



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS DE SOBRAL
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

PEDRO MATEUS PIMENTA RODRIGUES

**COMISSONAMENTO DA MALHA DE ATERRAMENTO DA SUBESTAÇÃO
CACIMBAS 34,5/230 KV DO COMPLEXO EÓLICO BONS VENTOS DA SERRA 2**

SOBRAL

2017

PEDRO MATEUS PIMENTA RODRIGUES

COMISSIONAMENTO DA MALHA DE ATERRAMENTO DA SUBESTAÇÃO
CACIMBAS 34,5/230 KV, DO COMPLEXO EÓLICO BONS VENTOS DA SERRA 2

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à coordenação do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará Campus de Sobral como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica. Área de concentração: Sistemas de Energia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Éber de Castro Diniz.

SOBRAL

2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- P697c Pimenta Rodrigues, Pedro Mateus.
COMISSIONAMENTO DA MALHA DE ATERRAMENTO DA SUBESTAÇÃO CACIMBAS
34,5/230 KV DO COMPLEXO EÓLICO BONS VENTOS DA SERRA 2 / Pedro Mateus Pimenta
Rodrigues. – 2017.
80 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Sobral,
Curso de Engenharia Elétrica, Sobral, 2017.
Orientação: Prof. Dr. Éber de Castro Diniz.
1. Aterramento elétrico. 2. Subestação. 3. Comissionamento. 4. Geração eólica. I. Título.
- CDD 621.3
-

PEDRO MATEUS PIMENTA RODRIGUES

COMISSIONAMENTO DA MALHA DE ATERRAMENTO DA SUBESTAÇÃO
CACIMBAS 34,5/230 KV DO COMPLEXO EÓLICO BONS VENTOS DA SERRA 2

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada à coordenação do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará Campus de Sobral como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica. Área de concentração: Sistemas de Energia Elétrica.

Aprovada em: ___ / ___ / ____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Éber de Castro Diniz (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Marcelo Marques Simões de Souza
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Eng. Felipe Baptista Lopes
SERVTEC Energia

Eng. Paulo Régis Cavalcanti Oliveira
Geradora Eólica Bons Ventos da Serra I

A Deus.

Aos meus pais, amigos e família.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus que me concedeu saúde e força para superar todas as dificuldades ao longo de todo o curso de graduação.

Aos meu pai Manuel Rodrigues da Silva e minha mãe Francisca das Chagas Pimenta Rodrigues, por todo amor, incentivo e apoio incondicional em todos os momentos que necessitei, me compreendendo e sempre dando o melhor de si para minha formação.

Ao meu orientador Prof. Dr. Éber de Castro Diniz, pela excelente orientação e suporte no pouco tempo que lhe coube, pelas suas correções e incentivos, sendo mais do que um orientador, mas sim um verdadeiro amigo.

A todos meus colegas de graduação que estiveram juntos comigo durante essa caminhada, e que sempre me acompanharam nas longas noites de estudo, fazendo-as ainda mais prazerosas. Sem vocês tenho certeza que não estaria onde estou hoje.

Aos engenheiros da Servtec Energia, que me oportunizaram a janela de conhecimento, através dos ensinamentos adquiridos no período de estágio na construção do complexo eólico Bons Ventos da Serra 2, em especial aos engenheiros Felipe Baptista Lopes, Ronaldo Vinha, Paulo Régis Cavalcanti Oliveira e Wilson Roberto de Melo, que estiveram presentes nesse meu início de carreira e formação profissional.

A todos do corpo docente do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará, que propiciaram experiências incalculáveis durante o período de curso.

A todos os colegas e tutores que fizeram parte do Programa de Educação Tutorial, aonde desenvolvi diversas atividades acadêmicas que me propiciaram momentos gloriosos dentro da universidade.

E a todos que, direta ou indiretamente, fizeram parte da minha formação, deixo aqui minha imensa gratidão.

“Nossa maior fraqueza está em desistir. O caminho mais certo de vencer é tentar mais uma vez.” (Thomas Edison).

RESUMO

O sistema elétrico brasileiro está em constante expansão, o que resulta na necessidade do desenvolvimento de todo o sistema interligado nacional. Isso implica na construção de novas centrais geradoras, linhas de transmissão e subestações de energia. Visto isso, tais sistemas devem operar de forma apropriada, mantendo sua devida continuidade e alinhando o seu desempenho estável à segurança pessoal. Para tal é de suma importância que o aterramento elétrico das instalações esteja devidamente projetado e principalmente comissionado de forma correta. Particularmente, nas subestações de energia é necessário um cuidado especial em todos os ensaios realizados no período de comissionamento. O entendimento por parte dos envolvidos no projeto do aterramento de uma subestação, além da análise precisa e detalhada dos dados de ensaios e equipamentos compreendidos, são primordiais para que o projeto seja realizado e entregue de forma íntegra, segura e eficiente, obedecendo todos os critérios estabelecidos nas normas nacionais e internacionais concernentes ao tema. O presente trabalho apresenta a descrição e análise dos testes realizados no comissionamento da malha de aterramento da subestação coletora Cacimbas 34,5/230 kV, reunindo dados reais e expondo as principais características dos ensaios realizados, seguindo as recomendações das normas: ABNT NBR 15749, NBR 15751, IEEE std 80 e std 81. Esse trabalho traz o embasamento teórico e prático necessário para realização dos ensaios de comissionamento de um sistema de aterramento em uma subestação, sendo portanto uma referência para engenheiros e técnicos que atuam na área.

Palavras-chave: Aterramento elétrico. Subestação. Comissionamento. Geração eólica.

ABSTRACT

The Brazilian electrical system is constantly expanding, which results in the need to develop the entire national interconnected system, which implies the construction of power plants, transmission lines and energy substations. Seen, the systems are compatible with the proper form, maintaining their due continuity, aligning their stable performance to personal safety. To this end, it is extremely important that the electrical landfill of the installations is properly designed and mainly commissioned correctly. Under these conditions, the need for special care in all tests carried out without commissioning is evident in energy substations. The environmental and environmental issues included are essential for the project to be carried out and delivered in an integral, safe and efficient manner. established in national and international standards of concern to the topic. The present work presents a description and analysis of the tests performed without commissioning of the landing strip of the Cacimbas 34,5 / 230 kV collector substation, gathering real data and exposing as main characteristics of the tests carried out, following the recommendations of the standards: ABNT NBR 15749, NBR 15751, IEEE std 80 and std 81. The paper proposes a theoretical and practical basis for conducting the commissioning tests of a grounding system in a substation, becoming a reference for engineers and technicians who in the area.

Keywords: Electrical grounding. Substation. Commissioning. Wind power generation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Principais Componentes do Aterramento.....	17
Figura 2 - Componentes de corrente no solo.....	18
Figura 3 - Exemplo de um canto da malha de aterramento da subestação Cacimbas.	20
Figura 4 - Exemplo de conexão exotérmica.....	22
Figura 5 - Exemplo de sub-malha.....	23
Figura 6 - Resistividade x Temperatura.	27
Figura 7 - Estratificação do solo em duas camadas.	27
Figura 8 - Circuito para o método de Franck Wenner.....	28
Figura 9 - Contornos de potenciais em um solo homogêneo.	31
Figura 10 - Indivíduo submetido a potencial de toque.	33
Figura 11 - Circuito para o cálculo do potencial de toque.	34
Figura 12 - Indivíduo submetido a potencial de passo.	35
Figura 13 - Circuito para o cálculo do potencial de passo.	35
Figura 14 - Camada de brita adicional sobre o solo.	36
Figura 15 - Corrente de curto circuito pela terra.	37
Figura 16 - Retorno da corrente de sequência zero para a subestação.....	38
Figura 17 - Corrente de malha em um curto a terra.....	39
Figura 18 - Arranjo dos equipamentos para o método da queda de potencial.....	40
Figura 19 - Curva de potencial de patamar do solo.	41
Figura 20 - Potencial elétrico gerado na superfície do solo pelo método da queda de potencial.	42
Figura 21 - Esquema de medição para potencial de toque.....	45
Figura 22 - Esquema de medição para potencial de toque.....	45
Figura 23 - Vista aérea da subestação coletora Cacimbas.....	48
Figura 24 - Leiaute da malha de aterramento da subestação Cacimbas.	50
Figura 25 - Simulação da modelagem do solo da Subestação.	50
Figura 26 - Modelagem da malha de aterramento da subestação Cacimbas.....	52
Figura 27 - Perfis de potencial traçados.....	52
Figura 28 - Isolinhas de potencial de acordo com os perfis traçados.	53
Figura 29 - Isolinhas de potencial da malha de aterramento, à direita gráfico em 2D, à esquerda gráfico em 3D.	54
Figura 30 - Grupo motor gerador.....	55
Figura 31 - multímetros, à esquerda alicate amperímetro e à direita multímetro digital.....	56
Figura 32 - Segregação dos cabos guarda da linha de transmissão com a subestação.	58
Figura 33 - Representação da subestação coletora e estruturas da linha de transmissão.....	59
Figura 34 - Contra pesos da linha de transmissão.	60
Figura 35 - Valor de corrente estabelecido no ensaio.	60
Figura 36 - Medição da resistividade do solo. Do lado esquerdo haste fincada no solo. Do lado direito o valor mensurado de tensão.	61
Figura 37 - Medições dos potenciais de passo. A esquerda valor mensurado, a direita procedimento de medição.....	65
Figura 38 - Medição dos potenciais de toque. A esquerda procedimento de medição e a direita valor medido.	65
Figura 39 - Croqui com os pontos críticos dos potenciais na superfície do solo da subestação.	66
Figura 40 - Esquemático do método da queda de potencial.....	77

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Efeito da umidade na resistividade do solo.....	25
Gráfico 2 - Curva característica (Resistência X Distância).....	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Ordem de grandeza da resistividade de certos materiais.	24
Tabela 2 - Tipos de solos e suas resistividades.	24
Tabela 3 - Influência da temperatura na resistividade do solo.	26
Tabela 4 - Distribuição dos parques eólicos cacimbas.	47
Tabela 5 - Níveis de curto circuitos nas barras na subestação Cacimbas.	49
Tabela 6 - Valores dos potenciais admissíveis na superfície do solo.	51
Tabela 7 - Valores medidos de tensão e resistência calculada.	62
Tabela 8 - Potenciais de passo e toque encontrados nos pontos mostrados na Figura 37.	67
Tabela 9 - Potenciais de passo medidos no pátio da subestação.	73
Tabela 10 - Potenciais de toque medidos no pátio da subestação.	74
Tabela 11 - Valores de tensão de passo para áreas externas ao pátio.	74
Tabela 12 - Valores de tensão de Toque para áreas externas ao pátio.	75

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
IEEE	Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
MRT	Monofilar com Retorno pela Terra
NBR	Norma Brasileira Regulamentar
UFGRS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
CC	Sistema Integrado de Bibliotecas
LT	Linha de Transmissão
GMG	Grupo Motor Gerador
SE	Subestação
GPR	Máxima Elevação de Potencial no Solo
BVS2	Bons Ventos da Serra 2
OPGW	<i>Optical Ground Wire</i>
EPI	Equipamento de Proteção Individual
EPC	Equipamento de proteção Coletiva

LISTA DE SÍMBOLOS

I	Corrente Elétrica
%	Porcentagem
V	Potencial Elétrico
P	Resistividade Elétrica
H	Espessura de uma camada
D	Distância entre a malha de terra e o eletrodo de corrente
B	Profundidade da haste no método de Werner
R	Resistência elétrica
L	Comprimento dos cabos
Ψ	Função de ψ
ϵ	Permissividade elétrica
Δ	Condutividade do solo
Ω	Frequência angular
A	Espaçamento entre as hastes de aterramento
B	Profundidade das hastes de aterramento
ΔV	Diferença de potencial
K	Constante empírica relacionada a massa do corpo humano
H	Função de η
Φ	Função de φ

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	14
1.1 Objetivos	15
1.2 Estrutura do trabalho.....	15
2 CONCEITOS SOBRE ATERRAMENTO ELÉTRICO.....	17
2.1 Aterramento em subestações.....	19
2.2 Elementos da malha de terra	20
<i>2.2.1 Eletrodo de aterramento</i>	<i>20</i>
<i>2.2.2 Condutor de aterramento</i>	<i>21</i>
<i>2.2.3 Conexões</i>	<i>21</i>
<i>2.2.4 Malha auxiliar.....</i>	<i>22</i>
2.3 Resistividade do solo	23
<i>2.3.1 Influência da umidade</i>	<i>25</i>
<i>2.3.2 Influência da temperatura.....</i>	<i>26</i>
<i>2.3.3 Influência da estratificação.....</i>	<i>27</i>
<i>2.3.4 Determinação da resistividade do solo: O método de Franck Wenner</i>	<i>28</i>
2.4 Conceitos básicos de segurança em aterramentos.....	30
<i>2.4.1 Efeitos da corrente elétrica no corpo humano.....</i>	<i>31</i>
<i>2.4.2 Tensão de contato ou de toque</i>	<i>32</i>
<i>2.4.3 Potencial de passo</i>	<i>34</i>
2.5 Retorno da corrente de sequência zero de curto circuito.....	37
2.6 Experimentos de Campo	39
<i>2.6.1 Medição da resistência de aterramento: método da queda de potencial</i>	<i>40</i>
<i>2.6.2 Medição dos potenciais na superfície do solo.....</i>	<i>43</i>
3 COMISSONAMENTO DA MALHA DE ATERRAMENTO	47
3.1 Complexo eólico Bons Ventos da Serra 2.....	47
3.2 Características gerais da malha de aterramento da subestação coletora Cacimbas	48
3.2.1 Instrumentação	55
<i>3.2.1.1 Gerador</i>	<i>55</i>
<i>3.2.1.2 Equipamentos multitestes.....</i>	<i>56</i>
<i>3.2.1.3 Cabos, carretel e hastes</i>	<i>56</i>
<i>3.2.1.4 Resistor</i>	<i>57</i>

3.2.2 <i>Medição da resistência de aterramento</i>	57
3.2.3 <i>Medição dos potenciais na superfície do solo</i>	64
4 CONCLUSÕES	68
5 TRABALHOS FUTUROS	70
REFERÊNCIAS	71
APÊNDICE A – VALORES DE ENSAIO DOS POTENCIAIS DE PASSO E TOQUE.	73
ANEXO A – TEORIA DO MÉTODO DA QUEDA DE POTENCIAL	76
ANEXO B – ESTRUTURAL DA SE COLETORA CACIMBAS	80

1 INTRODUÇÃO

O avanço tecnológico e industrial, demanda a cada dia quantidades maiores de energia elétrica. Assim, faz-se necessário sistemas de potência que supram essa crescente demanda por energia da forma segura, confiável e economicamente viável (TELLÓ, 2007).

Neste cenário, o tema “aterramento elétrico” vem despertando e atraindo a atenção de inúmeros pesquisadores e profissionais que exercem atividade no campo da engenharia elétrica. O principal motivo de tal atração é que um aterramento elétrico inadequado pode ter consequências indesejáveis, tanto para pessoas quanto para a instalação ao qual o mesmo está associado, afetando portanto os índices de disponibilidade e segurança dos empreendimentos (TELLÓ, 2007).

Logo, os sistemas de aterramento são essenciais para o funcionamento correto e seguro das instalações elétricas. O mesmo deve alinhar tanto a garantia da continuidade ininterrupta de energia elétrica aliada a segurança pessoal. Para tal, faz-se necessário que o aterramento elétrico esteja dimensionado, instalado e comissionado de forma adequada. Na prática, o comissionamento do sistema é uma das principais atividades no processo iterativo que é o projeto de aterramentos elétricos.

Pode-se definir o termo comissionamento como uma atividade técnica que contempla uma série de testes e avaliações do funcionamento de máquinas, equipamentos e instalações, tanto em seus componentes como um todo, afim de permitir ou autorizar a sua operação (CONFEA, 2007). Na prática, o comissionamento pode ser entendido como um conjunto de técnicas e procedimentos de engenharia aplicados para verificar, inspecionar e testar cada componente físico do sistema, partindo dos equipamentos individuais mais simples até os mais complexos como módulos, subsistemas e sistemas (PRATES, FARES e MONTENEGRO, 2010).

O desenvolvimento de diretrizes para o processo de comissionamento começou formalmente em 1982, quando a “*American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*” (ASHRAE) formou um comitê para documentar as melhores práticas afim de alcançar os requisitos exigidos em um projeto, (ASHRAE, 2013). Desde então, empresas e órgãos de engenharia estabeleceram documentos orientativos e roteiros de comissionamento afim de padronizar tal procedimento.

O processo de comissionamento é aplicável a todas as fases do empreendimento, desde o projeto básico onde são feitos os testes de fábrica, até a montagem e aceitação por parte do cliente. É nesta fase que as falhas de projeto, erros de construção ou transporte devem vir à

tona. O planejamento e execução com excelência dessa atividade são de extrema importância para que o que foi projetado seja entregue de forma íntegra ao cliente.

Atualmente, os materiais que tratam sobre o tema comissionamento são bastantes limitados e não explicativos, o que torna as referências de estudo bastante escassas, dificultando assim o surgimento de novas técnicas e padronizações de roteiros por parte de engenheiros e pesquisadores da área. Em processos de comissionamento mais específicos como é o caso de sistemas de aterramento, a situação se torna mais crítica.

A partir de pesquisas e do envolvimento prático com o tema, observou-se a deficiência de documentos relativos ao comissionamento de malhas de aterramento que tragam um embasamento teórico suficiente para que os engenheiros e técnicos envolvidos nesse processo possam realizar a implementação, análise e desenvolvimento da sequência de testes, recomendados nos padrões definidos em normas nacionais e internacionais. Com isso a criação de um documento que venha dar embasamento teórico e prático de um procedimento de comissionamento mostra-se de extrema relevância para que as atividades sejam planejadas, fiscalizadas e entregues da melhor maneira possível.

Apresentar um trabalho que descreva as etapas do comissionamento dentro de parques eólicos poderá ajudar na melhoria dos indicadores de disponibilidade almejados em empreendimentos deste tipo, aumentando a confiabilidade e possibilitando uma maior facilidade de detectar erros e possíveis pontos prejudiciais à segurança e ao processo de geração de Energia Eólica. Assim, o presente trabalho apresenta uma descrição dos ensaios de comissionamento realizados na malha de aterramento da subestação coletora Cacimbas 34,5/230 kV que compõe o complexo eólico Bons Ventos da Serra 2, visando retratar na prática os ensaios realizados, e através disso propiciar um documento base para estudos e consultas relativos ao tema.

1.1 Objetivos

O presente trabalho tem como principal objetivo desenvolver um estudo sobre a descrição e análise dos principais ensaios realizados em um sistema de aterramento durante a fase de comissionamento, sendo feito a identificação prática das atividades de comissionamento em campo.

1.2 Estrutura do trabalho

O trabalho foi dividido em quatro capítulos, que estão distribuídos da seguinte maneira:

Capítulo 2 Conceitos Sobre Aterramento Elétrico: Serão apresentados conceitos teóricos que são de fundamental importância para entendimento das seções subsequentes do trabalho, apontando os esquemáticos de testes, metodologia utilizada e as ferramentas necessárias para realizar os ensaios na malha de aterramento.

Capítulo 3 Comissionamento da Malha de Aterramento: Apresentação dos ensaios práticos realizados no sistema de aterramento, expondo os resultados e comparando com os valores de projeto.

Capítulo 4 Conclusões: Apresentação de uma análise final dos dados obtidos, esclarecendo os resultados apresentados no desenvolvimento do trabalho

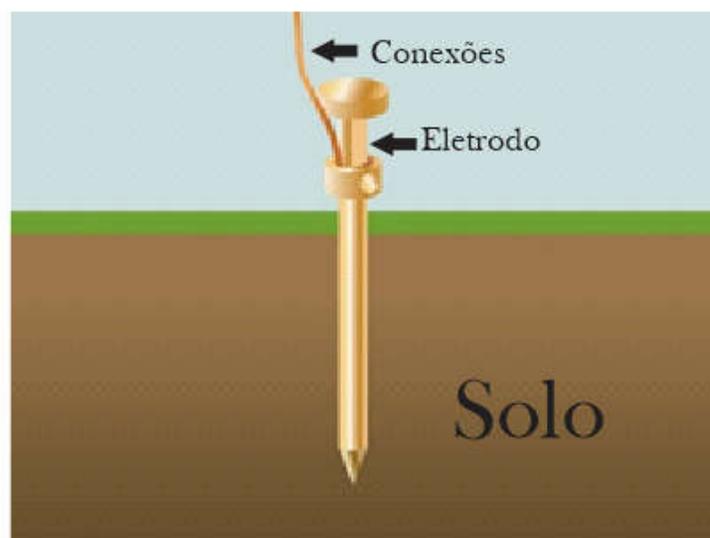
Capítulo 5 Trabalhos futuros: São apontados trabalhos e perspectivas futuras para desenvolvimento posterior, e aperfeiçoamento do trabalho.

2 CONCEITOS SOBRE ATERRAMENTO ELÉTRICO

Aterramento elétrico pode ser definido como o conjunto de componentes que possibilitam um caminho de baixa impedância para a terra, facilitando o escoamento de correntes indesejadas quando há ocorrência de perturbações no sistema como curtos circuitos fase terra, descargas atmosféricas e cargas estáticas na carcaça dos equipamentos.

Além disso, o aterramento elétrico proporciona uma “referência” para um sistema de corrente alternada, facilitando também a rápida atuação das proteções na ocorrência de curtos circuitos à terra no sistema elétrico, sendo portanto crucial na proteção de possíveis danos aos equipamentos (TELLÓ, 2007). Um aterramento elétrico é composto por três principais componentes, que são: As conexões do sistema que ligam ao aterramento, condutores cravados no solo e toda a terra que os envolvem. A Figura 1 representa os elementos citados, sendo que o condutor é um eletrodo revestido de cobre.

Figura 1 - Principais Componentes do Aterramento.



Fonte: Adaptado de (FLUKE)

O aterramento elétrico pode desempenhar uma gama variada de funções, desde o emprego em sistemas específicos de telecomunicação até ramos da eletrônica. Contudo, suas duas principais funções estão associadas a dois fatores primordiais em qualquer instalação elétrica, que são:

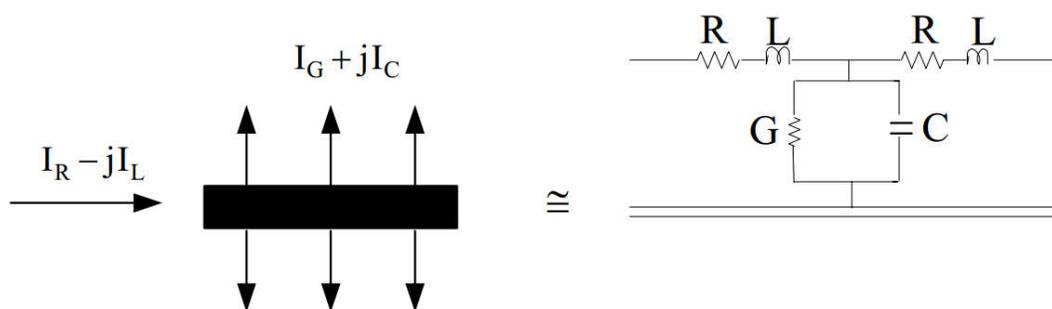
O desempenho do sistema ao qual o aterramento está conectado, neste pode-se citar o solo com um condutor de retorno, aplicação bastante utilizada nas MRT's que são muito empregadas em distribuição rural, em alguns sistemas de corrente contínua que usam o solo como segundo condutor, além da proteção do sistema em sistemas polifásicos, atuando quando o desequilíbrio de tensões resultante, acarreta correntes no solo (VISÁCRO, 2002).;

A questão de segurança dos seres vivos e da proteção dos equipamentos, pode-se ressaltar que o aterramento permite o escoamento para terra de cargas ou correntes de descarga sendo essas vindas de fenômenos atmosféricos ou não, além de assegurar a distribuição de potenciais seguros na superfície do solo quando injeta-se uma corrente nos seus eletrodos, protegendo assim as pessoas contra possíveis choques elétricos (VISÁCRO, 2002).

O ponto do sistema o qual se deseja realizar o aterramento pode apresentar natureza variada. De acordo com a aplicação almejada, pode ser constituído de uma placa impressa em um circuito, carcaça de um motor ou um neutro de um instalação elétrica (VISÁCRO, 2002).

Em um aterramento elétrico, deve-se considerar a presença de resistência, capacitância e indutância, na conexão com a terra, uma vez que esses elementos influenciam diretamente a corrente que flui pelo solo. Considera-se a impedância do sistema como a oposição do solo à injeção de corrente através de um eletrodo. A Figura 2 ilustra a natureza deste circuito e a origem da sua configuração.

Figura 2 - Componentes de corrente no solo.



Fonte: (VISÁCRO, 2002)

Ao considerar-se apenas uma porção do eletrodo de aterramento, verifica-se que a corrente que se dissipa para o solo é formada pelas quatro componentes mostradas na Figura 2. Parte da corrente injetada é dissipada para a terra e o restante no comprimento do eletrodo. Em relação a última, são estabelecidas perdas internas, e um campo magnético em volta do caminho da corrente pelo condutor. Ademais, existe a influência do campo elétrico no solo (através de

uma resistividade ρ e uma permissividade ϵ), através do qual se estabelecem as correntes capacitivas e condutivas do meio. Tais correntes independem da geometria do eletrodo, mas dependem da relação δ/ω , em que δ refere-se a condutividade do solo e ω a frequência angular (VISÁCRO, 2002).

O circuito equivalente mostrado na Figura 2 representa os elementos envolvidos na análise de sistemas de aterramento sujeitos ou não a ondas impulsivas. Em análises de baixa frequência, a representação de uma haste vertical cravada no solo resume-se apenas a uma resistência ôhmica R (TELLÓ, 2007). Sendo que os efeitos reativos e capacitivos são bastante reduzidos, resultando em uma configuração que se aproxima das condições em regime permanente dos sistemas de potência, como no caso de curtos circuitos. Então, o valor da resistência de aterramento pode ser quantificado, através da lei de Ohm, pela relação entre a tensão aplicada e a corrente resultante, neste caso entende-se como potencial adquirido pelo eletrodo referenciado ao infinito (VISÁCRO, 2002).

2.1 Aterramento em subestações

Uma subestação de energia elétrica é um sistema de potência complexo que apresenta níveis de tensão e corrente elevados, desenvolvendo então altos gradientes de potencial quando há ocorrência de uma falha à terra. Através disso, subestações requerem um sistema de aterramento que garanta a confiabilidade e os níveis de segurança dentro dos valores aceitáveis.

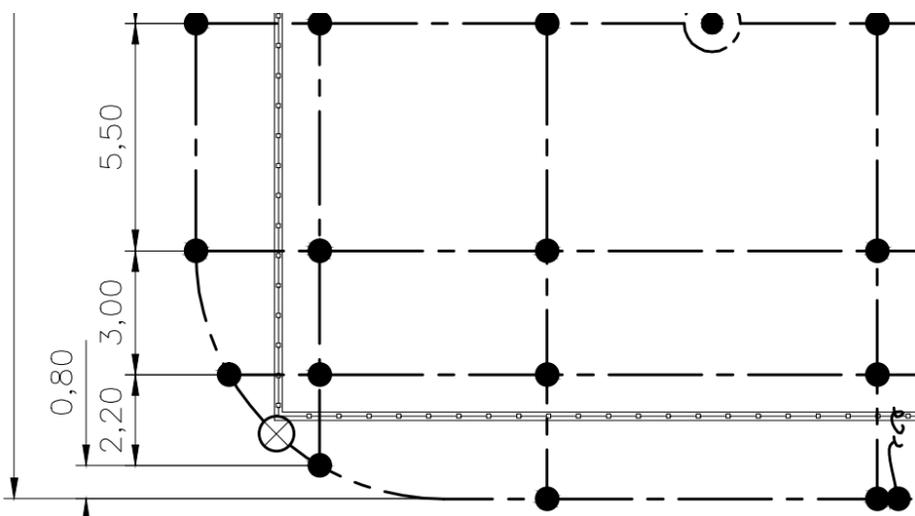
Existem inúmeras maneiras de construir sistemas, as principais são:

- Uma simples haste cravada no solo;
- Hastes alinhadas;
- Hastes em triângulo;
- Hastes em círculos;
- Placas de aterramento;
- Malha de terra.

Por ser um sistema de alta potência, utiliza-se uma combinação das técnicas acima, sendo o principal elemento é a malha de terra. Essa constitui um quadriculado de cabos enterrados no solo em forma de rede. Utilizam-se também placas de aterramento auxiliares, ou sub redes, nos locais onde serão operados os equipamentos, para que o operador não seja submetido a uma tensão diferencial elevada em caso de falhas.

Na prática a corrente à terra tende a escoar pela periferia e cantos da malha de aterramento. Isso acontece devido a interação entre os condutores do sistema de aterramento, forçando a circulação da maior parte da corrente pelas as bordas da malha. Por esta razão os cantos da malha são constituídos em formato arredondado, para evitar o sobreaquecimento nesses pontos. Além disso, são utilizadas hastes de aço cobreado nas periferias da malha, afim de ajudar o escoamento das correntes de falta à terra. Também são utilizadas no aterramento de alguns equipamentos da subestação os quais necessitam de pontos específicos para ajudar o escoamento das correntes, como os transformadores de corrente, transformadores de potencial e seccionadoras, essas hastes são representadas por um círculo com um (x), como pode ser visto na Figura 3.

Figura 3 - Exemplo de um canto da malha de aterramento da subestação Cacimbas.



Fonte: (BONS VENTOS DA SERRA, 2017)

2.2 Elementos da malha de terra

Uma malha de terra pode empregar diferentes tipos de materiais em sua construção, conforme a aplicação, sendo o conhecimento de tais materiais de suma importância nos estudos relativos a aterramentos elétricos. Os tópicos subsequentes, mostram os principais tipos de aparatos e peças utilizados em projetos de aterramento.

2.2.1 Eletrodo de aterramento

O eletrodo de aterramento é o elemento do sistema de aterramento que assegura o contato elétrico com o solo, fazendo com que a corrente de defeito se disperse na terra (ABNT, 2009). Em subestações, um único eletrodo é insuficiente para estabelecer um sistema confiável de aterramento. Logo, diversos eletrodos são utilizados em locais da subestação onde as correntes de falta podem propiciar condições críticas, formando uma rede de aterramento ligadas a malha de terra, a fim de auxiliar escoamento de tais correntes. (IEEE, 2000).

Geralmente usa-se eletrodos no formato de hastes cilíndricas do tipo *Copperweld*, que é um tipo de haste sendo composta por uma barra de aço revestida por cobre, sendo também usual encontrar hastes revestidas em zinco. Elas apresentam rigidez mecânica, boa condutividade elétrica, além de suportar bem as condições de corrosão impostas.

2.2.2 Condutor de aterramento

A malha de aterramento é composta por cabos de cobre nu, conectados, formando uma rede de quadriculados. Utiliza-se em projetos de aterramento o cabo de cobre nu, por este apresentar uma boa condutividade elétrica e boa resistência a corrosão.

De acordo com as normas vigentes, utiliza-se uma seção mínima para o condutor da malha de 50 mm². No entanto a maioria das empresas utilizam como critério uma seção mínima de 70 mm².

2.2.3 Conexões

A malha de aterramento é instituída por diversas conexões. Elas são compostas por elementos metálicos que conectam os condutores na ocorrência de emendas ou derivações. Recomenda-se que essas conexões sejam soldadas, sendo a escolha do material de soldagem é importante. Sua má escolha pode acarretar problemas na circulação de corrente na malha, podendo afetar os níveis de toque e passo na superfície. Vale ressaltar que uma característica primordial desse tipo de conexão é a temperatura que a mesma suporta durante a ocorrência de um curto circuito. Normalmente utiliza-se a solda de natureza exotérmica que pode chegar a suportar temperaturas da ordem de 900 ° C.

O processo de solda exotérmica é feito a quente, onde ocorre a fusão entre o condutor metálico e o elemento de fusão através de uma reação química. Essas conexões são bastante úteis, visto que apresentam baixo índice de corrosão, afrouxamento e apresentam alta

rigidez mecânica. Existem vários tipos de conexão que utilizam esse processo. A Figura 4 mostra o tipo de conexão (T), muito usual em projetos de malha (MAMEDE FILHO, 2007).

Figura 4 - Exemplo de conexão exotérmica



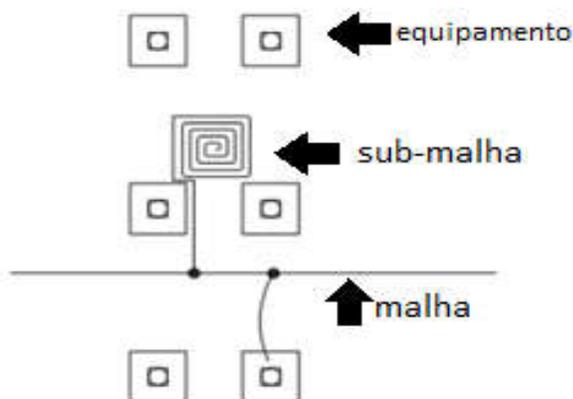
Fonte: (PORTAL METALICA, 2017)

2.2.4 Malha auxiliar

Em situações em que os operadores da subestação ficam sujeitos a situações de risco, ou seja, com potenciais de toque e passo capazes de ocasionar choques elétricos, são adicionados sub-malhas de aterramento enterradas no solo e ligadas a malha geral da subestação. Na prática elas podem ser chamadas de “Malhas Aranha”, por conta do seu formato.

Essas malhas são postas nos equipamentos que necessitam de manobras manuais no pátio da subestação, como é o caso dos seccionadores. O manuseio errôneo de um equipamento desse tipo, pode acarretar arcos voltaicos, afetando diretamente o operador e causando danos à integridade do mesmo. Na Figura 5, pode-se observar um exemplo da ligação de uma sub-malha à malha de terra principal, onde observa-se a utilização de um fio de cobre no formato de espiral no local de operação.

Figura 5 - Exemplo de sub-malha.



Fonte: Adaptado de (SILVA, 2012)

2.3 Resistividade do solo

Para o projeto de um aterramento elétrico, é extremamente importante o conhecimento prévios das características do solo, principalmente em relação a sua composição, homogeneidade e resistividade (MAMEDE FILHO, 2007).

Define-se a resistividade do solo (ρ) como a resistência elétrica (R) que é medida entre as faces opostas de um cubo com dimensões unitárias preenchido com solo, sendo que a unidade é “ Ωm ” (VISÁCRO, 2002). Sabe-se então que a relação entre resistividade e resistência é dada pela Equação 1:

$$R = \rho \frac{l}{A} \text{ ou } \rho = R \frac{A}{l} \quad (1)$$

Para aplicações em baixa frequência, na modelagem matemática do solo pode se considerar o modelo quase estático, aonde, sua representação se dá apenas por meio de uma resistência elétrica R . Em geral, o solo não é um bom condutor de eletricidade, e sua resistividade elétrica pode variar em uma escala de 0 a 80 $\text{k}\Omega\cdot\text{m}$. Quando totalmente seco, o solo pode ser considerado como um material isolante (VISÁCRO, 2002).

Na Tabela 1 verifica-se o valor da resistividade do solo em relação aos principais condutores de eletricidade utilizados.

Tabela 1 - Ordem de grandeza da resistividade de certos materiais.

Condutor	Resistividade ($\Omega.m$)
Cobre puro	$1,6 \times 10^{-8}$
Alumínio	$2,7 \times 10^{-8}$
Solos mais comuns	5 a 20.000

Fonte: Adaptado de (VISÁCRO, 2002)

A resistividade do solo é influenciada por diversos fatores como:

- Tipo de solo;
- Mistura de diversos tipos de solo;
- Teor de umidade;
- Temperatura;
- Compactação e pressão;
- Composição química.

A Tabela 2 mostra a resistividade do solo para diferentes condições. Observa-se resistividades elevadas para solos que apresentam condições arenosas e rochosas, e baixas para solos que possuem resíduos vegetais e animais, que é o caso das argilas, lama e terra de jardim.

Tabela 2 - Tipos de solos e suas resistividades.

Tipo de solo	Resistividade [$\Omega.m$]
Lama	5 a 100
Terra de jardim 50% de umidade	140
Terra de jardim com 20 % de umidade	480
Argila seca	480
Argila com 40% de umidade	80
Argila com 20% de umidade	330
Areia seca	3.000 a 8.000
Calcário compacto	1.000 a 5.000
Granito	1.500 a 10.000

Fonte: Adaptado de (KINDERMANN e CAMPAGNOLO, 1995)

Na prática, os solos não são homogêneos, mas formados por diversas camadas de materiais. Tais camadas são consideradas horizontais em sua maioria, mas na prática podem estar dispostas de diversas formas no terreno.

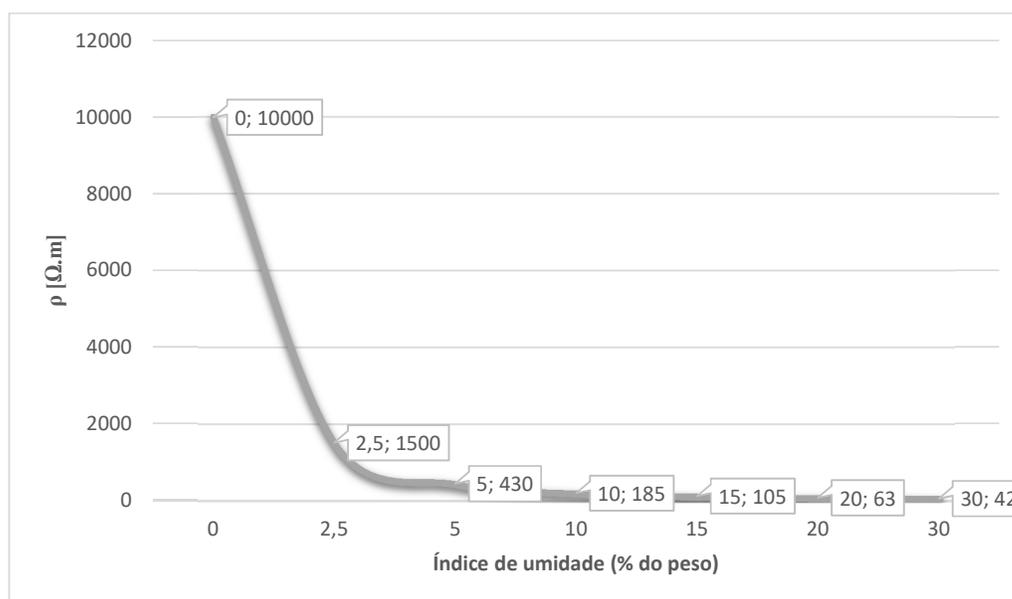
Existem vários métodos para se determinar a resistividade aparente do solo, sendo mais confiáveis aqueles realizados em campo. O mais utilizado é o método desenvolvido por Frank Wenner, que será discutido no tópico 2.3.2 do presente trabalho.

2.3.1 Influência da umidade

Considerando-se a aplicação em baixa frequência, a condutibilidade elétrica ocorre através de mecanismos eletrolíticos, sendo que a eletrólise acontece quando existe água e sais que proveem os íons da mistura. Sendo assim, a condutividade é afetada diretamente pela água contida no solo, pois quando aumenta-se a umidade os sais são mais facilmente dissolvidos, o que implica em um caminho mais favorável à passagem da corrente iônica. (VISÁCRO, 2002).

Em períodos chuvosos a resistividade aparente do solo diminui, tornando o sistema de aterramento instalado em um local com essas características mais eficaz. No Gráfico 1 é apresentado a relação entre a resistividade do solo e a umidade para um solo arenoso. Percebe-se variações bruscas da resistividade a partir do aumento de 2,5 % do índice de umidade, onde a derivada da curva tende a ser crescente.

Gráfico 1 - Efeito da umidade na resistividade do solo.



Fonte: Adaptado de (VISÁCRO, 2002).

2.3.2 Influência da temperatura

A temperatura também é um fator que influencia a resistividade do solo, mas não tão diretamente como a umidade. Na Tabela 3 pode-se observar o comportamento da resistividade do solo quando o mesmo está submetido a variações de temperatura, mantendo todas as outras influências fixas.

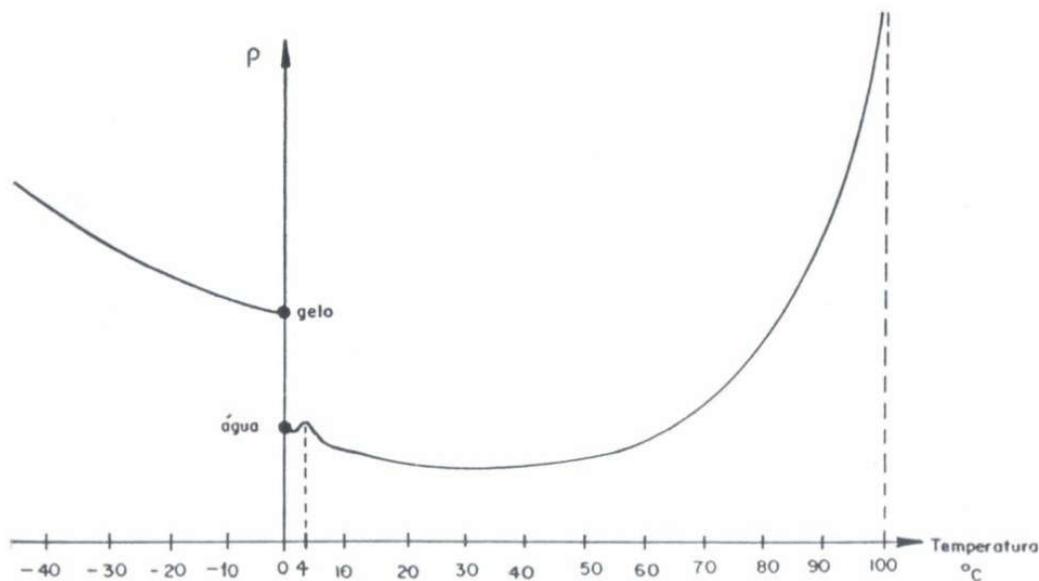
Tabela 3 - Influência da temperatura na resistividade do solo.

Temperatura	Resistividade (Solo arenoso) [Ω.m]
20	72
10	99
0 (água)	138
0 (gelo)	300
5	790
-15	3300

Fonte: Adaptado de (VISÁCRO, 2002)

As maiores variações na resistividade ocorrem em dois pontos: quando a temperatura se encontra próxima aos 100 ° C e quando ela fica abaixo dos 0 ° C. Partindo de um “ ρ ” mínimo, com a diminuição da temperatura, ocorre a aglutinação da água, produzindo então uma dispersão das ligações iônicas entre os grãos de terra, aumentando assim a resistividade. Através da Figura 6, observa-se uma descontinuidade no gráfico no ponto de temperatura 0° C (água), aumentando o seu valor para o ponto 0° C (gelo). Atribui-se esse fenômeno à mudança repentina do estado de ligação entre os grânulos da concentração eletrolítica. Quando a temperatura diminui ocorre uma concentração molecular, o que faz o solo se tornar mais seco, e com isso sua resistividade aumenta. No outro extremo da curva, com temperaturas elevadas acima de 100 ° C, a vaporização faz com que o solo fique mais seco, o que acarreta a ocorrência de bolhas internas, e com isso aumentando a resistividade (KINDERMANN e CAMPAGNOLO, 1995).

Figura 6 - Resistividade x Temperatura.

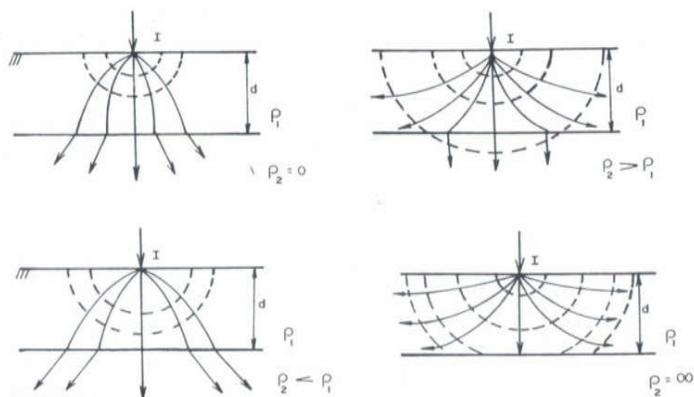


Fonte: (KINDERMANN e CAMPAGNOLO, 1995)

2.3.3 Influência da estratificação

Através da variação da resistividade das camadas do solo existe também uma variação na dispersão da corrente que se dissipa no mesmo. Isso fica explícito na Figura 7, que mostra um solo estratificado em duas camadas, onde é apresentado o comportamento do fluxo de dispersão da corrente em um solo heterogêneo para variações dos valores de resistividade das duas camadas. As linhas pontilhadas mostram as superfícies equipotenciais e cheias são as correntes fluindo no solo.

Figura 7 - Estratificação do solo em duas camadas.



Fonte: (KINDERMANN e CAMPAGNOLO, 1995)

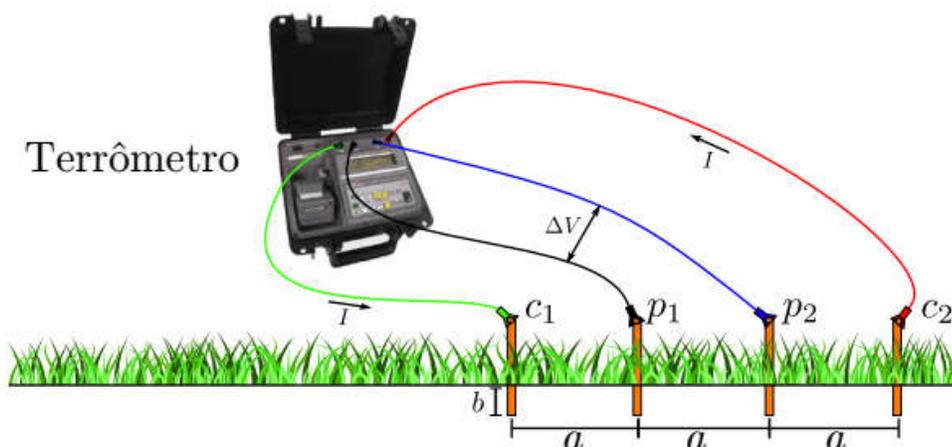
2.3.4 Determinação da resistividade do solo: O método de Franck Wenner

A medição da resistividade do solo deve ser feita depois da terraplanagem do terreno onde será instalado a malha de terra, e ao passar-se um decorrido tempo afim de estabilizar as componentes físico-químicas do solo.

As medições são feitas através da imposição de sinais eletromagnéticos em regiões limitadas do solo, colocando-se eletrodos dispostos adequadamente. Pela detecção de potenciais estabelecidos, é possível determinar a característica do solo em termos da sua resistividade. Um dos métodos mais utilizados por técnicos e engenheiros de campo, é o método desenvolvido por Franck Wenner, que oferece facilidade operacional e precisão para encontrar o valor da resistividade do solo.

Esse método utiliza conceitos geoeletricos através de quatro pontos alinhados, igualmente espaçados e cravados a mesma profundidade. De acordo com o que está exibido na Figura 8, com um terrômetro injeta-se um corrente que circula entre os eletrodos C1 e C2. Essa corrente passando pelo solo, faz com que se gere uma diferença de potencial entre os pontos P1 e P2. Assim, é possível obter uma relação entre a resistividade aparente do solo e as duas medidas já mencionadas.

Figura 8 - Circuito para o método de Franck Wenner.



Fonte: (COELHO, 2015)

A resistividade aparente do solo, é diretamente ligada a profundidade “b” a qual as hastes estão cravadas no solo, bem como a resistência R, que é obtida através da relação das

medições de corrente e de tensão nas hastes de aterramento, que estão espaçadas entre si a uma distância “a”.

Considerando um solo uniforme, o potencial “P1”, em que a haste está enterrada a uma profundidade “b”, é encontrada aplicando-se a Equação 2. Essa expressão é obtida através da aplicação da função potencial no solo.

$$V_{p1} = \frac{\rho_a}{4\pi} \left[\frac{1}{a} + \frac{1}{\sqrt{a^2 + (2b)^2}} - \frac{1}{2a} - \frac{1}{\sqrt{(2a)^2 + (2b)^2}} \right] \quad (2)$$

Da mesma forma, agora adotando uma corrente negativa, pode-se calcular o potencial no ponto P2, como mostra a Equação 3.

$$V_{p2} = \frac{\rho_a}{4\pi} \left[\frac{1}{2a} + \frac{1}{\sqrt{(2a)^2 + (2b)^2}} - \frac{1}{a} - \frac{1}{\sqrt{a^2 + (2b)^2}} \right] \quad (3)$$

Com isso, a diferença de potencial entre as hastes P1 e P2, será:

$$V_{p1} - V_{p2} = \frac{\rho_a}{4\pi} \left[\frac{1}{2a} + \frac{2}{\sqrt{a^2 + (4b)^2}} - \frac{1}{\sqrt{a^2 + b^2}} \right] \quad (4)$$

Realizando a divisão da diferença de potencial entre P1 e P2, e da corrente injetada “I”, tem-se então o valor da resistência “R” do solo para a profundidade de penetração da corrente:

$$R = \frac{V_{p1-p2}}{I} = \frac{\rho_a}{4\pi} \left[\frac{1}{a} + \frac{2}{\sqrt{a^2 + (2b)^2}} - \frac{2}{\sqrt{(2a)^2 + (2b)^2}} \right] \quad (5)$$

Seguindo a relação linear entre a resistência e resistividade, tem-se:

$$\rho = \frac{4\pi a R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + (2b)^2}} - \frac{2a}{\sqrt{(2a)^2 + (2b)^2}}} [\Omega. m] \quad (6)$$

A Equação 6 é conhecida como Fórmula de Palmer, e é empregada para encontrar a resistividade aparente do solo através do método de Wenner.

A norma IEEE (2012) indica que normalmente os eletrodos não são enterrados mais do que 10 % da distância de espaçamento das hastes, fazendo então com que a Equação 6 seja simplificada. No entanto, quando as distancias de medição são pequenas necessita-se enterrá-las por uma profundidade maior, impossibilitando a simplificação citada. Se necessário, pode-se utilizar água adicionada de sais afim de melhorar a resistência de contato entre o eletrodo e o solo. O resultado da simplificação comentada pode ser averiguado na Equação 7:

$$\rho_a = 2\pi aR[\Omega.m] \quad (7)$$

De acordo com Kindermann e Campagnolo (1995), o número de direções em que as medidas deverão ser levantadas, depende de três fatores:

- Importância do local do aterramento;
- Alimentação do sistema de aterramento;
- Variação acentuada nos valores medidos para os respectivos orçamentos.

Em se tratando de subestações de energia o ideal é realizar várias medições em pontos diferentes. Caso necessite de um número mínimo de direções, deve-se efetuar nas linhas indicadas abaixo (KINDERMANN e CAMPAGNOLO, 1995):

- Na direção da linha de alimentação;
- Na direção do ponto de aterramento ao aterramento da fonte de alimentação.

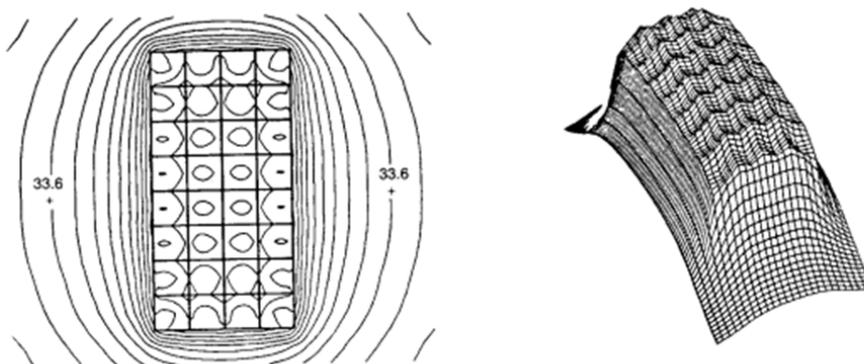
2.4 Conceitos básicos de segurança em aterramentos

Um dos principais objetivos de um aterramento elétrico é preservar a segurança das pessoas que operam ou estão susceptíveis a influência de potências riscos de choque elétrico dentro da área protegida pelo mesmo.

Um aterramento deve ser projetado de forma que quando submetido a um curto circuito máximo com a terra, garanta a distribuição dos potenciais de passo e toque abaixo dos limites máximos admissíveis pelo corpo humano (KINDERMANN e CAMPAGNOLO, 1995).

Durante falhas à terra, quando correntes de sequência zero são conduzidas através do solo, o fluxo gerado por elas à terra produzirá potenciais dentro e em torno de uma malha da subestação protegida (IEEE, 2000). A Figura 9 apresenta esse efeito para uma subestação com uma malha de aterramento retangular simples em um solo homogêneo.

Figura 9 - Contornos de potenciais em um solo homogêneo.



Fonte: (IEEE, 2000)

Portanto, verifica-se que elevados níveis de potencial na sua superfície de uma malha de aterramento, são responsáveis por acidentes com pessoas e animais, caso o sistema de aterramento não seja devidamente projetado e testado. No que tange ao aterramento elétrico, é indispensável descrever algumas situações que são causadas quando o corpo humano é percorrido por uma corrente elétrica, sendo normalmente classificados e referenciados como parâmetros no projeto de um sistema de aterramento.

2.4.1 Efeitos da corrente elétrica no corpo humano

Quando o corpo humano é submetido a circulação de corrente elétrica, o mesmo sofre efeitos que estão relacionado à magnitude e à frequência dessa corrente. Um dos principais efeitos é a ocorrência de fibrilação ventricular no coração, que em casos extremos pode acarretar a morte do indivíduo (TELLÓ, 2007).

Considerando correntes elétricas em baixas frequências, em torno de 50 a 60 Hz, o ser humano pode sofrer danos incalculáveis e até mesmo a morte. De acordo com os estudos descritos por Dalziel (1956), 99,5% das pessoas toleram a passagem de corrente pelo corpo sem sofrer fibrilação, seguindo a equação:

$$I_{choque} = \frac{k}{\sqrt{t_s}} \quad (8)$$

Em que

I_{choque} : Valor eficaz da corrente elétrica através do corpo [A]

t_s : Tempo de passagem da corrente elétrica através do corpo [s] , sendo que $0,03s \leq t_s \leq 30$ s. Geralmente adota-se 0,5s (tempo de atuação da proteção retraguarda), conforme a IEE (2000).

K: Constante empírica, relacionada à massa do ser humano, sendo:

$K = 0,116$ [As^{1/2}] para pessoas com massa igual a 50 kg;

$K = 0,167$ [As^{1/2}] para pessoas com massa igual a 70 kg.

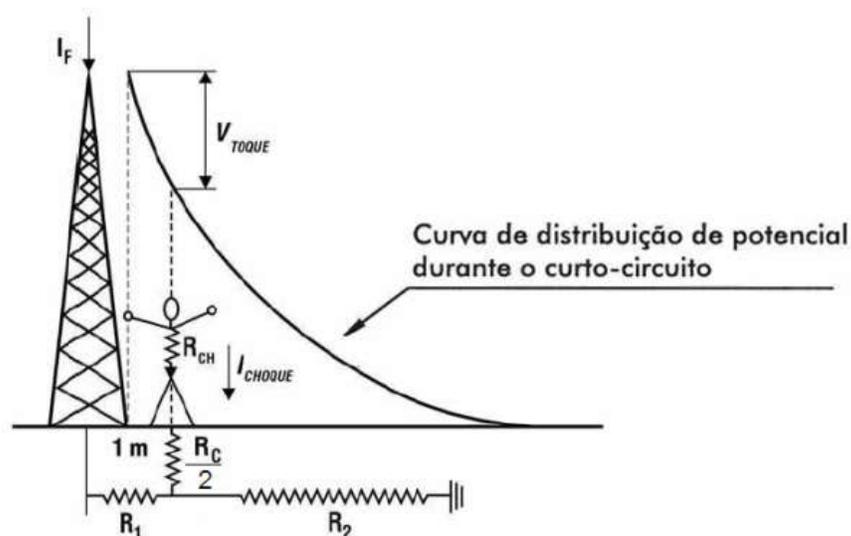
De acordo com a Equação 9, a maioria dos seres humanos toleram, sem sofrer efeitos patológicos, uma corrente de 116 mA para 1 segundo e 367mA para 0,1 segundo. Vale ressaltar que essas conclusões se aplicam à para descargas atmosféricas. Além disso, deve-se lembrar que em sistemas de potência, usualmente utiliza-se o processo de religamento automático após a atuação de algumas proteções. Logo é necessário um cuidado em relação ao tempo desse religamento, visto que uma pessoa pode sobreviver ao primeiro choque elétrico, mas no segundo, o indivíduo pode não ter se recuperado dos danos causados pelo anterior, podendo motivar sérios problemas a integridade do mesmo.

2.4.2 Tensão de contato ou de toque

A tensão de contato, é definida como sendo a tensão que é submetido o corpo humano quando o mesmo está em contato com um objeto metálico energizado ou com um sistema que apresenta isolamento comprometido e algum ponto da superfície, acarretando na circulação de corrente no corpo humano. Considera-se a distância de contato horizontal como a equivalente ao alcance do braço de uma pessoa, convencionando-se assim 1,0 m (ABNT, 2009).

A Figura 10 representa um esquemático de um indivíduo submetido a tensão de toque. Observa-se as resistências do corpo humano, de contato e dos trechos da terra. A curva de distribuição de potencial apresenta uma característica exponencial, sendo decrementada a partir do afastamento do objeto energizado pela corrente I_f .

Figura 10 - Indivíduo submetido a potencial de toque.



Fonte: (KINDERMANN e CAMPAGNOLO, 1995)

A expressão para calcular o potencial de toque é obtida a partir da corrente de choque no corpo humano, considerando a resistência de contato R_c , de acordo com a Equação 9:

$$V_{toque} = \left(R_{ch} + \frac{R_c}{2} \right) * I_{choque} \quad (9)$$

Onde:

R_{ch} : Resistência do corpo humano, normalmente considerada 1000 Ω ;

R_c : resistência de contato, segundo recomendação de IEEE (2000), considera-se igual a: (3 ρ_s) (Resistividade superficial do solo);

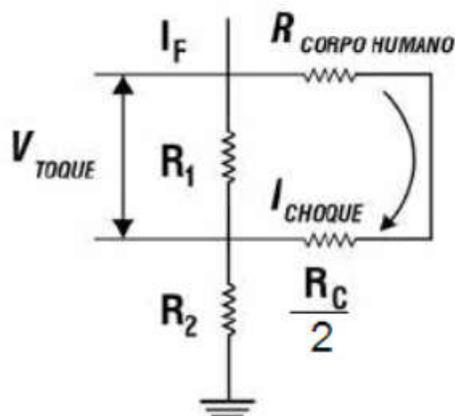
I_{choque} : Corrente de choque que passa pelo corpo humano;

I_f : Corrente de falha;

R_1 e R_2 : Resistências dos trechos de terra.

O esquemático do circuito equivalente analisado, pode ser averiguado na Figura 11.

Figura 11 - Circuito para o cálculo do potencial de toque.



Fonte: (KINDERMANN e CAMPAGNOLO, 1995)

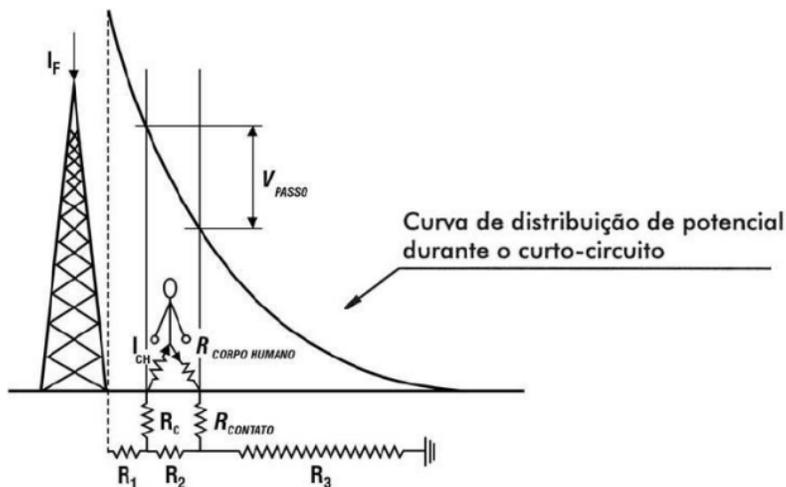
Substituindo os valores recomendados, a Equação 9 pode ser reescrita da seguinte forma:

$$V_{toque} = (1000 + 1,5\rho_s) * I_{choque} \quad (10)$$

2.4.3 Potencial de passo

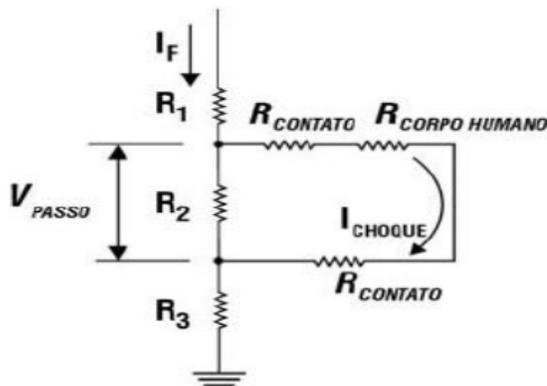
Potencial de passo é a diferença de potencial entre dois pontos que estão distanciados a um metro (distância entre dois pés de uma pessoa) situados dentro da área de influência de uma malha de aterramento, quando a mesma está sobre escoamento de uma corrente de curto circuito à terra. (KINDERMANN e CAMPAGNOLO, 1995) (ABNT, 2009). As Figuras 12 e 13 apresentam os esquemáticos representativos de um indivíduo submetido a tensão de passo e o circuito equivalente analisado, respectivamente.

Figura 12 - Indivíduo submetido a potencial de passo.



Fonte: (KINDERMANN e CAMPAGNOLO, 1995)

Figura 13 - Circuito para o cálculo do potencial de passo.



Fonte: (KINDERMANN e CAMPAGNOLO, 1995)

A expressão para encontrar a tensão de passo, considera a resistência dos dois pés de uma pessoa, assim como a de contato dos mesmos com o solo. Através da análise do circuito da Figura 13, encontra-se a diferença de potencial causada pela corrente de choque, I_{choque} que percorre o indivíduo. Portanto a Equação 11 apresenta o cálculo da tensão de passo.

$$V_{passo} = (2R_c + R_{ch}) * I_{choque} \quad (11)$$

Onde:

$R_{corpo\ humano}$: Resistência do corpo humano, normalmente considerada 1000 Ω ;

R_{contato} : resistência de contato, segundo recomendação de IEEE, (2000), considera-se igual a $(3\rho_s)$ (Resistividade superficial do solo);

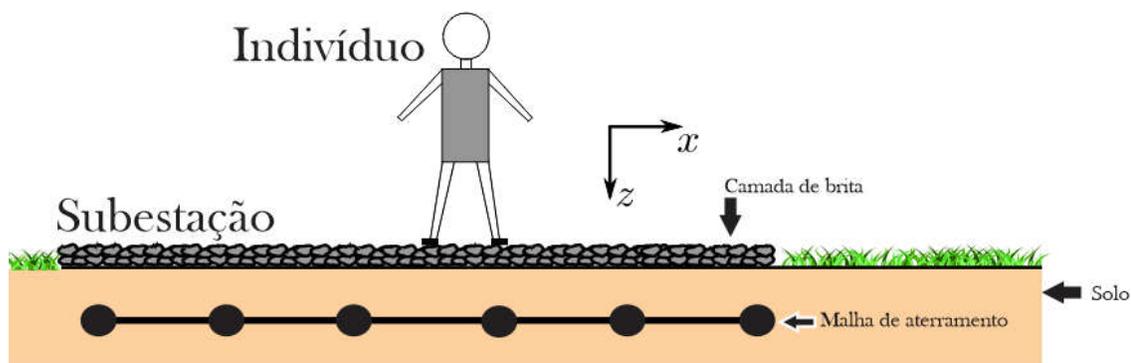
I_{choque} : Corrente de choque que passa pelo corpo humano;

I_f : Corrente de falha;

R_1, R_2 e R_3 : Resistências dos trechos de terra.

Em áreas onde o nível de periculosidade causado por correntes de curto à terra é elevado, como é o caso de subestações de energia, o solo é revestido por uma camada de brita. Essa camada garante um nível de isolamento maior entre o contato dos pés do indivíduo com o solo. A Figura 14 representa uma camada adicional de brita sobre um sistema de aterramento.

Figura 14 - Camada de brita adicional sobre o solo.



Fonte: Elaborado pelo autor

Como a brita funciona como uma estratificação adicional no solo, deve-se realizar uma correção no valor da resistividade usada nas equações ditas, a qual é dada de acordo com a Equação 12 (ABNT, 2009).

$$C \cong 1 - \alpha * \left[\frac{1 - \frac{\rho_1}{\rho_s}}{2 * h_s + a} \right] \quad (12)$$

Onde:

ρ_1 : Resistividade da 1ª camada (Ωxm)

ρ_s : É a resistividade do recobrimento da camada superficial (em Ωxm)

h_s : É a espessura da camada de revestimento superficial (m)

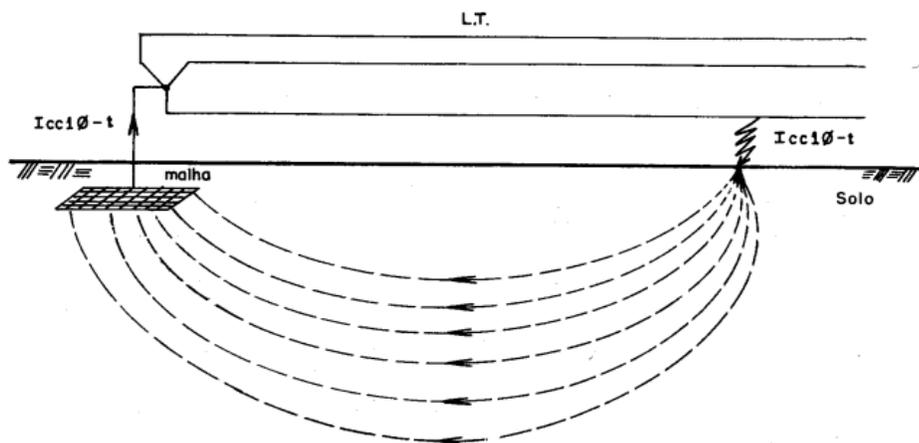
α : 0,106m

2.5 Retorno da corrente de sequência zero de curto circuito

As correntes que irão trafegar pela malha de aterramento são originadas de: Curtos circuitos monofásicos à terra; Curtos bifásicos à terra.

Essas faltas possuem um grau elevado de incidência, cerca de 70 % de modo geral. Quando o sistema é afetado por faltas desse tipo, são geradas correntes de sequência zero. Elas são as únicas que retornam para subestação, percorrendo uma parte pelo cabo guarda da linha de transmissão e outra parte pela terra, sendo que a corrente que retorna pela terra está ligada diretamente a resistência malha de aterramento da subestação (KINDERMANN e CAMPAGNOLO, 1995). A Figura 15 representa um curto monofásico a terra, mostrando a corrente fazendo o percurso do solo até a malha de terra da subestação.

Figura 15 - Corrente de curto circuito pela terra.



Fonte: (KINDERMANN e CAMPAGNOLO, 1995)

Sabe-se que em um sistema trifásico a soma das correntes que fluem pelas três fases deve ser igual a corrente de neutro. Através da aplicação da técnica de componentes simétricas, as correntes de fase podem ser expressas através da relação das sequências positiva, negativa e zero como segue abaixo.

$$\begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (13)$$

Obtém-se então a seguinte relação:

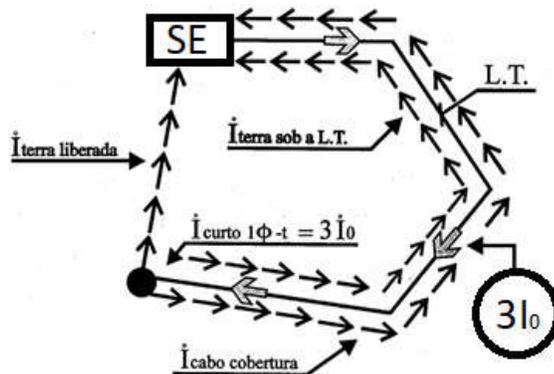
$$I_{a0} = \frac{1}{3}(I_a + I_b + I_c) \quad (14)$$

Sendo a soma dessas correntes igual à corrente de neutro, fica demonstrado que a corrente de falta fase terra é originada apenas pela parcela de sequência zero. Com isso, a corrente de falta fica formulada como segue:

$$I_{falta} = 3 \cdot I_{a0} \quad (15)$$

As correntes de sequência zero estão em fase e geram um campo magnético que enlaça e concatena com o cabo da LT. Isso faz com que através do princípio da ação e reação surja uma corrente de retorno, que se dá o nome de corrente auto - neutralizada. Essa corrente retorna a subestação seguindo o percurso da linha de transmissão. A porção de terra que está sobre a linha de transmissão fica em paralelo com o cabo guarda, fazendo com que também ocorra uma concatenação do fluxo magnético gerado com o solo sobre a LT, induzindo uma corrente que flui através do solo até à subestação, que se dá o nome de corrente de retorno sob a LT. A corrente restante resultante da falta retorna para subestação utilizando o menor caminho pela terra, partindo do curto (KINDERMANN e CAMPAGNOLO, 1995). A Figura abaixo mostra o percurso das três correntes ditas.

Figura 16 - Retorno da corrente de sequência zero para a subestação.



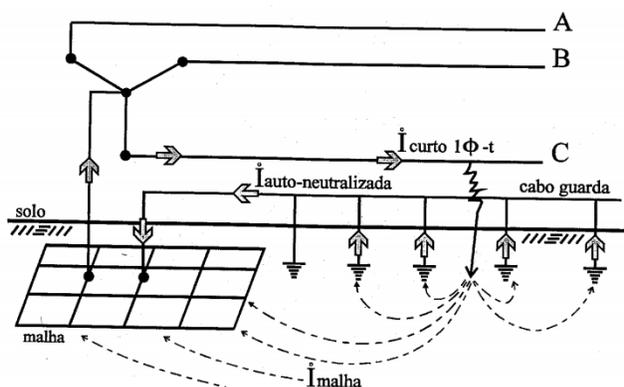
Fonte: (KINDERMANN e CAMPAGNOLO, 1995)

A corrente que efetivamente retorna à subestação através do solo é chamada de corrente de malha I_m . Ela é formada pela soma das correntes sobre a LT e a corrente de terra liberada. O seu valor é dado pela seguinte equação:

$$I_{malha} = I_{terra} + I_{Terra\ liberada} \quad (16)$$

A componente de malha é a responsável por produzir os potenciais de passo e toque. Portanto ela deve ser a corrente considerada no projeto de uma malha na questão da segurança humana. Vale ressaltar que a corrente neutralizada não produz potenciais de passo e toque, visto que ela retorna diretamente pelo cabo de cobertura para o cabo da malha, retornando pelo terra do Y do transformador ou do gerador (KINDERMANN e CAMPAGNOLO, 1995). Isso pode ser observado através da Figura 17, onde fica claro o percurso de cada componente gerada pela corrente de curto $I_{1\phi-t}$.

Figura 17 - Corrente de malha em um curto a terra.



Fonte: (KINDERMANN e CAMPAGNOLO, 1995)

2.6 Experimentos de Campo

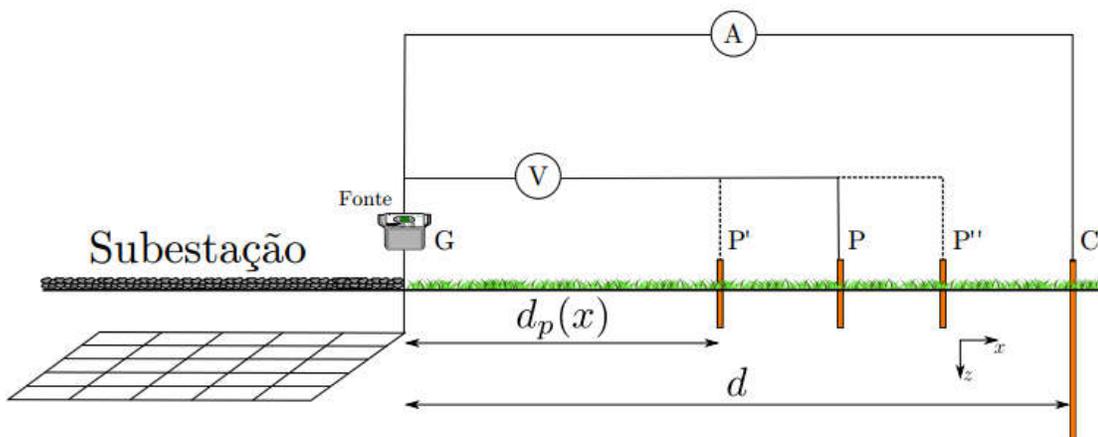
Nesta seção será apresentado a metodologia utilizada para os ensaios de medição da resistência de aterramento e potenciais de passo e toque. Os métodos aqui descritos serão utilizados na realização dos testes práticos de comissionamento da malha de aterramento da subestação Cacimbas. Os mesmos estão expostos no capítulo 3 do presente trabalho. Os ensaios apresentados foram baseados em normas nacionais e internacionais como a ABNT NBR 15749 (2009), IEE Std 80 (2000) e ABNT NBR 15751 (2009).

Visto isso, será abordado toda a fundamentação teórica necessária para a realização dos testes de campo, bem como conceitos de segurança fundamentais para realização das atividades práticas.

2.6.1 Medição da resistência de aterramento: método da queda de potencial

Esse método tem como objetivo medir a resistência de um sistema de aterramento. Consiste em fazer circular uma corrente em baixa frequência, usualmente 60 Hz, entre a malha de aterramento e uma haste auxiliar de corrente “C”, essa corrente deve ser injetada por uma fonte com potência adequada, e ligada ao aterramento analisado. Feito isso utiliza-se uma sonda de potencial “P” para medir a tensão entre a malha de aterramento e o local onde a haste esta cravada, sendo feitas variações nas direções P’ e P”. A Figura 18, mostra o esquemático de ligação para realização do ensaio, ficando evidente os pontos de ligação e a forma com que são feitas as variações no eletrodo de potencial. Através da coleta dos dados de tensão e corrente é possível traçar a curva característica (Resistencia x Distancia) da malha¹. Quando encontra-se medidas constantes de tensão, determina-se a resistência real a ser considerada.

Figura 18 - Arranjo dos equipamentos para o método da queda de potencial.



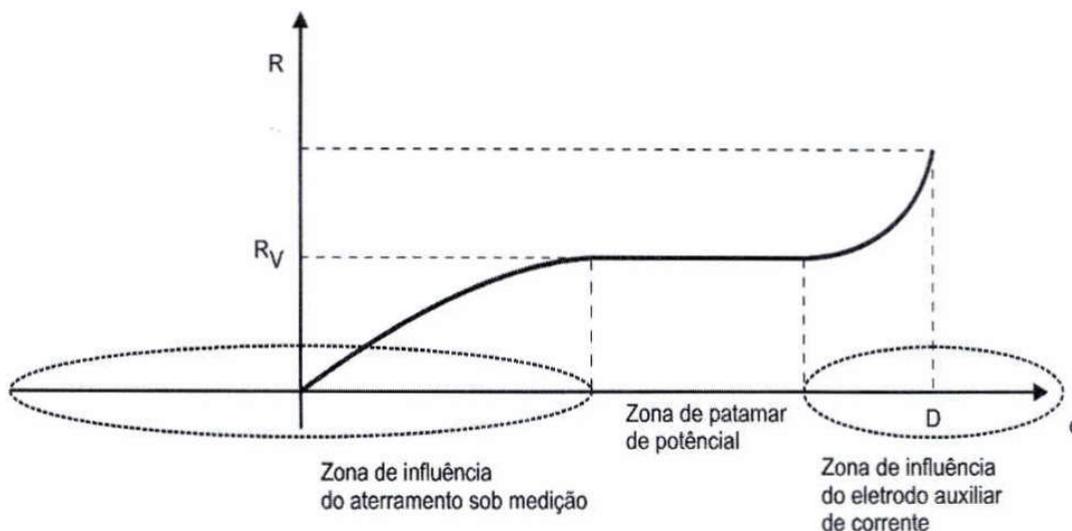
Fonte: (COELHO, 2015)

Para diminuir a influência inter-eletrodos, causadas por resistências mútuas, faz-se o teste adotando-se distâncias consideráveis da malha de aterramento ao eletrodo de corrente. Caso isso não ocorra, as medidas de tensão podem não se estabilizar, impossibilitando coletar

¹ A teoria sobre o método da queda de potencial, estabelecida na IEEE (2012), pode ser consultada no anexo A do presente trabalho.

o valor correto da resistência de aterramento (COELHO, 2015). Deve-se atentar para as zonas de influências da malha e do eletrodo de corrente. O último deve ser posicionado a uma distância superior a cinco vezes a maior dimensão do eletrodo de aterramento sob ensaio. Esta distância depende da configuração do sistema de aterramento, da instalação elétrica e do tipo do solo. As variações na haste de potencial não devem ultrapassar cerca de 5% da distância total “d”. Através da montagem do esquemático mostrado, coletando os dados e calculando a resistência através da relação linear entre corrente e tensão é possível traçar o gráfico apresentado na Figura 19.

Figura 19 – Curva de potencial de patamar do solo.



Fonte: (ABNT, 2009)

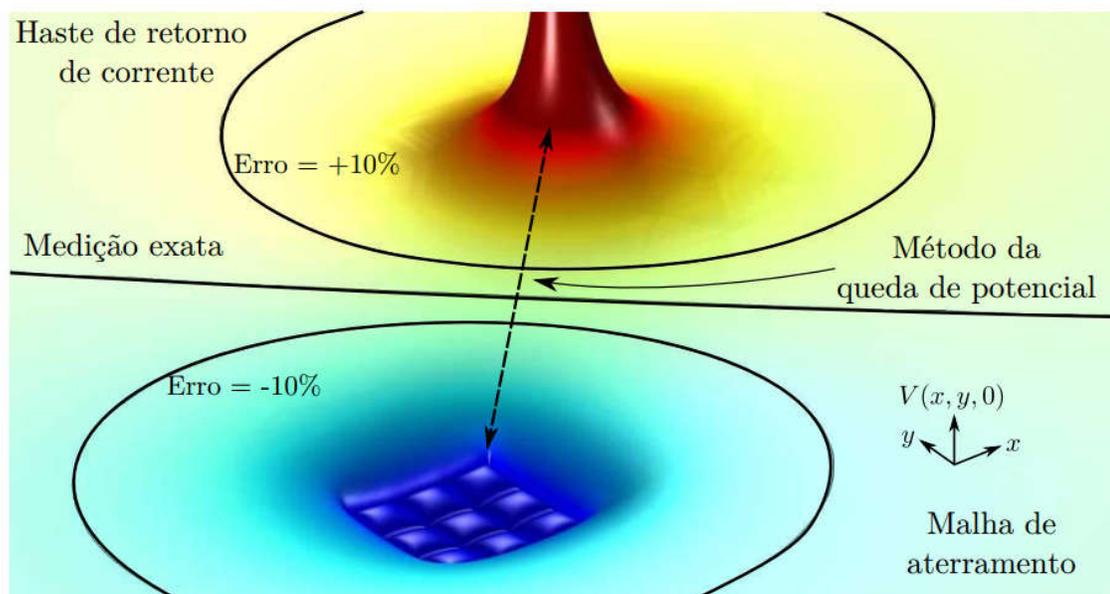
Verifica-se que a resistência de aterramento é encontrada quando a curva característica fica estável. Esse valor é representado por R_v , estando o mesmo na região chamada de “patamar de potencial”. Observa-se a influência das duas zonas de interferência causadas pela malha de aterramento sob medição e a do eletrodo auxiliar de corrente, localizados nas duas extremidades do gráfico. Nelas encontram-se curvas com uma derivada crescente, sendo o aumento assintótico nas proximidades da haste de corrente. Aconselha-se que a sonda de potencial seja cravada na mesma direção da sonda de corrente. Caso isso não seja possível, a mesma pode ser fincada na direção oposta à malha, caracterizando um gráfico de sentido oposto ao mostrado.

De acordo com a IEEE (2000), os valores de resistência são encontrados à 61,8% da distância total “d” do aterramento até a haste de corrente. No entanto, tal afirmação só se

aplica aos solos homogêneos. No entanto, em sua maioria, os solos encontrados são heterogêneos, fazendo com que essa distância geralmente varie para mais ou para menos, de acordo com as características do solo do local.

A Figura 20, apresenta o comportamento do potencial elétrico no solo gerado pelo ensaio. Percebe-se que a haste de potencial pode ser fincada em qualquer ponto da região plana, caracterizando a não influência da malha principal e remota. Pode-se observar também que as regiões onde é possível obter o valor exato da resistência, como também onde o erro é ocasionado, ficaria em torno de 10 %, para mais ou para menos, representados pelos círculos indicados. É possível que a sonda de potencial seja posicionada fora da linha de medição mostrada, desde que a região seja uma zona de potencial, apresentando um valor correto.

Figura 20 - Potencial elétrico gerado na superfície do solo pelo método da queda de potencial.



Fonte: (COELHO, 2015)

Ao se lançar os cabos que conectam as sondas de corrente e de potencial, podem estabelecer-se indutâncias mútuas entre os cabos. Esse efeito é um fator importante nas medições da resistência de aterramento com valores abaixo de 1Ω , que geralmente são estabelecidas em sistemas de grande porte. De acordo com a ABNT (2009), para tensões na faixa de 60 Hz, erros consideráveis causados pelo acoplamento indutivo dos cabos são bastantes consideráveis. Deve-se levar em conta que tal acoplamento pode chegar a $(0,1\Omega/100\text{ m})$, e com isso ocasionar erros consideráveis na medição.

Em alguns casos a curva, de resistência da malha pode não se estabilizar. Essas situações ocorrem principalmente em áreas urbanas, onde encontra-se limitações para cravar a haste de corrente. Atualmente, existem métodos analíticos que buscam encontrar um ponto estável na curva de resistência, viabilizando as medições mesmo com distâncias reduzidas entre a fonte e a haste auxiliar de corrente.

Em determinadas situações, deve-se aumentar a corrente injetada no ensaio entre o sistema de aterramento sob ensaio e o solo, através da sonda auxiliar de corrente. Isso deve ser feito quando há limitações para aplicação do método da queda de potencial com baixas correntes. Aplicar um alta corrente pode ser uma alternativa viável para medir a resistência de aterramento, pois possibilita encontrar valores mensuráveis e patamares mais estáveis de tensão, e consequentemente, de resistência (ABNT, 2009).

Na aplicação do método com correntes elevadas, geralmente utiliza-se como haste de corrente os contrapesos de uma linha de transmissão, uma malha de uma subestação próxima ou uma malha de aterramento construída exclusivamente para este fim. Por conta das grandes distâncias estimadas para conexão do eletrodo de corrente, pode-se utilizar as fases de uma linha de transmissão desenergizada que pertença ao sistema, como circuito de corrente, simulando um curto circuito entre as fases e ligando-as na própria torre. É importante lembrar que, para esse caso, deve-se estabelecer uma distância mínima de 5km da malha sob ensaio (ABNT, 2009).

O método da queda de potencial pode ser utilizado para mensurar a resistência de aterramento de um sistema específico ou de um conjunto total de impedâncias, que engloba todas as conexões envolvidas, podendo ser outras subestações, cabos guarda de linhas de transmissão ou condutores de alimentadores. No caso do presente trabalho, será mensurado os valores da resistência da malha de aterramento da subestação isoladamente, ou seja, sem considerar os elementos ditos.

Portanto, na realização dos testes, os cabos para raios e contra pesos das linhas de transmissão, neutro dos alimentadores, blindagem e capas metálicas de cabos isolados que estão conectados à instalação, devem ser desconectados do sistema de aterramento testado, afim de isolar e garantir a veracidade dos testes. Vale ressaltar que quando os ensaios englobam todo sistema de aterramento interligado, faz-se necessário a injeção de correntes com valores acima de 100 A. Nessas situações, deve-se ter uma atenção maior as questões da segurança das pessoas envolvidas no ensaio.

2.6.2 Medição dos potenciais na superfície do solo

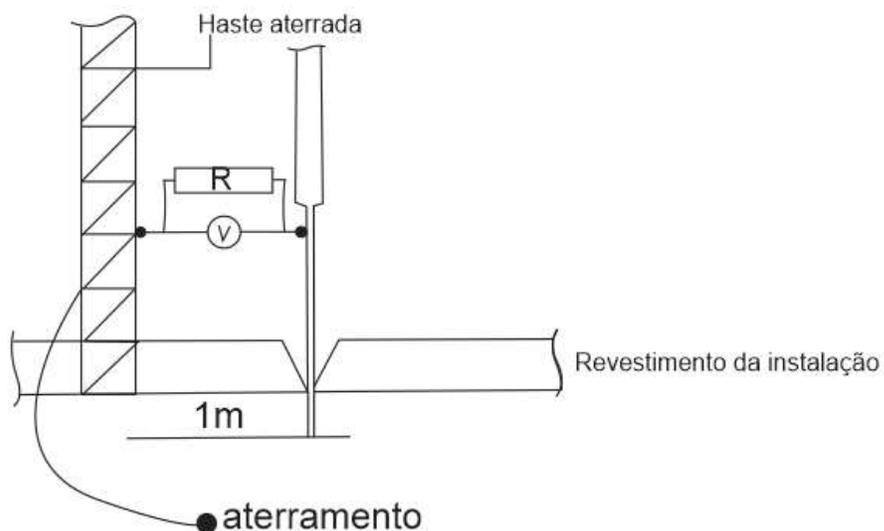
Esses ensaios visam determinar os níveis de potenciais na superfície do solo causados pela ocorrência de curtos-circuitos à terra, com o principal objetivo de garantir a segurança das pessoas que trafegam pela subestação. O circuito de injeção de corrente é estabelecido de forma análoga ao montado para medir a resistência de aterramento. Para esses testes, é recomendado a utilização de altos valores de corrente entre a malha principal e remota. Para tal, deve-se garantir que a fonte possua níveis de tensão e potências adequadas afim de reduzir os erros de medição. Para isso, pode-se utilizar um motor gerador, um transformador isolador ligado a alguma rede primária, ou até mesmo uma rede secundária de distribuição que esteja nas proximidades do local.

Nas medições deve-se utilizar amperímetros e voltímetros em escala adequada. Em locais onde não são constatadas correntes parasitas, recomenda-se a utilização de um simples terrômetro, sendo que as instruções de medição variam de acordo com o fabricante do equipamento.

Os ensaios devem ser realizadas em pontos específicos, que geralmente são determinados no projeto ou nos procedimentos apresentados pelas empresas responsáveis. Os mesmos devem abranger diferentes direções dentro da malha da subestação. Recomenda-se que essas medições contemplem a periferia da malha, uma vez que essas regiões apresentam os maiores valores de potenciais no solo, bem como nas áreas centrais da subestação, que possuem a maior possibilidade do tráfego de pessoas.

O ensaio de medição de potenciais de toque deve ser realizado entre as estruturas metálicas, carcaças de equipamentos conectadas a malha de terra e a haste de potencial cravada no solo, conforme mostrado na Figura 21. Essa haste simula o contato dos pés de uma pessoa com o solo, devendo-se estabelecer a distância horizontal de um metro até a estrutura analisada, que é a distância aproximada do alcance do braço de uma pessoa (ABNT, 2009). A fim de simular a resistência do corpo humano, pode-se utilizar um voltímetro de alta impedância, ou então um resistor de $1k\Omega$ em paralelo com o instrumento de medição. A Figura 21 apresenta o esquemático de ligação para medição do potencial de toque.

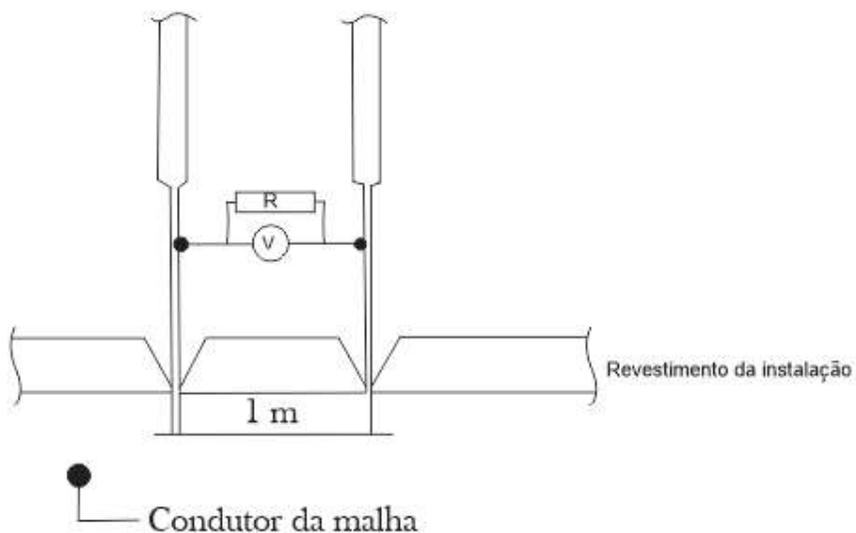
Figura 21 - Esquema de medição para potencial de toque.



Fonte: Adaptado de (ABNT, 2009)

Analogamente, as medições de tensão de passo devem ser realizadas através de duas hastes de potencial espaçadas a um metro. Esse ensaio deve ser feito a fim de simular a tensão entre os pés de um indivíduo que estiver dentro dos limites da subestação, na ocorrência de uma falha à terra. Da mesma maneira da medição do potencial de toque, utiliza-se um resistor de $1k\Omega$.

Figura 22 - Esquema de medição para potencial de toque.



Fonte: Adaptado de (ABNT, 2009)

A fim de produzir as tensões na superfície do solo, pode-se considerar como regra prática a injeção de corrente com uma tensão produzida por um gerador/fonte da ordem de 100 V, como recomenda a (ABNT, 2009). Além disso, é importante lembrar que em sistemas interligados, deve-se no mínimo injetar uma corrente de 100 A.

Os valores medidos devem ser referidos ao valor real da corrente de malha I_M , para pior condição de uma falta a terra. A relação apresentada na Equação 17, deve ser utilizada para encontrar o valor referido da tensão medida no ensaio:

$$V_R = \frac{V_E \cdot I_E}{I_M} \quad (17)$$

Onde:

V_R é a tensão real durante uma falha à terra, dada em volts (V);

V_E é a tensão medida no ensaio, dada em volts (V);

I_M é a corrente de malha, dada em ampères (A);

I_E é a corrente de ensaio, dada em ampères (A).

3 COMISSONAMENTO DA MALHA DE ATERRAMENTO

3.1 Complexo eólico Bons Ventos da Serra 2

Historicamente, o Brasil baseou a sua matriz energética em duas principais fontes: hidrelétrica e térmica. Essas duas fontes de energia representam juntas, quase 75 % da matriz energética nacional. Diante disso, e levando em consideração o progressivo crescimento econômico do Brasil, surge a necessidade de diversificação das suas fontes de energia. Neste contexto surgem, as chamadas “Fontes Alternativas de Energia”, que são inseridas no cenário energético nacional para diminuir o risco de possíveis crises no setor, alinhando também os baixos índices de agressão ambiental.

Através disso, a energia eólica mostra-se uma solução eficaz, tendo em vista o grande potencial brasileiro no setor, principalmente na região nordeste, que conta com cerca de 6,08 GW de potência instalada, conectada ao Sistema Interligado Nacional (SIN).

O complexo Eólico Bons Ventos da Serra 2 é um empreendimento de geração de energia elétrica através de turbinas eólicas. O mesmo está programado para entrar em operação comercial no início de 2018. A energia comercializada foi vendida no certame ANEEL/2013. O empreendimento é de propriedade da empresa Geradora Eólica Bons Ventos da Serra 2 S/A, Fundada em 2014 e sediada em Ibiapina / CE. O complexo é formado por 41 aerogerados WEG AGW/110, distribuídos em 5 parques localizados nas cidades de Ibiapina e Ubajara, como pode ser visto na Tabela 4:

Tabela 4 - Distribuição dos parques eólicos cacimbas.

Parque	Potência em (MVA)	Localização
Bons Ventos Cacimbas 2	23,10	Ubajara
Bons Ventos Cacimbas 3	14,70	Ubajara
Bons Ventos Cacimbas 4	10,50	Ibiapina
Bons Ventos Cacimbas 5	21,00	Ibiapina
Bons Ventos Cacimbas 7	16,80	Ubajara
Potência Total	86,10	--

Fonte: (BONS VENTOS DA SERRA, 2017)

Contando com uma rede de média tensão, com extensão de 27,87 km, que coleta a potência fornecida pelos aerogeradores com nível de tensão de 34,5kV até a subestação coletora Cacimbas 34,5/230 kV que conta com dois transformadores de potência de 80 MVA, a conexão

com SIN, é feita através de uma linha de transmissão de 230 kV, com extensão de 18,6 km até o barramento de conexão na subestação Ibiapina II da Chesf.

3.2 Características gerais da malha de aterramento da subestação coletora Cacimbas

A subestação coletora Cacimbas, possui área igual a 924m². Nela encontram-se distribuídos todos equipamentos de média e alta tensão que realizam toda parte de proteção, controle e manobra relativos aos parques eólicos do complexo eólico Bons Ventos da Serra 2. Em um empreendimento desse porte, faz-se necessário um estudo preciso para a determinação da malha de aterramento, visto as elevadas correntes de curto circuito nas barras da subestação e dos transformadores. A Figura 23 apresenta a vista aérea da subestação em sua fase de construção.

Figura 23 - Vista aérea da subestação coletora Cacimbas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A malha de aterramento da subestação coletora foi projetada a partir das medições de resistividade do solo no local da instalação, que foi realizada utilizando o método de Franck Wenner. Além disso, para o correto dimensionamento da malha, analisou-se os dados das correntes de curto circuito nas barras da subestação, sendo considerado o máximo valor encontrado, para que a proteção seja abrangente às piores situações possíveis de um curto à

terra. Na Tabela 5, verificam-se os níveis de curto circuito apontados pelos estudos elétricos do empreendimento, considerando a contribuição dos aerogeradores WEG AGW 110 conectados.

Tabela 5 - Níveis de curto circuitos nas barras na subestação Cacimbas.

	MVA	ANG (gr)	KA
Cacimbas A 230 kV	547,48	-87,91	1,37
Cacimbas A 34,5 kV	265,65	-89,14	4,45
Cacimbas B 34,5kV	254,37	-89,15	4,26

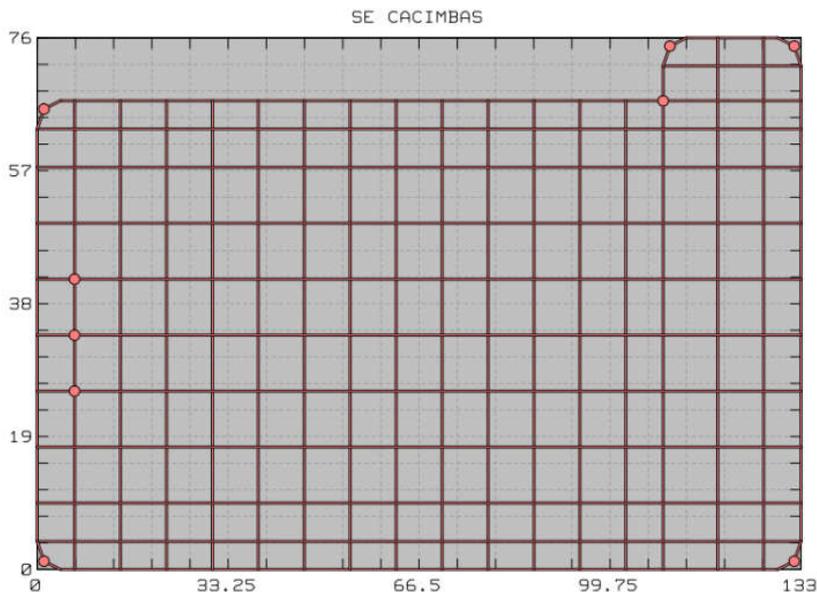
Fonte: (BONS VENTOS DA SERRA, 2017)

O transformador elevador da subestação, apresenta uma corrente simétrica máxima de 14,53kA, no lado de 34,5kV. Portanto, levando-se em conta o curto-circuito dos terminais do transformador, foi adotado para o projeto da malha uma corrente de 14,53 kA com um tempo de duração de até 1,0 segundo.

A fim de determinar o tamanho mínimo dos módulos da malha da subestação, foram feitas simulações através do *software* CYMGRD, determinando então as características da malha a partir dos dados coletados. As simulações apontaram um valor ótimo da malha que balanceiam a menor quantidade de cabos de cobre que permitem manter os potenciais de passo e toque dentro dos valores admissíveis.

Nas simulações, foi adotada a configuração apresentada na Figura 24, na qual a malha apresenta *grids* com tamanho de 8x8 m em sua parte central. Os círculos preenchidos em vermelho nos cantos da malha e saídas de linha, representam hastes de 3 metros de comprimento e 3/4” de diâmetro, que reforçam o escoamento das correntes para o solo. As dimensões finais da malha são de 133x76m, totalizando uma área de 10108 m², que cobre toda extensão da subestação.

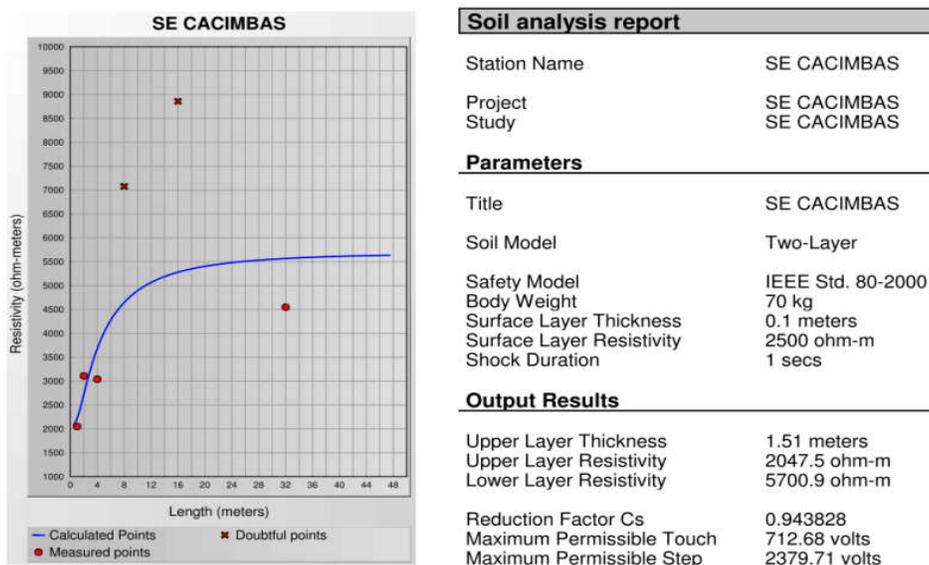
Figura 24 - Leiaute da malha de aterramento da subestação Cacimbas.



Fonte: (BONS VENTOS DA SERRA, 2017)

A partir do resultado das medições de resistividade do solo realizadas em campo, modelou-se o solo através da estratificação em duas camadas. Para isso, de acordo com Kindermann e Campagnolo (1995), desconsiderou-se as medições com um desvio padrão superior a 50 % da média. A Figura 25 apresenta os resultados da simulação da malha de terra.

Figura 25 - Simulação da modelagem do solo da Subestação.



Fonte: (BONS VENTOS DA SERRA, 2017)

A Figura 25 mostra no gráfico de resistividade por comprimento do terreno analisado os dados de saída para malha, bem como a resistividade das duas camadas analisadas e os valores dos potenciais admissíveis considerando o modelo de segurança apresentado pela norma IEEE, (2012). Através dos valores calculados, e considerando a camada superficial de brita de 10cm, bem como uma resistividade de 2500Ω , tem-se que os maiores valores admissíveis de potenciais de toque e passo na subestação Cacimbas, que são:

Tabela 6 - Valores dos potenciais admissíveis na superfície do solo.

Máximo Potencial de Passo	712,68 V
Máximo Potencial de Toque	2379,71 V

Fonte: (BONS VENTOS DA SERRA, 2017)

Com a determinação do modelo do solo, a malha foi modelada para abranger toda a área da subestação, conforme as recomendações que constam na norma IEEE (2012). A mesma será composta por cabos de cobre nu, com seção transversal de 70 mm^2 , e enterrados a uma profundidade de 0,60 m a partir do solo acabado com brita.

Observa-se os valores de saída finais da simulação na Figura 26, tendo como fator crucial a impedância e resistência de aterramento da malha. O valor calculado da resistência de aterramento foi então de **23,3858 Ω** . Esse valor pode variar de baixos valores, próximos a zero, até milhares de ohms, esse dado não é suficiente, de maneira isolada, para determinar a eficiência do sistema de aterramento. De acordo com a norma IEEE (2000), a questão do aterramento de uma instalação elétrica não se trata apenas de baixar a resistência/reatância do sistema, mas de manter os potenciais de toque e passo dentro dos limites toleráveis. Portanto o valor da resistência da malha de aterramento pode ser interpretado erroneamente como inconforme por possuir valores elevados, mas simulações posteriores mostrarão que a mesma atende os requisitos de potencial de toque e passo.

Na Figura 26 pode-se observar os parâmetros utilizados para realizar o projeto da malha, considerando um tempo de choque de 1 segundo (tempo para atuação das proteções) e corrente de curto circuito no lado de baixa do transformador de potência. No Anexo C.3 da

norma IEEE std 80 (2000), pode-se encontrar detalhadamente a forma com o que os parâmetros expostos são calculados.

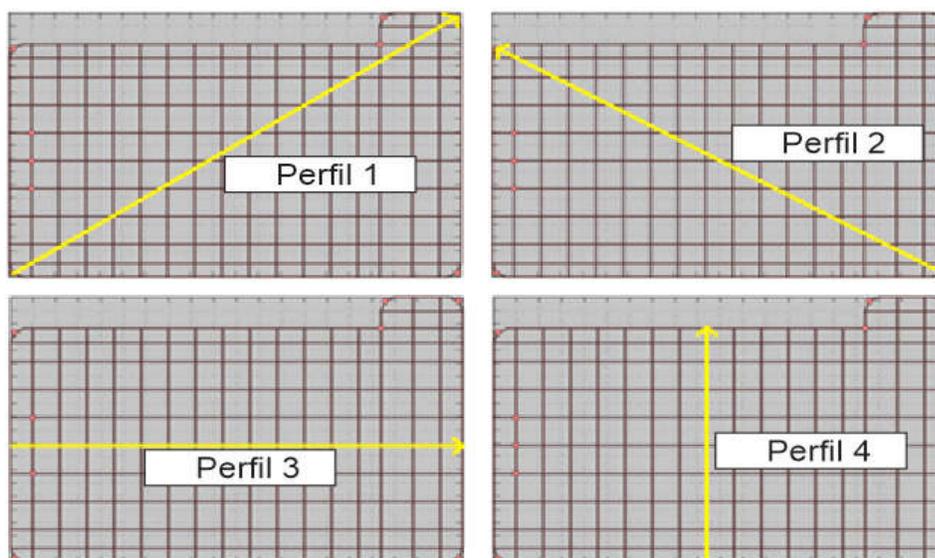
Figura 26 - Modelagem da malha de aterramento da subestação Cacimbás.

Grid analysis report		Friday, October 14, 2016, 16:16:06	
Station Name	SE CACIMBAS		
Project	SE CACIMBAS		
Study	SE CACIMBAS		
Parameters			
Equivalent Parallel Z Spec.	Current Split Factor		
Nominal Frequency	60 hz		
Bus ID	34,5 kV		
LG Fault Current	14530 amps		
Remote Contribution	100 %		
LG X/R	10		
Rtg	100 ohms		
Transmission Lines	1		
Rdg	200 ohms		
Distribution Feeders	9		
Shock Duration	1 secs		
Upper Layer Thickness	1.51 meters		
Upper Layer Resistivity	2047.5 ohm-m		
Lower Layer Resistivity	5700.9 ohm-m		
Output Results			
Parallel Z (Interpolated)	0.686764 ohms	Ground Potential Rise	9821.73 volts
Split Factor	0.0285289	Calculated Ground Resistance	23.3858 ohms
Decrement Factor	1.01318	Equivalent Impedance	0.667171 ohms

Fonte: (BONS VENTOS DA SERRA, 2017)

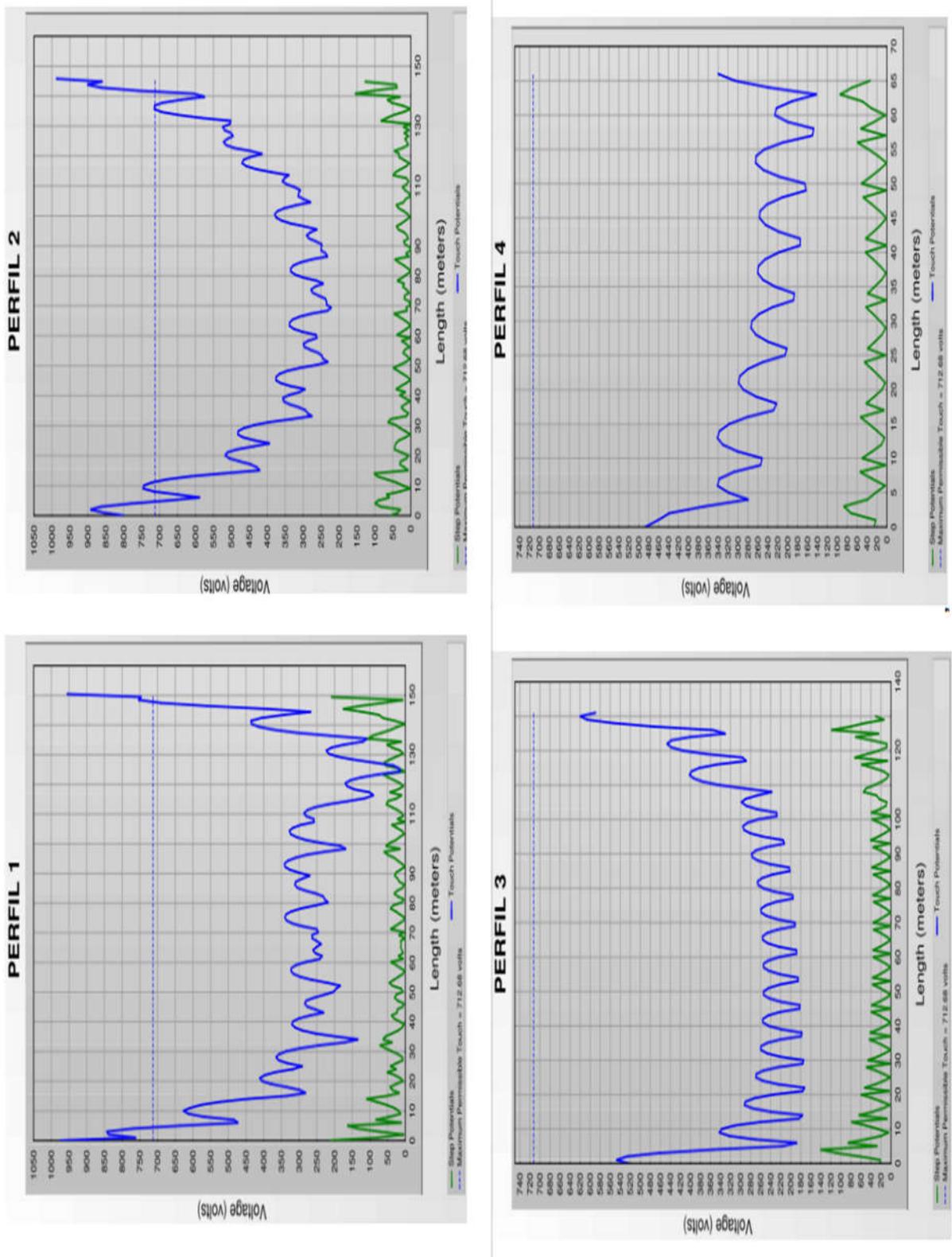
É possível então simular o comportamento da malha quando submetida a corrente de curto circuito adotada. De acordo com o perfis traçados, na Figura 27, foi delineado as esolinhas de potencial para cada perfil, respectivamente. Os valores dos potenciais foram obtidos aplicando-se técnicas de elementos finitos.

Figura 27 - Perfis de potencial traçados.



Fonte: (BONS VENTOS DA SERRA, 2017)

Figura 28 - Isolinas de potencial de acordo com os perfis traçados.



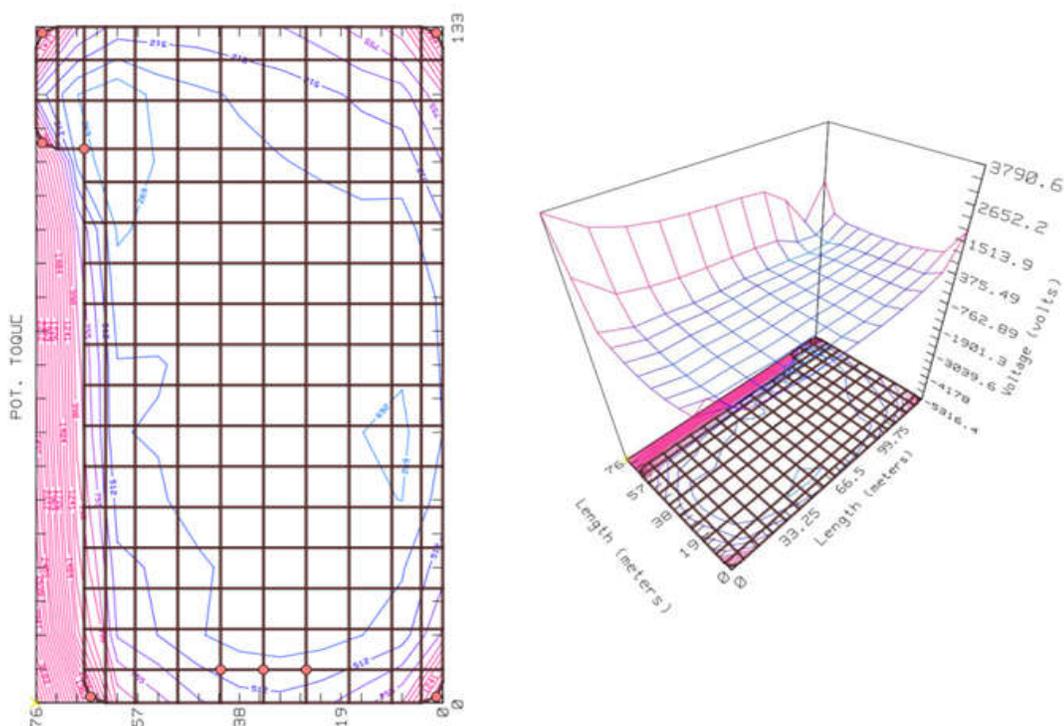
Fonte: (BONS VENTOS DA SERRA, 2017)

Nos gráficos apresentados na Figura 28, observa-se os valores dos potenciais de passo em verde e os potenciais de toque e azul. Adota-se como linha de referência o menor valor admissível de tensão, ou seja, o de tensão de toque, que pode ser observado na linha azul tracejada. Os maiores patamares de potencial encontram-se nas proximidades da periferia da malha, como já era esperado.

Em complemento, a Figura 29 pode-se reparar através das isolinhas de potencial, em duas e três dimensões, os valores dos potenciais na superfície do solo na área de influência da malha.

Vale salientar que as regiões que apresentaram tensões de toque superiores ao limite admissível encontram-se fora da região energizada do pátio. Eles devem ser desprezados, pois não interferem nos requisitos de segurança da subestação. Ademais esses valores não são realísticos, pois o método de elementos finitos utilizado não considera os efeitos da malha fora dos seus limites, fazendo com que os resultados limiares se tornem excessivamente conservadores.

Figura 29 - Isolinhas de potencial da malha de aterramento, à direita gráfico em 2D, à esquerda gráfico em 3D.



Fonte: (BONS VENTOS DA SERRA, 2017)

3.2 Procedimento prático

Neste subcapítulo, será utilizado as metodologias descritas nas seções 2.5.1 e 2.5.2, para realização das medições reais de resistência de aterramento e potenciais da superfície do solo da subestação coletora Cacimbas. Ao final, será apresentada uma análise dos dados do ensaio, traçado a curva: (Resistência de aterramento x Distância), como também será comparado os valores de potenciais na superfície do solo obtidos com valores máximos indicados nos estudos da malha.

3.2.1 Instrumentação

3.2.1.1 Gerador

Figura 30 - Grupo motor gerador.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Nos testes, foi utilizado, como fonte de injeção de corrente, um GMG (Grupo Motor Gerador) a diesel, de 110kVA de potência, semelhante ao mostrado na Figura 30. Esses geradores são bastante utilizados em locais onde não pode ser encontrada com facilidade uma rede da concessionária disponível. Os mesmos apresentam, em sua parte frontal, um conjunto de tomadas trifásicas. Nesse caso, tomadas ligadas a um disjuntor tripolar de 50 A, possibilitando a conexão do circuito de corrente diretamente na saída desse disjuntor. Em locais onde a resistividade do solo apresenta valores muito elevados, recomenda-se a utilização de um transformador isolador elevador a fim de aumentar a tensão e possibilitar a injeção de maiores

valores de corrente. Deve-se atentar a todos aspectos de segurança e conexões nesse tipo de equipamento por conta da sua elevada potência.

3.2.1.2 Equipamentos multitestes

Para realizar as medições de tensão e corrente, foram utilizados multímetros digitais, também conhecidos como multitestes. Para medição da corrente injetada entre a malha de aterramento e a malha auxiliar, utilizou-se um amperímetro alicate. Esse equipamento possibilita a medição de elevados valores de corrente sem a necessidade de seccionamento do circuito. Além disso, o mesmo apresenta a função “*true RMS*”, que possibilita uma maior confiabilidade nas medições da corrente RMS injetada.

Figura 31 - multímetros, à esquerda alicate amperímetro e à direita multímetro digital.



Fonte: Adaptado de (FLUKE)

Para mensurar os valores de tensão, foi utilizado um multímetro digital. Esse equipamento deve realizar as medições em escala adequada, possibilitando averiguar os valores. Deve-se lembrar também que, as ponteiros desse equipamento devem possuir isolação adequada para as medições, afim de assegurar a segurança das pessoas que irão realizar os ensaios.

3.2.1.3 Cabos, carretel e hastes

De forma a auxiliar as medições de resistência de aterramento e potenciais de passo e toque, foi utilizado bobinas de cabos isolados de 4mm², colocadas em um carretel, para auxílio

a movimentação e lançamento mais ágil dos cabos. Na medição dos potenciais de superfície, foram utilizados hastes de aço revestidas em cobre, do tipo apresentado na seção 2.5.2.

3.2.1.4 Resistor

Nos testes de passo e toque, foi utilizado um resistor de potência com valor de 1 k Ω , a fim de simular a resistência média do corpo humano conforme as recomendações da IEEE (2012). Apesar de sua simplicidade, esse equipamento deve estar com seus valores de resistência coerentes. Para isso recomenda-se realizar medições da resistência do equipamento antes de realizar os testes. Além disso, deve possuir sistema de isolamento eficaz a fim de garantir a segurança das pessoas que envolvidos dos ensaios. A ligação deve ser feita em paralelo com o voltímetro para medição de acordo com o esquemático proposto na seção 2.5.1.

3.2.2 Medição da resistência de aterramento

O ensaio aqui descrito, segue a metodologia apresentada na seção 2.5 deste trabalho. Antes do início dos testes, deve-se estabelecer todos os critérios de segurança, com o intuito de garantir a integridade de todos os envolvidos, não somente para realizar o teste de resistência da malha, como também para todos os ensaios de comissionamento do sistema de aterramento. Abaixo estão descritos os critérios de segurança a serem seguidos.

Conhecimento das normas de segurança e o uso de EPI's / EPC's durante toda a execução dos ensaios;

O ambiente de ensaio deve estar limpo e sem sujeira ou resíduos;

O responsável técnico da equipe de comissionamento, deve orientar sua equipe sobre as responsabilidades afim de cumprir todas as práticas de segurança tanto técnicas como comportamental;

O responsável técnico, junto com sua equipe, deve selecionar os materiais antes de realizar o teste, verificando todas as condições de uso;

Antes de iniciar os testes, o líder deve fazer uma programação de todo trabalho, a fim de identificar e controlar todos os riscos e acidentes, inclusive com terceiros;

Toda equipe deve estar ciente de todos os serviços a serem realizados, e só poderão dar início as atividades após a avaliação das condições de segurança pelo líder.

O ensaio visa mensurar o valor da resistência da malha de aterramento isoladamente, sem considerar a conexão dos cabos para raio, contrapesos da linha de

transmissão, e subestações adjacentes. Como a subestação possui uma linha de transmissão de 230 kV conectada, o primeiro passo antes de realizar o ensaio é isolar a malha de interferências causadas pelos componentes da LT. Este processo consiste em seccionar os cabos para-raio e OPGW no encabeçamento com o pórtico da subestação Cacimbas. A Figura 32 apresenta o procedimento dito.

Figura 32 - Segregação dos cabos guarda da linha de transmissão com a subestação.



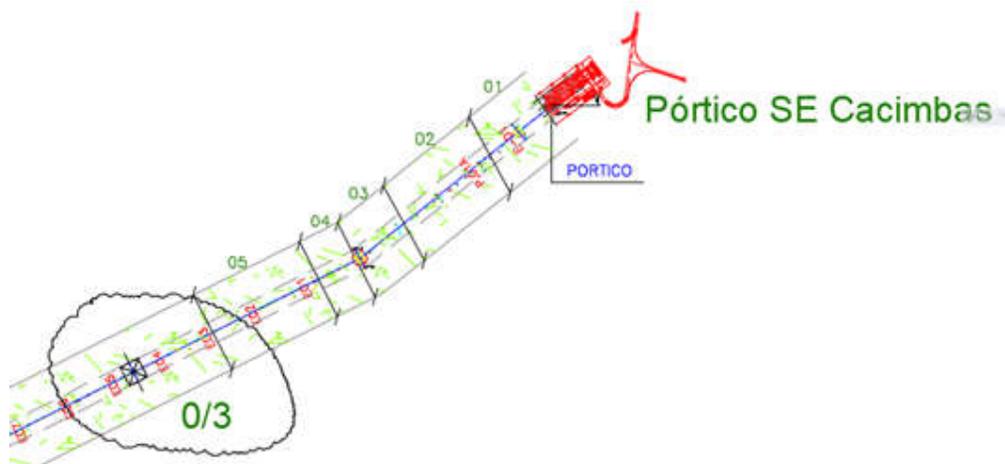
Fonte: Elaborado pelo autor.

No método da queda de potencial, aconselha-se que a distância entre a malha de aterramento e a sonda de corrente seja, no mínimo, cinco vezes a maior dimensão da malha. Como a subestação Cacimbas possui um sistema de aterramento com dimensões de 76x133m, logo a maior distância (diagonal da subestação) possui um valor de: 153m. Com isso, o distanciamento recomendável para a sonda de corrente é de 766m, partindo do centro elétrico malha a ser ensaiada.

Por conta da distância e dos níveis de corrente chegarem a escala de 5 à 30 Amperes, deve-se utilizar como eletrodo auxiliar, uma das três alternativas descritas na norma IEEE (2012). São elas: Construir uma malha remota com o menor valor de resistência possível, utilizar um sistema de aterramento já existente (Contra pesos de uma linha de transmissão) e utilizar os cabos de uma linha de transmissão como circuito auxiliar de corrente. O

empreendimento possui uma linha de transmissão de 18,6 km, apresentando torres com espaçamento médio de 350m e uma faixa de servidão de 40 m, logo, neste caso, foi optou-se em utilizar como eletrodo auxiliar de corrente os contrapesos de uma das torres da LT, os quais apresentam uma resistência abaixo de 10Ω , possibilitando a condutibilidade maior da corrente injetada no ensaio. A torre escolhida denominada como 0/3, está indicada no croqui apresentado na Figura 33. A mesma encontra-se a uma distância de 900m do pórtico da subestação, sendo uma distância adequada para realização dos teste sem a interferência remota das malhas auxiliar e principal.

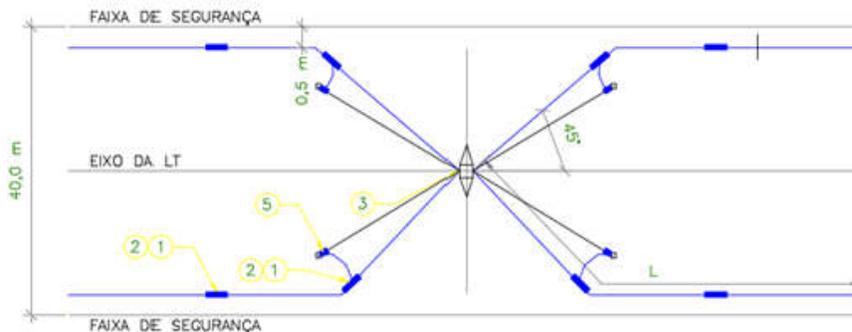
Figura 33 - Representação da subestação coletora e estruturas da linha de transmissão.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 34 representa o sistema de contra pesos de uma das estruturas da linha de transmissão 230 kV. As conexões formam 45° com a estrutura metálica onde estão desconectadas. Com o propósito de garantir o total isolamento dos sistemas de aterramento interligados, foi desconectado todas as junções dos contra pesos da torre com a estrutura metálica, com o intuito de garantir que não exista interferência nas medições. Com o circuito totalmente isolado em suas extremidades, pode-se então lançar o cabo para formar o circuito de corrente que conecta as duas malhas, sempre atentando-se a disponibilizar uma distância adequada para o posterior lançamento do circuito de potencial, de modo que não ocorra acoplamento magnético entre os cabos, garantindo então a confiabilidade das medições.

Figura 34 - Contra pesos da linha de transmissão.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Pode-se então alimentar o circuito de corrente através da saída em 220V do GMG. Vale ressaltar que a fonte teve seu neutro aterrado junto à malha de aterramento da subestação. Em um primeiro momento, deve-se averiguar o nível de corrente estabelecido entre as duas malhas, para se certificar que o valor alcançado é suficiente para a realização dos ensaios. Através da medição com o alicate amperímetro, encontrou-se o valor de 7 A, como mostra a Figura 35. Esse valor está condizente com o requisito mínimo de 5 A, estabelecido na IEEE (2012).

Figura 35 - Valor de corrente estabelecido no ensaio.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Após a leitura da corrente no amperímetro, um dos envolvidos deve permanecer monitorando possíveis variações na leitura do aparelho. Com esse valor imutável, deve-se então iniciar as medições de potencial na superfície do solo, cravando a haste auxiliar no decorrer da faixa de servidão da linha de transmissão, sendo que o eletrodo deve ser variado gradativamente na direção do centro elétrico da subestação até a malha remota. As medições devem ser feitas para cada ponto e anotadas em uma tabela, de forma que ao final do ensaio seja possível traçar a curva característica da resistividade da malha da subestação.

A norma IEEE (2012), recomenda que a sonda, ou eletrodo auxiliar de tensão, seja deslocado (geralmente em uma reta entre a malha de aterramento e o eletrodo de corrente) a partir da periferia do sistema de aterramento sob ensaio em intervalos regulares de medição iguais a 5% da distância total utilizada do centro elétrico do sistema até os contrapesos da LT. Neste caso, foram feitas variações de 15 m, que representam cerca de 1,7% da distância total. Isso é feito com o intuito de alcançar um número maior de pontos na curva característica da malha, o que concerne ao teste uma maior confiabilidade dos valores. A Figura 36 apresenta uma das hastes de medição sendo cravada no solo, como também um dos valores de tensão medidos pelo multímetro.

Figura 36 - Medição da resistividade do solo. Do lado esquerdo haste fincada no solo. Do lado direito o valor mensurado de tensão.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir dos valores levantados nas medições realizadas, foi possível preencher a tabela que relaciona a distância e tensão. Com isso, aplicando-se a relação linear definida pela lei de Ohm, foi possível calcular os valores de resistência para cada ponto. Através da Tabela 7, nota-se o comportamento nas duas regiões de influências do aterramento da subestação e dos contrapesos da LT, situadas entre os pontos: 0 a 125 m, 500 a 770 m, respectivamente, como também uma faixa de valores os quais a resistência apresentou uma relativa estabilidade.

Tabela 7 - Valores medidos de tensão e resistência calculada.

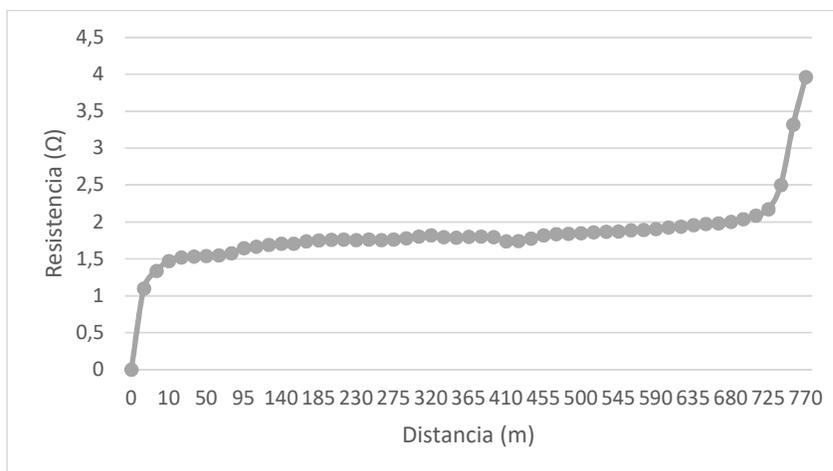
Distancia em (m)	Corrente injetada em (A)	Tensão mensurada em (V)	Resistência calculada em (Ω)
0	0	0,00	0,00
3	7	7,70	1,10
5	7	9,38	1,34
10	7	10,45	1,49
20	7	10,65	1,52
35	7	10,74	1,53
50	7	10,78	1,54
65	7	10,85	1,55
80	7	11,05	1,58
95	7	11,52	1,65
110	7	11,67	1,67
125	7	11,83	1,69
140	7	11,94	1,71
155	7	11,96	1,71
170	7	12,17	1,74
185	7	12,25	1,75
200	7	12,32	1,76
215	7	12,35	1,76
230	7	12,30	1,76
245	7	12,35	1,76
260	7	12,30	1,76
275	7	12,36	1,77
290	7	12,47	1,78
305	7	12,63	1,80
320	7	12,76	1,82
335	7	12,57	1,80
350	7	12,52	1,79
365	7	12,61	1,80
380	7	12,64	1,81
395	7	12,57	1,80
410	7	12,19	1,74
425	7	12,20	1,74
440	7	12,42	1,77
455	7	12,76	1,82
470	7	12,85	1,84

485	7	12,88	1,84
500	7	12,94	1,85
515	7	13,02	1,86
530	7	13,10	1,87
545	7	13,11	1,87
560	7	13,24	1,89
575	7	13,26	1,89
590	7	13,33	1,90
605	7	13,48	1,93
620	7	13,58	1,94
635	7	13,72	1,96
650	7	13,81	1,97
665	7	13,88	1,98
680	7	14,03	2,00
695	7	14,29	2,04
710	7	14,63	2,09
725	7	15,21	2,17
740	7	17,52	2,50
755	7	23,24	3,32
770	7	27,75	3,96

Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir dos valores expostos anteriormente é possível construir o gráfico (Resistência x Distância) para a malha de aterramento da subestação Coletora Cacimbas, o que permite avaliar a consistência dos resultados encontrados visualmente. O gráfico permite evidenciar o patamar de potencial no qual as medições não sofreram influência das malhas remotas. Isso ocorre no ponto onde a curva se estabiliza e representa o verdadeiro valor da resistência da malha analisada. O mesmo ocorre a cerca de 48% da distância do circuito de corrente, tendo um valor médio de **1,78Ω**, considerando tal região estável.

Gráfico 2 - Curva característica (Resistência X Distância).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Considera-se portanto que a malha da subestação apresenta um valor de resistência de aproximadamente $1,78\Omega$, confrontando com os $23,3858\Omega$ simulados computacionalmente. A resistência encontrada no ensaio está dentro do limite estipulado, o que concerne a aprovação do sistema de aterramento da subestação coletora Cacimbas no que se diz respeito a esse patamar. A razão das medidas encontrados estarem abaixo dos estimados na simulação, deve-se ao fato de que os modelos computacionais aplicados, apresentam inconsistências, principalmente no que diz respeito ao modelo real do solo, ocasionando discrepâncias em relação aos valores medidos. No entanto, grandezas de tensão abaixo dos que foram estipulados, apresentam uma condição adequada para o nível de curto circuito adotado nos lados de baixa do transformador.

3.2.3 Medição dos potenciais na superfície do solo

Nesta seção será discutido o procedimento prático do ensaio para medição dos valores de potenciais de toque e passo na superfície do solo. Nesse caso, foi mantido o circuito de corrente montado para a medição da resistência de aterramento, com o intuito de imprimir um fluxo de corrente na malha da subestação, simulando então a condição de um curto à terra. Nos testes utilizou-se a metodologia apresentada na seção 2.5.1 do presente estudo. Durante o ensaio, foram utilizadas duas hastes de cobre do tipo “*Copperweld*”, com o intuito de simular o contato do operador com o solo. A diferença de potencial encontrada entre as hastes em um metro, simula a tensão de passo causada pela circulação de corrente imposta na malha de aterramento. Analogamente, a tensão entre uma das hastes e a carcaça de um equipamento aterrado, separadas de um metro, simula o potencial de toque no ponto analisado.

A ABNT (2009), recomenda realizar no mínimo três medições em diferentes direções, nos contatos metálicos dos equipamentos da subestação e áreas de maior circulação. Essa consideração, deve-se ao fato da possibilidade do não conhecimento da localização dos pontos aonde encontram-se os maiores valores de potencial de toque e passo a serem lidos. Nos ensaios realizados na subestação Cacimbas, foram mensurados os potenciais de passo e toque em todos os objetos metálicos aterrados dentro e no contorno da malha, assim como as áreas de circulação próximas a eles. Desta forma inúmeros pontos foram levantados, os quais podem ser observados nas tabelas contidas no Apêndice A.

A primeira etapa antes de iniciar o teste, é mensurar o valor de resistência do resistor utilizado. O mesmo apresentou uma resistência de: $1,08\text{ k}\Omega$, com um erro de 8 % em relação

ao valor recomendado pela norma ABNT (2009). Considera-se então esse valor coerente para a realização dos ensaios.

Foi possível então cravar as hastes de aterramento para realização das medições das tensões de passo e toque da subestação. As Figuras 38 e 39 mostram o procedimento de medição dos potenciais de passo e toque, respectivamente, assim como o respectivo valor encontrado medido com um voltímetro digital.

Figura 37 - Medições dos potenciais de passo. A esquerda valor mensurado, a direita procedimento de medição.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 38 - Medição dos potenciais de toque. A esquerda procedimento de medição e a direita valor medido.

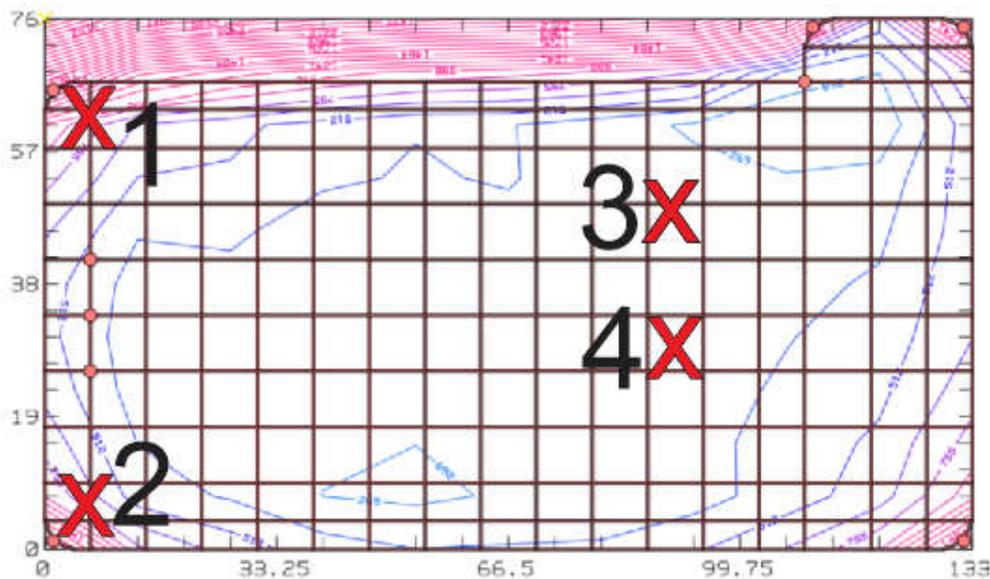


Fonte: Elaborado pelo autor.

Foram feitas as medições de potencial de toque em todos os “rabichos” que aterraram os equipamentos e as carcaças metálicas dos mesmos.

Os locais que apresentam os valores mais críticos de tensão de toque, de acordo com o estudo da malha de aterramento exposto na seção 3.1, estão localizados na periferia da malha. Além disso os locais onde ocorrerá a maior movimentação dos operadores deve ser analisado com maior prudência. Nesse caso, as maiores elevações de potenciais encontrados, tanto na simulação como nos experimentos práticos, foram os estabelecidos nos pontos 1 e 2 da Figura 37. Já as regiões 3 e 4 representam locais de veemente circulação, que estão próximos aos dois transformadores de potencia da subestação.

Figura 39 - Croqui com os pontos críticos dos potenciais na superfície do solo da subestação.



Fonte: Elaborado pelo autor.

De acordo com o exposto na seção 2.5.1, as grandezas encontradas devem ser refletidas para o valor real da corrente de curto circuito adotada. Para isso, deve-se utilizar a relação linear entre as medidas mensuradas: Corrente do ensaio/Tensão de passo e toque e a corrente de curto circuito do estudo. Com isso, é possível estabelecer os maiores valores de tensão de toque e passo encontrados nos ensaios práticos da subestação coletora Cacimbas, que estão exibidos na tabela abaixo. O valor em vermelho indica o maior patamar de potencial encontrado nos testes realizados em campo.

Tabela 8 - Potenciais de passo e toque encontrados nos pontos mostrados na Figura 37.

Ponto	Potencial de Passo	Potencial de toque
1	398,5	738,9
2	368,65	461,84
3	127,86	187,85
4	107,52	157,13

Fonte: Elaborado pelo autor.

Através dos dados referidos de corrente de curto circuito do lado de baixa do transformador, considera-se que os níveis de potencial de passo e toque com os respectivos valores: (398,5 /738,9 V), estão abaixo dos (712,68/2379,71 V) estipulados no modelo projetado, sendo esta a pior situação encontrada na subestação. Consequentemente, admite-se que a malha de aterramento atende os requisitos estabelecidos na norma IEEE (2000), em relação à segurança ao risco de choque elétrico causados pelos potenciais na superfície do solo.

4 CONCLUSÕES

O principal objetivo deste trabalho foi apresentar, de forma prática, como são realizados os ensaios de comissionamento em uma malha de aterramento de uma subestação elevatória, seguindo as metodologias apresentadas nas normas nacionais e internacionais através da coleta de dados reais em campo, apresentando então um documento base para realização e análise do comissionamento de sistemas de aterramento.

Foram expostas as principais características de sistemas de aterramento, abordando os conceitos teóricos sobre representação elétrica, aspectos construtivos, bem como os principais fatores que influenciam nas características do solo. Foi discutido as etapas para obtenção da resistividade do terreno através do método desenvolvido por Frank Wernner, o qual foi escolhido por ser o mais utilizado para a obtenção da resistividade do solo em terrenos de subestações.

Foi apresentado os conceitos básicos sobre segurança em aterramentos, mostrando os efeitos patológicos ocasionados pela circulação de corrente elétrica no corpo humano, bem como as tensões estabelecidas no mesmo quando há ocorrência de potenciais na superfície do solo onde encontra-se uma instalação. Além disso, foi apresentada uma breve descrição sobre falhas à terra, mostrando o percurso das componentes de sequência zero que retornam à subestação através do solo, e que ocasionam assim os potenciais de passo e toque na subestação.

Por fim, foi abordado as metodologias adota no ensaio prático, seguindo as recomendações das normas ABNT NBR 15749 e a IEEE std 81. Para medição da resistência de aterramento, foi escolhido o método da queda de potencial, por conta de ser o mais utilizado em ensaios de subestações. O mesmo foi descrito e discutido de forma a possibilitar o entendimento do processo prático de medição. Os testes de potenciais de passo e toque, foram baseados na metodologia discutida pela ABNT NBR 15749, onde optou-se pela utilização de hastes cravadas no solo por conta da maior praticidade.

Com a apresentação da metodologia a ser utilizada nos testes, foi demonstrado de a aplicação na prática dos métodos discutidos. A princípio, foram levantadas as características do empreendimento no qual o estudo foi desenvolvido. Após isso, foi discutida sobre as características da malha de aterramento da subestação Cacimbas, estabelecendo os critérios definidos pela simulação no *software* CYMDRID, no qual foi possível verificar a resistividade esperada da malha, bem como os patamares admissíveis de potenciais de passo e toque no interior da subestação. A utilização do método dos elementos finitos na simulação, ocasionou

linhas de potencial fora da malha com características extremamente conservadoras, por conta de que o mesmo não considera os efeitos da malha em seus limites.

Isto posto, foi descrito todo o procedimento prático realizado na subestação. Primeiramente, foi mostrado os dispositivos a serem utilizados no teste, assim como todos os critérios de segurança requisitos para realização dos ensaios. O sistema analisado foi isolado da influência de outras malhas ou contrapesos de linhas de transmissão adjacentes, a fim de extinguir a interferência mútua desses sistemas nas medições. Como malha remota, foi empregado os contrapesos de uma das torres da linha de transmissão do empreendimento o que trouxe uma agilidade maior ao realizar os testes.

Por fim, foi possível averiguar os resultados adquiridos nos ensaios. Através das medições da resistência de aterramento, traçou-se o gráfico que relaciona a distância com a resistência. Assim, foi possível estabelecer o patamar estável do gráfico, o qual apresentou uma resistência de $1,78\Omega$, valor bem abaixo dos $23,3858\ \Omega$ estipulados na simulação. Para os potenciais de passo e toque, foram realizadas medições em toda a área da subestação, sendo que o maior valor de potencial de toque e passo encontrados foram de $398,5 / 738,9\ \text{V}$, respectivamente, também inferiores aos limites de $712,68 / 2379,71\ \text{V}$ estipulados.

Assim, foi possível verificar de forma prática como deve-se realizar os ensaios de comissionamento em uma malha de aterramento. Os dados coletados serviram de base para a análise dos valores obtidos em simulação. Com isso, a malha da subestação coletora Cacimbas $34,5 / 230\ \text{kV}$, foi aprovada nos testes realizados, estando então devidamente projetada e construída, atendendo os requisitos estabelecidos nas normas ditas anteriormente.

Portanto, o documento apresentado pode ser utilizado como manual padrão para ensaios em malhas de aterramento em subestações, estabelecendo todos os pontos a serem seguidos e analisados. Foi constatada uma grande dificuldade de se encontrar na literatura nacional referências sobre o tema, principalmente em relação as questões práticas. Dessa forma, o trabalho apresentou um documento padrão, que descreve todas as etapas práticas realizadas no comissionamento de uma malha de aterramento servindo de referência para engenheiros e técnicos realizarem estudos e ensaios de acordo com os padrões estabelecidos em norma.

5 TRABALHOS FUTUROS

Para aperfeiçoamento da forma de realização dos ensaios descritos no decorrer do trabalho, sugere-se alguns tópicos a serem abordados em posteriores trabalhos sobre o tema, os mesmos seguem abaixo.

- Aplicação de métodos computacionais robustos, para estimar o ponto exato da resistência de aterramento em auxílio ao método da queda de potencial;
- Desenvolver estudos referentes a ensaios com subestações energizadas, através de métodos de inspeção em alta frequência;
- Estudos referentes a aterramentos destinados a Sistemas de Proteção Contra descargas Atmosféricas (SPDA);
- Desenvolver ferramentas, que possibilitem estimar de forma mais precisa os potenciais na superfície do solo;
- Desenvolver mais estudos que comprovem o teórico – experimental, através das medições de resistência de aterramento e potenciais na superfície do solo;
- Desenvolver plano ou manual de requisitos para realização do comissionamento de malhas de aterramento.

REFERÊNCIAS

- ABNT. **NBR 15749: Medição de resistências de aterramento e de potenciais na superfície do solo em sistemas de aterramento.** Rio de Janeiro, p. 49. 2009.
- ABNT. **NBR 15751: Sistemas de aterramento de subestações.** Rio de Janeiro, p. 47. 2009.
- ASHRAE. **Guideline 0-2013: the commissioning process.** ASHRAE. Atlanta, p. 68. 2013.
- BONS VENTOS DA SERRA. **Memorial de Calculo da Malha de Aterramento da Subestação Coletora Cacimbas.** Ibiapina, p. 21. 2017.
- COELHO, R. R. A. **Aplicação do Método dos Elementos Finitos como Auxílio ao Projeto e ao Comissionamento de Sistemas de Aterramento Elétrico.** Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará - UFC. Fortaleza, p. 111. 2015.
- CONFEA. **Manual de Procedimentos para a Verificação do Exercício Profissional.** Brasília, p. 146. 2007.
- DALZIEL, C. F. Effects of Electric Shock on Man. **IRE Transactions on Medical Electronics** , California, v. PGME-5, p. 44-62, 1956.
- FLUKE. Noções básicas sobre aterramento. **Fluke.** Disponível em: <<http://www.fluke.com/fluke/brpt/solutions/earthground/no%C3%A7%C3%B5es-b%C3%A1sicas-sobre-aterramento>>. Acesso em: 10 nov. 2017.
- IEEE. **IEEE std - 80 : Guide for Safety in AC Substation Grounding.** New York. 2000.
- IEEE. **IEEE Std - 81 : Ieee guide for measuring earth resistivity, ground impedance, and earth surface potentials of a grounding system.** IEEE Std 81-2012. New York, p. 86. 2012.
- KINDERMANN, G.; CAMPAGNOLO, J. M. **Aterramento Elétrico.** 3. ed. [S.l.]: Sagra De Luzzatto, 1995.
- MAMEDE FILHO, J. **Instalações Elétricas Industriais.** 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007.
- PORTAL METALICA. Soldagem Exotérmica. **Portal Metalica,** 2017. Disponível em: <<http://www.metalica.com.br/soldagem-exotermica>>. Acesso em: 11 nov. 2017.
- PRATES, A.; FARES, F.; MONTENEGRO, B. **Commissioning Of Oil & Gas Projects, Current Status, Evolution And Trends.** em: Rio Oil & Gas 2010, Rio de Janeiro, Brazil, set. 2010.
- SILVA, F. A. **Análise do aterramento de subestações.** Projeto de Diplomação - UFRS. Porto Alegre, p. 70. 2012.
- TAGG, G. F. Measurement of the resistance of physically large earth-electrode systems. **Proceedings of the IEEE,** v. 117, n. 11, p. 2185-2190, 1970.

TELLÓ, M. **Aterramento elétrico:** impulsivo em baixa e alta frequências - Com apresentação de casos. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2007.

VISÁCRO, V. F. **Aterramentos elétricos:** conceitos básicos, técnicas de medição e Instrumentação, filosofias de aterramento. São Paulo: Artliber Editora, 2002.

APÊNDICE A – VALORES DE ENSAIO DOS POTENCIAIS DE PASSO E TOQUE

Abaixo são apresentados os valores coletados nos ensaios relativos aos potenciais de toque e passo na Subestação Coletora Cacimbas. Na coluna mais a Direita observa-se a extrapolação em relação a corrente de malha I_M , seguindo as recomendações da ABNT (2009).

Tabela 9 - Potenciais de passo medidos no pátio da subestação.

Setor	Tensão de Passo (mV)	Valor extrapolado (V)
Pátio/ Equipamentos	76,4	158,58
	89,4	185,57
	14,4	29,89
	5,7	11,83
	12,5	25,95
	10,5	21,80
	13,8	28,64
	177,6	368,65
	22,8	47,33
	154,1	319,87
	192,2	398,95
	119,6	248,26
	7,5	15,57
	5,2	10,79
	7,5	15,57
	15,8	32,80
	94,7	196,57
	22,14	45,96
	36,2	75,14
	19,7	40,89
	17,1	35,49
	32,8	68,08
	61,6	127,86
	31,2	64,76
	17,7	36,74
	30,3	62,89
25,9	53,76	
15,9	33,00	
51,8	107,52	
38,3	79,50	
105,5	218,99	

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 10 - Potenciais de toque medidos no pátio da subestação.

Setor	Tensão de Toque (mV)	Valor extrapolado (V)
Pátio/ Equipamentos	76,4	444,20
	89,4	247,01
	14,4	152,15
	5,7	55,84
	12,5	319,87
	10,5	248,26
	13,8	191,17
	177,6	606,11
	22,8	72,23
	154,1	452,51
	192,2	400,20
	119,6	248,26
	7,5	219,61
	5,2	196,99
	7,5	84,11
	15,8	155,47
	94,7	354,32
	22,14	198,44
	36,2	535,95
	19,7	351,21
	17,1	385,67
	32,8	268,60
	61,6	187,85
31,2	157,13	
17,7	328,17	
30,3	342,49	
25,9	175,81	
15,9	158,79	
51,8	342,29	
38,3	280,64	
105,5	178,51	

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 11 - Valores de tensão de passo para áreas externas ao pátio.

Setor	Tensão de Passo (mV)	Valor extrapolado (V)
Área Externa	67,4	139,90
	33,5	69,54
	130,6	271,09
	19,5	40,48
	28	58,12
	43,8	90,92
	150,5	312,40
	16,3	33,83
	24,5	50,86
	9,8	20,34

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 12 - Valores de tensão de Toque para áreas externas ao pátio

Setor	Tensão de Toque (mV)	Valor extrapolado (V)
Área externa	61	126,62
	112,8	234,14
	61,2	127,03
	217	450,43
	54,7	113,54
	48,9	101,50
	41,3	85,73
	53,3	110,64
	375	778,39
	222,4	461,64

Fonte: Elaborado pelo autor.

ANEXO A – TEORIA DO MÉTODO DA QUEDA DE POTENCIAL

A teoria base sobre o método da queda de potencial, através de definições e símbolos segue abaixo:

- (a) Quando um eletrodo “E” não conduz a corrente no solo, e está localizado à grandes distâncias de qualquer outro eletrodo condutor de corrente elétrica, o seu potencial P_E^E é zero (Terra remoto de Potencial);
- (b) Se a corrente entra no solo através desse eletrodo, então o potencial do mesmo aumenta para: $P_E^E = R_E * I$, onde “R*E” representa a impedância do eletrodo. Se $I=1A$, então $P_E^E = R_E * 1 = R_E$. Portanto, prosseguindo, V_E^E designa o aumento de potencial do eletrodo “E” quando existe um fluxo de 1 A entre o solo e o mesmo. E com isso a tensão V_E^E , é numericamente igual a impedância do eletrodo em ohms;
- (c) Assume-se então agora que a uma distância finita do eletrodo “E”, um eletrodo “G” injeta uma corrente “I” no solo (“E” não conduz nenhuma corrente). Devido ao aumento do potencial no local, o eletrodo “E” inicialmente com um potencial zero, passará a possuir um potencial P_E^G (Normalmente esse acontecimento é chamado de resistência de acoplamento). Se $I=1A$, então $P_E^G = V_E^G$ (Essa equação é normalmente chamada de resistência mutua entre “E” e “G”)
- (d) Se no eletrodo “E” percorre uma corrente de 1 A, enquanto simultaneamente o eletrodo G também conduz 1A, o potencial do eletrodo “E” será $V_E^E + V_E^G$, a forma teórica de calcular V_E^E ou V_E^G , são extremamente complexas e não serão abordadas nesse anexo.

➤ Derivação das equações principais

O problema discutido está exposto na Figura 40. Primeiramente assume-se que a corrente “i”, no eletrodo “P” é insignificante. Dado um tempo “t”, a corrente “I”, injetada no solo através de “E” é convencionalizada como positiva, como também “I” coletada por “G” é considerada negativa.

Considerando o que foi exposto nos itens (a,b,c,d), mantem-se as seguintes relações:

$$V_P = V_P^E(I') + V_P^G * (-I') \quad (18)$$

$$V_P = V_E^E(I') + V_P^G * (-I') \quad (19)$$

Onde:

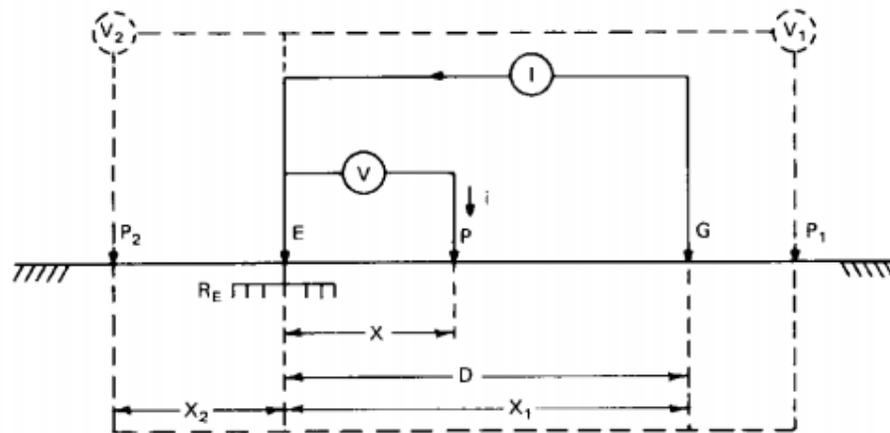
$$I' = \frac{I A}{1 A} \quad (20)$$

“U_P” e “U_E” são os potenciais ou GPR dos eletrodos “P” e “E”, respectivamente. A tensão “V” medida pelo método da queda de potencial é dada então por:

$$V = V_E - V_P \quad (21)$$

$$V = I'(V_E^E - V_E^G - V_P^E + V_P^G) \quad (22)$$

Figura 40 - Esquemático do método da queda de potencial.



Fonte: (IEEE, 2012)

V_E^E é a elevação de potencial no eletrodo “E”, resultando da própria corrente de 1 A. Então por definição R_E é a impedância do eletrodo “E”. Portanto a equação 22 pode ser reescrita da seguinte forma:

$$R = \frac{V}{I} = R_E + (V_P^G - V_E^G - V_P^E)/IA \quad (23)$$

V_P^G V_P^E são funções do espaço entre os eletrodos (E,G e P), a configuração dos eletrodos e das características do solo.

➤ **Solo uniforme**

Define-se então as seguintes funções: η, φ e ψ com relação ao sistema de coordenadas mostrados na Figura 40. (Assume-se que η, φ e ψ são funções das distâncias D e x)

$$V_E^G = \eta(D) \quad (24)$$

$$V_P^G = \varphi(D - x) \quad (25)$$

$$V_P^E = \psi(x) \quad (26)$$

De acordo com a Equação 23, a medida de impedância é dada pela lei de Ohm, será igual a impedância R_E se:

$$V_P^G - V_E^E = 0 \quad (27)$$

$$V_P^G - V_E^G - V_P^E = 0 \quad (28)$$

$$D(D - x) - \eta(D) - \psi(x) = 0 \quad (29)$$

➤ **Eletrodos iguais e igualmente espaçados**

Se os eletrodos “E” e “G” são idênticos $\varphi = \psi$ e se “D”, é grande o suficiente para que $V_P^E = \eta(D) = 0$, então a condição da Equação 29 torna-se:

$$\varphi(D - x) - \psi(x) = 0 \quad (30)$$

Portanto tem-se que $x_0=D/2$, isto é a sonda deve estar localizada entre "E" e "G".

➤ Eletrodos hemisféricos

Se os eletrodos E e G são hemisféricos estão circulando corrente CC através do solo, então as funções potenciais φ, η e ψ são inversamente proporcionais a distância relativa em relação ao centro hemisférico. Se a origem dos eixos estiver no centro do hemisfério "E", então a Equação 29, torna-se:

$$\frac{1}{(D - x)} - \frac{1}{D} - \frac{1}{x} = 0 \quad (31)$$

A raiz positiva da equação 31, é a equação exata da sonda de potencial x_0 . Esse valor é igual á $x_0=0,618D$.

Este resultado é justamente a regra padrão dos 61,8 % . Se o potencial de prova "P" esta localizado em "P₂" , então (D-x) poderá ser reescrito da forma D+x na Equação 31. Neste caso encontra-se apenas raízes complexas na equação. Se "P" está no local de P₁, então (D-x) dverá ser reescrito como (x-D) na Equação 31. Sendo que a raiz positiva da Equação ficará: $x_0=1,619D$.

➤ Caso Geral

Se o solo não for uniforme ou então um dos eletrodos "E" e "G" tiverem feição complexa, ou ambos, então as funções ψ, φ e η tem solução complexa, necessitando então de técnicas computacionais para tai resolução.

ANEXO B – ESTRUTURAL DA SE COLETORA CACIMBAS

