicionar corretamente cada haste, as quais serão cravadas no solo utilizando-se uma marreta.

As medições de resistência de terra em malhas de subestações desenergizadas serão realizadas em apenas uma subestação da Energisa-PB:

- SE Aroeiras – subestação de distribuição com transformador na configuração delta/estrela-aterrado (69/13,8 kV) e potência nominal de 10 MVA. A malha de terra desta subestação apresenta uma área efetiva de 1.668,45 m², com diagonal da malha equivalente a 59,14 m.

Por motivos de segurança, nas realizações de ensaios em subestações, serão utilizados equipamentos de proteção individual como capacete, botas (com capacidade isolante de 1 kV) e luvas de borracha (com máxima tensão de uso de 500 V).

3.4.2. Método de Medição

As medições de resistência de terra em malhas de subestações desenergizadas serão realizadas através do método tradicional de queda de potencial, conforme descrito na seção 2.3 da Revisão Bibliográfica.

O eletrodo auxiliar de corrente será posicionado, quanto possível, a uma distância d da malha de aterramento, correspondente a três vezes a maior dimensão da malha, enquanto que o eletrodo auxiliar de potencial será posicionado entre a malha de aterramento e o eletrodo de corrente, percorrendo esta distância em intervalos regulares de 10% do valor total da distância entre a malha e o eletrodo auxiliar de corrente.

Na Figura 3.6 é apresentado um esquema da medição de resistência de terra pelo método tradicional de queda de potencial utilizando-se o terrômetro digital, em que $H(Z)$ é o eletrodo auxiliar de corrente, $S(Y)$ é o eletrodo auxiliar de potencial e $E(X)$ é o eletrodo que deve ser conectado à malha de aterramento sob estudo.

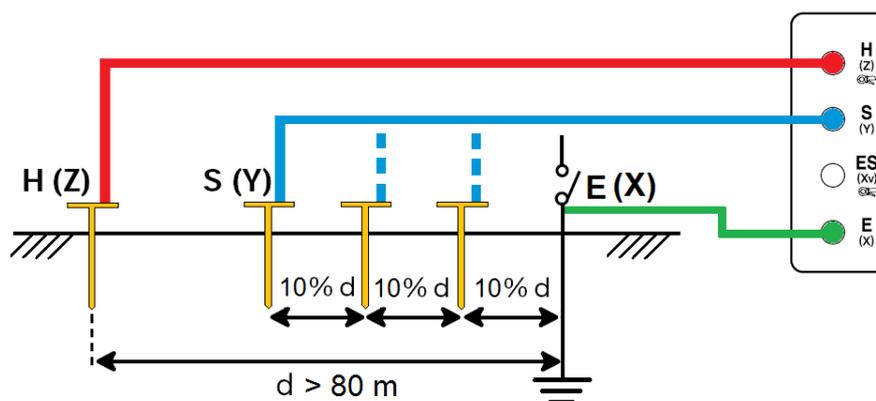


Figura 3.6 – Esquema de medição de resistência de terra em instalações desenergizadas utilizando-se o terrômetro digital.

Com os valores de resistência de terra medidos e as respectivas distâncias utilizadas na medição em campo, será desenhada a curva da resistência de terra em função da distância entre a malha de terra e o eletrodo auxiliar de corrente. Através da curva, será obtido o valor da resistência de terra do sistema de aterramento medido o qual corresponderá à região de patamar da curva.

Nos casos em que a região de patamar não for demonstrada na curva, a resistência de terra será dada pela média dos valores medidos entre os pontos a 40%, 50%, 60% e 70% da distância total d adotada na medição.

3.5. Medição de Resistência de Terra em Instalações Energizadas

Neste trabalho será utilizado e validado um método de medição de resistência de aterramento em instalações energizadas, capaz de medir não somente a resistência da malha de aterramento, como também, a resistência de conexão dos vários elementos conectados a malha.

3.5.1. Material Utilizado

A medição da resistência de malha de aterramento em instalações energizadas será realizada utilizando-se o terrômetro digital descrito na seção 3.1.1, entretanto, utilizar-se-á também uma pinça amperimétrica, modelo SR182 da AEMC *Instruments*[®].

Da mesma forma que o terrômetro digital, a pinça amperimétrica também foi adquirida por recursos do Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento Energisa Paraíba – UFCG/PaqTc-PB, Código ANEEL 0377-001/2007. Ela é bastante precisa e com capacidade para medição de altas correntes, podendo realizar medições até 40 A rms. Na Figura 3.7 é apresentada a fotografia da pinça amperimétrica utilizada.

Além do terrômetro e da pinça amperimétrica serão utilizados os quatro rolos de cabos isolados, pertencentes ao kit do terrômetro, além de duas hastes de aço, revestidas por cobre, com 0,50 m de comprimento e 11 mm de diâmetro cada.

Uma trena com capacidade de medição de 30 m será utilizada para posicionar corretamente cada haste, as quais serão cravadas no solo utilizando-se uma marreta.

Um amperímetro do tipo alicate amperimétrico digital SMART, modelo FT-266C, será utilizado para medir a corrente de desequilíbrio no neutro do transformador no momento da medição.



Figura 3.7 – Pinça amperimétrica da AEMC Instruments[®] utilizada nas medições de resistência de malha de aterramento em instalações energizadas.

Por motivos de segurança, nas realizações de ensaios em subestações, serão utilizados equipamentos de proteção individual como capacete, botas (com capacidade isolante de 1 kV) e luvas de borracha (com máxima tensão de uso de 500 V).

As medições de resistência de terra em malhas de subestações energizadas serão realizadas em seis subestação da Energisa-PB:

- SE Aroeiras – subestação de distribuição com transformador na configuração delta/estrela-aterrado (69/13,8 kV) e potência nominal de 10 MVA.
- SE Patos – subestação de distribuição com transformador na configuração delta/estrela-aterrado (69/13,8 kV) e potência nominal de 10 MVA.
- SE Jatobá – subestação de distribuição com transformador na configuração delta/estrela-aterrado (69/13,8 kV) e potência nominal de 10 MVA.
- SE São Gonçalo – subestação de distribuição com transformador na configuração delta/estrela-aterrado (69/13,8 kV) e potência nominal de 10 MVA.
- SE Mataraca – subestação de distribuição com transformador na configuração delta/estrela-aterrado (69/13,8 kV) e potência nominal de 10 MVA.
- SE Alto Branco – subestação de distribuição com dois transformadores na configuração delta/estrela-aterrado (69/13,8 kV) cada, e potências nominais de 10 MVA.

3.5.2. Método de Medição

O método de medição de resistência de aterramento em instalações energizadas aqui apresentado é baseado na capacidade do conjunto terrômetro digital modelo 6472

da AEMC *Instruments*[®] e pinça amperimétrica modelo SR182 da AEMC *Instruments*[®]. O conjunto permite a determinação da resistência do aterramento sob ensaio através do método convencional da queda de potencial, sem a necessidade de disponibilidade de grandes áreas para realização da medição, como também não havendo a necessidade de se dispor de cabos extensos. Neste método, os eletrodos de potencial e de corrente permanecerão fixos e relativamente próximos ao sistema de aterramento sob teste. As medições serão realizadas para várias correntes, de frequências distintas, injetadas na malha sob teste.

O procedimento adotado para a medição de resistência de malha de terra em instalações energizadas consiste em:

- Fixar os eletrodos $H(Z)$ e $S(Y)$, espaçados pelo menos 30 metros um do outro, evitando interferência entre eles;
- Conectar o terminal $ES(Xv)$ na pinça amperimétrica e o terminal desta no ponto do aterramento que se deseja medir;
- Conectar o terminal $E(X)$ em outro ponto do mesmo aterramento que se deseja medir.

Na Figura 3.8 está ilustrado o esquema de medição de resistência de terra em instalações energizadas adotado.

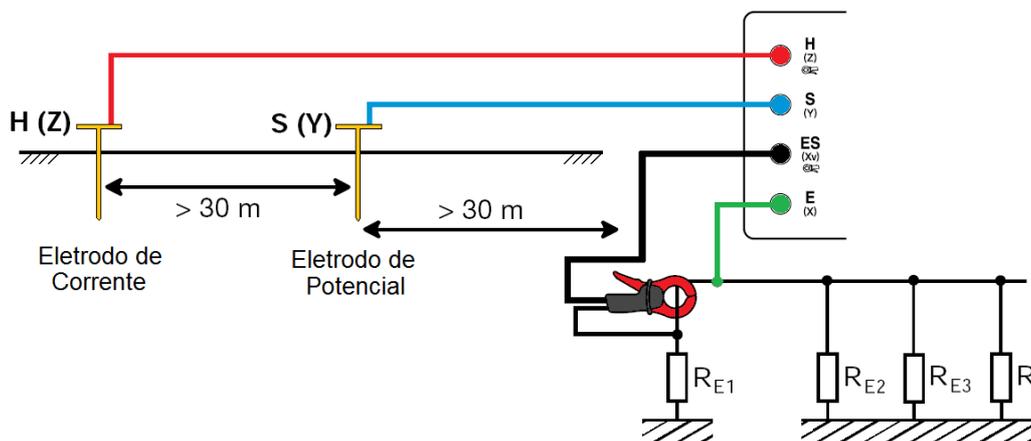


Figura 3.8 – Esquema de medição de resistência de terra em instalações energizadas com uso do terrômetro digital e da pinça amperimétrica.

O terrômetro digital modelo 6472 da AEMC *Instruments*[®] permite a injeção de correntes no solo em várias frequências distintas. As correntes serão injetadas pela haste $H(Z)$ e retornarão ao terrômetro através da haste $E(X)$. Com os valores das corrente

injetadas e os respectivos potenciais medidos a partir do eletrodo de potencial $S(Y)$, o terrômetro calculará e analisará, automaticamente, as resistências para cada corrente injetada. O terrômetro, utilizando filtros seletivos internos, disponibilizará no seu *display* o valor mais preciso. A pinça amperimétrica medirá as várias correntes injetadas pelo terrômetro e pelo sistema elétrico, auxiliando o software interno ao terrômetro a realizar os cálculos de resistência para cada valor de corrente distinto.

A partir do procedimento apresentado, será possível realizar medições de resistência da malha de terra em vários pontos de conexão de equipamentos com a malha de terra como, por exemplo, no neutro do transformador, nas chaves seccionadoras, no banco de capacitores, nos transformadores de potencial (TP), nos transformadores de corrente (TC), nos pára-raios, entre outros equipamentos. Também será possível realizar a medição diretamente na malha de terra quando a subestação dispuser de caixas de inspeção.

Na realização deste procedimento de medição encontram-se valores mais exatos que os encontrados no método tradicional de medição de resistência de terra, além de não serem necessárias grandes distâncias entre os eletrodos de medição utilizados.

Para evitar interferência eletromagnética, sugere-se que se estenda todo o comprimento de cada cabo, mantendo-os tão distantes, um do outro, quanto possível. Além disso, deve-se evitar colocar os cabos próximos ou paralelamente a condutores metálicos (cabos, calhas, cercas, etc.).

3.6. Medição de Potencial de Superfície

3.6.1. Material Utilizado

A realização das medições de potenciais de superfície poderia ser feita com o simples uso de um voltímetro e duas hastes de cobre cravadas no solo. Entretanto, a fim de facilitar o processo de medição de potenciais de superfície, foi desenvolvido um equipamento de medição de potencial, na Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). O medidor de potenciais de superfície desenvolvido tem a capacidade de medir e armazenar valores de potencial de pico de até 127 pontos de medição, um de cada vez. O projeto e a montagem do medidor de potenciais não fazem parte do escopo deste trabalho. Na Figura 3.9 está apresentada uma fotografia do medidor de potenciais de superfície desenvolvido.



Figura 3.9 – Fotografia do medidor de potenciais de superfície.

O medidor de potenciais tem a capacidade de se comunicar com o microcomputador para a transferência dos dados. Os valores dos potenciais armazenados serão tratados e analisados por uma rotina computacional especificamente desenvolvida para este fim. Na Figura 3.10 é apresentado o diagrama de blocos funcionais do medidor de potencial descrito.

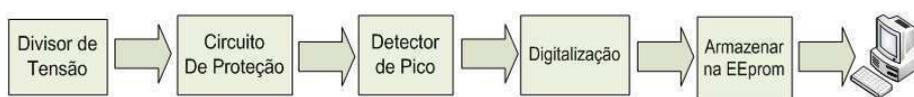


Figura 3.10- Diagrama de blocos funcionais do sistema.

O processo de medição de potencial de superfície só será possível ser realizado com a subestação energizada, visto que o medidor de potenciais não injeta correntes no solo. No momento da medição, as únicas correntes presentes no solo, são as correntes de desequilíbrio (desbalanço) injetadas na malha através do neutro do transformador, como também as correntes oriundas dos aterramentos de outros equipamentos e de possíveis sistemas monofásicos com retorno pela terra (MRT).

Além do medidor de potenciais de superfície desenvolvido, será necessária a utilização de outros materiais tais como: duas hastes de cobre do tipo *Copperweld* com 80 cm de comprimento e 10 mm de diâmetro cada; trena com capacidade de medição de 30 m será utilizada para posicionar corretamente cada haste, as quais serão cravadas no solo utilizando-se uma marreta; dois rolos de cabos isolados com comprimentos de 20 m e 100 m, ambos com bitolas de 2,5 mm²; e um amperímetro do tipo alicate

amperimétrico digital SMART, modelo FT-266C, utilizado para medir a corrente de desequilíbrio no neutro do transformador no momento da medição.

Por motivos de segurança, nas realizações de ensaios em subestações, serão utilizados equipamentos de proteção individual como capacete, botas (com capacidade isolante de 1 kV) e luvas de borracha (com máxima tensão de uso de 500 V).

As medições de resistência de terra em malhas de subestações energizadas serão realizadas apenas em uma subestação da Energisa-PB:

- SE Alto Branco – subestação de distribuição com dois transformadores na configuração delta/estrela-aterrado (69/13,8 kV) cada, e potências nominais de 10 MVA. As dimensões da malha de aterramento são de 39 m x 41 m, com uma diagonal de 56,59 m e uma área efetiva de aproximadamente 1.600,0 m².

3.6.2. Método de Medição

O processo de medição dos potenciais de superfície no solo, proposto neste trabalho, será realizado medindo-se a diferença de potencial entre pontos desejados e um ponto de referência situado suficientemente longe da malha de aterramento, conforme ilustrado na Figura 3.11.

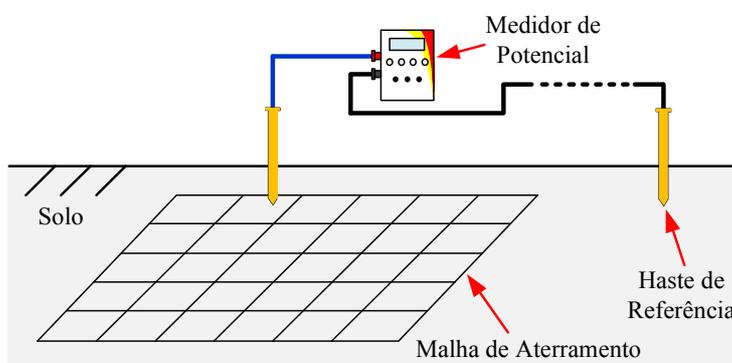


Figura 3.11 – Esquema de medição de potencial de superfície.

O ponto de referência usado na medição em campo deverá ser posicionado a uma distância longe o suficiente da malha de aterramento da subestação, de modo que o potencial de superfície medido entre o ponto de referência e pontos próximos a ele seja zero. Uma vez escolhido o ponto de referência, atribuir-se-á que este se encontra em um dos limites (arestas) do terreno total a ser simulado e então será desenhado um esboço do terreno a partir de um plano cartesiano criado.

Os valores dos potenciais de superfície medidos corresponderão à corrente de desbalanço do transformador no instante da medição, a qual deverá ser medida com o auxílio de um amperímetro e ter seu valor anotado. A corrente de desbalanço do transformador fará parte de um conjunto de variáveis de entrada de uma rotina computacional que realizará o mapeamento dos potenciais superficiais no solo.

A área de medição escolhida deve ser dividida em pequenos reticulados de medição abrangendo toda a área da malha de aterramento e sua circunvizinhança. Quanto menores forem os reticulados de medição, maior será a precisão no mapeamento dos potenciais de superfície. Sugere-se que os reticulados não sejam superiores a 7 m x 7 m na área interna à malha de terra.

Os pontos de medição escolhidos deverão ter suas coordenadas anotadas para que se tenha a exata localização de cada potencial medido. As coordenadas dos pontos medidos farão parte de um conjunto de variáveis de entrada de uma rotina computacional que realizará o mapeamento dos potenciais superficiais no solo.

Como o mapeamento dos potenciais de superfície, através da rotina computacional desenvolvida, será feito com o uso de matrizes, as coordenadas dos pontos de medição deverão ser números inteiros, ou seja, cada ponto na matriz equivalerá a um reticulado de 1 m² no terreno. Caso o ponto de medição não apresente coordenadas inteiras dever-se-á arredondá-las para o valor inteiro mais próximo quando do fornecimento das coordenadas à rotina computacional.

Na Figura 3.12 está ilustrado o posicionamento hipotético de alguns pontos de medição de potencial de superfície, como também a localização do ponto de referência.

A simples utilização dos valores obtidos nas medições de potenciais em vários pontos não é muito conclusiva, no que diz respeito ao diagnóstico do comportamento dos potenciais na superfície do solo. Uma maneira de se realizar uma análise mais apurada é a utilização de métodos iterativos de mapeamento. Um dos métodos possíveis é o Método das Diferenças Finitas (MDF), o qual é um método de mapeamento que resolve a equação de *Laplace* de forma iterativa conforme descrito na seção 2.5 da revisão bibliográfica.

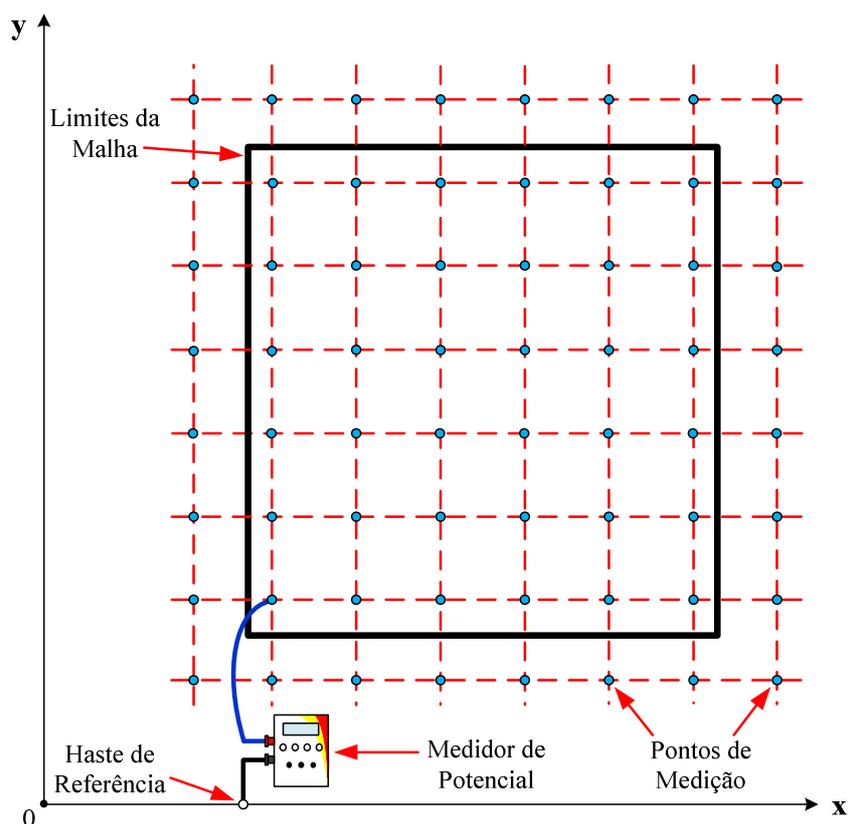


Figura 3.12 – Pontos escolhidos para a medição de potencial de superfície.

Na seção a seguir será descrito o funcionamento de uma rotina computacional que realiza o mapeamento dos potenciais de superfície através do MDF, tendo dentre suas várias variáveis de entrada os valores de potenciais medidos e suas respectivas coordenadas.

3.7. Rotina Computacional para Diagnóstico de Potenciais de Superfície

Uma rotina computacional de diagnóstico de malha de aterramento foi desenvolvida, em MATLAB[®], como objetivo de evidenciar as condições operacionais das malhas de terra em subestações energizadas.

A rotina é capaz de mapear os potenciais na superfície da malha e em suas circunvizinhanças, indicando as possíveis concentrações de campo ou as dificuldades da malha em escoar a corrente elétrica, externando as prováveis zonas de alta resistividade, zonas de desgaste ou de descontinuidade na malha, tanto em condições de regime permanente como fazer uma estimativa quando da ocorrência de um curto-circuito.

A rotina computacional faz uso do Método das Diferenças Finitas (MDF), através do conceito de diferença central, conforme descrito na seção 2.5 da revisão

bibliográfica, e tem como dados de entrada e condição de contorno, os valores medidos e armazenados na memória do medidor de potenciais desenvolvido. Também constituem dados de entrada a corrente de desequilíbrio (desbalanço) do transformador medida durante a medição de potenciais de superfície, a corrente de curto-circuito fornecida em projeto, a espessura das camadas estratificadas do solo e suas respectivas resistividades, as dimensões do terreno em que se deseja mapear os potenciais de superfície, as dimensões da malha de terra, além das coordenadas do ponto de referência e dos pontos onde foram medidos os potenciais de superfície.

A rotina computacional gera gráficos em duas e três dimensões que apresentam o comportamento dos potenciais na superfície do solo, tanto em condições de regime permanente como também simulando o comportamento dos potenciais na ocorrência de um curto-circuito, referentes ao mesmo ponto de referência. Para isso foram utilizadas funções do MATLAB[®] capazes de fazer o mapeamento dos níveis de potenciais utilizando cores distintas para grupos de potencial distintos, como também linhas equipotenciais em cores distintas para cada nível de potencial.

Além dos gráficos gerados, a rotina computacional também é capaz de calcular e externar, em forma de relatório, os potenciais de passo, no momento de um curto-circuito, apresentando as localizações e os respectivos valores dos potenciais de passo que ultrapassem um limite máximo preestabelecido. Sendo conservativo, o limite de segurança foi fixado em 75% do limite máximo do potencial de passo calculado a partir da equação 2.15.

Para que seja possível a apresentação do relatório com os potenciais de passo acima do limite estabelecido, a rotina realiza uma sequência de cálculos, dentre os quais se podem citar o cálculo da resistividade aparente do solo e o cálculo do potencial de passo máximo permitido para uma pessoa de 50 kg.

O cálculo da resistividade aparente do solo se dá conforme apresentado na seção 2.1.3 da revisão bibliográfica. Entretanto, para viabilizar a sua representação computacional, o conjunto de curvas apresentado na Figura 2.5 foi linearizado por partes e tratado na rotina computacional em 27 subintervalos, atribuindo-se assim um valor fixo de N a cada um dos subintervalos.

A estratificação do solo, nesta pesquisa, é realizada utilizando o TecAt Plus 5.2[®]. No cálculo da resistividade aparente, a rotina computacional realiza primeiramente o procedimento de redução das camadas estratificadas do solo em apenas

duas camadas equivalentes. A redução em duas camadas é obtida a partir da equação de *Hummel* dada pela Equação 2.3.

Após a obtenção das duas camadas equivalentes e das suas dimensões, a rotina calcula o coeficiente de penetração α , dado pela Equação 2.5. Para o cálculo do coeficiente de penetração também é necessário a utilização das dimensões da malha (área e a sua maior diagonal).

Utilizando os valores de resistividade das camadas equivalentes, a rotina calcula o coeficiente de divergência β , dado pela Equação 2.7. O coeficiente de divergência é determinado pela razão entre a resistividade da camada mais profunda e a resistividade da camada equivalente (reduzida).

Com os coeficientes de penetração e divergência calculados, a rotina computacional se utiliza dos 27 subintervalos criados a partir da linearização da Figura 2.5 para obter o fator N . A rotina computacional calcula a resistividade aparente através da Equação 2.9, multiplicando o valor do fator N pela resistividade da primeira camada equivalente do solo.

O potencial de passo máximo é obtido utilizando-se as Equações 2.13 e 2.15, apresentadas na seção 2.2.3 da revisão bibliográfica. Na equação 2.13, atribui-se a ρ o valor da resistividade aparente calculado e à resistividade superficial do solo ρ_s , é atribuído valor 3.000 Ω .m. Esta representa a resistividade da brita usada no pátio das subestações, e cuja espessura h_s foi adotada como sendo de 0,1 m. Na Equação 2.15, foi utilizado um valor de k igual a 0,116, correspondente a um indivíduo de 50 kg, e para a variável t foi utilizado um valor de 0,3 segundos.

3.7.1. Preenchimento dos Dados de Entrada da Rotina

- **Dimensões do terreno a ser simulado**

Para uma melhor representação gráfica dos níveis de potenciais na superfície do solo, torna-se necessário localizar a malha centralizada em um terreno bem mais amplo. As bordas do terreno amplo são consideradas o infinito, isto é, os locais onde o potencial de referencia é zero (condição de contorno). Na Figura 3.13 são mostradas a malha de terra e a sua localização no terreno.

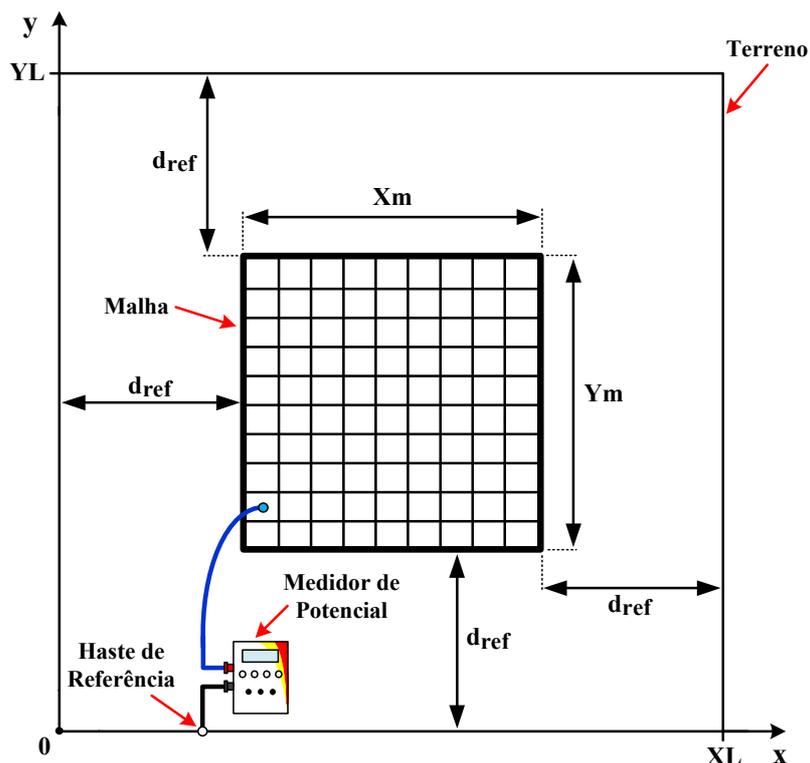


Figura 3.13 – Localização da malha no terreno amplo.

- **Comprimento total no eixo X:** É a distância entre a origem e o ponto XL .
- **Comprimento total no eixo Y:** É a distância entre a origem e o ponto YL .

- **Dimensões da malha de aterramento**

Os valores do comprimento (Xm) e da largura (Ym) da malha de terra serão utilizados nos cálculos da diagonal da malha e da sua área abrangida. Eles serão usados no cálculo do coeficiente de penetração α , que é necessário no cálculo do valor da resistividade aparente do solo.

- **Corrente no neutro do transformador**

A corrente no neutro do transformador é a corrente elétrica medida diretamente no neutro do transformador no instante das medições de potencial de superfície.

- **Corrente circulante na malha no momento de um curto-circuito**

Parcela da corrente de curto-circuito que contribui efetivamente para o surgimento de potenciais perigosos na superfície do solo, sendo assim, somente esta corrente deverá ser considerada nos cálculos dos potenciais de toque e de passo.

Em projetos de malhas de aterramento de subestação é comum atribuir-se um valor fixo de 50% da corrente de curto-circuito fase-terra para a corrente circulante na malha de terra no momento de um curto-circuito. Dessa forma, a rotina computacional desenvolvida terá a corrente circulante pela malha, no momento de um curto-circuito, fixada em 50% da corrente de curto-circuito fase-terra fornecida pela concessionária.

- **Dados da estratificação do solo**

Os dados da estratificação do solo, obtidos através do TecAt Plus 5.2[®], são fornecidos à rotina computacional e serão utilizados nos cálculos da resistividade aparente, conforme apresentado na seção 2.1.3 da revisão bibliográfica.

- **Potenciais de superfície medidos**

Os valores dos potenciais de superfície medidos, juntamente com suas respectivas coordenadas, serão utilizados pela rotina computacional para realizar o mapeamento completo dos potenciais de superfície no terreno, tanto para condições de regime permanente, como também realizar uma simulação para a ocorrência de um curto-circuito.

Para realizar uma simulação no momento de um curto-circuito, a rotina computacional realizará uma extrapolação linear simples dos valores de potencial de superfície medidos em campo. A extrapolação será obtida a partir da corrente de desequilíbrio medida no neutro do transformador e da corrente circulante na malha de terra calculada a partir da corrente de curto-circuito fase-terra fornecida pela concessionária. Na extrapolação apenas os valores dos potenciais serão alterados, mantendo-se inalteradas as coordenadas dos pontos.

A rotina computacional realizará o mapeamento dos potenciais de superfície através do MDF (solução iterativa), primeiramente para as condições de regime e em seguida para as condições de curto-circuito.

- **CrITÉrios de parada**

A rotina computacional utiliza dois critérios de parada para a realização do mapeamento dos potenciais de superfície através do MDF (solução iterativa):

- **Número de iterações:** Será utilizado um valor máximo de 2.000 iterações.
- **Erro Permitido:** Será utilizado o valor padrão de 0,01. A cada iteração realizada no mapeamento dos potenciais de superfície, a rotina

computacional realizará uma subtração de matrizes, entre a matriz da iteração atual e a matriz obtida na iteração anterior, gerando uma terceira matriz (matriz subtração). O módulo do maior valor presente na matriz subtração será comparado com o Erro Permitido, e enquanto o valor comparado for maior do que 0,01, uma nova iteração será executada.

Capítulo 4

RESULTADOS E ANÁLISE

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos em medições realizadas em subestações da Energisa-PB, como também os resultados obtidos a partir de simulações utilizando uma rotina computacional desenvolvida. Os resultados apresentados foram obtidos utilizando-se os métodos descritos no Capítulo 3 deste trabalho.

4.1. Caso 1 – SE Aroeiras

A SE Aroeiras é uma subestação recém-implantada em que foi possível acompanhar o seu processo de construção, desde a escolha do terreno onde ela seria construída, até que ela fosse posta em operação. Por este motivo, medições foram realizadas em três campanhas de medição distintas.

A primeira campanha de medição teve como objetivo medir a resistividade do solo no local onde a subestação seria construída. As medições foram realizadas dias após a escavação e compactação do solo.

A segunda campanha de medição teve como objetivo medir a resistência da malha de aterramento com a subestação desenergizada. As medições foram realizadas após a conclusão do processo de construção da subestação, e antes que ela fosse posta em operação.

Por fim, a terceira campanha de medição teve como objetivo medir a resistência da malha de aterramento com a subestação energizada, utilizando a técnica de medição proposta. A fim de validar a técnica de medição adotada, os resultados obtidos nesta etapa foram comparados com os obtidos na medição de resistência de malha de aterramento com a subestação desenergizada.

Na SE Aroeiras não foram realizadas medições de potenciais de toque e passo, como também medições de potenciais de superfície.

4.1.1. Medição de Resistividade do Solo

A medição de resistividade do solo na SE Aroeiras foi realizada seguindo o método de medição descrito na seção 3.1 deste trabalho, em que os pontos de medição foram dispostos em seis direções diferentes (*A*, *B*, *C*, *D*, *E* e *F*), conforme ilustrado na

Figura 4.1. No momento da medição, o solo apresentava-se seco, e não havia registro de chuvas nos quinze dias que antecederam a medição.

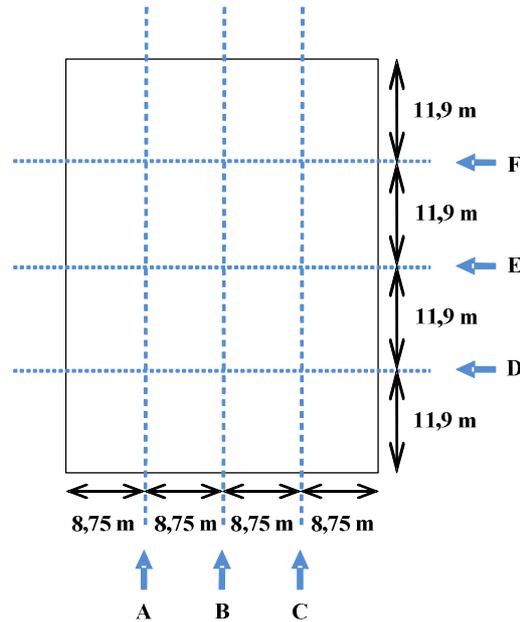
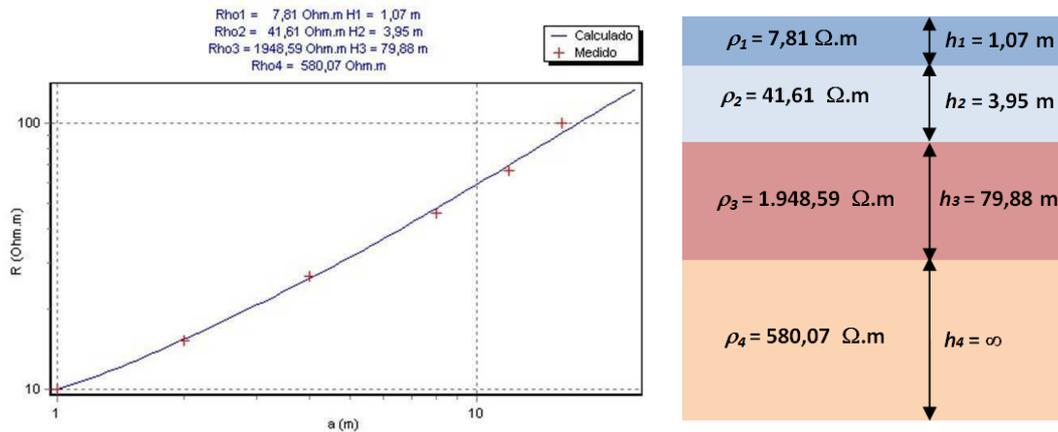


Figura 4.1 - Esquema da disposição dos pontos de medição de resistividade do solo na SE Aroeiras.

Na Tabela 4.1 estão apresentados os resultados obtidos na medição de resistividade do solo na SE Aroeiras. A partir dos dados de resistividade obtidos, utilizou-se o software TecAt Plus 5.2[®] para que fosse realizada a modelagem de estratificação do solo. Na Figura 4.2 é apresentado o resultado da estratificação do solo fornecida pelo TecAt Plus 5.2[®].

Tabela 4.1 – Valores de resistividade do solo obtidos na SE Aroeiras.

a (m)	Valores medidos ($\Omega.m$)						Média
	A	B	C	D	E	F	
1	10,39	9,71	9,05	8,97	9,13	8,86	9,35
2	18,11	14,67	12,32	15,28	13,95	15,23	14,93
4	32,35	25,76	23,98	21,69	24,45	29,51	26,29
8	52,78	45,64	50,42	37,20	37,30	51,92	45,88
12	-----	-----	-----	59,80	57,23	81,88	66,30
16	89,67	98,52	109,38	-----	-----	-----	99,19



(a) Curva de resistividade do solo em função do espaçamento entre as hastes

(b) Esboço do solo estratificado em quatro camadas

Figura 4.2 – Resultado da estratificação do solo fornecida pelo software TecAt Plus 5.2[®].

A estratificação realizada pelo TecAt Plus 5.2[®] demonstra que o solo é heterogêneo, formado por quatro camadas com resistividades e espessuras distintas. Os resultados fornecidos pelo software indicam a existência de baixíssimas resistividades para as duas primeiras camadas do solo, uma resistividade elevada para a terceira camada, e uma resistividade relativamente baixa para a quarta e última camada do solo estratificado.

Uma vez que a terceira camada do solo, com cerca de oitenta metros de espessura, apresenta uma resistividade elevada, e as duas primeiras camadas, com cerca de cinco metros de espessura, apresentam baixíssimas resistividades, pode-se concluir que as correntes elétricas presentes no solo escoarão em sua quase totalidade pelas duas primeiras camadas do solo, podendo acarretar situações de risco quando da ocorrência de um curto-circuito.

4.1.2. Medição de Resistência de Terra em Instalações Desenergizadas

A medição de resistência de terra na SE Aroeiras foi realizada, com a subestação desenergizada, seguindo o método de medição descrito na seção 3.4 deste trabalho. Entretanto, devido à falta de espaço físico disponível nos arredores da subestação, não foi possível posicionar o eletrodo auxiliar de corrente a uma distância correspondente a três vezes a maior diagonal da malha de aterramento, ou seja, a uma distância de aproximadamente 177 m, de maneira que o posicionamento do eletrodo se deu a apenas 100 m de distância da malha. No que diz respeito ao eletrodo auxiliar de potencial, ele

foi posicionado entre a malha de aterramento e o eletrodo de corrente, percorrendo a distância entre eles em intervalos regulares de 10 m.

Na Figura 4.3 está apresentada uma ilustração de como foi realizada a medição de resistência da malha de terra na SE Aroeiras desenergizada.

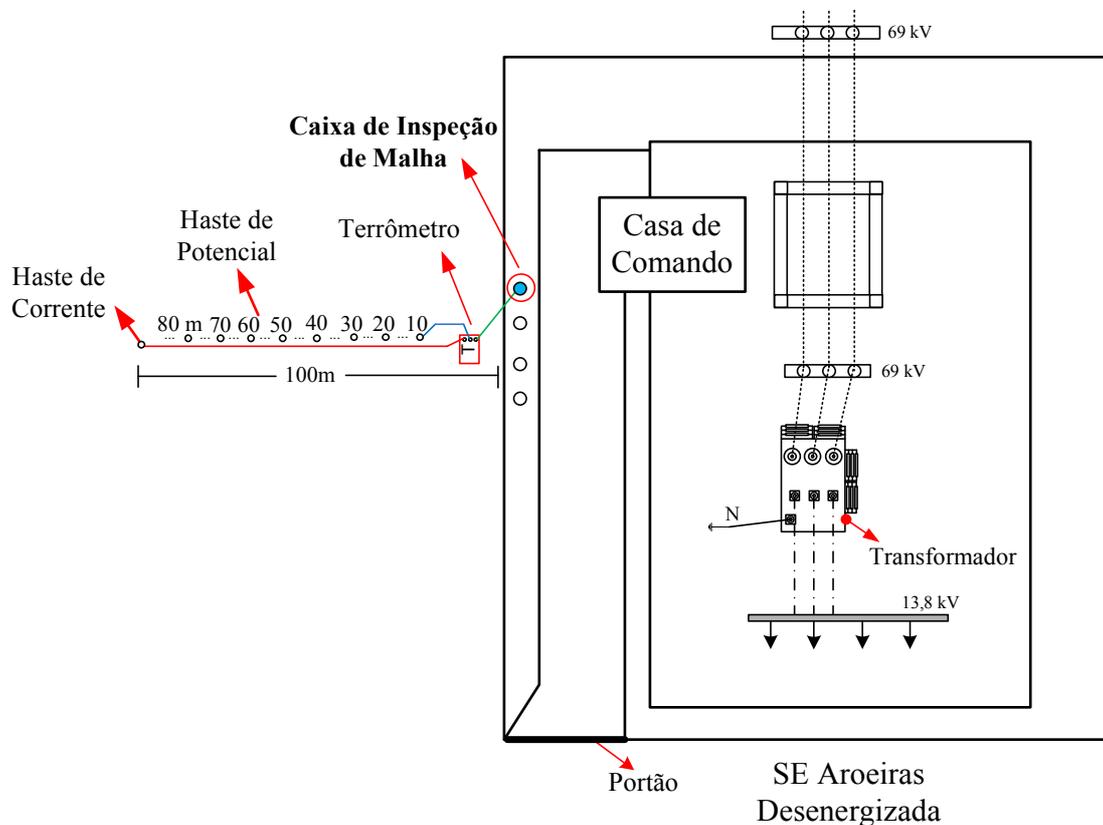


Figura 4.3 - Esquema de medição de resistência de malha de terra na SE Aroeiras desenergizada.

No momento da medição, o solo apresentava-se seco e não havia registro de ocorrência de chuvas nos quinze dias que antecederam a medição. Os valores obtidos na medição de resistência de malha de terra na SE Aroeiras são apresentados na Tabela 4.2, e a partir desses valores pôde-se desenhar a curva de resistência de terra em função da distância, conforme mostrado na Figura 4.4. Como o gráfico não apresentou visivelmente uma região de patamar, realizou-se o cálculo da média aritmética entre os valores de resistência obtidos no intervalo de 40 m a 70 m de distância, a fim de identificar a resistência da malha de terra. A partir da média aritmética calculada, concluiu-se que a resistência da malha é aproximadamente $2,12 \Omega$, caracterizando uma situação de baixa resistência, confirmando, assim, a eficiência e a implantação do projeto, o qual previa um valor de resistência de malha de terra não superior a $2,5 \Omega$.

Tabela 4.2 – Medição da resistência da malha de terra com SE Aroeiras desenergizada.

Distância (m)	Resistência (Ω)
10	1,29
20	1,57
30	1,74
40	1,88
50	2,03
60	2,19
70	2,39
80	2,65
90	2,97
100	28,90

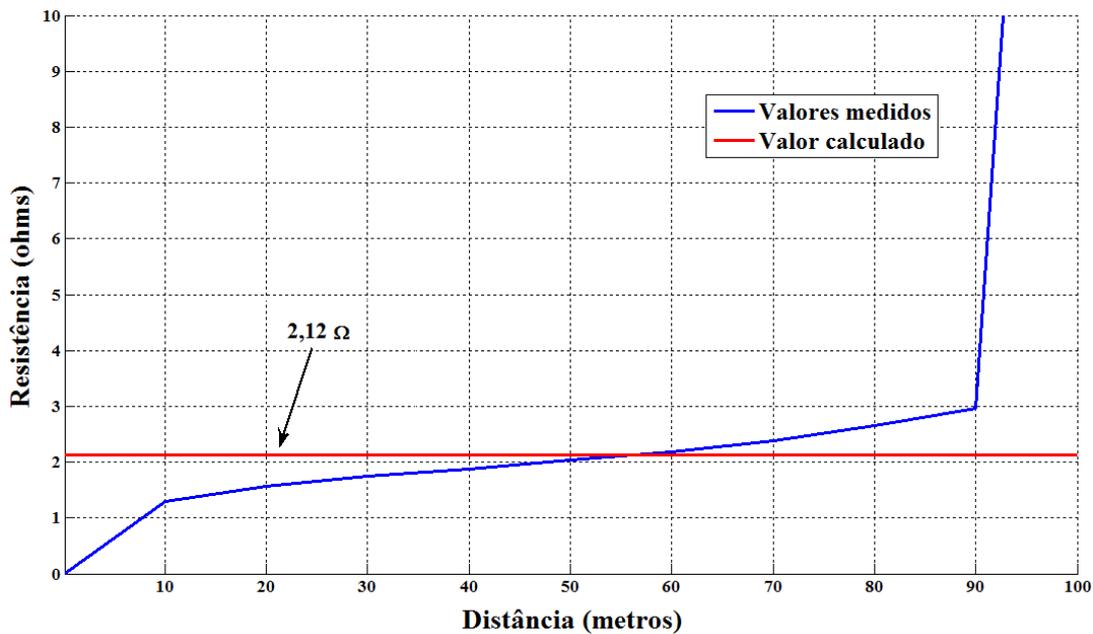


Figura 4.4 – Curva de resistência de terra versus distância para medições na SE Aroeiras desenergizada.

A partir do projeto da malha de terra e com o auxílio do TecAt Plus 5.2[®] foi possível simular a curva de resistência de terra para uma distância de mil metros entre a malha e o eletrodo auxiliar de corrente, como também calcular a resistência de terra teórica a partir da curva. A simulação foi realizada considerando condições ideais, tais como solo homogêneo e a malha de terra em perfeitas condições.

Na Figura 4.5 está ilustrada a curva de resistência de terra simulada pelo TecAt Plus 5.2[®], como também o valor da resistência teórica calculada pelo software, que foi de 1,69 Ω .

A partir da análise dos resultados obtidos, tanto na medição em campo quanto na simulação através do software TecAt Plus 5.2[®], pode-se concluir que a malha de aterramento da SE Aroeiras encontrava-se em excelentes condições, visto que os valores de resistência obtidos foram baixos e inferiores ao previsto em projeto.

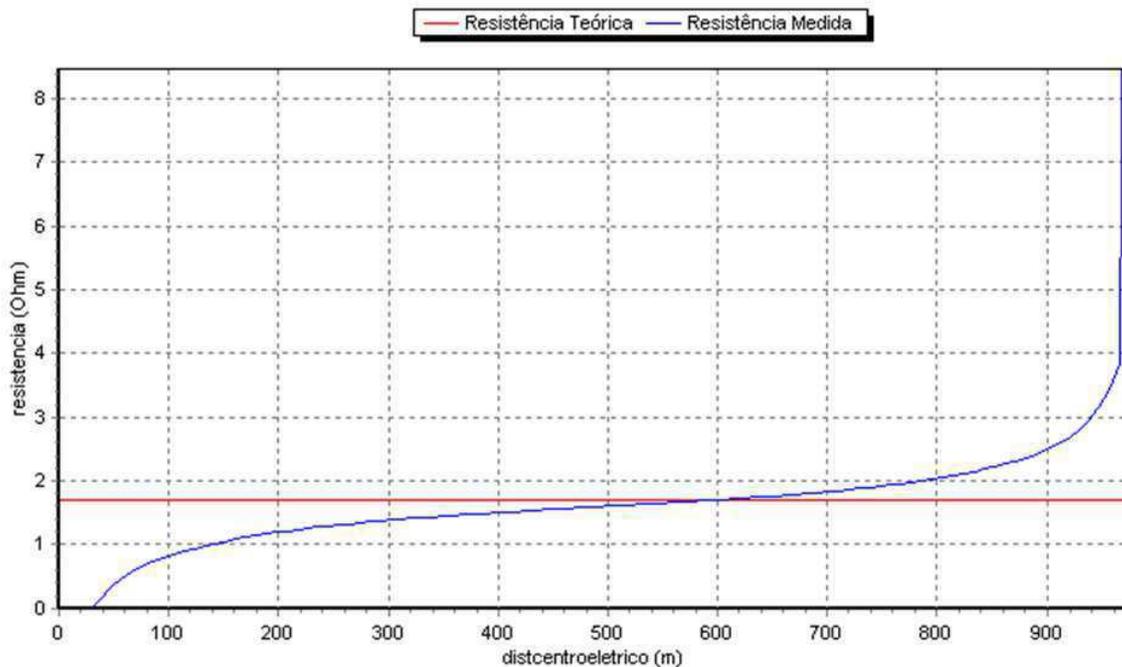


Figura 4.5 - Curva de resistência de terra versus distância obtida através de uma simulação pelo software TecAt Plus 5.2[®].

Uma justificativa para o valor obtido na medição em campo ter sido maior que o obtido na simulação está relacionado à resistividade das camadas estratificadas do solo. Na estratificação comprovou-se a existência de uma camada espessa do solo com elevada resistividade, o que dificulta o escoamento de correntes elétricas pelas camadas mais profundas e, conseqüentemente, afeta a resistência da malha de terra.

Comparando-se os resultados obtidos na medição em campo com os obtidos na simulação, pode-se concluir também que mesmo não havendo um espaço físico suficiente para posicionar o eletrodo auxiliar de corrente a uma distância correspondente a três vezes a maior diagonal da malha, os resultados obtidos foram relativamente aproximados. Isso pode ser comprovado comparando-se o comportamento das curvas apresentadas nas Figuras 4.4 e 4.5, como também pelo fato da resistência medida em campo ter ficado abaixo do valor previsto no projeto da malha.

A medição de resistência de terra para uma distância de apenas 100 m tornou-se possível de se realizar porque o terrômetro utilizado injeta correntes em várias frequências diferentes, dessa forma, quanto maior for a frequência da corrente injetada, menor será o comprimento de onda e, conseqüentemente, menor será a distância necessária para realizar a medição sem que haja superposição das zonas de influência.

Entretanto, no manual do terrômetro utilizado é sugerido que a distância total entre o eletrodo auxiliar de corrente e a malha de terra não seja inferior 80 m.

4.1.3. Medição de Resistência de Terra em Instalações Energizadas

A medição de resistência de terra na SE Aroeiras foi realizada, com a subestação energizada, seguindo o método de medição descrito na seção 3.5 deste trabalho.

No momento da medição, a corrente de desequilíbrio medida no neutro do transformador era de 12,8 A. Além disso, o solo apresentava-se seco e não havia registro de ocorrência de chuvas nos dias que antecederam a medição.

O esquema de medição de resistência de malha de terra utilizado nesta subestação encontra-se ilustrado na Figura 4.6.

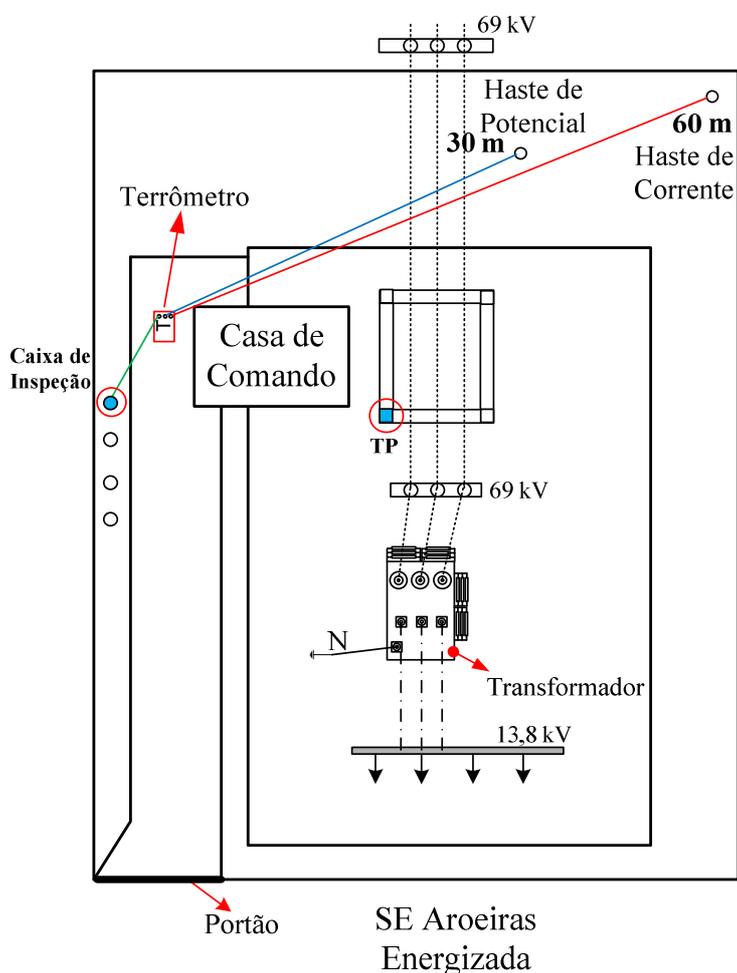


Figura 4.6 – Esquema de medição de resistência de malha de terra na SE Aroeiras energizada.

Uma vez que o neutro do transformador encontrava-se isolado, impossibilitando a medição de resistência de terra através do seu condutor, as medições na SE Aroeiras

ficaram restritas às caixas de inspeção de malha e ao aterramento de um dos transformadores de potencial (TP). Os resultados obtidos nas medições estão apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Valores de resistência de aterramento medidos com a subestação energizada.

Pontos de medição	Medição 1 (Ω)	Medição 2 (Ω)	Média (Ω)
Caixa de inspeção	1,21	1,25	1,23
TP	1,38	1,38	1,38

Conforme apresentado na Tabela 4.3 acima, os resultados das medições de resistência de malha de terra foram baixos e aproximados, confirmando, assim, a eficiência e a implantação do projeto, o qual previa um valor de resistência de malha de terra não superior a 2,5 Ω .

Realizando-se um comparativo entre as medições de resistência da malha de terra com a subestação desenergizada e energizada observa-se que após a sua energização a subestação apresentou valores de resistência inferiores, porém próximos, aos valores obtidos na medição com a subestação desenergizada. Tendo como referência a simulação realizada através do TecAt Plus 5.2[®], verifica-se que os valores obtidos na medição com a subestação energizada estão mais próximos do valor simulado do que os valores obtidos na medição com a subestação desenergizada. Os valores aproximados legitimam a técnica de medição de resistência de terra em instalações energizadas apresentada.

Os valores de resistência de aterramento obtidos na medição com a subestação energizada se apresentaram inferiores aos valores de resistência medidos com a subestação desenergizada e aos valores obtidos em simulação. Foi constatado que o solo não se apresentava tão seco quanto no dia da medição de resistência de terra com a subestação desenergizada.

4.2. Caso 2 – SE Patos

As medições realizadas na SE Patos ficaram restritas à medição de resistência de terra com a subestação energizada. Medições de resistividade do solo, potenciais de toque e passo, como também medições de potenciais de superfície não foram realizadas nesta subestação.

4.2.1. Medição de Resistência de Terra em Instalações Energizadas

A medição de resistência de terra na SE Patos foi realizada, com a subestação energizada, seguindo o método de medição descrito na seção 3.5 deste trabalho.

No momento da medição, a corrente de desequilíbrio medida no neutro do transformador era de 7,06 A. Além disso, o solo apresentava-se seco e não havia registro de ocorrência de chuvas nos dias que antecederam a medição.

O esquema de medição de resistência de terra utilizado na SE Patos encontra-se ilustrado na Figura 4.7.

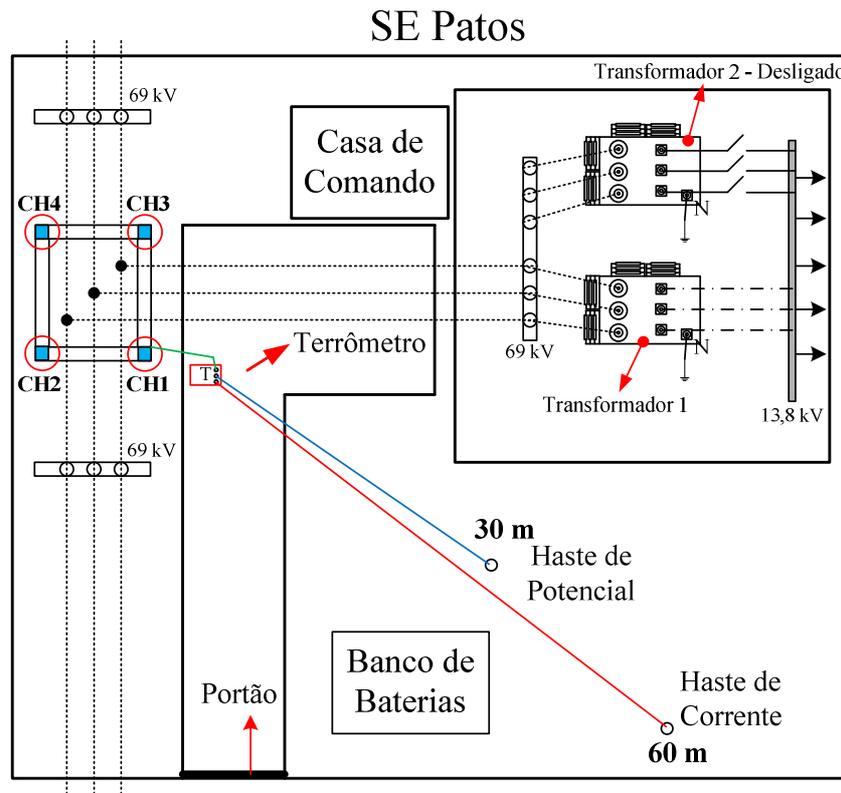


Figura 4.7 – Esquema de medição de resistência de malha de terra na SE Patos.

Pelo fato de a subestação não dispor de caixas de inspeção de malha, como também o neutro do transformador se apresentar isolado, as medições de resistência de terra ficaram restritas às chaves seccionadoras. Dessa forma, realizaram-se medições de resistência de terra nos cabos de aterramento de quatro chaves. Os resultados obtidos nas medições estão apresentados na Tabela 4.4.

De acordo com os dados apresentados na Tabela 4.4, as resistências medidas, no cabo de aterramento das chaves seccionadoras CH1, CH2 e CH4, apresentaram valores aproximados e abaixo de 5Ω , resistência máxima recomendada para malhas de terra de

subestações de distribuição. Por outro lado, a medição referente à chave seccionadora CH3 apresentou valor de resistência elevado caracterizando um possível problema de oxidação avançada ou problemas de contato na solda que une o aterramento da chave com a malha de terra.

Dessa maneira, conclui-se que os resultados das medições realizadas na chave seccionadora CH3 evidenciam a necessidade da ação de equipes de manutenção corretiva, a fim de identificar e solucionar o problema; comprovando, assim, a eficiência do método de medição.

Tabela 4.4 - Resistência de malha de terra através da conexão das chaves.

Chaves	Medição 1 (Ω)	Medição 2 (Ω)	Média (Ω)
CH1	1,15	1,15	1,15
CH2	1,17	1,16	1,17
CH3	209,49	210,33	209,91
CH4	1,16	1,15	1,16

4.3. Caso 3 – SE Jatobá

As medições realizadas na SE Jatobá ficaram restritas à medição de resistência de terra com a subestação energizada. Medições de resistividade do solo, potenciais de toque e passo, como também medições de potenciais de superfície não foram realizadas nesta subestação.

4.3.1. Medição de Resistência de Terra em Instalações Energizadas

A medição de resistência de terra na SE Jatobá foi realizada, com a subestação energizada, seguindo o método de medição descrito na seção 3.5 deste trabalho.

No momento da medição o solo apresentava-se um pouco úmido, referente a chuvas ocorridas cerca de uma semana antes da medição. O esquema de medição de resistência de terra utilizado está ilustrado na Figura 4.8. A medição da corrente de desequilíbrio não foi realizada, tendo em vista que o neutro do transformador encontrava-se sob difícil acesso.

Devido à subestação não dispor de caixas de inspeção de malha, como também à inviabilidade de se medir no neutro do transformador, as medições de resistência de terra ficaram restritas ao aterramento das chaves seccionadoras. Dessa forma, realizaram-se medições de resistência de terra nos cabos de aterramento de quatro chaves e os resultados obtidos nas medições estão apresentados na Tabela 4.5.

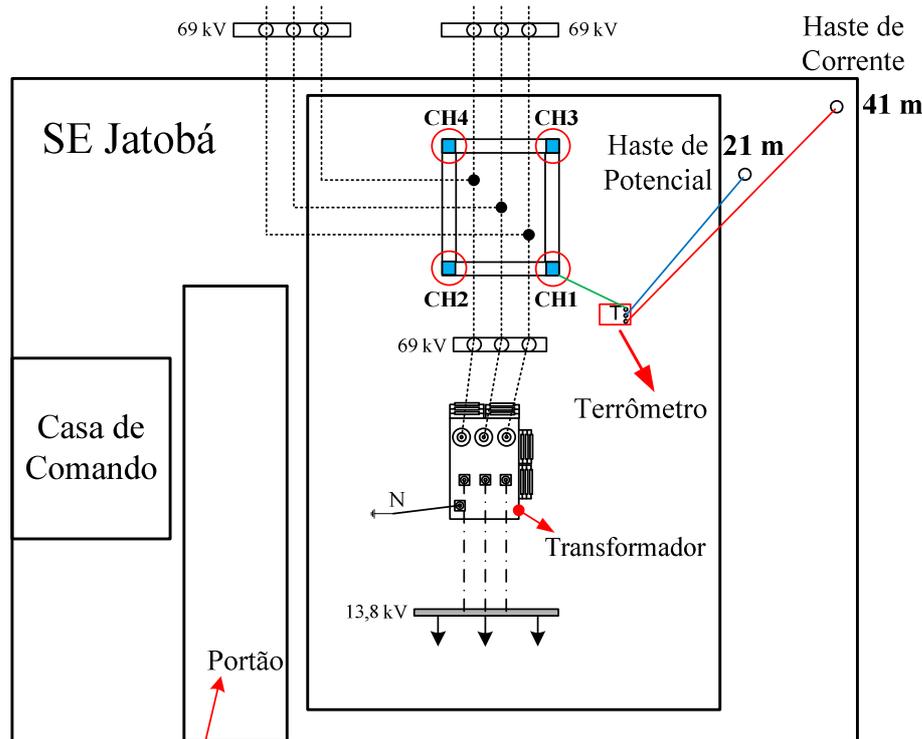


Figura 4.8 – Esquema de medição de resistência de malha de terra na SE Jatobá.

Tabela 4.5 - Resistência da malha de terra através da conexão das chaves.

Chaves	Medição 1 (Ω)	Medição 2 (Ω)	Média (Ω)
CH1	3,45	3,51	3,48
CH2	0,55	0,55	0,55
CH3	0,49	0,49	0,49
CH4	0,44	0,44	0,44

Conforme visto na Tabela 4.5, as medições referentes às chaves seccionadoras CH2, CH3 e CH4 apresentaram valores de resistência muito baixos e aproximados. A chave seccionadora CH1 apresentou valor um pouco mais elevado de resistência quando comparada com as demais, entretanto o valor encontra-se abaixo de 5Ω , resistência máxima recomendada para malhas de terra de subestações de distribuição. A partir dos valores obtidos nas medições, pode-se concluir que, aparentemente, a malha de terra da SE São Jatobá encontra-se em ótimo estado de conservação.

Os baixos valores de resistência obtidos na medição podem estar atrelados à distância de posicionamento dos eletrodos, um pouco inferior à recomendada pelo método de medição, como também ao fato do solo apresentar certa umidade no dia da medição.

4.4. Caso 4 – SE São Gonçalo

As medições na SE São Gonçalo ficaram restritas à medição de resistência de terra com a subestação energizada. Medições de resistividade do solo, potenciais de toque e passo, como também medições de potenciais de superfície não foram realizadas nesta subestação.

4.4.1. Medição de Resistência de Terra em Instalações Energizadas

A medição de resistência de terra na SE São Gonçalo foi realizada, com a subestação energizada, seguindo o método de medição descrito na seção 3.5 deste trabalho.

No momento da medição, a corrente de desequilíbrio medida no neutro do transformador era de 5,62 A e o solo apresentava-se um pouco úmido, referente a chuvas ocorridas cerca de uma semana antes da medição.

O esquema de medição de resistência de terra utilizado está ilustrado na Figura 4.9.

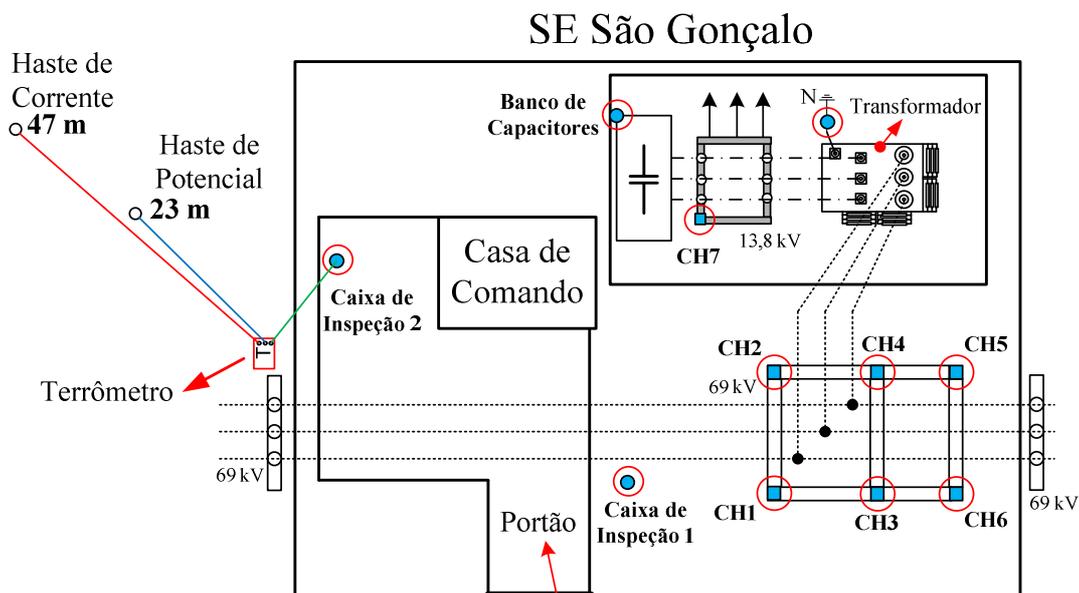


Figura 4.9 – Esquema de medição de resistência de malha de terra na SE São Gonçalo.

Na SE São Gonçalo foram realizadas medições de resistência de terra nos cabos de aterramento de sete chaves seccionadoras, no aterramento do banco de capacitores, no aterramento do transformador, além de medições de resistência de malha de terra

realizadas diretamente através de duas caixas de inspeção de malha. Os resultados encontrados nas medições encontram-se apresentados nas Tabelas 4.6 e 4.7.

Tabela 4.6 - Resistência da malha de terra através da conexão de equipamentos.

Pontos de medição	Medição 1 (Ω)	Medição 2 (Ω)	Média (Ω)
Chave CH1	1,07	1,03	1,05
Chave CH2	1,06	1,10	1,08
Chave CH3	1,03	1,06	1,05
Chave CH4	1,06	1,06	1,06
Chave CH5	1,11	1,06	1,09
Chave CH6	1,05	1,07	1,06
Chave CH7	1,07	1,07	1,07
Banco de capacitores	1,13	1,16	1,15
Aterramento do transformador	1,09	1,09	1,09

Tabela 4.7 - Resistência da malha de terra medida através das caixas de inspeção de malha.

Caixas de inspeção	Medição 1 (Ω)	Medição 2 (Ω)	Medição 3 (Ω)	Média (Ω)
Caixa 1	1,88	1,85	1,83	1,85
Caixa 2	1,15	1,16	1,19	1,17

Conforme apresentado nas Tabelas 4.6 e 4.7, os resultados das medições de resistência de malha de terra obtidos foram aproximados e abaixo do valor máximo recomendado para subestações de distribuição, 5 Ω . A partir dos valores obtidos nas medições, pode-se concluir que a malha de terra da SE São Gonçalo encontra-se em ótimo estado de conservação.

Os baixos valores de resistência obtidos na medição podem estar relacionados tanto ao fato de o solo apresentar certa umidade como também devido à distância de posicionamento dos eletrodos que foi um pouco inferior à recomendada pelo método de medição, uma vez que não havia espaço suficiente.

4.5. Caso 5 – SE Mataraca

Na SE Mataraca foram realizadas medições de resistividade do solo, medições de potenciais de toque e de passo, como também medições de resistência de malha de terra com a subestação energizada. Não foram realizadas medições de potenciais de superfície nesta subestação.

4.5.1. Medição de Resistividade do Solo

A medição de resistividade do solo na SE Mataraca foi realizada seguindo o método de medição descrito na seção 3.1 deste trabalho, em que os pontos de medição

foram dispostos em oito direções diferentes (A, B, C, D, E, F, G e H), conforme ilustrado na Figura 4.10.

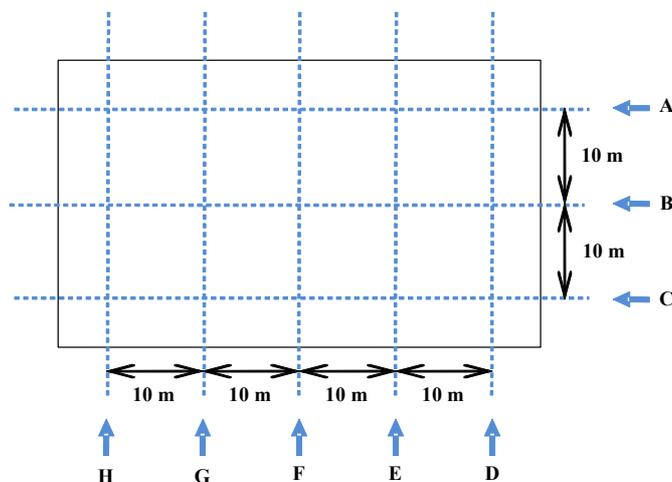


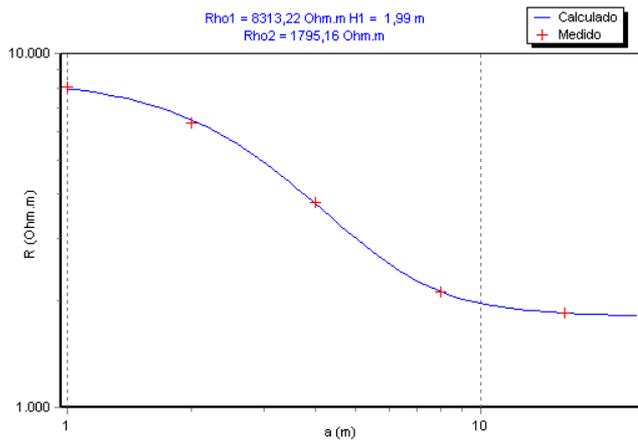
Figura 4.10 - Esquema da disposição dos pontos de medição de resistividade do solo na SE Mataraca.

Como a existência de massas metálicas no solo interfere nas medições de resistividade, provocando erros nos valores obtidos, optou-se pela realização das medições de resistividade do solo em um terreno ao lado da subestação. A escolha desse terreno foi válida posto que, além de estar suficientemente distante da malha de terra, o solo do terreno escolhido apresentava as mesmas características do solo encontrado no interior da SE Mataraca. No momento da medição o solo apresentava-se seco e não havia registro de chuvas nos dias que antecederam a medição.

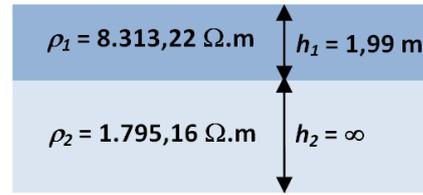
Na Tabela 4.8 estão apresentados os resultados obtidos na medição de resistividade do solo na SE Mataraca. A partir dos valores de resistividade obtidos, utilizou-se o software TecAt Plus 5.2[®] para que fosse realizada a modelagem de estratificação do solo. Na Figura 4.11 é apresentado o resultado da estratificação do solo fornecida pelo software, que modelou o solo em duas camadas com resistividades e espessuras distintas.

Tabela 4.8 – Valores de resistividade do solo obtidos na SE Mataraca.

a (m)	Valores medidos (Ω.m)								Média
	A	B	C	D	E	F	G	H	
1	7.474,8	9.097,4	6.690,4	1.1466,0	5.421,5	8.020,8	9.412,7	6.775,0	8.044,8
2	5.582,6	7.309,6	6.559,9	8.942,9	5.274,7	4.819,5	6.292,1	6.158,3	6.367,4
4	3.270,8	3.398,5	5.391,6	4.369,5	2.861,9	3.602,9	3.781,8	3.551,8	3.778,6
8	2.018,4	2.169,7	2.371,6	1.816,5	2.018,4	2.119,3	2.270,6	2.220,2	2.125,6
16	1.609,4	2.011,8	1.911,2	-----	-----	-----	-----	-----	1.844,1



(a) Curva de resistividade do solo em função do espaçamento entre as hastes



(b) Esboço do solo estratificado em duas camadas

Figura 4.11 – Resultado da estratificação do solo fornecida pelo software TecAt Plus 5.2[®].

A estratificação realizada pelo TecAt Plus 5.2[®] demonstra que o solo é heterogêneo e com elevada resistividade, apresentando características de um solo arenoso. A partir dos resultados obtidos na estratificação do solo, e sabendo-se que a resistividade do solo influi na resistência da malha, espera-se que os valores de resistência de terra, obtidos através de medições na subestação, sejam naturalmente elevados quando comparados com os valores obtidos nas medições de resistência de terra realizadas nos casos anteriormente apresentados.

4.5.2. Medição de Potencial de Toque

A medição de potencial de toque na SE Mataraca foi realizada seguindo o método de medição descrito na seção 3.2 deste trabalho, a fim de se verificar se os níveis de potencial encontrados estavam abaixo dos limites máximos estabelecidos em norma.

Na Tabela 4.9 estão apresentados os potenciais de toque máximos (potenciais de segurança) permitidos no interior da subestação, durante a ocorrência de um curto-circuito. Os potenciais de toque máximos foram calculados a partir das equações apresentadas na seção 2.2.3, adotando-se um tempo t de 0,3 segundos e atribuindo-se à resistividade do solo (ρ) o valor da resistividade aparente do solo (ρa). A resistividade aparente do solo foi calculada de acordo com o procedimento descrito na seção 2.1.3, e o seu valor foi de 5.403,60 $\Omega.m$.

Tabela 4.9 – Limites de potenciais de segurança na ocorrência de curto-circuito (Potencial de Toque).

Potencial de Toque	Massa média do indivíduo	
	50 kg	70 kg
	1.401,80 V	1.897,30 V

As medições de potencial de toque na SE Mataraca ficaram restritas à carcaça do transformador. Na Figura 4.12 estão apresentados os esquemas de medição adotados para duas configurações.

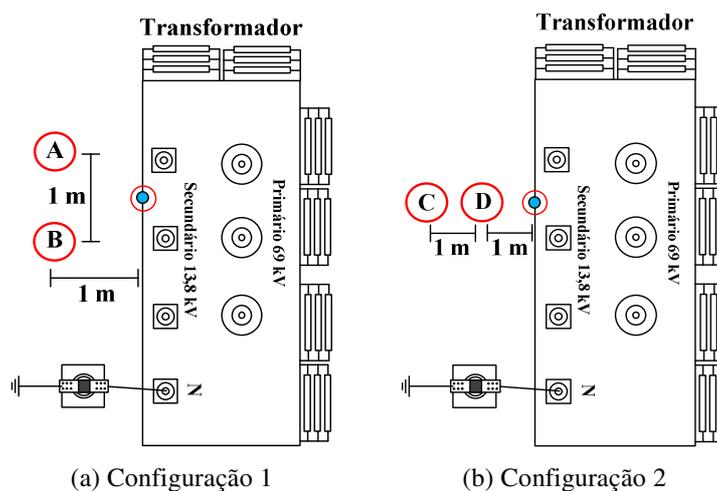


Figura 4.12 – Esquema de medição do potencial de toque na carcaça do transformador.

As medições de potencial de toque foram realizadas em duas configurações diferentes, tendo como referência uma corrente de desequilíbrio de 17,15 A, medida no neutro do transformador. No dia das medições, o solo apresentava-se relativamente úmido devido à ocorrência de chuvas cinco dias antes das medições. Os resultados obtidos na medição de potencial de toque, para as duas configurações, estão apresentados na Tabela 4.10.

Tabela 4.10 – Potenciais de toque no transformador da subestação.

Potenciais de toque	
Massas em A e B	24,0 mV
Massas em C e D	20,0 mV

O potencial de toque aproximado, no instante de curto-circuito, pode ser obtido através de uma extrapolação linear entre a corrente medida no neutro do transformador e a corrente circulante na malha de terra no momento do curto-circuito. Na Tabela 4.11 estão apresentados os valores de potencial de toque aproximado, no momento de um

curto-circuito, para uma corrente circulante na malha de 1,745 kA (valor fornecido pela concessionária).

Tabela 4.11 – Potenciais de toque no transformador da subestação no momento de curto-circuito.

Potenciais de toque no momento do curto-circuito	
Massas em A e B	2,44 V
Massas em C e D	2,04 V

Conforme apresentado na Tabela 4.11, no momento de um curto-circuito, os níveis dos potenciais de toque, entre a carcaça do transformador e o solo, apresentaram-se muito abaixo dos valores estabelecidos na Tabela 4.9, indicando que a conexão do cabo de aterramento do transformador com a malha de terra encontra-se em ótimo estado, ou seja, sem problemas de solda e sem a ocorrência de oxidação avançada. Uma justificativa para os baixos valores dos potenciais de toque obtidos está relacionada também à implantação da expansão da área da malha de terra e à umidade presente no solo, no dia da medição, devido à ocorrência de chuvas cinco dias antes das medições.

4.5.3. Medição de Potencial de Passo

A medição de potencial de passo na SE Mataraca foi realizada seguindo o método de medição descrito na seção 3.3 deste trabalho, a fim de se verificar se os níveis de potencial encontrados estavam abaixo dos limites máximos estabelecidos em norma.

Na Tabela 4.12 estão apresentados os potenciais de passo máximos (potenciais de segurança) permitidos no interior da subestação, durante a ocorrência de um curto-circuito. Os potenciais de passo máximos foram calculados a partir das equações apresentadas na seção 2.2.3, adotando-se um tempo t de 0,3 segundos e atribuindo-se à resistividade do solo (ρ) o valor da resistividade aparente do solo (ρ_a). A resistividade aparente do solo foi calculada de acordo com o procedimento descrito na seção 2.1.3, e o seu valor foi de 5.403,60 Ω .m.

Tabela 4.12 – Limites de potenciais de segurança na ocorrência de curto-circuito (Potencial de Passo).

Potencial de Passo	Massa média do indivíduo	
	50 kg	70 kg
	4.971,80 V	6.729,10 V

As medições de potencial de passo na SE Mataraca foram realizadas em sete pontos distintos localizados no interior e nas imediações da malha de aterramento da subestação. Na Figura 4.13 estão apresentados os pontos e os esquemas de medição de potencial de passo adotados.

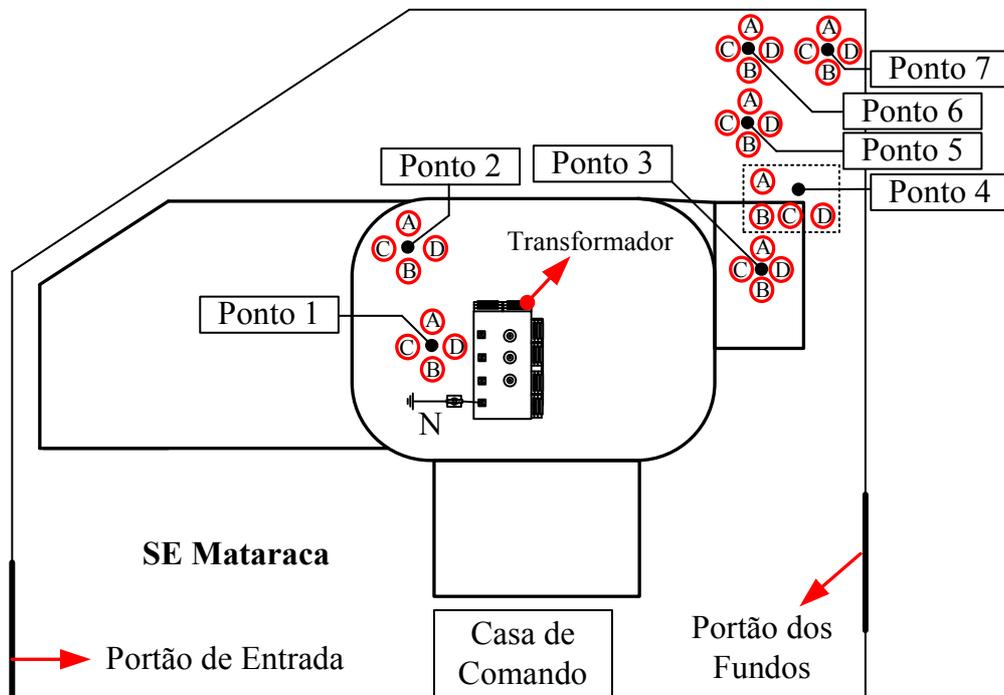


Figura 4.13 – Esquemas de medição do potencial de passo na SE Mataraca.

As medições de potencial de passo foram realizadas tendo como referência uma corrente de desequilíbrio de 17,15 A, medida no neutro do transformador. No dia das medições, o solo apresentava-se relativamente úmido devido à ocorrência de chuvas cinco dias antes das medições. Os resultados obtidos na medição de potencial de passo estão apresentados na Tabela 4.13.

O potencial de passo aproximado, no instante de curto-circuito, pode ser obtido através de uma extrapolação linear entre a corrente medida no neutro do transformador e a corrente circulante na malha de terra no momento do curto-circuito. Na Tabela 4.14 estão apresentados os valores de potencial de passo aproximado, no momento de um curto-circuito, para uma corrente circulante na malha de 1,745 kA (valor fornecido pela concessionária).

Tabela 4.13 – Potenciais de passo medidos na SE Mataraca.

Pontos	Posições das massas	Potenciais de passo (mV)
1	A e B	1,0
	C e D	5,0
2	A e B	24,0
	C e D	29,0
3	A e B	23,0
	C e D	39,0
4	A e B	29,0
	C e D	79,0
5	A e B	666,0
	C e D	133,0
6	A e B	674,0
	C e D	147,0
7	A e B	394,0
	C e D	162,0

Tabela 4.14 – Potenciais de passo na SE Mataraca no momento de curto-circuito.

Pontos	Posições das massas	Potenciais de passo
1	A e B	101,75 mV
	C e D	508,75 mV
2	A e B	2,44 V
	C e D	2,95 V
3	A e B	2,34 V
	C e D	3,97 V
4	A e B	2,95 V
	C e D	8,04 V
5	A e B	67,77 V
	C e D	13,53 V
6	A e B	68,58 V
	C e D	14,96 V
7	A e B	40,09 V
	C e D	16,48 V

Conforme apresentado na Tabela 4.14, no momento de um curto-circuito, os níveis dos potenciais de passo apresentaram-se muito abaixo dos valores estabelecidos na Tabela 4.12. Uma justificativa plausível para os baixos valores dos potenciais de passo obtidos está relacionada à implantação da expansão da área da malha de terra e à umidade presente no solo, no dia da medição, devido à ocorrência de chuvas cinco dias antes das medições.

Para se obter um panorama mais exato dos potenciais de passo no interior e nas imediações da malha seria necessário um número maior de medições realizadas em todo espaço físico de interesse. Entretanto, a realização dessas medições requereria muito tempo e esforço físico, e por esse motivo, apenas algumas regiões de interesse foram selecionadas.

4.5.4. Medição de Resistência de Terra em Instalações Energizadas

A medição de resistência de terra na SE Mataraca foi realizada, com a subestação energizada, seguindo o método de medição descrito na seção 3.5 deste trabalho.

No momento da medição, a corrente de desequilíbrio medida no neutro do transformador era de 20,2 A e o solo apresentava-se úmido, referente a chuvas ocorridas cerca de cinco dias antes da medição. O esquema de medição de resistência de terra utilizado está ilustrado na Figura 4.14.

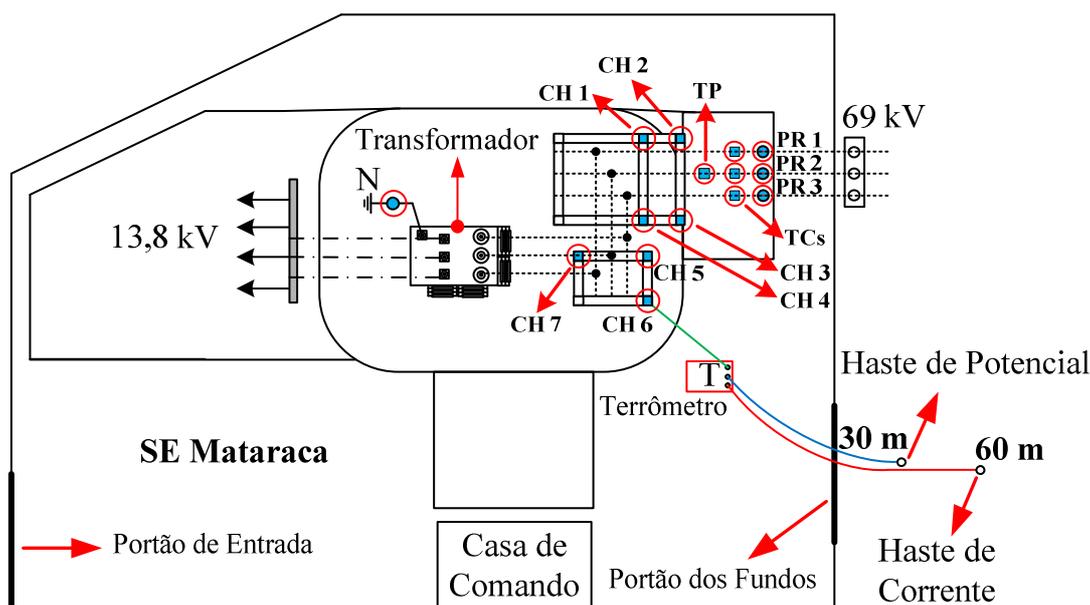


Figura 4.14 – Esquema de medição de resistência de malha de terra na SE Mataraca.

Na SE Mataraca foram realizadas medições de resistência de terra nos cabos de aterramento de alguns equipamentos existentes na subestação. As medições foram realizadas em três para-raios, um TP, três TC, sete chaves seccionadoras e no aterramento do transformador. A subestação dispunha de caixas de inspeção de malha, entretanto, devido a dificuldades impostas ao posicionamento da pinça amperimétrica, não foram realizadas medições de resistência de terra nas caixas de inspeção.

Os resultados obtidos nas medições de resistência de terra na SE Mataraca encontram-se apresentados na Tabela 4.15.

Tabela 4.15- Resistência da malha de terra medida em vários pontos.

Pontos de medição	Medição 1 (Ω)	Medição 2 (Ω)	Média (Ω)
Para-raios PR1	12,03	12,09	12,06
Para-raios PR2	11,78	11,76	11,77
Para-raios PR3	11,48	11,48	11,48
TP	12,29	12,21	12,25
TC1	13,79	13,85	13,82
TC2	13,05	13,05	13,05
TC3	11,93	11,93	11,93
Chave CH1	11,67	11,53	11,60
Chave CH2	16,72	16,80	16,76
Chave CH3	14,65	14,61	14,63
Chave CH4	11,93	11,93	11,93
Chave CH5	11,66	11,64	11,65
Chave CH6	11,60	11,60	11,60
Chave CH7	10,81	10,85	10,83
Aterramento do transformador	4,35	3,98	4,17

Conforme apresentado na Tabela 4.15, os resultados obtidos nas medições realizadas nos aterramentos dos para-raios, do TP, dos TC e das chaves seccionadoras, apresentaram-se superiores ao valor de resistência de malha de terra recomendado para subestações de distribuição, 5 Ω .

Entretanto, os resultados obtidos nas medições realizadas no aterramento do transformador apresentaram-se inferiores a valor recomendado para subestações de distribuição, o que nos leva a concluir que a conexão do aterramento do transformador com a malha de terra encontrava-se em melhores condições que as conexões dos aterramentos dos demais equipamentos com a malha. Os valores elevados da resistência obtidos nas medições nos para-raios, no TP, nos TC e nas chaves seccionadoras podem estar relacionados, por exemplo, a pequenos problemas de solda ou início de oxidação nas conexões desses equipamentos com a malha de terra.

Por mais que as conexões entre os equipamentos e a malha de terra na SE Mataraca estivessem em perfeito estado, valores de resistência relativamente elevados já eram esperados, devido à resistividade do solo, no local onde se encontra a subestação, ser muito elevada. Os resultados obtidos nas medições de resistência de terra não foram maiores, provavelmente, devido à umidade presente no solo, a qual facilita o escoamento da corrente elétrica, diminuindo a resistividade do solo e, conseqüentemente, diminuindo também a resistência de terra.

Na SE Mataraca não foram realizadas medições de resistência de terra com a subestação desenergizada, uma vez que não havia nenhum desligamento agendado pela concessionária para esta subestação. Porém, medições de resistência de terra com a

subestação desenergizada, outrora realizadas por uma equipe de profissionais da concessionária, demonstraram que a resistência de terra da malha da SE Mataraca apresentava-se em torno de 11Ω , aproximadamente. No processo de medição o eletrodo de corrente foi posicionado a uma distância de 300 m da malha (distância pouco superior a três vezes a maior diagonal da malha) e o eletrodo de potencial foi posicionado a uma distância correspondente a cerca de 62% da distância entre a malha e o eletrodo de corrente. Na realização das medições foi utilizado um equipamento de medição pertencente a terceiros.

No dia da medição realizada o solo apresentava-se úmido decorrente de chuvas ocorridas cerca de uma semana antes da medição, assemelhando-se às condições climáticas e geológicas das medições realizadas e apresentadas neste trabalho. Dessa maneira, comparando-se os resultados obtidos na medição de resistência de terra para a subestação energizada e desenergizada, verifica-se a proximidade dos valores obtidos, legitimando a técnica de medição de resistência de terra em instalações energizadas, apresentada neste trabalho.

Outro parâmetro de comparação para a validação da técnica apresentada é o valor da resistência de terra teórica simulada pelo software TecAt Plus 5.2[®]. A simulação foi realizada com base no projeto da malha de terra e nos valores obtidos na medição de resistividade do solo, e o valor simulado para a resistência de terra teórica foi de aproximadamente 17Ω . Uma justificativa plausível para os resultados obtidos nas medições terem sido abaixo do valor simulado está, provavelmente, associada ao fato do solo se apresentar úmido no dia das medições.

4.6. Caso 6 – SE Alto Branco

Na SE Alto Branco foram realizadas medições de potenciais de toque e de passo, medições de resistência de malha de terra com a subestação energizada e medições de potenciais de superfície. Os valores obtidos na medição de potenciais de superfície serão tratados e analisados em uma rotina computacional desenvolvida.

Medições de resistência de terra, com a subestação desenergizada, não foram realizadas, uma vez que não havia nenhum desligamento agendado pela concessionária para esta subestação. Também não foi realizada a medição de resistividade do solo, posto que o único terreno disponível nos arredores da subestação apresentava características geológicas diferentes das características do terreno onde a subestação

está instalada. Entretanto, baseando-se no projeto da malha de terra, e a fim de se modelar a estratificação do solo utilizando o software TecAt Plus 5.2[®], serão utilizados os dados da medição de resistividade do solo, realizada por uma equipe de profissionais da concessionária, antes da construção da subestação.

4.6.1. Medição de Resistividade do Solo

A medição de resistividade do solo na SE Alto Branco foi realizada, por uma equipe de profissionais da concessionária, seguindo o mesmo método de medição descrito na seção 3.1 deste trabalho. Entretanto, na realização da medição foi utilizado um equipamento de medição pertencente à concessionária, diferentemente do equipamento utilizado nas medições realizadas pela equipe da UFCG.

Segundo informações contidas no projeto da malha de terra, no momento da medição o solo apresentava-se seco, e os pontos de medição foram dispostos em cinco direções diferentes (*A*, *B*, *C*, *D* e *E*), conforme ilustrado na Figura 4.15.

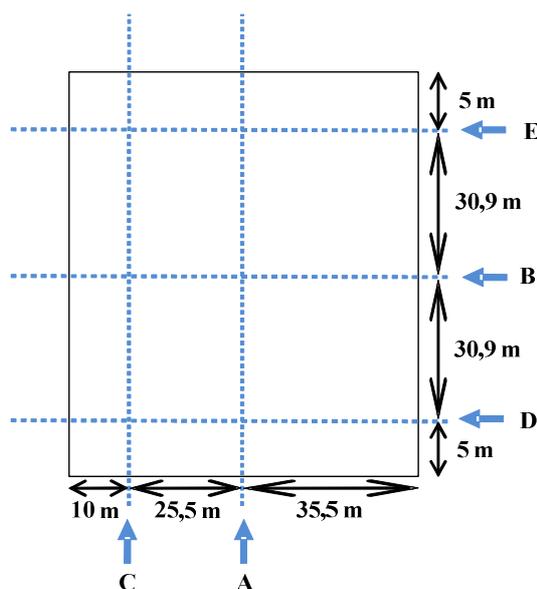
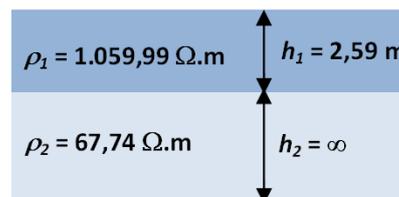
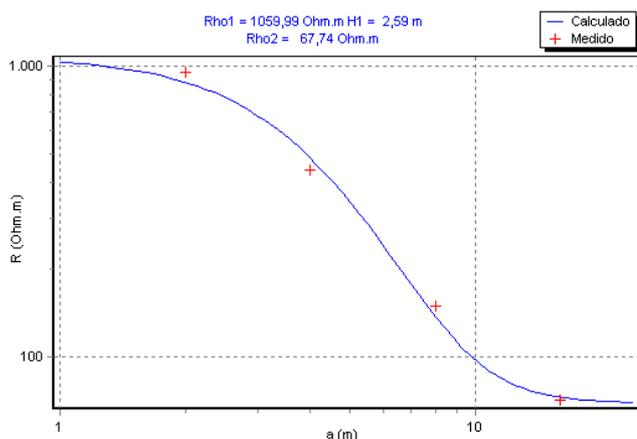


Figura 4.15 - Esquema da disposição dos pontos de medição de resistividade do solo na SE Alto Branco.

Na Tabela 4.16 estão apresentados os resultados obtidos na medição de resistividade do solo na SE Alto Branco. A partir dos valores de resistividade obtidos, utilizou-se o software TecAt Plus 5.2[®] para que fosse realizada a modelagem de estratificação do solo. Na Figura 4.16 é apresentado o resultado da estratificação fornecida pelo software, que modelou o solo em duas camadas com resistividades e espessuras distintas.

Tabela 4.16 – Valores de resistividade do solo obtidos pela concessionária na SE Alto Branco.

a (m)	Valores medidos ($\Omega.m$)					Média
	A	B	C	D	E	
2	954,56	489,84	942	1356,48	992,24	947,02
4	351,68	276,62	351,68	904,32	778,72	532,60
8	140,67	20,10	135,65	175,84	140,67	122,59
16	70,34	50,24	60,23	160,77	100,48	88,41



(a) Curva de resistividade do solo em função do espaçamento entre as hastes

(b) Esboço do solo estratificado em duas camadas

Figura 4.16 – Resultado da estratificação do solo fornecida pelo software TecAt Plus 5.2[®].

A estratificação realizada pelo TecAt Plus 5.2[®] demonstra que o solo é heterogêneo e com elevada resistividade na primeira camada. Entretanto, como a primeira camada do solo não é tão espessa e a segunda camada apresenta uma resistividade muito baixa, pode-se concluir que se trata de um solo que não impõe grandes dificuldades ao escoamento das correntes. Desse modo, espera-se que os valores de resistência de terra, obtidos através de medições na subestação, sejam relativamente baixos.

Os resultados fornecidos pelo TecAt Plus 5.2[®], para a estratificação de solo na SE Alto Branco, serão utilizados como parte de um conjunto de dados de entrada de uma rotina computacional, a qual é capaz de mapear os potenciais na superfície do solo, dentro e fora dos limites da malha de aterramento.

4.6.2. Medição de Potencial de Toque

A medição de potencial de toque na SE Alto Branco foi realizada seguindo o método de medição descrito na seção 3.2 deste trabalho, a fim de se verificar se os níveis de potencial encontrados estavam abaixo dos limites máximos estabelecidos em norma.

Na Tabela 4.17 estão apresentados os potenciais de toque máximos (potenciais de segurança) permitidos no interior da subestação, durante a ocorrência de um curto-circuito. Os potenciais de toque máximos foram calculados a partir das equações apresentadas na seção 2.2.3, adotando-se um tempo t de 0,3 segundos e atribuindo-se à resistividade do solo (ρ) o valor da resistividade aparente do solo (ρ_a). A resistividade aparente do solo foi calculada de acordo com o procedimento descrito na seção 2.1.3, e o seu valor foi de 530,0 Ω .m.

Tabela 4.17 – Limites de potenciais de segurança na ocorrência de curto-circuito (Potencial de Toque).

Potencial de Toque	Massa média do indivíduo	
	50 kg	70 kg
	921,31 V	1.246,90 V

As medições de potencial de toque na SE Alto Branco ficaram restritas à carcaça do transformador energizado. Havia dois transformadores na subestação, entretanto, apenas um deles se encontrava energizado. Na Figura 4.17 estão apresentados os esquemas de medição adotados para duas configurações distintas.

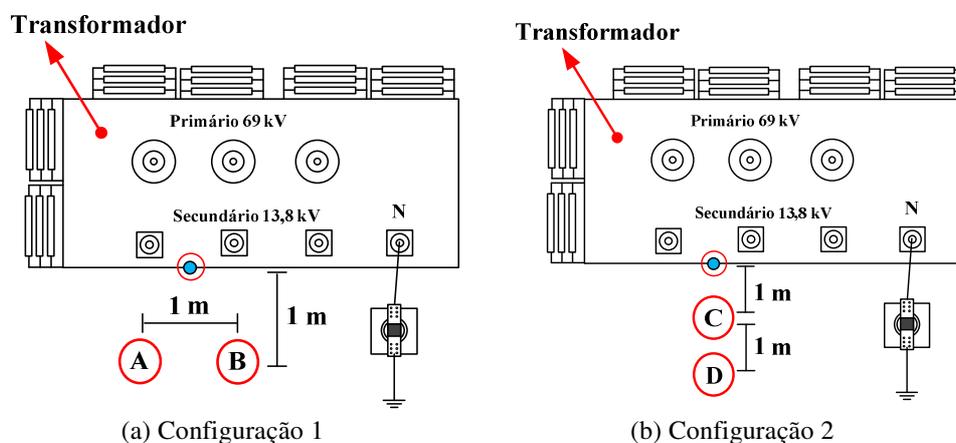


Figura 4.17 – Esquema de medição do potencial de toque na carcaça do transformador.

As medições de potencial de toque foram realizadas em duas configurações diferentes, tendo como referência uma corrente de desequilíbrio de 4,46 A, medida no neutro do transformador. No dia das medições, o solo apresentava-se seco e não havia registro de ocorrência de chuvas nos dias que antecederam a medição. Os resultados obtidos na medição de potencial de toque, para as duas configurações, estão apresentados na Tabela 4.18.

Tabela 4.18 – Potenciais de toque no transformador da subestação.

Potenciais de toque	
Massas em A e B	88,70 mV
Massas em C e D	58,40 mV

O potencial de toque aproximado, no instante de curto-circuito, pode ser obtido através de uma extrapolação linear entre a corrente medida no neutro do transformador e a corrente circulante na malha de terra no momento do curto-circuito. Na Tabela 4.19 estão apresentados os valores de potencial de toque aproximado, no momento de um curto-circuito, para uma corrente circulante na malha de 4,866 kA (valor fornecido pela concessionária).

Tabela 4.19 – Potenciais de toque no transformador da subestação no momento de curto-circuito.

Potenciais de toque no momento do curto-circuito	
Massas em A e B	96,77 V
Massas em C e D	63,72 V

Conforme apresentado na Tabela 4.19, no momento de um curto-circuito, os níveis dos potenciais de toque, entre a carcaça do transformador e o solo, apresentaram-se muito abaixo dos valores estabelecidos na Tabela 4.17, indicando que a conexão do cabo de aterramento do transformador com a malha de terra encontra-se, aparentemente, em ótimo estado, ou seja, sem problemas de solda e sem a ocorrência de oxidação avançada.

4.6.3. Medição de Potencial de Passo

A medição de potencial de passo na SE Alto Branco foi realizada seguindo o método de medição descrito na seção 3.3 deste trabalho, a fim de se verificar se os níveis de potencial encontrados estavam abaixo dos limites máximos estabelecidos em norma.

Na Tabela 4.20 estão apresentados os potenciais de passo máximos (potenciais de segurança) permitidos no interior da subestação, durante a ocorrência de um curto-circuito. Os potenciais de passo máximos foram calculados a partir das equações apresentadas na seção 2.2.3, adotando-se um tempo t de 0,3 segundos e atribuindo-se à resistividade do solo (ρ) o valor da resistividade aparente do solo (ρ_a). A resistividade aparente do solo foi calculada de acordo com o procedimento descrito na seção 2.1.3, e o seu valor foi de 530,0 Ω .m.

Tabela 4.20 – Limites de potenciais de segurança na ocorrência de curto-circuito (Potencial de Passo).

Potencial de Passo	Massa média do indivíduo	
	50 kg	70 kg
	3.049,90 V	4.127,80 V

As medições de potencial de passo na SE Alto Branco foram realizadas em cinco pontos de medição tanto no interior como nas imediações da malha de aterramento da subestação. Na Figura 4.18 estão apresentados os pontos e os esquemas de medição de potencial de passo adotados.

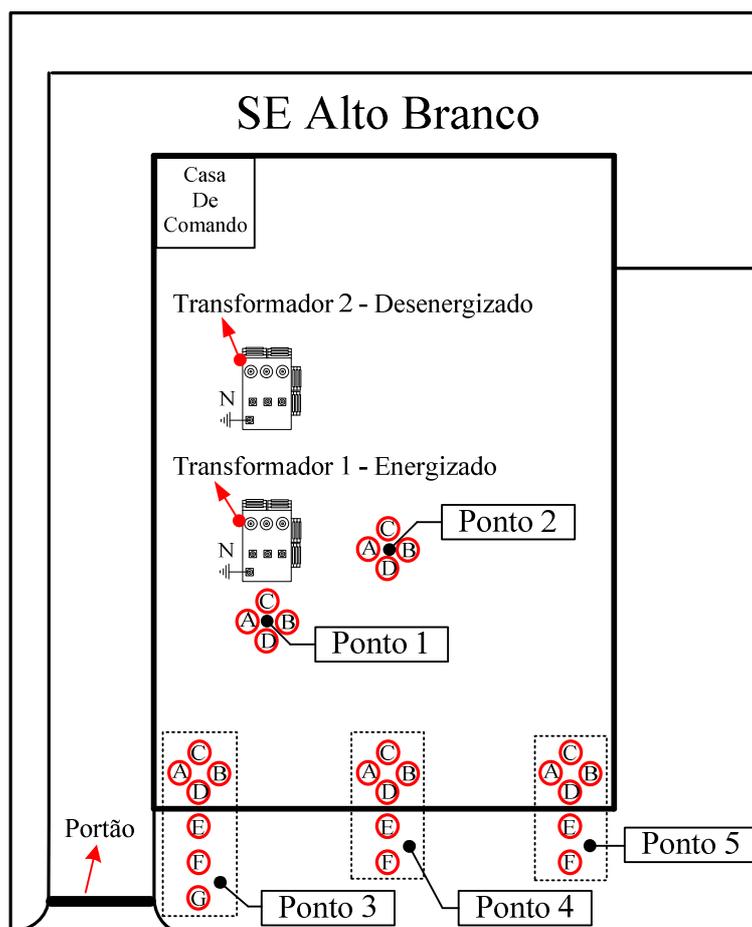


Figura 4.18 – Esquemas de medição do potencial de passo na SE Alto Branco.

As medições de potencial de passo foram realizadas tendo como referência uma corrente de desequilíbrio de 4,46 A, medida no neutro do transformador. No dia das medições, o solo apresentava-se seco e não havia registro de ocorrência de chuvas nos dias que antecederam a medição. Os resultados obtidos na medição de potencial de passo estão apresentados na Tabela 4.21.

Tabela 4.21 – Potenciais de passo medidos na SE Alto Branco.

Pontos	Posições das massas	Potenciais de passo (mV)
1	A e B	1,90
	C e D	1,40
2	A e B	3,50
	C e D	5,60
3	A e B	0,10
	C e D	2,30
	D e E	14,50
	E e F	16,70
4	A e B	23,50
	C e D	1,80
	D e E	4,90
	E e F	15,00
5	A e B	27,50
	C e D	0,10
	D e E	0,50
	E e F	6,20
		9,00

O potencial de passo aproximado, no instante de curto-circuito, pode ser obtido através de uma extrapolação linear entre a corrente medida no neutro do transformador e a corrente circulante na malha de terra no momento do curto-circuito. Na Tabela 4.22 estão apresentados os valores de potencial de passo aproximado, no momento de um curto-circuito, para uma corrente circulante na malha de 4,866 kA (valor fornecido pela concessionária).

Tabela 4.22 – Potenciais de passo na SE Alto Branco no momento de um curto-circuito.

Pontos	Posições das massas	Potenciais de passo (V)
1	A e B	2,07
	C e D	1,53
2	A e B	3,82
	C e D	6,11
3	A e B	0,11
	C e D	2,51
	D e E	15,82
	E e F	18,22
4	A e B	25,64
	C e D	1,96
	D e E	5,35
	E e F	16,37
5	A e B	30,00
	C e D	0,11
	D e E	0,55
	E e F	6,76
		9,82

Conforme apresentado na Tabela 4.22, no momento de um curto-circuito, os níveis dos potenciais de passo apresentaram-se muito abaixo dos valores máximos estabelecidos na Tabela 4.20, indicando que a malha de aterramento encontra-se em ótimo estado de conservação nas regiões onde foram feitas as medições.

Para se obter um panorama mais preciso dos potenciais de passo no interior e nas imediações da malha seria necessário um número maior de medições realizadas em todo espaço físico de interesse. Entretanto, a sua realização requereria muito tempo e esforço físico, e por este motivo, apenas algumas regiões de interesse foram selecionadas.

4.6.4. Medição de Resistência de Terra em Instalações Energizadas

A medição de resistência de terra na SE Alto Branco foi realizada, com a subestação energizada, seguindo o método de medição descrito na seção 3.5 deste trabalho.

No momento da medição, a corrente de desequilíbrio medida no neutro do transformador era de 4,46 A. Além disso, o solo apresentava-se seco e não havia registro de ocorrência de chuvas nos dias que antecederam a medição. O esquema de medição de resistência de terra utilizado está ilustrado na Figura 4.19.

Na SE Alto Branco foram realizadas medições de resistência de terra nos cabos de aterramento de alguns equipamentos existentes na subestação, como também medições realizadas diretamente em caixas de inspeção de malha. As medições foram realizadas nos aterramentos de dois disjuntores, de duas chaves seccionadoras, no aterramento do transformador e em duas caixas de inspeção de malha. Os resultados obtidos nas medições encontram-se apresentados na Tabela 4.23.

Conforme apresentado na Tabela 4.23, os resultados das medições de resistência de malha de terra obtidos foram baixos e relativamente aproximados. Com exceção do resultado obtido na medição realizada na segunda caixa de inspeção, todos os outros valores se apresentaram abaixo do valor de resistência de terra máxima recomendada para subestações de distribuição, 5 Ω .

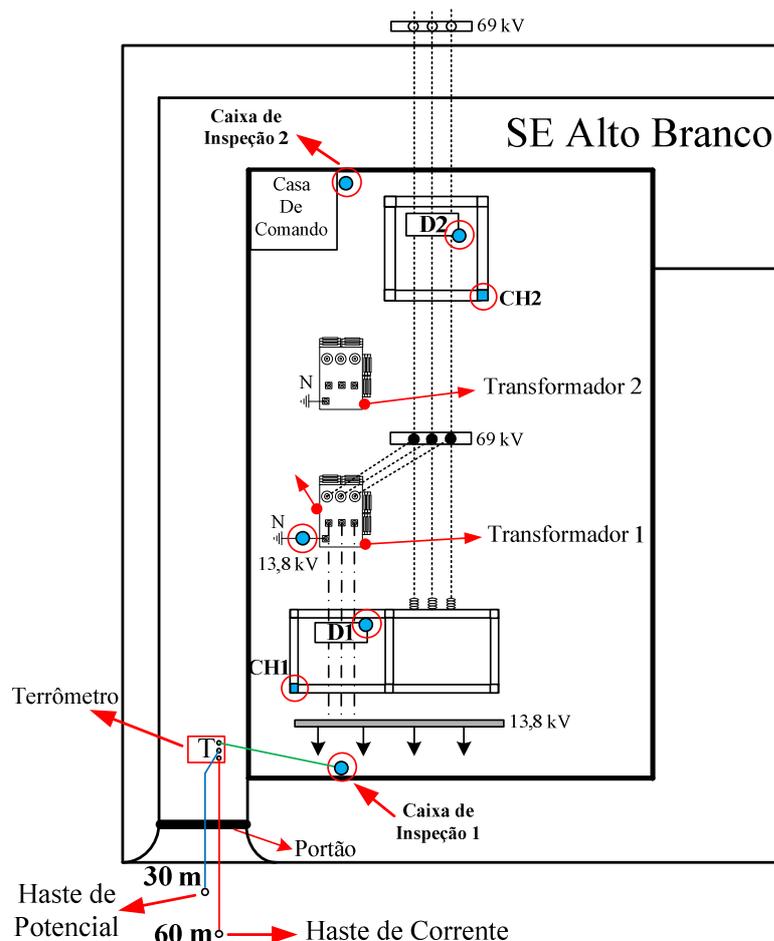


Figura 4.19 – Esquema de medição de resistência de malha de terra na SE Alto Branco.

Tabela 4.23- Resistência da malha de terra medida em vários pontos.

Pontos de medição	Medição 1 (Ω)	Medição 2 (Ω)	Média (Ω)
Caixa de inspeção 1	2,36	2,54	2,45
Caixa de inspeção 2	5,38	5,26	5,32
Disjuntor D1	1,47	1,47	1,47
Disjuntor D2	2,71	2,83	2,77
Chave CH1	2,25	2,05	2,10
Chave CH2	2,20	2,26	2,23
Aterramento do transformador	1,87	1,87	1,87

A constatação de uma resistência de terra mais elevada, na segunda caixa de inspeção, evidencia que a malha de terra apresenta possíveis problemas de solda ou início de oxidação de seus condutores nesta região, ou que a resistividade do solo nesta região da subestação encontra-se mais elevada do que em outras; comprovando novamente a eficiência do método de medição.

A partir dos resultados obtidos, conclui-se que, apesar de ter apresentado um valor de resistência acima do limite estabelecido para subestações de distribuição, a

malha de terra da SE Alto Branco encontra-se, aparentemente, em ótimo estado de conservação. Também foi constatado que a conexão dos cabos de aterramento dos equipamentos com a malha não apresentam problemas de solda ou oxidação consideráveis. Entretanto, é imprescindível a realização de medições periódicas em toda a malha, a fim de monitorar o grau de envelhecimento desta no decorrer do tempo.

4.6.5. Medição de Potencial de Superfície

A medição de potencial de superfície na SE Alto Branco foi realizada seguindo o método de medição descrito na seção 3.6 deste trabalho, a fim de se verificar a distribuição dos potenciais no solo e analisar as condições operacionais da malha.

A medição ocorreu em duas campanhas de medição distintas, com um intervalo de aproximadamente seis meses de uma para outra, sendo a primeira delas realizada no mês de agosto e a segunda no mês de janeiro do ano seguinte. Esta última campanha de medição ocorreu no mesmo dia em que foram realizadas a medição de potencial de toque, medição de potencial de passo e a medição de resistência de malha de terra. Em ambas as campanhas de medição o solo apresentava-se seco e não havia registro de chuvas nos dias que antecederam às medições.

a) Medição de Potencial de Superfície – Primeira Campanha de Medição

Na primeira campanha de medição, os potenciais de superfície foram medidos em 70 pontos distintos, dispostos na área efetiva da malha e em sua circunvizinhança. Na realização das medições foram utilizados reticulados de medição de 7 m x 7 m na área correspondente à malha de terra da subestação.

Na Figura 4.20 está ilustrado o esboço do terreno da subestação e o esquema de medição de potencial de superfície utilizado. Também é apresentada a localização dos dois transformadores presentes na subestação, além da haste de referência utilizada na medição, que foi posicionada a uma distância de 40 m da malha de terra.

A medição de potencial de superfície, realizada na primeira campanha de medição, teve como referência uma corrente de desequilíbrio de 4,24 A, medida no neutro do transformador (Transformador 2). Os valores obtidos na medição estão apresentados na Tabela 4.24, e serão tratados e analisados na seção 4.6.6 deste capítulo.

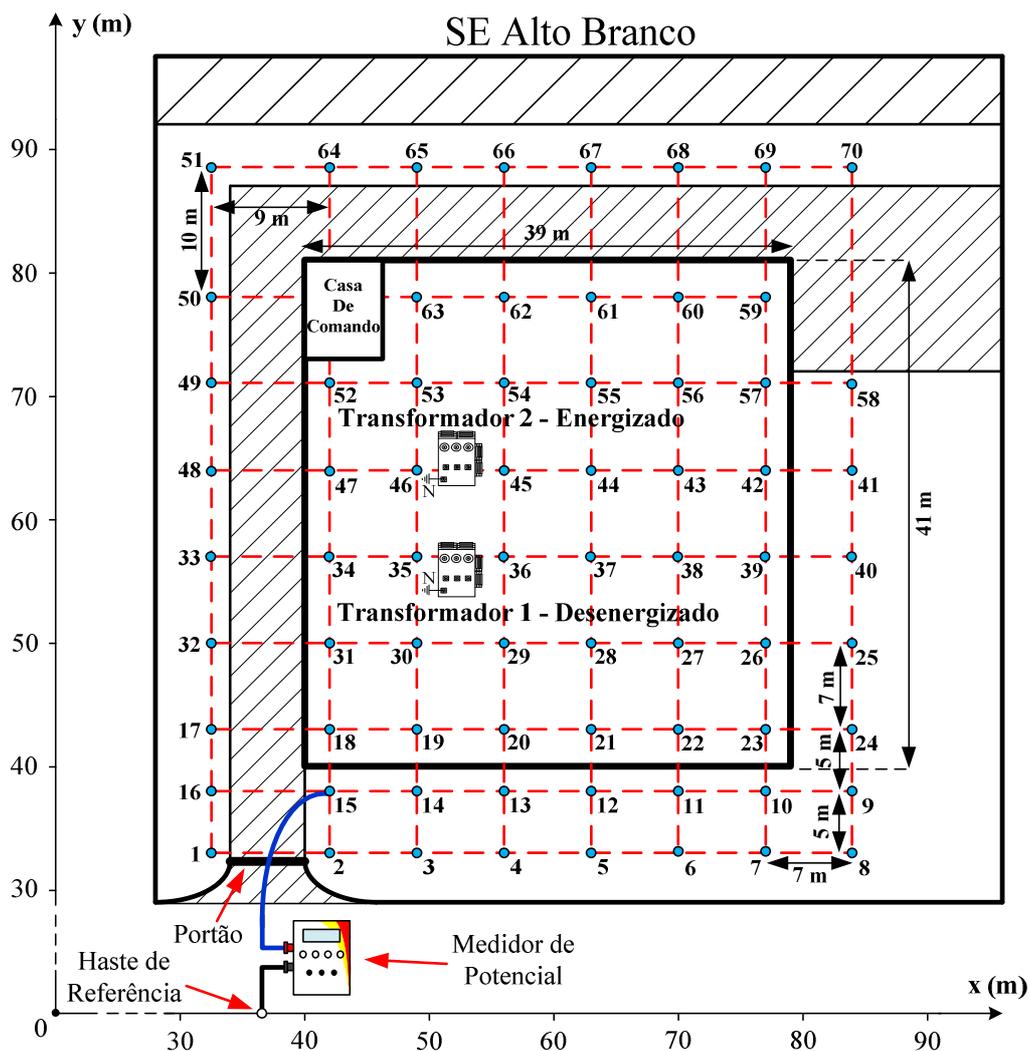


Figura 4.20 – Medição de potencial de superfície na SE Alto Branco (Primeira Campanha de Medição).

Tabela 4.24 – Medição de potencial de superfície na SE Alto Branco (Primeira Campanha de Medição).

Nº	Medição (V)								
1	2,20	15	4,46	29	8,70	43	7,75	57	7,05
2	4,68	16	3,13	30	7,02	44	7,56	58	5,42
3	3,66	17	4,60	31	8,47	45	7,77	59	6,85
4	4,14	18	7,81	32	5,54	46	7,24	60	7,15
5	4,16	19	8,04	33	6,29	47	7,55	61	7,14
6	4,15	20	7,76	34	8,70	48	5,95	62	6,93
7	3,97	21	7,30	35	8,28	49	6,18	63	6,62
8	3,36	22	7,87	36	8,70	50	5,13	64	3,34
9	4,30	23	8,40	37	7,98	51	3,20	65	4,06
10	5,31	24	5,21	38	7,89	52	7,48	66	4,19
11	6,28	25	5,21	39	7,27	53	7,42	67	3,95
12	6,19	26	8,17	40	5,21	54	7,30	68	3,78
13	5,52	27	8,38	41	5,41	55	6,61	69	3,86
14	5,32	28	8,60	42	7,75	56	6,41	70	3,52

b) *Medição de Potencial de Superfície – Segunda Campanha de Medição*

A fim de se realizar o mapeamento dos potenciais de superfície de maneira mais apurada, na segunda campanha de medição foram utilizados reticulados de medição de 5 m x 5 m na área correspondente à malha de aterramento da subestação, e os potenciais de superfície foram medidos em 118 pontos distintos, dispostos na área efetiva da malha e em sua circunvizinhança.

Na Figura 4.21 está ilustrado o esboço do terreno da subestação e o esquema de medição de potencial de superfície utilizado. Também é apresentada a localização dos dois transformadores presentes na subestação, além da haste de referência utilizada na medição, que foi posicionada a uma distância de 40 m da malha de terra.

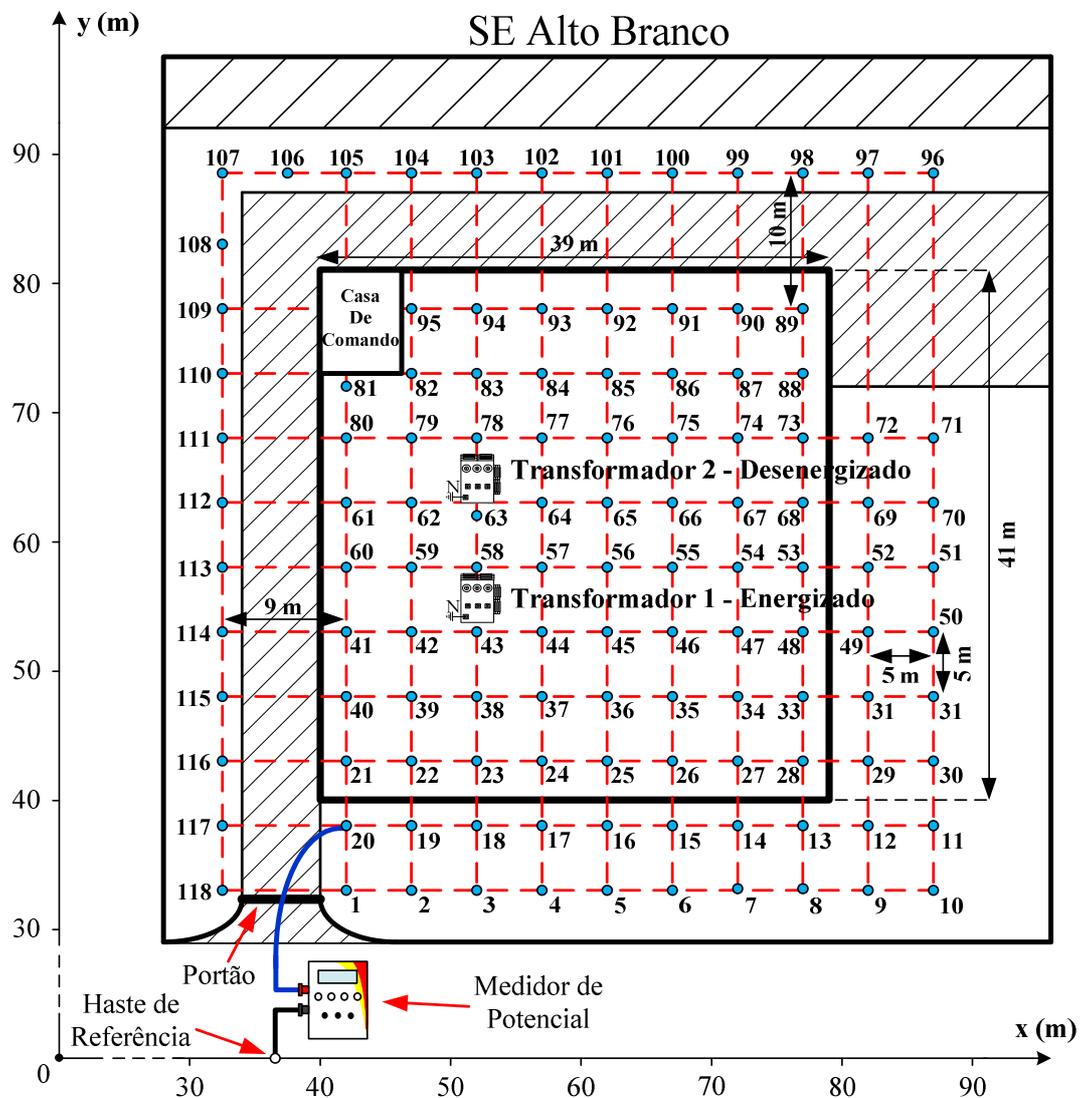


Figura 4.21 – Medição de potencial de superfície na SE Alto Branco (Segunda Campanha de Medição).

A medição de potencial de superfície, realizada na segunda campanha de medição, teve como referência uma corrente de desequilíbrio de 4,46 A, medida no neutro do transformador (Transformador 1). Os valores obtidos na medição estão apresentados na Tabela 4.25, e serão tratados e analisados na seção 4.6.6 deste capítulo.

Tabela 4.25 – Medição de potencial de superfície na SE Alto Branco (Segunda Campanha de Medição).

Nº	Medição (V)	Nº	Medição (V)						
1	6,52	25	8,77	49	6,93	73	11,13	97	3,44
2	4,59	26	9,96	50	6,03	74	11,23	98	3,33
3	3,86	27	9,63	51	6,24	75	11,38	99	4,32
4	4,30	28	9,75	52	7,17	76	11,15	100	4,55
5	4,38	29	6,78	53	10,19	77	12,24	101	4,51
6	4,79	30	6,58	54	9,96	78	12,83	102	4,98
7	3,82	31	7,05	55	9,97	79	12,97	103	5,45
8	4,19	32	6,98	56	9,50	80	12,88	104	4,80
9	3,78	33	9,02	57	8,96	81	13,20	105	4,25
10	3,70	34	8,92	58	10,32	82	12,94	106	3,87
11	4,59	35	10,48	59	10,79	83	13,29	107	3,34
12	5,58	36	9,42	60	10,24	84	13,42	108	4,53
13	7,32	37	10,69	61	11,19	85	12,11	109	4,30
14	7,01	38	10,62	62	11,23	86	12,12	110	6,02
15	7,50	39	8,78	63	10,38	87	12,38	111	5,44
16	8,19	40	8,81	64	11,58	88	11,87	112	4,77
17	8,12	41	9,11	65	11,28	89	6,44	113	4,91
18	7,84	42	9,01	66	11,15	90	6,09	114	4,39
19	8,17	43	8,96	67	10,46	91	6,62	115	4,01
20	6,49	44	9,21	68	10,57	92	6,71	116	4,09
21	7,78	45	8,96	69	8,42	93	6,25	117	2,93
22	9,18	46	9,77	70	7,23	94	6,48	118	2,30
23	9,81	47	9,22	71	6,16	95	6,44	----	-----
24	9,94	48	9,90	72	8,70	96	3,33	----	-----

Analisando os valores apresentados nas Tabelas 4.24 e 4.25, verificou-se que os potenciais de superfície se comportaram de maneiras distintas para as duas campanhas de medição, variando tanto em amplitude quanto na localização dos potenciais mais elevados.

No que diz respeito à amplitude dos potenciais medidos, enquanto que na primeira campanha (7x7) os valores obtidos variaram de 7,02 V a 8,70 V, para a área correspondente a malha de terra, e de 2,20 V a 6,28 V, para a sua circunvizinhança; na segunda campanha (5x5) estes valores variaram, respectivamente, de 6,09 V a 13,42 V, e de 2,30 V a 8,70 V.

Com relação à localização, na primeira campanha os potenciais mais elevados encontravam-se nas proximidades do Transformador 1, que estava desenergizado; enquanto que, na segunda campanha os potenciais mais elevados encontravam-se nas

proximidades do Transformador 2, especificamente entre ele e a casa de comando da subestação. Na segunda campanha de medição, o Transformador 2 era que estava desenergizado.

A partir dos valores apresentados na Tabela 4.24 e 4.25 e de uma análise detalhada levando em consideração a localização de cada ponto medido, observou-se que os potenciais de superfície, obtidos na primeira campanha de medição (7x7), apresentaram-se com uma melhor distribuição quando comparados aos potenciais obtidos na segunda campanha de medição (5x5). Na segunda campanha, verificou-se que, enquanto os valores de potencial obtidos nos pontos 73 a 88 foram os mais elevados, os potenciais obtidos nos pontos 89 a 95 foram relativamente baixos, podendo acarretar o surgimento de potenciais de passo elevados dentro da malha nesta região.

O tratamento e a análise dos dados obtidos nas medições de potencial de superfície serão realizados, na próxima seção deste capítulo, utilizando-se uma rotina computacional desenvolvida para facilitar as suas análises.

4.6.6. Tratamento e Análise dos Dados Via Rotina Computacional

O tratamento e a análise dos dados obtidos nas medições de potencial de superfície foram realizados, através da rotina computacional desenvolvida, seguindo os procedimentos descritos na seção 3.7 deste trabalho.

Os valores de potencial obtidos na medição de potencial de superfície são dados de entrada da rotina e foram utilizados como condição de contorno pelo MDF na resolução da equação de *Laplace*. Também constituíram dados de entrada da rotina as coordenadas dos pontos onde foram realizadas as medições de potencial de superfície, as dimensões da malha de terra, as dimensões do terreno amplo usado na simulação, a corrente de desequilíbrio (desbalanço) medida no neutro do transformador e a corrente circulante na malha de terra no momento de um curto-circuito.

Para a SE Alto Branco foi adotado um terreno com dimensões de 119 m x 121 m, no qual a malha de terra foi centralizada. As dimensões da malha, juntamente com a localização exata dos pontos onde foram realizadas as medições de potencial de superfície, encontram-se apresentados nas Figuras 4.20 e 4.21.

As correntes de desequilíbrio do transformador, medidas na primeira e na segunda campanha de medição de potencial de superfície, foram, respectivamente, de 4,24 A e de 4,46 A. Enquanto que a corrente circulante na malha de terra no momento

de um curto-circuito foi de 4,866 kA, valor este correspondente a 50% da corrente de curto-circuito fase-terra fornecida pela concessionária.

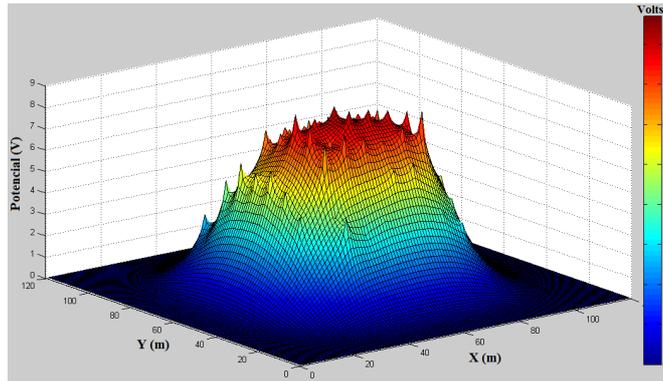
A rotina computacional, utilizando-se do MDF, foi capaz de mapear os potenciais na superfície da malha e em suas circunvizinhanças, apresentando a distribuição dos potenciais no solo, tanto em condições de regime permanente como na ocorrência de um curto-circuito. Os resultados fornecidos pela rotina são apresentados em formato gráfico bidimensional e tridimensional. Além dos gráficos gerados, a rotina computacional também foi capaz de calcular e externar em forma de relatório os potenciais de passo para uma ocorrência de curto-circuito.

A seguir serão apresentados os resultados fornecidos pela rotina computacional referentes às medições de potencial de superfície realizadas na SE Alto Branco.

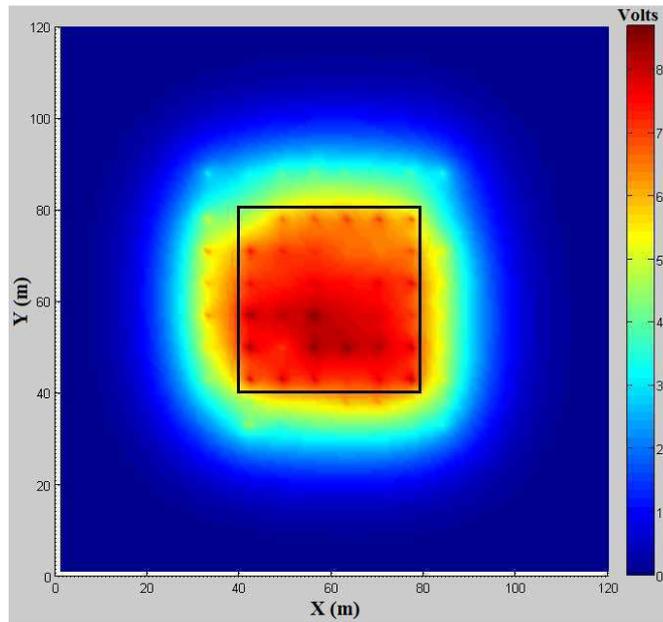
a) Primeira Campanha de Medição

Os resultados fornecidos pela rotina computacional, para as condições de regime permanente e para a ocorrência de um curto-circuito, estão apresentados nas Figuras 4.22 e 4.23, respectivamente. Nelas são mostrados gráficos que ilustram a distribuição dos potenciais de superfície e as linhas equipotenciais presentes no solo.

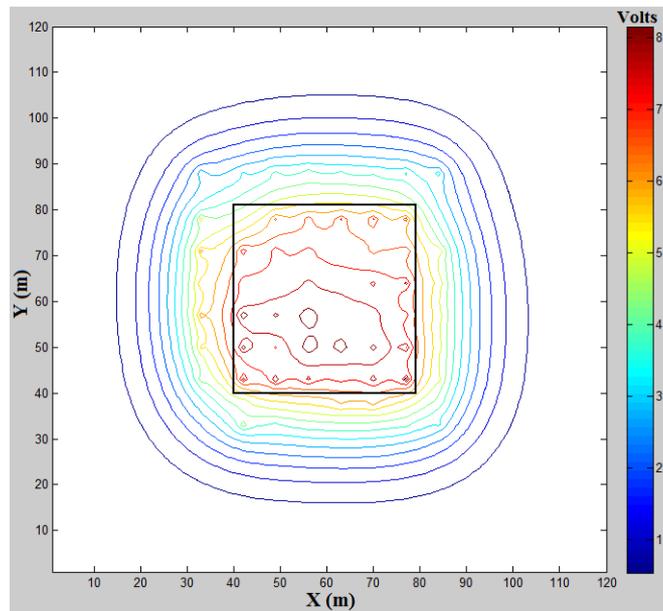
Além dos gráficos gerados, a rotina computacional também foi capaz de calcular e externar, em forma de relatório, os potenciais de passo na ocorrência de um curto-circuito. Para o caso analisado, verificou-se que todos os potenciais de passo calculados encontraram-se abaixo dos limites máximos permitidos apresentados na Tabela 4.20, como também, estiveram abaixo do limite de segurança fixado em 75% do potencial de passo máximo permitido para um indivíduo de 50 kg.



(a) Representação tridimensional

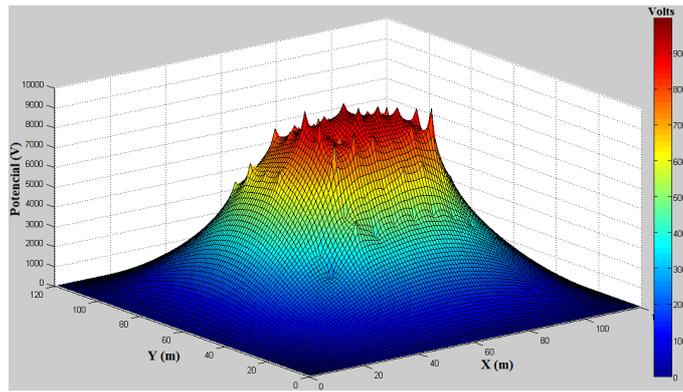


(b) Vista superior

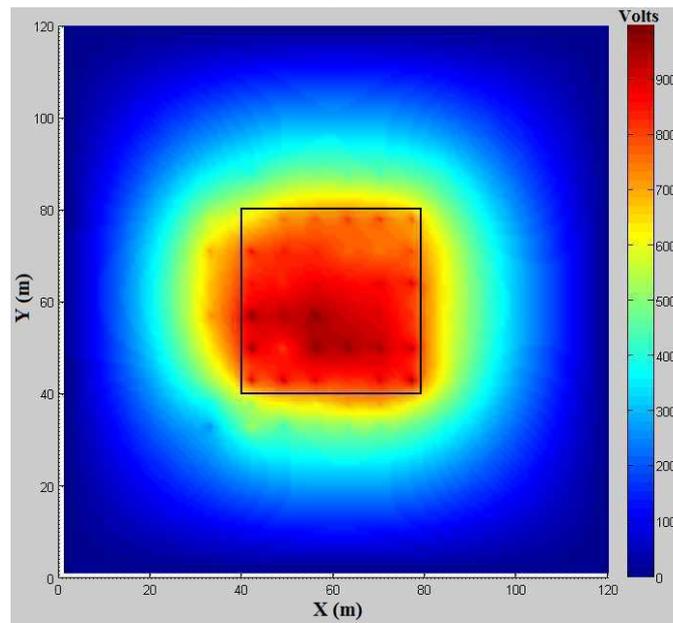


(c) Linhas equipotenciais

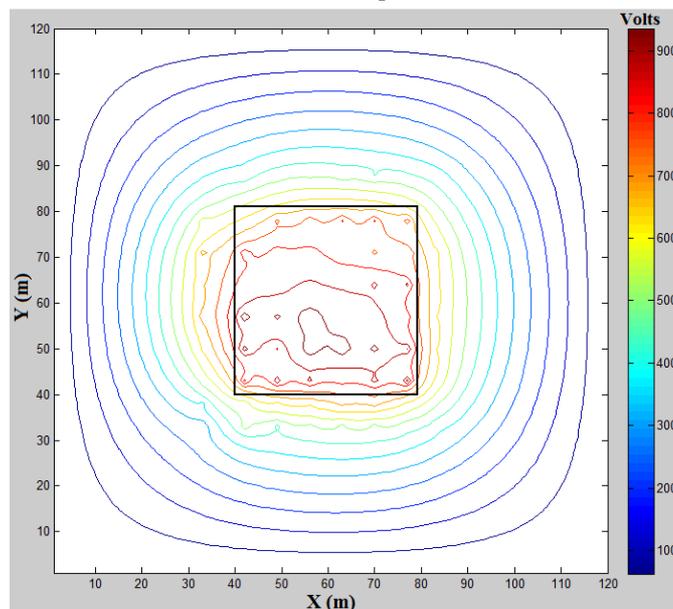
Figura 4.22 – Mapeamento dos níveis de potencial superficial em regime permanente (Primeira campanha de medição).



(a) Representação tridimensional



(b) Vista superior



(c) Linhas equipotenciais

Figura 4.23 – Mapeamento dos níveis de potencial superficial na ocorrência de um curto-circuito (Primeira campanha de medição).

Em uma análise mais apurada, observou-se que apenas cinco dos potenciais de passo calculados apresentaram-se acima de 1,0 kV, estando eles localizados nas imediações do fim da malha. Na Tabela 4.26 estão apresentados os valores destes cinco potenciais de passo calculados e as respectivas coordenadas dos pontos onde foram realizados os cálculos.

Tabela 4.26 – Coordenadas e potenciais de passo superiores a 1,0 kV.

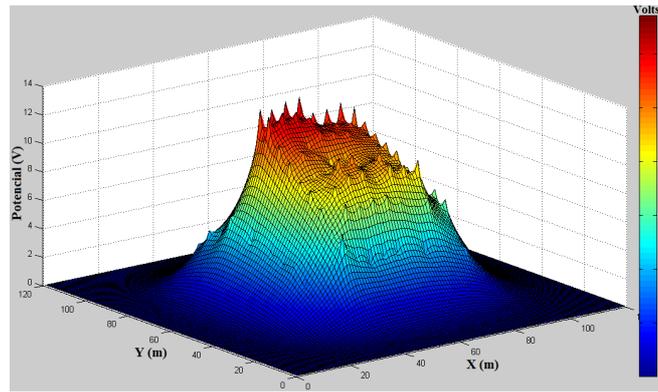
Coordenadas (X ₁ , Y ₁)	Coordenadas (X ₂ , Y ₂)	Potenciais de passo (V)
(41, 43)	(42, 43)	1.125,63
(42, 42)	(42, 43)	1.236,58
(49, 42)	(49, 43)	1.000,50
(77, 42)	(77, 43)	1.349,44
(77, 43)	(78, 43)	1.320,99

Entretanto, deve-se salientar que, o cálculo dos limites de potenciais de passo sofrem influência direta do tempo de duração do curto-circuito (t). Se o tempo de duração do curto-circuito for superior a 0,3 segundos, os potenciais de passo máximos permitidos na subestação deverão ser menores do que os adotados na Tabela 4.20.

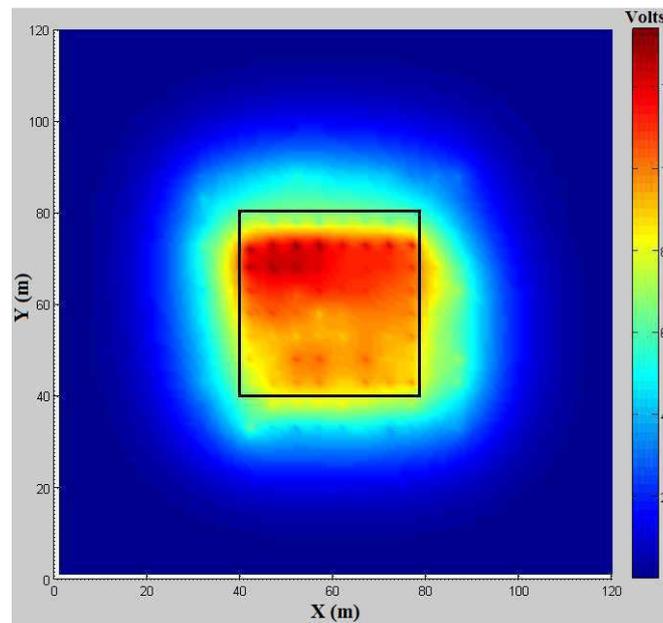
Uma vez que os gráficos gerados pela rotina computacional mostraram a distribuição dos potenciais de superfície e das linhas equipotenciais de maneira relativamente uniforme, como também, os potenciais de passo calculados pela rotina apresentaram-se abaixo dos limites máximos permitidos; pode-se concluir que a malha de aterramento da SE Alto Branco encontrava-se em ótimas condições de operação para as características físicas, climáticas e geológicas, no dia em que foi realizada a primeira etapa das campanhas de medição de potencial de superfície.

b) Segunda Campanha de Medição

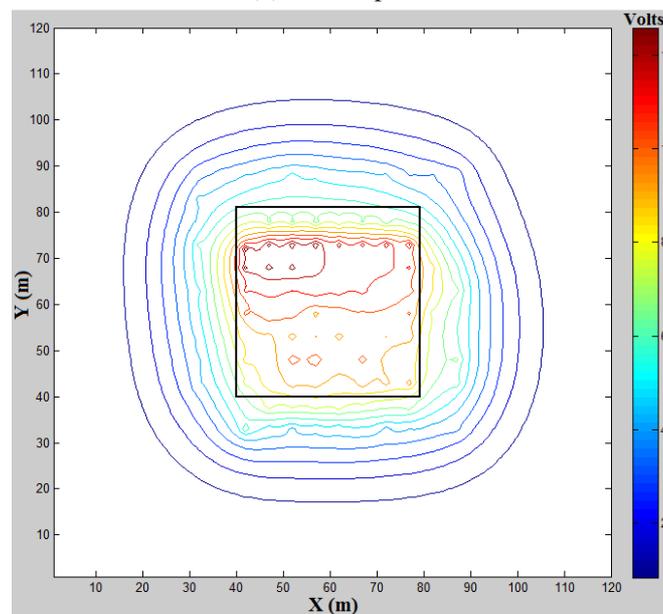
Os resultados fornecidos pela rotina computacional, para as condições de regime permanente e para a ocorrência de um curto-circuito, estão apresentados nas Figuras 4.24 e 4.25, respectivamente. Nelas são mostrados gráficos que ilustram a distribuição dos potenciais de superfície e as linhas equipotenciais presentes no solo.



(a) Representação tridimensional

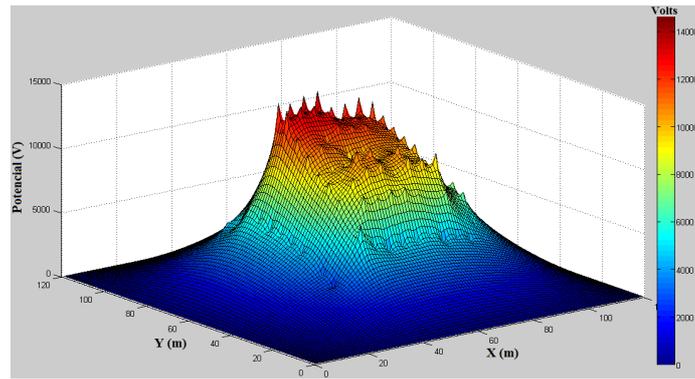


(b) Vista superior

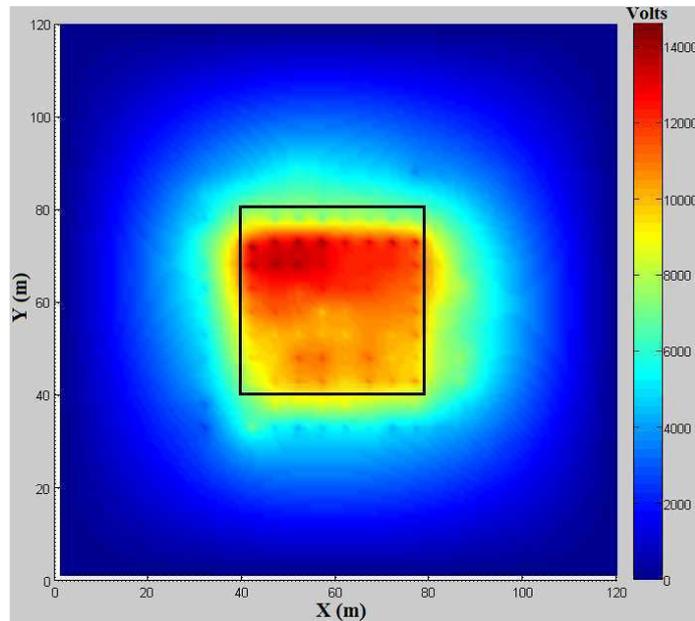


(c) Linhas equipotenciais

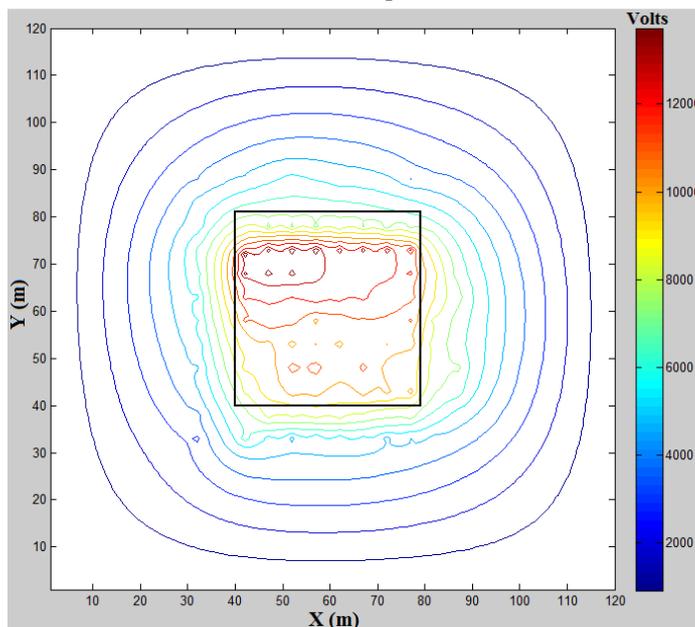
Figura 4.24 – Mapeamento dos níveis de potencial superficial em regime permanente (Segunda campanha de medição).



(a) Representação tridimensional



(b) Vista superior



(c) Linhas equipotenciais

Figura 4.25 – Mapeamento dos níveis de potencial superficial na ocorrência de um curto-circuito (Segunda campanha de medição).

Além dos gráficos gerados, a rotina computacional também foi capaz de calcular e externar, em forma de relatório, os potenciais de passo na ocorrência de um curto-circuito. Para o caso analisado, verificou-se que todos os potenciais de passo calculados encontraram-se abaixo dos limites máximos permitidos, apresentados na Tabela 4.20, como também, estiveram abaixo do limite de segurança fixado em 75% do potencial de passo máximo permitido para um indivíduo de 50 kg. Entretanto, os potenciais calculados apresentaram-se maiores do que os calculados na primeira campanha de medição, além de estarem presentes em uma região diferente da malha de terra.

Em uma análise mais apurada, observou-se que apenas oito dos potenciais de passo calculados apresentaram-se acima de 1,8 kV, e todos eles estavam localizados na área interna da malha. Na Tabela 4.27 são apresentados os valores destes oito potenciais de passo calculados e as respectivas coordenadas dos pontos onde foram realizados os cálculos.

Tabela 4.27 – Coordenadas e potenciais de passo superiores a 1,8 kV.

Coordenadas (X₁, Y₁)	Coordenadas (X₂, Y₂)	Potenciais de passo (V)
(41, 72)	(42, 72)	2.100,50
(42, 72)	(42, 73)	2.090,64
(47, 73)	(47, 74)	1.838,54
(52, 73)	(52, 74)	1.967,11
(57, 73)	(57, 74)	2.130,30
(72, 73)	(72, 74)	1.884,45
(77, 73)	(77, 74)	1.969,68
(77, 73)	(78, 73)	1.852,25

Entretanto, deve-se salientar que, o cálculo dos limites de potenciais de passo sofrem influência direta do tempo de duração do curto-circuito (*t*). Se o tempo de duração do curto-circuito for superior a 0,3 segundos, os potenciais de passo máximos permitidos na subestação deverão ser menores do que os adotados na Tabela 4.20.

A partir da inspeção visual utilizando-se os gráficos fornecidos pela rotina computacional, observa-se que o mapeamento dos potenciais de superfície obtidos para as duas campanhas de medição apresentaram comportamentos diferentes. Entretanto, a partir de uma análise minuciosa, observou-se que a maioria dos valores dos potenciais de superfície, distribuídos ao longo do terreno, encontrava-se relativamente próxima quando comparadas as medições, ou seja, não houve grandes variações dos valores de potenciais na maior parte do terreno, comparando-se os resultados da primeira campanha (7x7) com os da segunda campanha (5x5). A exceção se deu em uma região

específica do terreno, mas precisamente nas imediações do final da malha e correspondente às coordenadas de 40 m a 80 m, no eixo x , e de 65 m a 90 m, no eixo y . Nesta região específica, os níveis de potencial obtidos na segunda campanha (5x5) foram relativamente elevados quando comparados aos valores obtidos na primeira campanha (7x7). Justificativas plausíveis para este comportamento estão relacionadas à sazonalidade e às condições geológicas (relevo/pedra) onde a malha está instalada.

Com relação à sazonalidade, os maiores índices de precipitação que ocorrem na cidade de Campina Grande-PB estão entre os meses de março a agosto, segundo dados climatológicos. A primeira campanha de medição (7x7) foi realizada no mês de agosto e a segunda campanha (5x5) foi realizada em janeiro. Antes da implantação da malha de terra foi necessária a construção de um muro de arrimo (contenção), colocação de uma camada de aterro e a realização de uma terraplanagem. Normalmente a camada de aterro é composta por material de menor resistividade, propiciando uma menor resistência ao escoamento da corrente. Devido ao declive original do terreno, na região onde não sofreu aterro a resistividade do solo é maior, com grande probabilidade do afloramento de rocha. Quando o solo se encontra úmido (período chuvoso) as diferenças entre as resistividades não são bem evidenciadas. As medições realizadas em janeiro (segunda campanha de medição) ocorreram após um longo período de estiagem e de temperatura elevada, propiciando uma maior evaporação da água do solo. Para a região de solo raso (da superfície até a rocha) a evaporação é mais intensa e, como consequência, a resistividade do solo será maior, dificultando o escoamento da corrente elétrica pelo solo e, logicamente, proporcionando o surgimento de potenciais mais elevados.

A análise dos potenciais de passo, calculados para a ocorrência de um curto-circuito, mostrou que em determinados pontos da malha houve uma variação de mais de mais de 2.000% quando comparados os potenciais de passo calculados em ambas as campanhas de medição. Na Figura 4.26 está ilustrada a localização e os valores de dois potenciais de passo que sofreram maior variação de uma campanha de medição para outra.

A partir dos resultados obtidos, conclui-se que é imprescindível a realização de medições periódicas na SE Alto Branco, a fim de monitorar e analisar o comportamento da distribuição dos potenciais no solo no decorrer do tempo. É necessário que as medições sejam realizadas em pelo menos duas épocas diferentes do ano, no intuito de analisar a interferência que a sazonalidade climática exerce na distribuição dos

potenciais. Além das medições de potenciais de superfície, faz-se necessária a realização de medições de resistência de terra, medições de potencial de toque e medições de potencial de passo, de forma minuciosa, principalmente na região onde foram diagnosticados os maiores problemas na distribuição dos potenciais de superfície.

A realização de medições periódicas e a análise das condições da malha no decorrer do tempo tornam possível a utilização de mecanismos capazes de mitigar ou solucionar os problemas referentes à alta resistividade do solo e à corrosão dos condutores da malha, em pontos específicos.

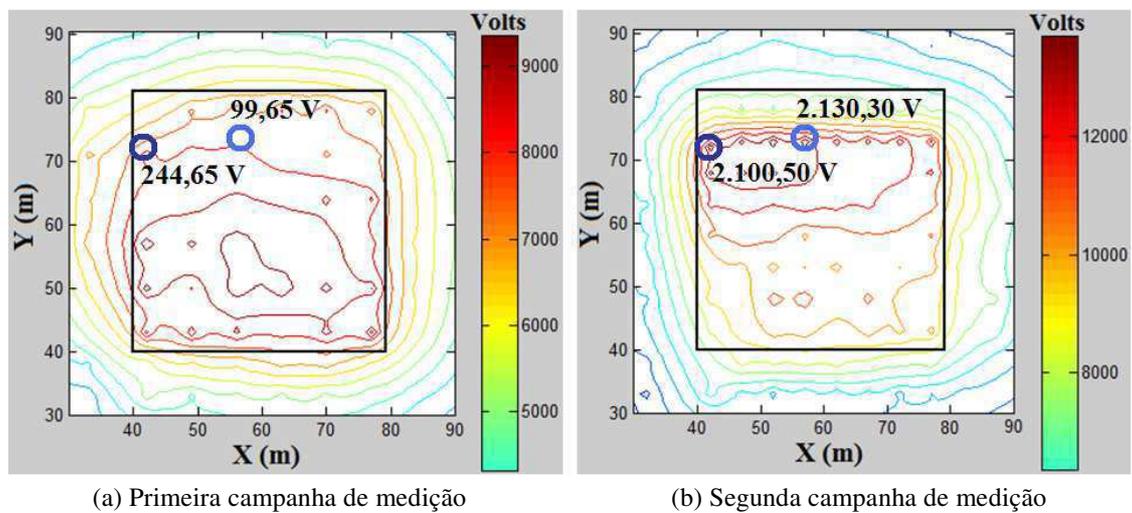


Figura 4.26 – Variação dos potenciais de passo com a sazonalidade climática.

Capítulo 5

CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

5.1. Conclusões

Neste trabalho foram apresentadas técnicas de medição que podem ser utilizadas, em conjunto, no monitoramento e na análise do estado de conservação de malhas de aterramento. As técnicas devem ser utilizadas em subestações energizadas. Para isso foram empregadas técnicas conhecidas como: medição de resistividade do solo, medição de potencial de toque e medição de potencial de passo; e técnicas propostas como: medição de resistência de aterramento em instalações energizadas e medição de potenciais de superfície.

Estudos de casos foram realizados em seis subestações de distribuição da Energisa-PB. Contudo, devido a limitações de ordem prática nem todos os métodos de monitoramento foram aplicados às seis subestações.

As medições de resistividade do solo foram realizadas em três subestações (**Caso 1**, **Caso 5** e **Caso 6**). O **Caso 1** e o **Caso 6** apresentaram resistividade do solo adequada para subestações de energia elétrica. O **Caso 5** evidenciou um solo de péssima qualidade, inadequado para subestações e que, mesmo com a malha em excelentes condições de trabalho, existiriam dificuldades no escoamento da corrente de desequilíbrio do neutro, como também, de correntes oriundas de faltas.

As medições de potencial de toque e medições de potencial de passo foram realizadas em duas subestações (**Caso 5** e **Caso 6**) para avaliar as condições de risco (potenciais de segurança). Os resultados mostraram que não foram encontrados potenciais de toque e de passo próximos aos limites máximos permitidos.

As medições de resistência de terra em instalações energizadas foram realizadas nas seis subestações. Utilizou-se o método de medição baseado na capacidade do conjunto terrômetro digital modelo 6472 da AEMC *Instruments*[®] e pinça amperimétrica modelo SR182 da AEMC *Instruments*[®].

Nas subestações **Caso 1** e **Caso 5** foram aplicados três métodos de avaliação das condições de operacionalidade por meio da medição da resistência de terra da malha: o método tradicional (subestação desenergizada); o método apresentado; e a utilização do software TecAt Plus 5.2[®]. Os resultados obtidos pela utilização das três técnicas de

determinação da resistência de malhas se mostraram em concordância, legitimando a viabilidade da técnica de medição com subestação energizada.

Uma vez legitimada a técnica de medição energizada, ela foi aplicada as demais subestações. Os valores de resistência das malhas se apresentaram baixos, caracterizando malhas em ótimas condições operacionais, com exceção do **Caso 5**. Vale salientar que valores elevados de resistência já eram esperados para o **Caso 5**, uma vez que a resistividade elétrica do solo se apresentou muito elevada.

As medições de potenciais de superfície foram realizadas em apenas uma das subestações estudadas (**Caso 6**). Os dados obtidos através da medição de potenciais de superfície foram tratados e analisados através de uma rotina computacional desenvolvida. A rotina foi capaz de calcular e mostrar, em formato gráfico bidimensional e tridimensional, a distribuição dos potenciais no solo. Ela também externa as coordenadas e os valores dos potenciais que ultrapassem 75% do limite de segurança, previsto em norma.

A análise gráfica dos potenciais de superfície no tempo é capaz de proporcionar o monitoramento e a análise do estado de conservação de malhas de aterramento.

Conclui-se, portanto, que o monitoramento e a análise do estado de conservação de malhas de aterramento não são tarefas triviais. Por este motivo, diagnósticos obtidos a partir da utilização isolada de técnicas de medição não evidenciam as reais condições em que a malha se encontra. Sendo assim, um conjunto de técnicas de medição deve ser utilizado, periodicamente, para que se obtenha um diagnóstico mais exato e confiável das condições operacionais da malha de aterramento.

5.2. Sugestões de Trabalhos Futuros

Como sugestões de trabalhos futuros, serão apresentados alguns temas que poderão ser desenvolvidos no intuito de dar continuidade ao trabalho. Deste modo, são propostos os seguintes temas:

- Desenvolvimento de um sistema eletrônico embarcado capaz de medir e analisar os potenciais de superfície de uma subestação energizada. O novo equipamento desenvolvido consistiria na reunião de diversas tecnologias como: circuitos microcontroladores, módulo GPS (*Global Positioning System*) e rotina computacional para tratamento e análise dos dados obtidos nas medições, em

que a determinação da localização de cada ponto de medição, como também as dimensões do terreno e da malha de aterramento seriam realizadas através do módulo GPS.

- Desenvolvimento de um sistema capaz de adquirir os sinais de tensão e de corrente que se propagam em malhas de aterramento quando da incidência de um surto, a fim de se analisar o comportamento da malha sob estas circunstâncias. Existem muitos softwares que avaliam o comportamento de malhas de forma teórica, entretanto, medições realizadas em campo, que possam validar os softwares, são poucas e com restrições técnicas.

5.3. Trabalho Publicado

No decorrer do curso de mestrado foi aceito para publicação o seguinte artigo, relacionado com o trabalho desenvolvido:

- DIAS, A. D.; DE ANDRADE JÚNIOR, G. V.; COSTA, E. G.; DE SOUSA, F. P. F.; MACEDO, E. C. T.; GOMES, L. V.; NÓBREGA NETO, S. A. G.; BRASIL, F. C. L. **Grounding Grids Analysis of Energized Substations**. In: 17th International Symposium on High Voltage Engineering - ISH 2011. Germany, 2011.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARBERINI, S. J. **Análise Eletrodinâmica em Estruturas de Aterramento Usando o Método FDTD**. Dissertação (Mestrado) – UFPR, Curitiba, 2005.

BELTANI, J. M. **Medição de Malha de Terra em Subestações Energizadas**. Dissertação (Mestrado) – UNESP, Ilha Solteira, 2007.

BEZERRA, S. R. C.; KANASHIRO, A. G. **Sistema de Aterramento Elétrico com Hastes Envolvidas em Concreto**. In: Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos – SBSE 2010. Belém, 2010.

CALIXTO, W. P.; NETO, L. M.; WU, M.; MACHADO FILHO, H. B.; YAMANAKA, K. **Algoritmo Genético Aplicado a um Método de Prospecção Geoelétrico**. In: Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos – SBSE 2010. Belém, 2010.

CAPELLI, A. **Aterramento Elétrico**. Revista Saber Eletrônica n. 329, junho de 2000. Disponível em: <<http://py2mok.tripod.com/arquivos-pdf-py2moko/aterramento1.pdf>>. Acesso em: 10 nov. 2009.

CAVALCANTI, C. V. A. **Uma Rotina Computacional para Estratificação: Desenvolvimento e Aplicação a Solos do Nordeste**. Dissertação (Mestrado) – UFPB, Campina Grande, 1991.

CUNHA, J. G. **Requisitos de Aterramento de Cabine Primária, Segundo a Nova NBR 14039**. ENERSHOW. São Paulo, 2003.

DALZIEL, C. F. **Effects of Electric Shock on Man**. Washington, DC, U.S.A., 1941.

DE ARAÚJO, H. X. **Proposta de Novas Técnicas de Modelagem para Estudo da Redução do Potencial de Passo e Aterramento por Elementos de Circuito**. Dissertação (Mestrado) – UFPA, Belém, 2007.

DE SOUZA, K. T.; DE MOURA, R. F.; CINTRA, G. **Estudo de Alternativas para a Construção de Malhas de Aterramento num Solo com Alta Resistividade Elétrica.** In: II CONNEPI – Congresso de Pesquisa e Inovação da Rede Norte Nordeste de Educação Tecnológica. João Pessoa, 2007.

ENDRENYI, J. **Evaluation of Resistivity Tests for Design of Station Grounds in Nonuniform Soil.** IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, v. 84, n. 12, December 1963.

FRAGA, F. N. **Contribuições para o Desenvolvimento de uma Metodologia para Avaliação de Sistemas de Aterramento em Alta Frequência Empregando TLM Tridimensional.** Dissertação (Mestrado) – UFPE, Recife, 2008.

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. Anais, GSE- 06, Curitiba, 2005.

GAMBOA, L. R. A.; SILVA, J. M.; RIBAS, C. E. et al. **Medição da Resistência de Malhas de Terra Energizadas, em SE 34,5/13,8 kV e Obtenção da Resistividade de Solos de SE, em Laboratório.** In: Seminário Nacional de Proteção e Transmissão de Energia Elétrica, 18. Anais, GSE- 04, Curitiba, 2005.

GILL, P. **Electrical Power Equipment Maintenance and Testing.** Boca Raton, FL, U.S.A.: CRC Press, 2nd ed., 1942.

HAYT JUNIOR, W. H.; BUCK, J. A. **Eletromagnetismo.** Rio de Janeiro: LTC, 2003.

IEEE Std 80-2000. **IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding.** New York, NY: IEEE Power Engineering Society, Substations Committee, 2000.

IEEE Std 81-1983. **IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Ground System.** New York, NY: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Power System Instrumentation and Measurements Committee, 1983.

IEEE Std 81.2-1991. **IEEE Guide for Measurement of Impedance and Safety Characteristics of Large, Extended or Interconnected Grounding Systems.** New York, NY: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Power System Instrumentation and Measurements Committee, 1991.

KINDERMANN, G.; CAMPAGNOLO, J. M. **Aterramento Elétrico.** Florianópolis: 5ª ed. do autor, 2002.

MAMEDE FILHO, J. **Proteção de Equipamentos Eletrônicos Sensíveis: Aterramento.** São Paulo: Érica, 1997.

MAMEDE FILHO, J. **Sistemas de Aterramento.** In: Instalações Elétricas Industriais. 6ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2001. p. 497-533.

MELIOPOULOS, A. P. S.; COKKINIDES, G.; ABDALLAH, H. et al. **A PC Based Ground Impedance Measurement Instrument.** IEEE Transaction on Power Delivery, v. 8, n. 3, October 1993.

MELIOPOULOS, A. P. S.; PATEL, S.; COKKINIDES, G. J. **A New Method and Instrument for Touch and Step Voltage Measurements.** IEEE Transaction on Power Delivery, v. 9, n. 4, July 1994.

MENG, Q.; HE, J.; DAWALIBI, F. P.; MA, J. **A New Method to Decrease Ground Resistances of Substation Grounding Systems in High Resistivity Regions.** IEEE Transactions on Power Delivery, v. 14, n. 3, July 1999.

MORENO, H.; COSTA, P. F. **Aterramento Elétrico.** São Paulo: Procobre, 1999.

NASCIMENTO, C. T. C.; PIRES, A. C. B.; MORAES, R. A. V. **Reconhecimento de Solos por Meio de Resistividade Elétrica e Radiação Gama.** Revista Brasileira de Geociências, vol. 34, 2004.

NBR 14039. **Instalações Elétricas de Média Tensão de 1,0 kV a 36,2 kV.** ABNT, 2005.

NBR 15749. **Medição de Resistência de Aterramento e de Potenciais na Superfície do Solo em Sistemas de Aterramento.** ABNT, 2009.

NBR 7117. **Medição da Resistividade do Solo pelo Método dos Quatro Pontos (Wenner)**. ABNT, 1981.

NR 10. **Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade**. Ministério do Trabalho e Emprego. Portaria nº 3214/78, 2004.

OZISIK, M. N. **Transferência de Calor: um Texto Básico**. Tradução de Luiz de Oliveira. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 1990.

PUSTILNICK, S. **Análise pelo Método FDTD dos Efeitos Eletromagnéticos em Estruturas Atingidas por Descargas Atmosféricas**. Dissertação (Mestrado) – UFPR, Curitiba, 2004.

SADIKU, M. N. O. **Numerical Techniques in Electromagnetics**. CRC Press. Inc., 1992.

SILVA, J. M.; RIBAS, R. M. **Desenvolvimento de um Eletrodo de Terra com Baixíssima Resistência para ser Instalado em Solos de Alta Resistividade**. In: XIII ERIAC - Encontro Regional Iberoamericano do CIGRÉ. Puerto Iguazú, Argentina, 2009.

SOUZA JÚNIOR, E. S. **Simulação, em Ambiente Computacional, do Método de Wenner e Obtenção da Resistência de um Sistema de Aterramento Usando FDTD**. Dissertação (Mestrado) – UFPA, Belém, 2007.

TAFLOVE, A. **Application of the Finite-Difference Time-Domain Method to Sinusoidal Steady-State Electromagnetic-Penetration Problems**. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, v. 22, n. 3, August 1980.

TAFLOVE, A.; BRODWIN, M. E. **Numerical Solution of Steady-State Electromagnetic Scattering Problems Using the Time-Dependent Maxwell's Equations**. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, v. 23, n. 8, August 1975.

TAGG, G. F. **Earth Resistances**. George Newnes Ltd., London, 1964.

TANABE, K. **Novel Method for Analyzing Dynamic Behavior of Grounding Systems Based on the Finite-difference Time-domain Method.** IEEE Power Engineering Review, v. 21, n. 9, September 2001.

TELLÓ, M.; DIAS, G. A. D.; RAIZER, A.; ALMAGUER, H. D.; MUSTAFA, T. I.; COELHO, V. L. **Aterramento Elétrico Impulsivo em Baixa e Alta Frequência.** Porto Alegre: EDIPUCRS, 2007.

VISACRO FILHO, S. **Aterramentos Elétricos: Conceitos Básicos, Técnicas de Medição e Instrumentação, Filosofias de Aterramento.** São Paulo: Artliber, 2002.

WEXLER, A. **Computation of Electromagnetic Fields.** IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, v. 17, n. 8, August 1969.

YEE, K. S. **Numerical Solution of Initial Boundary Value Problems Involving Maxwell's Equations in Isotropic Media.** IEEE Transactions on Antennas and Propagation, v. 14, n. 3, May 1966.

ZENG, R.; HE, J.; ZOU, J. SHENG, X. **Novel Method in Decreasing Grounding Resistances of Urban Substations by Utilizing Peripheral Geographical Conditions.** In: Industry Application Conference, 2002. 37th IEEE Industry Applications Society - IAS Annual Meeting, v. 2, December 2002.