



Universidade Federal de Campina Grande

Centro de Engenharia Elétrica e Informática

Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

JOÃO MARCELO COSTA LEAL DA SILVA

**ANÁLISE DE SISTEMAS DE ATERRAMENTO DE
SUBESTAÇÃO E PÉS DE TORRE**

Campina Grande, Paraíba
Outubro de 2012

JOÃO MARCELO COSTA LEAL DA SILVA

ANÁLISE DE SISTEMAS DE ATERRAMENTO DE
SUBESTAÇÃO E PÉS DE TORRE

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Campina Grande
como parte dos requisitos necessários para a
obtenção do grau de Bacharel em Ciências no
Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Processamento de Energia

Orientador:

Professor Tarso Vilela Ferreira, D. Sc.

Campina Grande, Paraíba
Outubro de 2012

JOÃO MARCELO COSTA LEAL DA SILVA

ANÁLISE DE SISTEMAS DE ATERRAMENTO DE SUBESTAÇÃO E PÉS DE TORRE

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Unidade
Acadêmica de Engenharia Elétrica da Universidade
Federal de Campina Grande como parte dos requisitos
necessários para a obtenção do grau de Bacharel em
Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Processamento de Energia

Aprovado em / /

Professor Avaliador
Universidade Federal de Campina Grande
Avaliador

Professor Tarso Vilela Ferreira, D. Sc.
Universidade Federal de Campina Grande
Orientador, UFCG

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus em primeiro lugar pela oportunidade de viver e assim poder me encantar com as belezas da natureza e ter o prazer de conhecer e amar pessoas maravilhosas.

Agradeço aos meus pais, Marcelino e Vera, as pessoas mais importantes em minha vida, por todo o amor dedicado durante todos esses anos e por nunca terem medido esforços, apesar das dificuldades, para ver sempre o sorriso no rosto de seus filhos.

Agradeço ao meu irmão, Juliano, por sempre ter sido um amigo fiel, um exemplo de dedicação, companheirismo, força e por nunca ter me deixado na mão nos momentos mais difíceis.

Agradeço a minha namorada, Dayane, por estar ao meu lado tornando meus dias difíceis mais felizes, por ter me ensinado o que é cumplicidade e por me dar forças para enfrentar os desafios que surgem desde que cheguei a Campina Grande.

Agradeço a todos os meus amigos, por terem tornado inesquecível o tempo vivido em Campina Grande, em especial a Marconni, por além de dividir apartamento, dividir os momentos alegres e tristes; ao Cazão, Pablo, Rubem e Ruy, por sempre estarem próximos; a Aranha, pelos conselhos e companheirismo; a Marlo, por sempre estar à disposição para conversar, independente da hora; a Renally e Neves por nunca deixarem faltar nada e sempre estar por perto para o que der e vier; a Felipe que chegou ao apartamento por último mas se tornou um dos melhores amigos que tenho; a Wesley, e Gustavo que além da amizade não mediram esforços para me ajudarem com as medições para este TCC; e por fim ao Cezar, Alex e Aninha que apesar da distância, sempre estiveram próximos e sempre me deram muita força.

Agradeço a todo o pessoal que faz parte do Departamento de Engenharia Elétrica. Em especial a Adail, Tchaikovsky, Professor Talvanes e Professor Mário.

Agradeço a todos que fazem parte do Laboratório de Alta Tensão, em especial ao Professor Tarso, por ter me aceitado como orientador, pela paciência e compreensão diante da minha situação e ao Professor Edson Guedes, que me deu uma oportunidade única na graduação e em muitos momentos me aconselhou como um pai.

*“A vida é pra quem
topa qualquer parada.
Não para quem
pára em qualquer topada.”*

Bob Marley.

RESUMO

Este trabalho apresenta avaliações de sistemas de aterramento de uma subestação e de linhas de transmissão. Para a subestação, foi dado foco às medições de resistividade do solo e às simulações da malha de terra no ambiente do TecAt Plus 5.2, verificando-se os potenciais de passo e toque na superfície da mesma frente a uma situação de curto-circuito. Para a subestação também é apresentada uma configuração alternativa de malha de terra, a qual foi comparada sua eficiência frente às mesmas condições de curto-circuito simulado para o malha original. No caso das Linhas Transmissão, o foco foi dado nas medições de resistência do aterramento de cada pé de torre e na comparação dos resultados com os dados de projeto das mesmas. Antes de ser iniciado o estudo de caso, o presente trabalho traz uma revisão bibliográfica sobre o tema “Aterramentos Elétricos” dando ênfase em conceitos importantes para a elaboração de projetos de aterramento. Os resultados das medições de aterramento *in loco* em cada pé de torre confirmaram a adequação do projeto da Chesf. Já para o caso da subestação, os resultados das simulações da malha alternativa apresentaram um resultado mais eficiente, no que concerne à redução dos potenciais de passo e toque nas fronteiras da malha quando comparada à malha original.

Palavras-chave: Aterramento, Subestação, Linhas de Transmissão.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Componentes de corrente no solo.	16
Figura 2. Efeito da umidade na resistividade do solo.	19
Figura 3. Estratificação do solo em duas camadas e, comparativos de resistividade.	22
Figura 4. Indivíduo Sujeito a potencial de toque.....	27
Figura 5. Indivíduo sujeito a potencial de passo.....	27
Figura 6. Circuitos equivalentes de toque e passo respectivamente.	30
Figura 7. Esquema de instalação do cabo de contrapeso.	32
Figura 8. Representação da Conexão do contrapeso com a estrutura.	32
Figura 9. Projeto de Aterramento para estrutura Autoportante.....	33
Figura 10. Foto do terrômetro digital MTD 20KWe da Megabras.	35
Figura 11. Perfil de potencial e sua relação com a corrente em função da distância.	35
Figura 12. Fotografia das hastes sendo cravadas para medição da resistência de aterramento.	37
Figura 13. Fotografia da conexão com a estrutura autoportante.	38
Figura 14. Fotografia da estrutura autoportante em estudo.	38
Figura 15. Método de Wenner.	42
Figura 16. Fotografia da medição de resistividade do solo.	43
Figura 17. Disposição dos pontos para medição de resistividade do solo.	43
Figura 18. Curva de estratificação do solo	45
Figura 19. Fotografia da subestação de Santa Rita II	46
Figura 20. Malha de Terra com a representação da linha de potencial da subestação.	47
Figura 21. Potenciais de passo.....	47
Figura 22. Potenciais de toque.....	48
Figura 23. Gráfico dos Potenciais na malha nas três dimensões.	48
Figura 24. Potenciais de passo.....	49
Figura 25. Potenciais de toque.....	50
Figura 26. Gráfico dos Potenciais, em três dimensões, na malha com hastes mais profundas nas extremidades.....	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Eletrodos de aterramento convencionais.	15
Tabela 2. Tipos de solo e respectivas resistividades.....	18
Tabela 3. Variação da resistividade com a temperatura	20
Tabela 4. Influência da concentração de sais na resistividade do solo (17° C, 15% de umidade)	21
Tabela 5. Faixas de correntes de exposição e prováveis consequências.....	28
Tabela 6. Resistência de aterramento medidas para a estrutura 1/1.....	39
Tabela 7. Resistência de aterramento medidas para a estrutura 1/2.....	39
Tabela 8. Diferença entre medições sucessivas.....	40
Tabela 9. Média entre três medições consecutivas.....	40
Tabela 10. Definições de projeto para o cabo contrapeso.	41
Tabela 11. Medições da resistência do solo em Ω de acordo com o Método de Wenner (NBR 7117).	44

SUMÁRIO

Agradecimentos.....	iv
Resumo.....	vi
Lista de Ilustrações.....	vii
Lista de Tabelas.....	viii
Sumário.....	ix
1 Introdução.....	11
1.1 Motivação.....	11
1.2 Objetivos.....	12
2 Revisão Bibliográfica.....	13
2.1 Aterramento Elétrico.....	13
2.2 Eletrodos de aterramento.....	14
2.3 Impedância de Aterramento.....	16
2.4 Resistividade do Solo.....	17
2.4.1 Influência da Umidade.....	18
2.4.2 Influência de Temperatura.....	19
2.4.3 Composição Química do Solo.....	20
2.4.4 Compacidade do Solo.....	21
2.4.5 Estratificação do Solo.....	21
2.5 Requisitos Básicos de um Aterramento.....	22
2.6 Técnicas para melhoria da resistência de aterramento.....	23
2.7 Considerações sobre segurança.....	26
2.7.1 Possíveis Situações de Perigo.....	26
2.7.2 Limites de Corrente Toleráveis Pelo Corpo Humano.....	27
2.7.3 Resistência do Corpo Humano à Passagem de Corrente em Baixas Frequências.....	29
2.7.4 Circuito Equivalente das Situações de Choques Acidentais.....	29
2.8 Considerações sobre o Projeto de Aterramento de uma Linha de Transmissão.....	32
3 Estudo de Caso.....	34
3.1 Medição da Resistência de Aterramento.....	34
3.1.1 Procedimento de medição.....	36
3.1.2 Apresentação dos resultados.....	39
3.1.3 Análise dos Resultados.....	40
3.2 Medição de Resistividade do Solo.....	41
3.2.1 Procedimento de Medição.....	43
3.2.2 Análise dos resultados.....	44
3.3 Simulações da Malha de Aterramento da Subestação de Santa Rita II.....	45
3.3.1 Malha original.....	46
3.3.2 Malha proposta.....	49
4 Conclusão.....	51

5 Bibliografia.....52

1 INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO

O tema aterramentos elétricos tem motivado ao longo do tempo o interesse de diversos pesquisadores. Muito provavelmente, tal interesse está relacionado à importância do aterramento e, principalmente, devido à questão de segurança de seres vivos.

Historicamente, os primeiros esquemas de aterramento foram orientados pelo estudo dos efeitos gerais da passagem de corrente pelo corpo humano, com o objetivo de proteger melhor as pessoas contra choques elétricos.

Em suma, os sistemas de aterramento têm como principais objetivos:

- Garantir que as pessoas que se encontrem nas vizinhanças de uma instalação energizada não corram risco de morte devido a choques elétricos inesperados;
- Garantir a integridade dos equipamentos presentes na instalação bem como do patrimônio propriamente dito;
- Propiciar um “caminho” seguro, controlado e de baixa impedância em direção à terra para correntes induzidas por descargas atmosféricas.

Ao longo dos últimos anos, estudos e medições têm comprovado que um sistema elétrico com resistência de terra elevada apresenta altos níveis de surtos atmosféricos induzidos, comprometendo, também a coordenação de isolamento e que malhas de terra superdimensionadas apresentam comportamento indesejado frente a impulsos de corrente.

Dessa forma, percebe-se que o dimensionamento de um sistema de aterramento é bastante complexo e envolve muitos estudos. Portanto, avaliar se um sistema de aterramento foi bem dimensionado é uma etapa imprescindível em um projeto de subestação, bem como das linhas de transmissão, e envolve uma série de análises como,

por exemplo, dos potenciais (de passo e toque) que surgem na região do sistema aterrado e em seu entorno quando por ali circula corrente proveniente de curto-circuito.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é avaliar o desempenho do sistema de aterramento de uma subestação (SE), através de medições de resistividade do solo (*in loco*) e simulações de potencial de passo e toque devido a correntes de curto-circuito. Têm-se também como objetivo verificar o aterramento de duas linhas de transmissão, através de medições de resistência de aterramento dos pés das torres destas linhas. Deseja-se também estratificar o solo e comparar eficácia da malha original da subestação, definida por projeto, com outro modelo de malha.

As medições foram realizadas na SE da Chesf situada no município de Santa Rita/PB e nos pés de torre de duas linhas de transmissão (LT) de 230 kV que chegam à SE. Ambas, SE e LT, estavam, à época das medições, em fase de construção, entretanto a SE estava em fase avançada e sua malha de terra já havia passado por avaliações, diferentemente das linhas de transmissão. Pelo fato da malha de terra da SE já ter sido avaliada, priorizou-se as medições de resistência dos pés de torre das LT.

Para as medições utilizou-se o terrômetro digital modelo MTD-20K Weda *Megabras*. Para as simulações de potencial de passo e toque, fez-se o projeto da subestação no software comercial TecAt Plus 5.2[©], mesmo software utilizado para estratificação do solo.

No desenvolvimento do trabalho, o Capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica onde são apresentados conceitos gerais relacionados a aterramentos elétricos com enfoque nos aspectos relevantes à projetos de malhas de aterramento. Além disso, são feitas considerações a respeito de segurança, onde serão tratados conceitos relativos aos potenciais de passo, toque e de superfície, além de mostrar os efeitos da corrente elétrica no corpo humano. Finalmente, são feitas considerações sobre projeto de aterramento de linhas de transmissão.

O Capítulo 3 apresenta o estudo de caso onde são mostradas as medições de resistência de aterramento e resistividade do solo, realizadas pelo autor, bem como as análises dos dados obtidos. Por fim, no Capítulo 4, são feitas as conclusões a respeito do trabalho realizado.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Na literatura específica, o tema aterramentos elétricos é vastamente citado e estudado, contudo como muitos leigos acreditam, não é todo equipamento aterrado pode ser tocado sem que haja qualquer risco de choque. Na prática, esse modo de pensar só se constitui verdadeiro se o sistema aterrado for corretamente dimensionado, ou seja, se a tensão no ponto de aterramento for efetivamente baixa.

Toda instalação elétrica deve cumprir exigências presentes nas normas técnicas reguladoras. Tais normas são de extrema importância no que concerne a padronizações de critérios de dimensionamento utilizados em projetos.

No Brasil, a norma mais utilizada para a regulamentação dos sistemas de aterramento é a IEEE std. 80 (2000). Esta norma apresenta critérios de projeto que devem ser considerados na construção dos sistemas de aterramento, no que diz respeito à segurança das pessoas, frente a defeitos no sistema elétrico.

Ao longo dessa seção serão apresentados conceitos básicos, porém essenciais, para que seja possível dimensionar corretamente um sistema de aterramento.

2.1 ATERRAMENTO ELÉTRICO

Aterramento elétrico consiste fundamentalmente de uma estrutura condutora, que é enterrada propositalmente ou já se encontra enterrada, e garante um bom contato elétrico com a terra. Basicamente, um sistema de aterramento se constitui de três componentes:

- As conexões elétricas que ligam um ponto do sistema aos eletrodos;
- Eletrodos de aterramento (qualquer corpo metálico colocado no solo);
- Terra que envolve os eletrodos.

A ligação elétrica intencional com a terra tem a função de prover ao sistema aterrado um potencial de referência e/ou um caminho de baixa impedância à corrente de falta. Neste último aspecto, a terra é considerada como elemento do circuito, já que por ela irá circular corrente, seja esta, proveniente de uma falta ou descarga atmosférica. No

caso da corrente de falta, o fenômeno é eletrodinâmico e a corrente percorre um caminho fechado incluindo a fonte e a carga; já no caso das descargas atmosféricas, trata-se de um fenômeno eletrostático e a corrente proveniente de tal fenômeno circula pela terra para neutralizar as cargas induzidas no solo. Deve-se ter em mente que corrente circulando pela terra apresenta consequências como, por exemplo, surgimento de tensões de passo e toque. Portanto no projeto de aterramento, deve-se observar se essas tensões estão dentro dos limites suportáveis pelo ser humano.

As partes do sistema que se deseja aterrar podem apresentar variadas formas e materiais que dependem diretamente da aplicação, podendo ser desde carcaça de computadores ou máquinas até o neutro de um sistema elétrico.

2.2 ELETRODOS DE ATERRAMENTO

Basicamente, o eletrodo se constitui em qualquer corpo metálico enterrado no solo. Os eletrodos de aterramento podem ser:

- **Naturais:** não são instalados especificamente para este fim. São elementos metálicos, normalmente da estrutura de uma edificação, que pela sua característica tem uma topologia e um contato com o solo melhor que os eletrodos convencionais e ainda apresentam uma resistência de aterramento também inferior.
- **Convencionais:** são instalados especificamente para este fim, como por exemplo, condutores em anel e as hastes verticais ou inclinadas.

De acordo com as normas do IEEE, quando no aterramento forem utilizados eletrodos convencionais, devem ser observados os seguintes aspectos:

- O tipo e a profundidade de instalação dos eletrodos de aterramento devem ser tais que as mudanças nas condições do solo não aumentem a resistência do aterramento acima dos valores exigidos;
- O projeto do aterramento deve considerar o possível aumento da resistência de aterramento dos eletrodos devido à corrosão;
- Resistam às solicitações térmicas, termomecânicas e eletromecânicas;

- Sejam adequadamente robustos ou possuam proteção mecânica apropriada para fazer face às condições de influência externas;
- Apresente baixo valor de resistência e impedância de aterramento;
- Tenha distribuição espacial conveniente.

Os eletrodos convencionais estabelecidos nas normas brasileiras estão indicados na Tabela 1.

Tabela 1. Eletrodos de aterramento convencionais.

Tipo de eletrodo	Dimensões mínimas	Observações
Tubo de aço zincado	2,40 m de comprimento e diâmetro nominal de 25 mm	Enterrado totalmente vertical
Perfil de aço zincado	Cantoneira de (20 mm x 20 mm x 3 mm) com 2,40 m de comprimento	Enterrado totalmente vertical
Haste de aço zincado	Diâmetro de 15 mm com 2,00 ou 2,40 m de comprimento	Enterrado totalmente vertical
Haste de aço revestida de cobre	Diâmetro de 15 mm com 2,00 ou 2,40 m de comprimento	Enterrado totalmente vertical
Haste de cobre	Diâmetro de 15 mm com 2,00 ou 2,40 m de comprimento	Enterrado totalmente vertical
Fita de cobre	25 mm ² de seção, 2 mm de espessura e 10 m de comprimento	Profundidade mínima de 0,60 m. Largura na posição vertical
Fita de aço galvanizado	100 mm ² de seção, 3 mm de espessura e 10 m de comprimento	Profundidade mínima de 0,60 m. Largura na posição vertical
Cabo de cobre	25 mm ² de seção e 10 m de comprimento	Profundidade mínima de 0,60 m. Posição horizontal
Cabo de aço zincado	95 mm ² de seção e 10 m de comprimento	Profundidade mínima de 0,60 m. Posição horizontal
Cabo de aço cobreado	50 mm ² de seção e 10 m de comprimento	Profundidade mínima de 0,60 m. Posição horizontal

Na literatura especializada, destacam-se três nomenclaturas para os eletrodos:

- **Tipo Copperweld:** barra de aço de seção circular onde o cobre é fundido sobre a mesma;
- **Tipo Encamisado por Extrusão:** a alma de aço é revestida por um tubo de cobre através do processo de extrusão;

- **Tipo Cadweld:** o cobre é depositado eletroliticamente sobre a alma de aço.

2.3 IMPEDÂNCIA DE ATERRAMENTO

A impedância de aterramento pode ser conceituada de forma simples como a oposição oferecida pelo solo à injeção de uma corrente elétrica no mesmo, através dos eletrodos. Pode-se quantificar essa impedância pela relação entre a tensão aplicada ao aterramento e a corrente resultante.

A natureza da “Impedância de Aterramento” pode ser ilustrada pela Figura 1, a qual apresenta uma representação simplificada do aterramento por meio de um circuito equivalente e explica sucintamente a origem da sua configuração (FILHO, 2005).

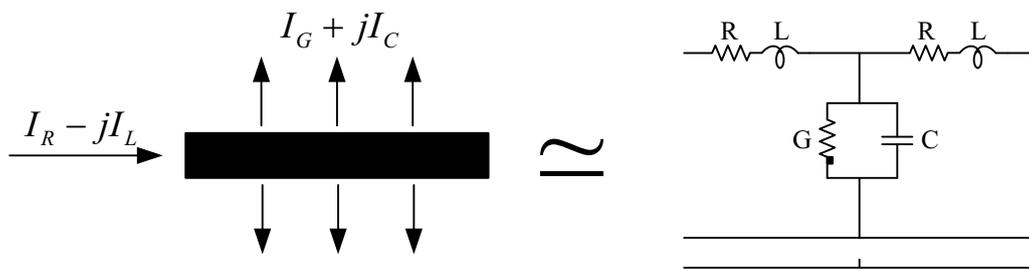


Figura 1. Componentes de corrente no solo.

Nota-se, pela Figura 1, que uma conexão à terra apresenta resistência, capacitância e indutância, cada qual apresentando influência na condução de corrente. A visualização de um sistema de aterramento nessa perspectiva se faz imprescindível quando se deseja analisar a resposta desse sistema frente a descargas atmosféricas. No caso de análises na frequência industrial, escopo desse trabalho, a “visualização” do sistema de aterramento como uma resistência, se faz satisfatória. Assim, a configuração resultante para o circuito equivalente se aproxima de um conjunto de condutâncias colocadas em paralelo. Esse é o caso de ocorrências próximas às condições de regime em sistemas de potência, como curtos-circuitos.

O valor da resistência de aterramento pode ser quantificado pela relação entre a tensão aplicada a um aterramento e a corrente resultante, de acordo com a Equação (1) (neste caso, entende-se por tensão o potencial adquirido pelo aterramento referido ao infinito).

$$R_T = V/I . \quad (1)$$

O termo normalizado para designar a resistência oferecida à passagem de uma corrente elétrica para o solo através de um aterramento é a “Resistência de Terra”. Para se estabelecer uma idéia da ordem de grandeza, deve-se considerar inicialmente que a terra não é um bom condutor de eletricidade, isto é, possui alta resistividade. Contudo, a seção reta do caminho percorrido por uma corrente no solo pode ser bastante ampla, de forma que mesmo com a alta resistividade do solo, sua resistência real pode ser bem pequena.

A presença do aterramento se manifesta na perspectiva do sistema quando flui corrente pelos seus eletrodos. Na ausência da mesma tem-se um potencial nulo nos eletrodos (mesmo potencial de um ponto infinitamente afastado). A resistência de aterramento pode afetar o sistema de duas formas. Primeiramente, através de uma influência ativa, o seu valor pode ser determinante na limitação do valor de corrente que flui para o solo. Por outro lado, numa perspectiva passiva, deve-se considerar que o fluxo de corrente pelo aterramento resulta em uma elevação de potencial no solo, transmitido ao ponto de aterramento do sistema, e que o valor da elevação de potencial V_T é diretamente proporcional ao valor da resistência de aterramento, como observado na Equação (2).

$$V_T = R_T \cdot I . \quad (2)$$

2.4 RESISTIVIDADE DO SOLO

O conhecimento das características intrínsecas do solo, onde a estrutura projetada será instalada, torna-se de extrema valia. De forma mais abrangente, tais características podem ser representadas pela resistividade do solo, que por definição, é a resistência elétrica (R) medida entre as faces opostas de um cubo de dimensões unitárias, preenchido pelo solo a ser analisado, satisfazendo a Equação (3).

$$\rho = R \cdot \frac{A}{l}, \quad (3)$$

onde ρ representa a resistividade do solo [$\Omega \cdot m$], R a resistência elétrica [Ω], A a área [m^2] de uma face do cubo e l , o comprimento [m] das arestas do cubo.

Alguns fatores influenciam diretamente na resistividade do solo, entre eles pode-se ressaltar:

- Tipo de solo;
- Teor da umidade;
- Temperatura;
- Compactação e pressão;
- Composição química e concentração dos sais dissolvidos na água retida.

Observando os fatores acima, percebe-se que solos aparentemente iguais podem apresentar resistividades diferentes. Na Tabela 2 pode-se observar a variação da resistividade para solos de naturezas distintas:

Tabela 2. Tipos de solo e respectivas resistividades.

Tipo de Solo	Resistividade [$\Omega \cdot m$]
Lama	5 a 100
Argila seca	1.500 a 5.000
Areia molhada	1.300
Areia seca	3.000 a 8.000
Calcário compacto	1.000 a 5.000
Granito	1.500 a 10.000

2.4.1 INFLUÊNCIA DA UMIDADE

A umidade do solo é um fator determinante na variação da condução de cargas elétrica. Em baixas frequências, a condução é realizada por mecanismos eletrolíticos. Dessa forma, na medida em que a umidade aumenta, os sais presentes no solo dissociam-se, de maneira a formar um meio eletricamente favorável à passagem de corrente elétrica. Portanto, a exposição de um mesmo tipo de solo a situações adversas de umidade traduz diferentes valores na resistividade do solo.

O teor normal de umidade de um solo, além de variar com a localização, depende também da época do ano, podendo nos períodos seco oscilar em torno de 10%

e em período de chuva pode atingir até 35%. A utilização de uma camada de brita de 100 a 200 mm sobre a área aterrada serve para retardar a evaporação de água do solo, além de oferecer uma elevada resistividade. A Figura 2 apresenta um gráfico que estabelece a relação entre a resistividade e a umidade para um solo arenoso.

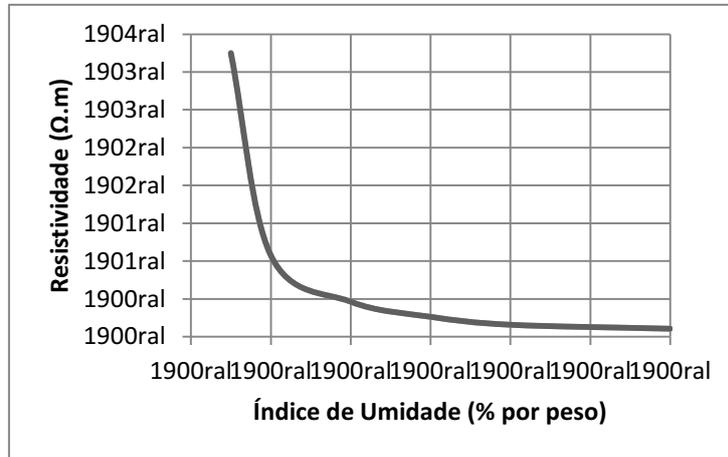


Figura 2. Efeito da umidade na resistividade do solo.

2.4.2 INFLUÊNCIA DE TEMPERATURA

A resistividade do solo e, conseqüentemente, a resistência de um sistema de aterramento são bastante afetadas quando a temperatura se aproxima de 0°C. Para temperaturas acima deste valor, a resistividade e a resistência de aterramento do solo diminuem.

As correntes de curto-circuito de valor elevado, envolvendo a terra, podem ocasionar elevação da temperatura do solo em torno do eletrodo, causando evaporação de água, com conseqüente redução da umidade do solo e elevação da sua resistividade. Com isso, o desempenho do sistema de aterramento é muito afetado.

Para um mesmo solo arenoso, mantendo todas as demais características e variando apenas a temperatura, sua resistividade comporta-se de acordo com a Tabela 3.

Tabela 3. Variação da resistividade com a temperatura.

Temperatura [°C]	Resistividade [$\Omega.m$] (solo arenoso)
20	72
10	99
0 (água)	138
0 (gelo)	300
-5	790
-15	3.300

Para analisar os efeitos da temperatura de um solo em sua resistividade, a sua umidade e temperatura devem ser consideradas, assim como os outros fatores relacionados.

2.4.3 COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO SOLO

A presença e a quantidade de sais solúveis e ácidos que são encontrados agregados ao solo têm bastante influência no valor da resistividade do mesmo. Se for necessário reduzir a resistência de uma determinada malha de terra, pode-se preparar previamente o solo através da adição adequada de produtos químicos neste. Existem vários produtos químicos à base de misturas de sais, que, quando combinados entre si na presença de água, formam o GEL, produto de uso comercial e de grande eficiência na redução da resistividade do solo.

Esses compostos têm as seguintes características:

- São higroscópicos;
- Dão estabilidade química ao solo;
- Não são corrosivos;
- Não são atacados pelos ácidos;
- São insolúveis na presença de água;
- Têm longa duração (entre 5 a 6 anos).

O tratamento do solo através da utilização de sal e carvão vegetal, ainda de largo uso entre alguns instaladores, não apresenta os efeitos esperados, principalmente pela curta duração de sua eficiência e também pela agressão corrosiva nos eletrodos de terra.

Na Tabela 4 é mostrada a relação entre a quantidade de sal adicionado a um solo arenoso, de umidade 15% (percentual em peso) e temperatura de 17 °C e sua resistividade.

Tabela 4. Influência da concentração de sais na resistividade do solo (17° C, 15% de umidade).

Sal adicionado (% em peso)	Resistividade [Ω.m] (solo arenoso)
0,0	107
0,1	18
1,0	1,6
5,0	1,9
10,0	1,3
20,0	1,0

2.4.4 COMPACIDADE DO SOLO

Um solo que é mais compacto que outro, apresenta uma maior continuidade física, o que proporciona um menor valor de resistividade. Por isso, é recomendada a espera de certo tempo após a instalação de um aterramento elétrico, para se fazer a medição de sua resistência. O solo demora um pouco para se acomodar e torna-se mais compacto.

Um aterramento de pressão sobre o solo ocasiona geralmente maior compactidade deste, reduzindo a sua resistividade.

2.4.5 ESTRATIFICAÇÃO DO SOLO

Na sua maioria, os solos não são homogêneos, mas constituídos de camadas com resistividade diferentes. Como resultado da variação da resistividade do solo, tem-se a variação da dispersão da corrente.

Normalmente essas camadas são horizontais e paralelas à superfície do solo. Na Figura 3 é apresentado o comportamento dos fluxos de dispersão decorrentes em um solo heterogêneo, em torno do aterramento. Pode-se perceber pela ilustração que, a corrente elétrica irá se dispersar melhor na camada que oferecer menor resistividade.

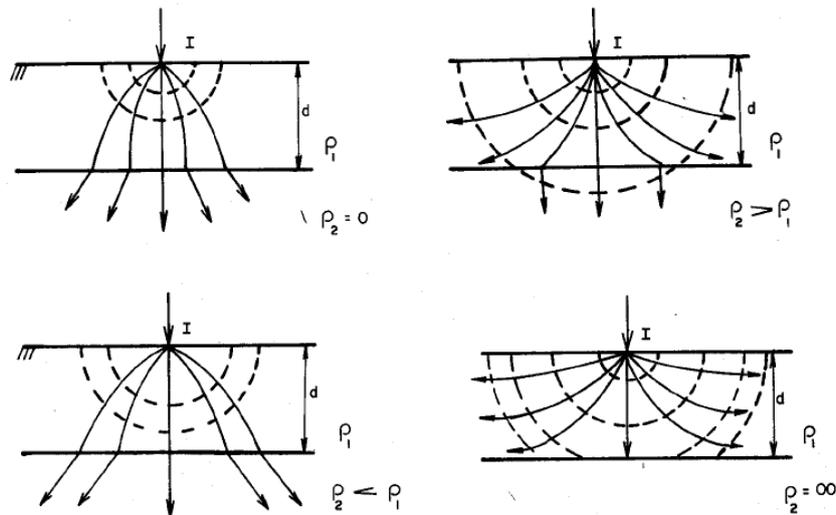


Figura 3. Estratificação do solo em duas camadas e, comparativos de resistividade.

2.5 REQUISITOS BÁSICOS DE UM ATERRAMENTO

Um aterramento deve apresentar basicamente três características:

- Capacidade de condução;
- Baixo valor de resistência;
- Configuração de eletrodos que possibilite o controle do gradiente de potencial.

De uma forma geral, espera-se que um aterramento tenha suficiente capacidade de dispersão para o solo de determinados valores de corrente, sem, contudo, permitir que os potenciais na superfície deste solo atinjam níveis comprometedores à segurança do pessoal, por ocasião de uma falta. Nessa perspectiva, é possível agrupar os aterramentos em: “aterramentos de serviço”, quando desempenham efetivamente uma função elétrica no sistema ou circuito elétrico, e “aterramento de segurança”, quando sua finalidade é evitar riscos para a vida no local.

Existe uma grande dificuldade de se estabelecer um valor específico para a resistência de aterramento (R_T), entretanto, em quase todos os casos, deseja-se que a resistência de aterramento tenha o menor valor possível. Para se ter uma ideia quantitativa de R_T é comum encontrar-se resistência de aterramento de valor menor que 5Ω para instalações elétricas de grande porte e de valores na faixa de 40 a 400 Ω nas

redes de distribuição de energia elétrica. Alguns autores consideram aterramentos com resistência superior a 25Ω condenáveis. Contudo, não parece razoável tal consideração, pois em muitas aplicações o valor da resistência de aterramento não é o ponto fundamental (por exemplo, nos aterramentos para se evitar o carregamento estático de sistemas eletro-eletrônicos). Por outro lado, em outras situações, não é possível alcançar valores reduzidos de resistência de aterramento, para as restrições impostas em condições práticas (por exemplo, valores elevadíssimos de resistividade do solo e restrições na dimensão da planta onde o aterramento deve ser instalado). Nesses casos, é possível assegurar o desempenho eficiente do sistema, através da adoção de abordagens mais abrangentes de proteção, que podem incluir práticas de equipotencialização e o recurso a técnicas e dispositivos específicos, como transformadores isoladores e supressores de surto.

2.6 TÉCNICAS PARA MELHORIA DA RESISTÊNCIA

DEATERRAMENTO

Muitas vezes, após a instalação de um aterramento, observa-se através de medições que o valor da sua resistência é superior ao valor desejado. Nesses casos empregam-se normalmente algumas técnicas capazes de melhorar (diminuir) o valor da resistência de terra. Essas técnicas atuam, basicamente, modificando a resistividade do solo nas proximidades do eletrodo, ou alterando as condições dos eletrodos de aterramento, ou ainda, fazendo aplicação dessas duas possibilidades simultaneamente.

i. Aumento do número de eletrodos em paralelo

Pode-se conseguir, aumentando o número de eletrodos em paralelo, diminuir bastante a resistência de aterramento. Contudo, deve-se lembrar que os eletrodos devem estar suficientemente afastados para minimizar os efeitos da resistência mútua. A partir de certo número de eletrodos em paralelo, a colocação de novos eletrodos torna-se ineficaz.

ii. Aprofundamento dos eletrodos

O processo pode ser eficiente e se mostra particularmente viável na aplicação de hastes verticais. Quando o solo apresenta camadas mais profundas de menor resistividade, a técnica é peculiarmente eficaz, pois com a emenda de hastes verticais consegue-se atingir camadas de melhor condução. Se o solo é homogêneo, a eficácia da técnica é reduzida para profundidades superiores a 3,5 m. Na prática tem-se observado segundo Araújo (2007), que a partir de certo ponto, a resistência do aterramento diminui pouco para grandes aumentos da profundidade.

iii. Aumento da seção reta do eletrodo

O aumento da seção de contato do eletrodo com o solo ocasiona uma pequena diminuição da resistência de aterramento. Contudo, na maioria das vezes, o dimensionamento da seção do eletrodo é feito por questões de resistência mecânica ou em função da sua capacidade de condução de corrente.

iv. Tratamento químico do solo

A adição de sais na terra circunvizinha a um aterramento diminui a resistividade do solo e conseqüentemente, a sua resistência de terra. É comum o emprego de cloreto de sódio ou sulfato de cobre ou, ainda, de produtos químicos industrializados com essa finalidade. No tratamento devem-se ter as precauções para que os sais não entrem em contato direto com o eletrodo para evitar a corrosão. O monitoramento da resistência de terra torna-se imprescindível, pois ela pode aumentar com o tempo devido à dispersão dos sais pelo solo.

Esta prática pode ser muito eficiente para aterramentos de pequena dimensão. Embora a redução da resistividade seja promovida apenas nas proximidades dos eletrodos, é justamente esta porção do solo que é responsável pela maior parcela da resistência de aterramento. Reduções superiores a 50% do valor da resistência de aterramento podem ser obtidas, se a dimensão do sistema é muito pequena (por exemplo, poucas hastes). Entretanto, no caso de aterramentos extensos, como é o caso de malhas de subestação, raramente se alcança redução superior a 15% no valor da resistência com o tratamento químico.

v. Tratamento físico do solo

Consiste em envolver o eletrodo com material condutor, fazendo uma ampliação da sua superfície de contato com o solo adjacente. Os materiais mais empregados são a sucata e o carvão.

Sabe-se que as técnicas aqui mencionadas diminuem a resistência de um aterramento. O que não se pode dizer é quão significativa será a redução para cada caso. Uma prática específica, que merece citação, refere-se ao emprego de betonita, que é usada para preenchimento de um volume em torno do eletrodo, em aterramentos colocados em solos de alta resistividade. É comum o uso desse material nas valas onde são colocados os eletrodos horizontais e comhastes (verticais) profundas. Além da sua baixa resistividade, a betonita tem propriedade higroscópica, que lhe permite concentrar uma maior umidade. A concentração maior de umidade se estende inclusive ao solo adjacente à betonita, o que resulta numa significativa redução da resistividade, justamente na região crítica para definição do valor da resistência de aterramento. A prática poderia ser classificada como um tratamento físico do solo.

Outra prática de interesse constitui-se no envolvimento dos eletrodos numa camada de concreto, muito usual em solos de alta resistividade e, sobretudo, quando a instalação que se deseja aterrar se localiza sobre rochas. Além de prover a fixação do eletrodo ao solo, o concreto apresenta valor de resistividade relativamente reduzido, propriedade higroscópica e, ainda, protege o eletrodo contra a corrosão.

No trabalho proposto por Souza et. al (2007) utilizam como técnica para redução de resistência por meio da concretagem das hastes da malha de terra. A partir dessa técnica foram obtidos bons resultados para solos com alto índice de resistividade, porém à técnica se limitou apenas a concretagem no formato quadrado e as medições foram realizadas com a malha desenergizada.

2.7 CONSIDERAÇÕES SOBRE SEGURANÇA

Para que sejam iniciadas as considerações sobre segurança é necessário que sejam definidos os possíveis riscos aos quais uma pessoa pode estar exposta, bem como as consequências de tal exposição. Assim, primeiramente, serão apresentadas as situações, previstas por norma, que podem colocar em risco a vida de um ser humano.

2.7.1 POSSÍVEIS SITUAÇÕES DE PERIGO

Quando ocorre um defeito típico envolvendo a terra, o fluxo de corrente induz gradientes de potencial no interior e entorno do sistema aterrado. Deste modo, a menos que as precauções adequadas sejam tomadas, os potenciais induzidos na superfície do solo podem atingir valores elevados o suficiente para colocar em riscos a vida de qualquer pessoa que se encontre na área.

As principais circunstâncias que podem provocar os choques elétricos fatais são:

- Uma corrente de curto-circuito muito elevada sendo injetada no sistema de aterramento, associada a uma resistência de aterramento elevada.
- A presença de um indivíduo, no instante da ocorrência do defeito, em posição tal que se encontre em contato com duas regiões de potenciais elétricos diferentes ao mesmo tempo.
- A insuficiência de resistência de contato para limitar a corrente circulando pelo corpo em valores aceitáveis.
- A duração da corrente e o tempo durante o qual a mesma permanece circulando pelo corpo humano.

As possíveis situações que podem levar a choques acidentais, bem como a disposição aproximada dos potenciais no solo sobre um sistema de aterramento são ilustradas nas Figura 4 e Figura 5.

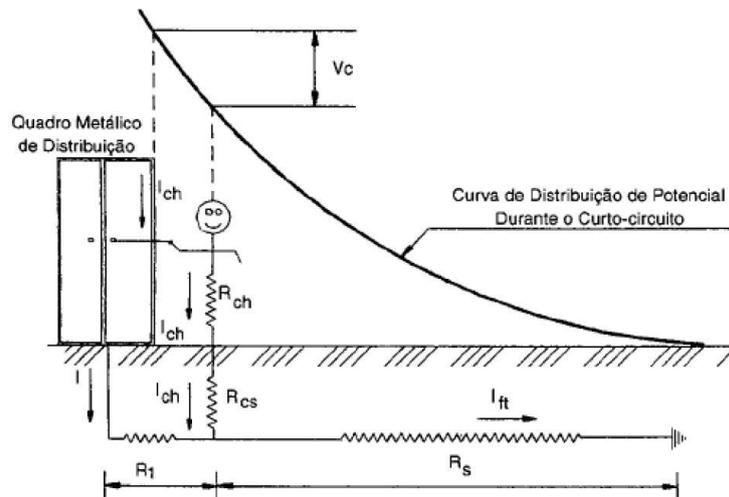


Figura 4. Indivíduo Sujeito a potencial de toque.

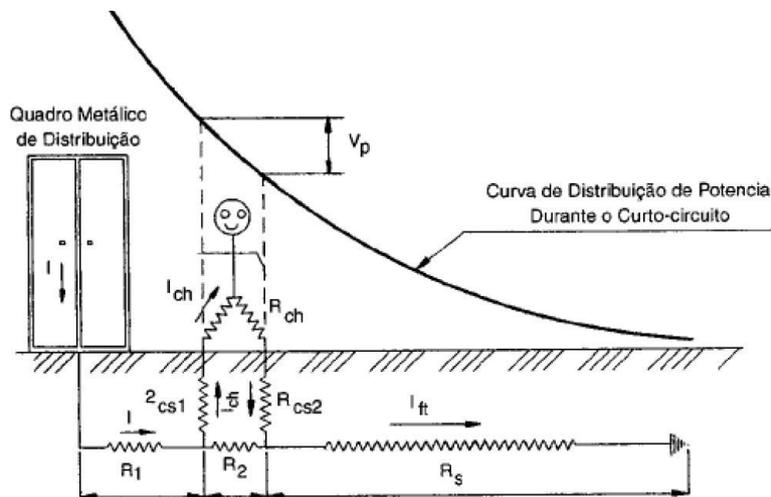


Figura 5. Indivíduo sujeito a potencial de passo.

2.7.2 LIMITES DE CORRENTE TOLERÁVEIS PELO CORPO HUMANO

Os efeitos de uma corrente elétrica atravessando o corpo humano dependem principalmente de três fatores, sendo estes a duração, a magnitude e a frequência. A consequência mais desastrosa para o corpo humano de uma possível exposição à passagem de correntes elétricas é a fibrilação ventricular.

Os seres humanos são muito vulneráveis aos efeitos da passagem de uma corrente elétrica em frequências industriais (50 a 60 Hz). Pequenas correntes, de aproximadamente 100 mA, podem ser fatais, se atravessarem a região do coração. As

faixas de valores correntes em frequências industriais associadas às consequências provocadas em um ser humano exposto a tais correntes são apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5. Faixas de correntes de exposição e prováveis consequências.

Faixa de Correntes [A]	Consequências provocadas em um ser humano exposto
1 mA	Este valor é aceito como o limiar da percepção humana, deste modo considera-se que nenhuma corrente igual ou inferior a este valor pode ser sentida por um ser humano.
1 – 9 mA	Provoca uma sensação de choque desagradável, todavia não chega a impedir que a pessoa afetada controle seus músculos de modo a cessar o contato com as partes energizadas.
9 – 25 mA	As correntes começam a se tornar dolorosas e começa a se tornar bastante difícil (em alguns casos, impossível) que a pessoa afetada consiga controlar seus músculos e cessar o contato com as partes energizadas. Ocorrem contrações musculares involuntárias.
25 – 60 mA	Além da dor e das contrações involuntárias provocadas, tornando bastante difícil ou impossível a extinção do contato do corpo com o objeto energizado, as contrações musculares podem causar certa dificuldade respiratória. Todavia, para correntes inferiores a 60 mA não é comum que se observe parada cardíaca e tampouco sequelas permanentes.
60 – 100 mA	Não é comum que correntes nesta faixa levem a morte por fibrilação ventricular, parada cardíaca ou respiratória. Entretanto o tempo de exposição à corrente já começa a se tornar um fator determinante.

O limite da fibrilação ventricular está associado não somente a magnitude e a frequência da corrente a que uma pessoa é exposta, mas também a massa e a energia efetivamente absorvida pelo ser humano. Desta forma, a Equação(4), propõe-se a determinar a máxima corrente suportável pelo corpo humano sem que haja risco de fibrilação ventricular. É de importantíssima observação que a Equação (4)somente apresenta resultados confiáveis para correntes com durações contidas no intervalo de 0,3 a 5,0 segundos, e de pulsação em frequência industrial.

$$I_B = \frac{k}{\sqrt{t_s}}, \quad (4)$$

onde, k é o coeficiente relacionado à energia absorvível pelo corpo humano; t_s , o tempo de exposição do ser humano e I_B a corrente máxima suportável pelo corpo humano sem que ocorra fibrilação ventricular.

Neste momento é valido que se chame atenção para a importância do tempo de extinção do defeito também para a segurança de pessoas, e não somente para finalidade de manutenção da estabilidade transitória do sistema elétrico.

Os valores típicos utilizados para a constante k são apresentados a seguir:

- $k_{(50\text{kg})}$: 0,116 para um ser humano cuja massa seja 50kg;
- $k_{(70\text{kg})}$: 0,157 para um ser humano cuja massa seja 70kg;

Em áreas energizadas, no interior de subestações, pode-se considerar que a massa de um indivíduo médio seja de aproximadamente 70 kg, todavia em áreas de acesso livre, deve-se adotar o valor de k correspondente a indivíduos cuja massa seja de aproximadamente 50 kg.

2.7.3 RESISTÊNCIA DO CORPO HUMANO À PASSAGEM DE CORRENTE EM BAIXAS FREQUÊNCIAS

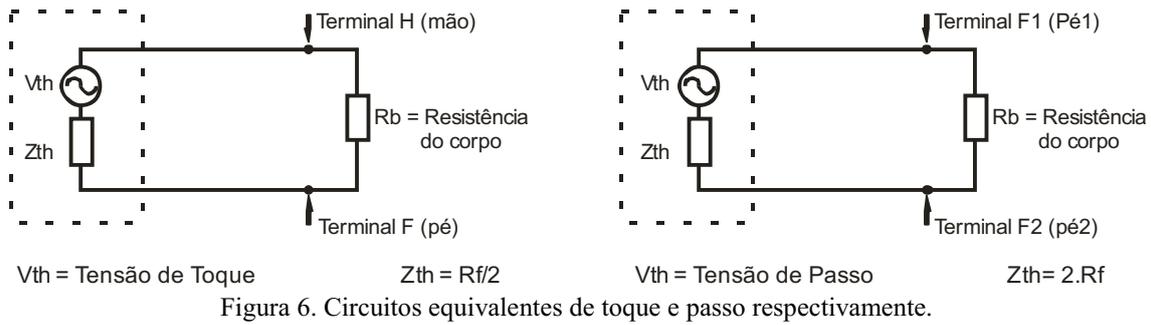
Em baixas frequências (até 60 Hz), o corpo humano pode ser aproximado por uma resistência equivalente. Os caminhos de corrente considerados normalmente são: de uma das mãos em direção aos dois pés ou de um pé para outro. Na literatura se especifica que a resistência do corpo humano à passagem de corrente contínua é de aproximadamente 300 Ω , todavia se considerada a resistência da pele humana, este valor pode variar de 500 até 3000 Ω . Faz-se válida a observação de que qualquer ferimento na pele na região de contato pode reduzir a resistência total do corpo humano.

Após diversos estudos, a resistência determinada por norma e assumida para o corpo humano (R_b), é de 1000 Ω , sendo utilizada tanto no cálculo de correntes que circulem de uma das mãos para os pés, como no cálculo de correntes que circulem de um dos pés para o outro.

2.7.4 CIRCUITO EQUIVALENTE DAS SITUAÇÕES DE CHOQUES ACIDENTAIS

Com a finalidade de calcular os potenciais máximos admissíveis, tanto para passo quanto para toque, foram desenvolvidos circuitos equivalentes que são capazes de simular a situação de uma pessoa submetida a uma das duas situações acidentais ilustradas nas Figura 4 e Figura 5.

A Figura 6 representa, respectivamente, a situação equivalente ao toque e ao passo.



A resistência R_f , representada em ambos os circuitos e utilizada no cálculo da impedância de Thévenin do circuito, simula a resistência de contato dos pés de uma pessoa com o solo. Para fins de aproximação, a resistência de contato entre os pés de uma pessoa e o solo pode ser calculada de forma aproximada pela Equação (5), que aproxima os pés de uma pessoa por um disco circular de raio b .

$$R_f = \frac{\rho}{4 \cdot b}, \quad (5)$$

sendo ρ , a resistividade da primeira camada do solo da subestação [$\Omega \cdot m$] e b , o raio do disco que representa os pés de uma pessoa (valor padrão: 0,08 m).

Levando-se em consideração a Equação (5) e os circuitos apresentados na Figura 6, as impedâncias de Thévenin equivalentes do circuito, bem como as tensões máximas admissíveis de passo e toque (Figura 4 e Figura 5) em função da corrente máxima admissível para circulação através do corpo humano (I_B), calculada a partir da Equação (4), são:

- $Z_{th(\text{toque})} = 1,5\rho$;
- $Z_{th(\text{passo})} = 6,0\rho$;
- $V_{th(\text{máximo admissível, toque})} = I_B \cdot (R_B + 1,5\rho)$;
- $V_{th(\text{máximo admissível, passo})} = I_B \cdot (R_B + 6,0\rho)$.

Todavia há que se atentar para o fato de que a Equação (5) não leva em consideração que, em geral, as subestações são cobertas por uma fina camada superficial de brita que em geral pode variar de 7 cm a 15 cm, dependendo das exigências da empresa dona do empreendimento. Esta camada de brita tem uma elevada resistividade, de aproximadamente 3000 $\Omega \cdot m$ quando está molhada. Assim sendo, as

Equações(6) e (7) são adaptadas para levar em consideração a presença de uma camada superficial de brita no terreno da subestação.

$$R_{f(\text{com_brita})} = \left(\frac{\rho_s}{4b} \right) \cdot C_s; \quad (6)$$

$$C_s = 1 - \frac{0,09 \cdot \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s} \right)}{2h_s + 0,09}; \quad (7)$$

sendo ρ a resistividade da primeira camada de solo da subestação [$\Omega \cdot m$], ρ_s a resistividade da camada de cobertura superficial da subestação (3000 $\Omega \cdot m$ no caso da brita), b o raio do disco que representa os pés de uma pessoa (valor padrão utilizado: 0,08 m), h_s a profundidade da camada de cobertura superficial do solo da subestação [m] e C_s o coeficiente de ajuste de R_f devido à presença da camada de cobertura superficial.

2.8 CONSIDERAÇÕES SOBRE O PROJETO DE ATERRAMENTO DE UMA LINHA DE TRANSMISSÃO

Os sistemas de aterramento de linhas de transmissão são normalmente instalados em disposição radial e são compostos por cabos de cobre, aço cobreado ou zincado, denominados de cabos contrapeso.

O procedimento para projeto de aterramento de uma linha de transmissão consiste na medição da resistividade do solo para determinação do comprimento (L) do cabo contrapeso. O critério utilizado para determinar o comprimento se baseia no comportamento do sistema a 60 Hz, onde o valor máximo de resistência de aterramento a ser atendido é de 20Ω .

A profundidade de instalação dos cabos de contrapeso segue um padrão com média entre 30 e 80 cm com exceção apenas para solos cultivados, onde se recomenda a instalação à profundidade de 1 m.

Outra observação relevante a respeito da instalação dos cabos de contrapeso consiste na concretagem das fundações, pois antes dela ser feita, deve-se instalar um eletroduto de PVC com a espessura de $\frac{3}{4}$ " para passagem dos cabos, conforme pode ser apresentado na Figura 7. No projeto de aterramento também esta definido, como é feita a conexão do contrapeso com a estrutura, como visto na Figura 8.

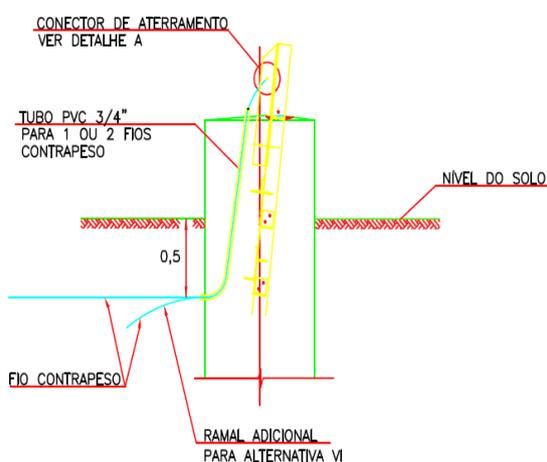


Figura 7. Esquema de instalação do cabo de contrapeso.

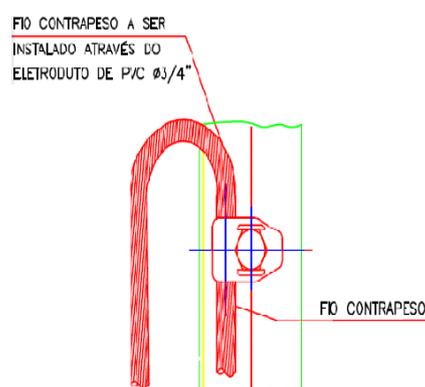


Figura 8. Representação da Conexão do contrapeso com a estrutura.

O cabo contrapeso deve ser instalado dentro dos limites da faixa de servidão da LT. Na Figura 9 é mostrado o projeto de aterramento de linhas de transmissão da Chesf para o caso estudado, onde a faixa de servidão é de 40 m.

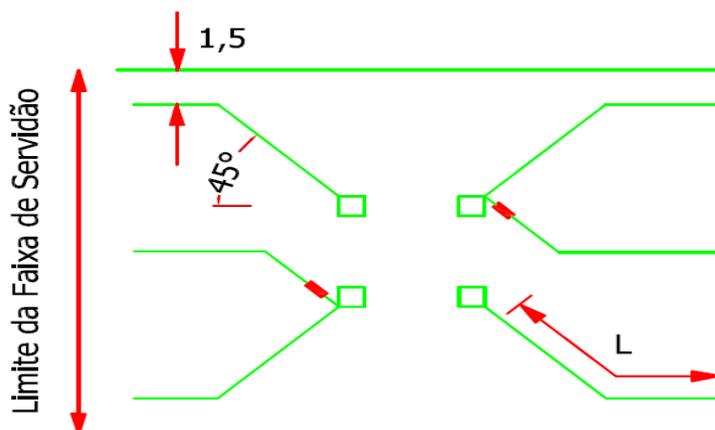


Figura 9. Projeto de Aterramento para estrutura Autoportante.

Caso necessário, a direção de qualquer ramal poderá ser alterada com a finalidade de desviar de obstáculos menores. No caso de grandes obstáculos que venham a impedir a continuidade da instalação, este deverá retornar paralelamente ao instalado, a uma distância mínima de 6 m e com um raio mínimo de retorno de 3 m, fazendo com que o contrapeso instalado se aproxime o máximo do valor especificado no projeto.

Em relação aos cabos para-raios, todas as estruturas devem ser aterradas, os mesmos serão conectados a estrutura através de um cabo com mesma bitola com grampos paralelos (lado do cabo para-raios) e com conectores tipo presilhas (lado da estrutura).

3 ESTUDO DE CASO

Foram realizadas medições de resistividade do solo e resistência de aterramento na cidade de Santa Rita/PB, em uma obra de construção de Linha de transmissão de 230 kV saindo da Linha Goianinha-Mussurê destinada a subestação Santa Rita II (230/69 kV). Em razão da oportunidade, a subestação Santa Rita II, que estava em fase final de construção, teve sua malha de terra avaliada através de simulações no TecAt Plus 5.2.

3.1 MEDIÇÃO DA RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO

As medições das resistências de aterramento tanto da malha de terra da subestação quanto da linha de transmissão seguem o mesmo padrão. Entretanto, pelo fato da malha de terra da subestação ter passado por avaliações quanto à sua adequação ao projeto, este trabalho foi focado nas medições de resistência de aterramento para as linhas de transmissão. Para tais medições foram utilizados os seguintes materiais:

- Duas hastes com 1 m de comprimento e 16 mm de diâmetro;
- Três carretéis de cabos flexíveis;
- Terrômetro digital modelo MTD 20KWe da Megabras.

Na Figura 10 é apresentado o terrômetro utilizado. O terrômetro injeta no terreno, através do eletrodo conectado em H (terminal vermelho), uma corrente estabilizada eletronicamente e mede com alta precisão a tensão (eletrodo conectado em S – terminal azul) que aparece no terreno pela circulação da corrente através da resistência de difusão do aterramento, conectado em E (terminal verde). A leitura da resistência R é direta, no display. Este método de medição de resistência de aterramento chama-se de método da queda de potencial com três terminais e se encontra ilustrado na Figura 11.



Figura 10. Foto do terrômetro digital MTD 20KWe da Megabras.

A medição consiste em se deslocar o eletrodo S, comumente chamado de eletrodo de potencial entre H (eletrodo de corrente) e E. Registra-se a cada ponto a indicação de R do terrômetro, e assim obtêm-se o perfil de resistência entre os dois eletrodos, como mostrado na Figura 11. Por esta mesma figura vê-se claramente que a curva da resistência tem a mesma forma do perfil de potencial, isto se deve ao fato da corrente que flui entre os eletrodos S e H, representados na Figura 11 por X e C respectivamente, possuir valor eficaz constante.

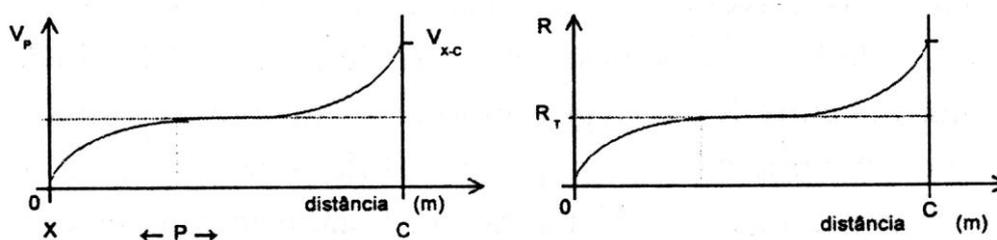


Figura 11. Perfil de potencial e sua relação com a corrente em função da distância.

Na prática, o eletrodo de corrente deve ser colocado a uma distância do centro elétrico do aterramento superior a cinco vezes a maior dimensão linear do aterramento. Isto se deve ao fato de evitar interferências da própria malha de terra nas medições. Essa distância foi estudada por Visacro (2005). Observando a Figura 11, percebe-se que o valor da resistência do sistema de aterramento situa-se na região do patamar. Após alguns estudos estimou-se que para se chegar diretamente ao valor da resistência de aterramento, o eletrodo de potencial (S) deve ser colocado a aproximadamente 60% da distância entre o centro elétrico da malha e o eletrodo de corrente (H).

Como o objetivo desse estudo é acadêmico, optou-se por realizar um maior número de medições a fim de se obter o valor da resistência de aterramento através da curva gerada pelas mesmas.

Neste trabalho foram realizadas medições de resistência de aterramento apenas para as duas estruturas autoportantes em estudo. No caso da subestação o valor da resistência de aterramento foi encontrado através das medições de resistividade do solo e simulações do projeto da malha no software TecAt Plus 5.2[©]. A principal razão por manter o foco nas medições de resistência de aterramento nas estruturas autoportantes se deu por estas estruturas, na época das medições, terem sido recentemente construídas e não terem passado por nenhuma avaliação, diferentemente da malha de terra da subestação, que já havia passado por avaliações.

As medições foram realizadas tomando como base os pés das estruturas individualmente, totalizando oito medições para as duas estruturas.

3.1.1 PROCEDIMENTO DE MEDIÇÃO

A haste de corrente (H) foi cravada a 70 m da ligação à estrutura (E). A Chesf recomenda que a haste de corrente seja cravada a 100 m da ligação com a estrutura, contudo, como pode ser visto na fotografia apresentada na Figura 12, as condições do terreno não permitiram medições com esta haste à distância especificada pela Chesf. Como com aproximadamente 60 % da distância entre a ligação com a estrutura e a haste de potencial se consegue atingir o valor de patamar da curva resistência \times distância, 70 m de distância entre H e E se configura satisfatório para se obter resultados confiáveis.



Figura 12. Fotografia das hastes sendo cravadas para medição da resistência de aterramento.

A haste de potencial, que foi cravada entre a referência e a haste de corrente, teve sua posição variada de 10 em 10 m do ponto de ligação à estrutura em direção à haste de corrente. Todas as hastes foram fincadas a uma profundidade mínima de 0,5m.

A direção das medições seguiu o recomendado pela Chesf: perpendicular ao eixo da linha de transmissão. Ainda segundo as especificações da Companhia, devem ser feitas tantas medições quanto necessário, até que ocorra uma das seguintes situações:

- Diferença entre cada uma das leituras sucessivas e a média das três não seja superior a 10% (dez por cento) desta média;
- A distância do eletrodo do potencial ao eletrodo de corrente seja inferior a 30 m, sem ter ocorrido a situação anterior;
- Caso não ocorra a situação do primeiro item, o eletrodo de corrente deverá ser cravado numa posição mais afastada da estrutura (aproximadamente 150 m) e as medições deverão ser repetidas;
- Será considerada como valor da resistência de aterramento da estrutura, a média dos três valores obtidos conforme o primeiro item.

Nas Figura 13 e Figura 14 são apresentadas fotografias da conexão com a estrutura autoportante e de uma das estruturas em estudo respectivamente.



Figura 13. Fotografia da conexão com a estrutura autoportante.



Figura 14. Fotografia da estrutura autoportante em estudo.

3.1.2 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

As medições foram acompanhadas por engenheiros eletricitistas da empresa Energy Eletricidade LTDA, empreiteira responsável pela construção das linhas de transmissão. Como dito anteriormente, foram realizadas medições individuais para cada pé de torre. Foram analisadas as estruturas 1/1 e 1/2 e os dados obtidos são apresentados nas Tabela 6 e Tabela 7 respectivamente.

Tabela 6. Resistência de aterramento medidas para a estrutura 1/1.

Posição da haste de corrente (m)	Posição da haste de tensão (m)	Resistência Pé A (Ω)	Resistência Pé B (Ω)	Resistência Pé C (Ω)	Resistência Pé D (Ω)
70	10	10,2	8,7	6,7	20,8
	20	34,1	18,4	11,0	35,7
	30	35,7	20,0	21,7	36,4
	40	38,2	21,7	23,0	39,5
	50	42,7	23,4	24,9	45,5
	60	95,4	50,8	44,3	81,1

Tabela 7. Resistência de aterramento medidas para a estrutura 1/2.

Haste de corrente (m)	Haste de tensão (m)	Resistência Pé A (Ω)	Resistência Pé B (Ω)	Resistência Pé C (Ω)	Resistência Pé D (Ω)
70	10	5,7	15,0	8,2	2,2
	20	22,6	23,3	18,7	10,0
	30	27,9	25,8	20,5	16,9
	40	29,2	27,8	22,2	18,8
	50	32,1	34,0	30,7	20,4
	60	57,4	49,6	55,1	31,3

De acordo com o exposto no tópico 5.2, o valor da resistência do pé da torre, especificado pela Chesf, será a média dos três valores onde a diferença entre cada uma das leituras sucessivas e a média das três não seja superior a 10% (dez por cento) desta média. Nas Tabela 8 e Tabela 9 encontram-se os valores da diferença de resistência entre medições consecutivas e a média das resistências de três medições consecutivas respectivamente.

Tabela 8. Diferença entre medições sucessivas para as estruturas 1/1 e 1/2.

		Pé A		Pé B		Pé C		Pé D	
		1/1	1/2	1/1	1/2	1/1	1/2	1/1	1/2
Diferença entre Medições sucessivas	2-1	1,3	16,9	9,7	7,3	4,3	10,5	14,9	7,8
	3-2	1,6	5,3	1,6	2,5	10,7	1,8	0,7	6,9
	4-3	2,5	1,3	1,7	2,0	1,5	1,7	3,1	1,9
	5-4	4,5	2,9	1,7	5,2	1,9	8,5	1,6	1,6
	6-5	52,7	25,3	27,4	15,6	19,4	24,4	10,9	10,9

Tabela 9. Média entre três medições consecutivas para as estruturas 1/1 e 1/2.

		Pé A		Pé B		Pé C		Pé D	
		1/1	1/2	1/1	1/2	1/1	1/2	1/1	1/2
Média entre Medições sucessivas	1,2,3	26,7	18,7	15,7	21,4	13,1	15,8	31,0	9,7
	2,3,4	36,0	26,6	20,0	25,6	18,6	20,5	37,2	15,2
	3,4,5	29,7	29,7	21,7	29,2	23,2	24,5	40,5	18,7
	4,5,6	58,8	39,6	31,97	37,1	30,7	36,0	55,4	23,5

3.1.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS

O comprimento do cabo *contrapeso* é previamente definido pelo projetista Chesf, baseado na medição das resistividades do solo realizadas durante a fase preliminar da construção da LT. Dessa maneira, a empreiteira responsável pela construção, os instala paramentando-se em tais definições. Portanto, o valor da resistência de aterramento de cada torre, fornecido pela Chesf, é o parâmetro utilizado para verificar se os aterramentos dos pés de torre estão de fato dentro do esperado no projeto. Esses valores foram fornecidos pela empreiteira responsável pela construção das linhas de transmissão e estão representados na Tabela 10.

Tabela 10. Definições de projeto para o cabo contrapeso.

Número da Torre	Resistência Calculada por Contrapeso (Ω)	Comprimento por perna (m)	Tipo de contrapeso a instalar	Comprimento Total a instalar (m)
1/1	40,00	52	LX4	208
1/2	30,00	50	LX4	200

A análise é feita pela comparação entre a resistência média da estrutura, apresentada na Tabela 10, com a resistência medida “*in loco*”, através do terrômetro, avaliando cada pé de torre individualmente, como se não houvesse nenhum acoplamento entre eles. Tal comparação dá subsídio para que o projetista Chesf identifique a necessidade, ou não, de modificação no projeto de aterramento.

Nas Tabela 8 e Tabela 9, os valores destacados pela cor azul apresentam a aplicação da metodologia sugerida pela Chesf para se encontrar a resistência de cada pé de torre. Observando especificamente a Tabela 9, vê-se que os valores de resistência de cada pé de torre encontrados, tanto para a estrutura 1/1 quanto para a estrutura 1/2, estão em conformidade com as definições de projeto para o cabo contrapeso, pois nenhum dos valores encontrados foi superior ao apresentado na Tabela 10.

Portanto, todas as resistências dos pés das torres estão dentro dos parâmetros, não havendo assim necessidade de modificação do projeto e as estruturas encontram-se prontas para todas as conexões do sistema de aterramento. Caso fosse necessária alguma modificação no projeto, os cabos de contrapeso deveriam ser aumentados para se adequarem aos valores de resistência definidas pela Chesf.

3.2 MEDIÇÃO DE RESISTIVIDADE DO SOLO

Dentre os métodos de medição de resistividade do solo, os métodos mais confiáveis são aqueles onde as medições são realizadas no local onde se quer avaliar. Neste relatório será apresentado o método desenvolvido por Frank Wenner, comumente chamado de Método de Wenner ou Método dos Quatro Pontos, por ser considerado um modelo de medição eficiente e relativamente simples. O método utiliza um terrômetro (instrumento de medição de resistência), que possui quatro terminais (dois de corrente e dois de potencial), os quais devem ser conectados a quatro eletrodos, distantes um do outro de a , conforme ilustrado na Figura 15.

Pelos terminais externos (C1 e C2), injeta-se corrente no solo. A queda de tensão causada pela corrente é detectada entre os terminais internos (V1 e V2). Estabelecendo-se a relação entre a tensão e a corrente medida, obtém-se um valor da resistência R no solo entre os eletrodos conectados em V1 e V2. Os instrumentos providos de quatro terminais (2 de corrente e 2 de tensão), como o terrômetro digital modelo MTD 20KWe da Megabrás, utilizados nas medições, fornecem diretamente o valor de R .

De posse dos valores de resistência coletados em várias direções no terreno, aplica-se então a fórmula de Palmer (Equação (8)), que considera o afastamento entre as hastes relativamente grande em relação à penetração dos eletrodos no solo.

$$\rho = 2 \pi a R. \quad (8)$$

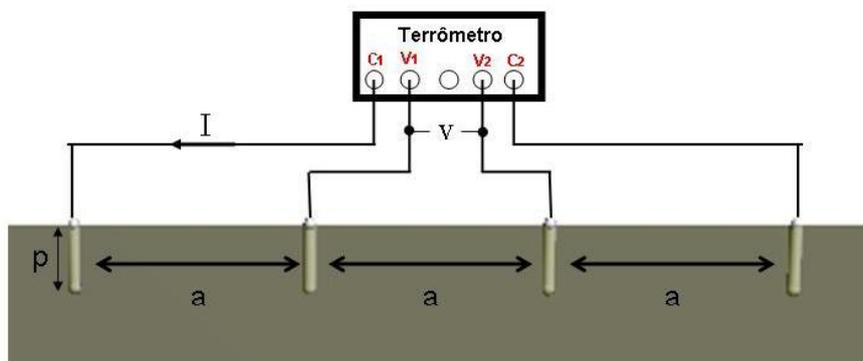


Figura 15. Método de Wenner.

Na implementação do método de *Wenner*, as hastes verticais devem estar firmemente cravadas, assegurando-se que a superfície condutora esteja em contato com o solo em toda sua extensão. A profundidade recomendada para as hastes é da ordem de 50 cm, sendo aconselhável um valor maior para terrenos arenosos, aterros e brejos, de forma a assegurar um contato íntimo entre eletrodo e solo. No caso de terrenos de grande resistência mecânica, algumas vezes é difícil alcançar o valor, sendo aceitável profundidade um pouco menor.

Na prática são usualmente adotados valores múltiplos sucessivos de afastamento para medição em uma dada direção: 1, 2, 4, 8, 16, 32 e 64 m. Assim, para cada espaçamento medido, é possível manter fixas as posições da primeira e da terceira haste da medição anterior e deslocar apenas as duas outras, pois os afastamentos sucessivos têm valor duplo do valor utilizado na operação precedente. Outra sequência usual é: 1,5; 3; 6; 9; 18; 36; 72 m

A partir dos valores encontrados, obtidos através das medições realizadas em campo, também é possível mapear todo o terreno no qual se deseja implantar o sistema de aterramento. Tal mapeamento pode ser denominado de estratificação do solo, que é basicamente a identificação das várias camadas que compõem o mesmo. Existem várias técnicas de modelagem do solo, dentre elas destacam-se:

- método do catalogo do aparelho Yokogawa;
- método de Pirson;
- método gráfico;
- método simplificado para estratificação do solo em duas camadas.

Nesse trabalho, o solo foi estratificado em duas camadas no TecAt Plus 5.2.

3.2.1 PROCEDIMENTO DE MEDIÇÃO

As medições de resistividade do solo foram realizadas no entorno da subestação de Santa Rita II, a uma distância intermediária entre a estrutura metálica autoportante e a subestação, de modo a minimizar os erros provenientes da influência do aterramento de ambas as estruturas nas medições.

Realizadas no dia 28/03/12, as medições seguiram, em linha reta (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**) as direções indicadas na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** O solo encontrava-se compactado e seco obedecendo a norma NBR 7117.



Figura 16. Fotografia da medição de resistividade do solo.

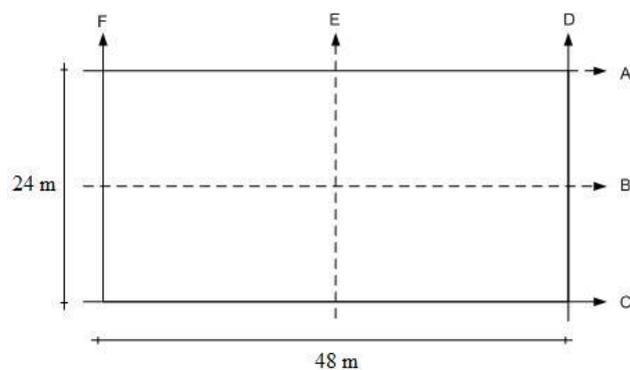


Figura 17. Disposição dos pontos para medição de resistividade do solo.

Seguindo o Método de Wenner, os espaçamentos entre as hastes para as direções A, B e C foram: 1, 2, 4, 8,16 m. Já para as direções D, E e F, os espaçamentos foram: 1, 2, 4 e 8 m entre as hastes, totalizando 27 medições. As hastes foram fincadas a uma profundidade de 0,40 m. Os valores de resistência obtidos estão apresentados na Tabela 11.

Tabela 11. Medições da resistência do solo em Ω de acordo com o Método de Wenner (NBR 7117).

a (m)	A	B	C	D	E	F
1	365 Ω	680 Ω	110 Ω	402 Ω	725 Ω	1100 Ω
2	323 Ω	633 Ω	60 Ω	380 Ω	690 Ω	645 Ω
4	163 Ω	510 Ω	32 Ω	470 Ω	695 Ω	615 Ω
8	105 Ω	650 Ω	80 Ω	146 Ω	527 Ω	556 Ω
16	93 Ω	380 Ω	50 Ω	-	-	-

3.2.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os dados que estão destacados em vermelho na Tabela 11 são valores não esperados, entretanto, esses tipos de resultados são comuns tendo em vista a não homogeneidade do terreno. Como todos os valores destacados são maiores do que os esperados, pode-se supor, que havia pedras, no “caminho” da corrente, sob a superfície em medição.

Com os dados da Tabela 11 e o software TecAt Plus 5.2, conseguiu-se uma estratificação de solo em duas camadas. A curva de estratificação é apresentada na Figura 18.

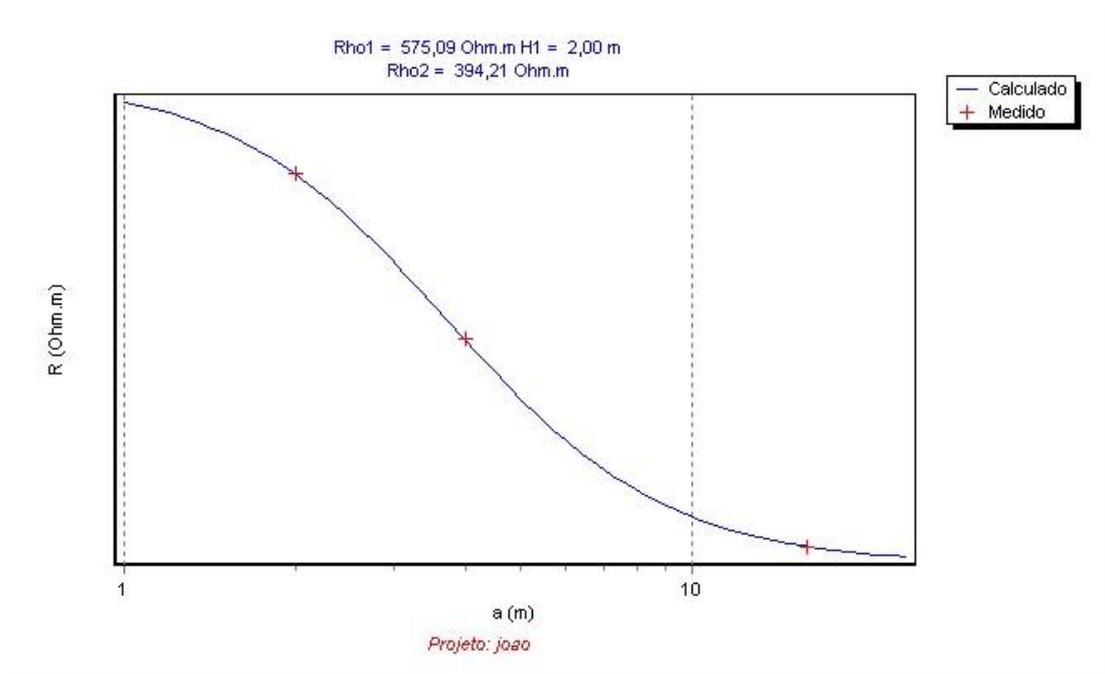


Figura 18. Curva de estratificação do solo.

Observando a Figura 18, pode-se ver que a primeira camada do solo, possui uma profundidade de 2,0 m e resistividade $575,09 \text{ } \Omega.m$ e a segunda camada possui resistividade de 394,21. Com esses valores, e o projeto da malha de aterramento da subestação Santa Rita II, pode-se encontrar, por simulação, o valor da resistência da malha de terra bem como os potenciais de passo e toque na superfície da mesma, frente a uma corrente de falta, itens a serem discutidos nos tópicos subsequentes.

3.3 SIMULAÇÕES DA MALHA DE ATERRAMENTO DA SUBESTAÇÃO DE SANTA RITA II

O projeto da malha de aterramento da subestação de Santa Rita II foi gentilmente cedido pela FAAB Engenharia, empreiteira responsável pela construção da subestação. No momento das medições de resistividade do solo, a malha já havia passado por avaliação e estava de acordo com o projeto, portanto, neste trabalho, deu-se foco às simulações de falta e análise de potenciais de passo e toque na superfície da mesma. Para tais simulações foi utilizado o TecAt Plus 5.2. Com o intuito de enriquecer o aprendizado, simulou-se também uma malha com hastes maiores na extremidade, para um melhor rendimento da mesma frente a situações de falta ou surtos atmosféricos.

A Figura 19 mostra uma fotografia, tirada da parte externa, da subestação de Santa Rita II.



Figura 19. Fotografia da subestação de Santa Rita II.

3.3.1 MALHA ORIGINAL

A malha de terra da subestação de Santa Rita II possui dimensões de 50 m x 40 m, o que representa uma área de 2000 m² com hastes de 2,4m de comprimento. Após ter passado os dados do projeto da malha de aterramento (fornecido em arquivo do AutoCad), para o TecAt Plus 5.2, analisou-se o efeito de uma falta em sua superfície. Na Figura 20 observa-se o projeto da malha no software TecAt Plus 5.2 bem como a linha (destacada em azul) na qual foram analisados os potenciais de passo e toque, chamada de linha de potencial.

Com o resultado do cálculo da resistividade e estratificação do solo apresentados anteriormente e o projeto da malha no software para análise de aterramento, chegou-se a um valor (simulado) de resistência de aterramento de 4,01 Ω . Como o valor fornecido pelo projeto é de 5,0 Ω , percebe-se que o TecAt Plus 5.2 forneceu valores adequados para as simulações.

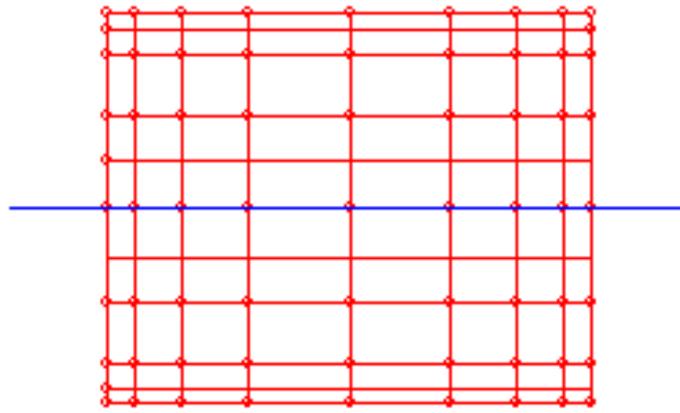


Figura 20. Malha de Terra com a representação da linha de potencial da subestação.

Para analisar a eficácia da malha, foi simulada uma injeção de corrente com amplitude de 1,0 kA e duração de 0,3s (tempo de atuação da proteção).

Os potenciais de passo e toque, aos quais uma pessoa de 70 kg estaria submetida se estivesse na subestação na ocasião de um curto-circuito, estão representados nas Figura 21 e Figura 22 respectivamente.

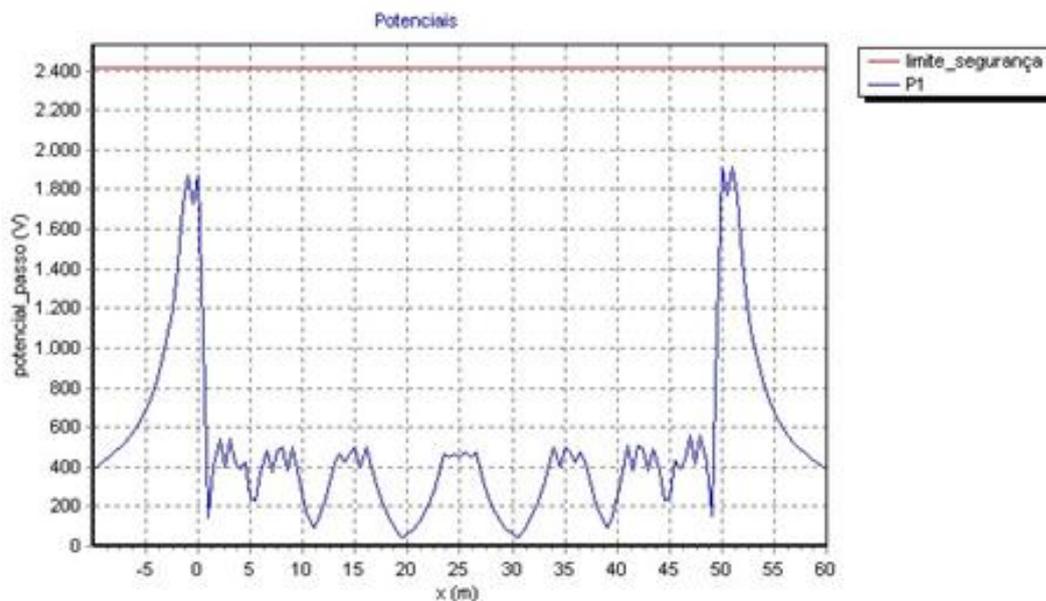


Figura 21. Potenciais de passo.

Analisando o resultado dos potenciais de passo ao longo do corte, ilustrado na Figura 20, verifica-se que os potenciais estão abaixo do limite de segurança. Por outro lado, na região da malha de terra há pequenas diferenças de potenciais, podendo ser caracterizada como diferenças entre linhas equipotenciais. Entretanto, nas extremidades da malha, há uma grande diferença de potencial compreendido entre a região da malha e

a região exterior, isso se dá devido ao acúmulo das cargas em lugares pontiagudos, fenômeno conhecido como poder das pontas.

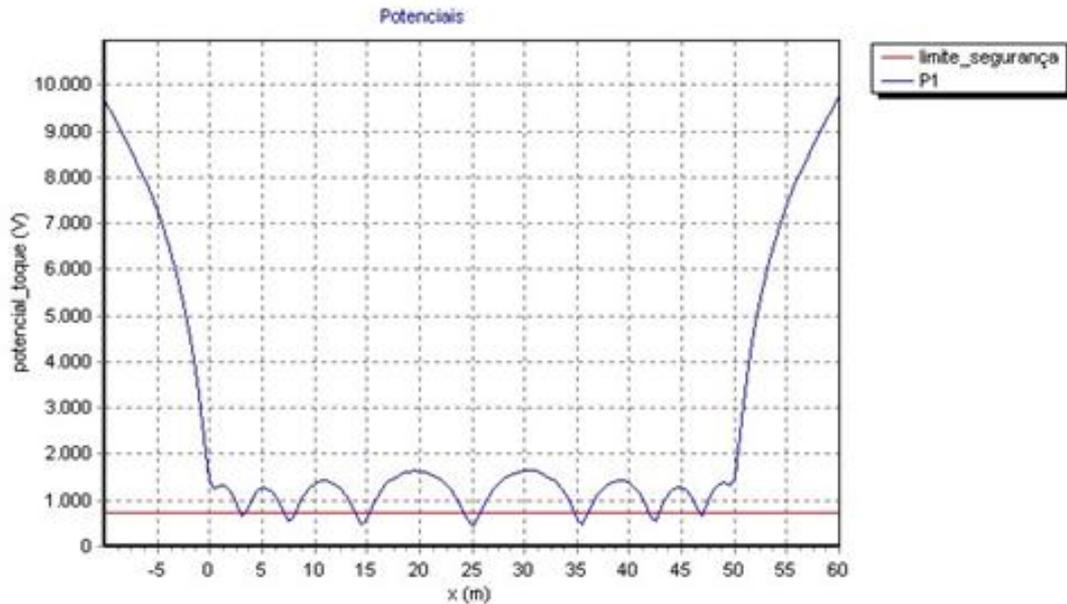


Figura 22. Potenciais de toque.

Neste caso, os potenciais de toque (Figura 22) apresentaram alguns valores acima do potencial de segurança, entretanto, verificam-se baixas variações de potencial na região compreendida pela malha. Semelhante ao resultado anterior há elevadas variações de potencial entre as extremidades da malha e a região exterior, entretanto isto pode ser contornado caso os equipamentos elétricos e outros materiais não estejam nas extremidades da malha.

Na Figura 23 é apresentado o gráfico os potenciais da malha nas três dimensões.

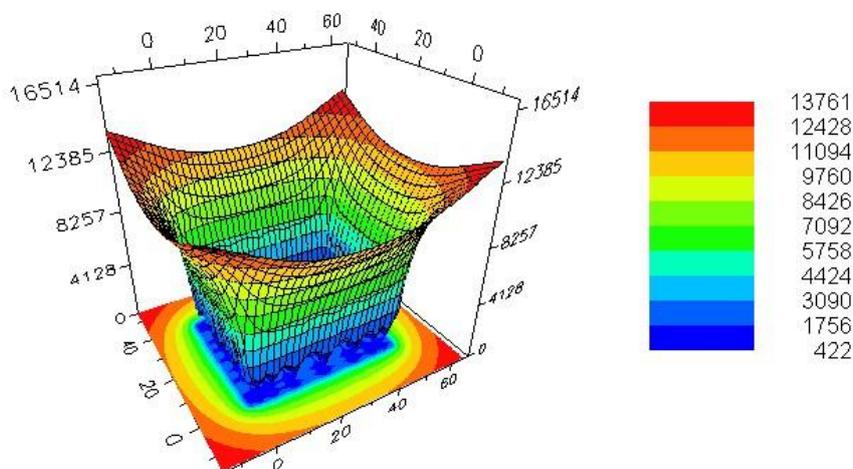


Figura 23. Gráfico dos Potenciais na malha nas três dimensões.

3.3.2 MALHA PROPOSTA

Como verificado nas simulações da seção anterior, há elevadas variações de potencial na interface da malha de aterramento. Para melhorar a eficiência da malha optou-se por aumentar para 12 m as hastes nas extremidades da malha, de modo a reduzir as diferenças de potenciais nos limites da malha. Nas Figura 24 e Figura 25 estão representados os resultados para os potenciais de passo e toque respectivamente.

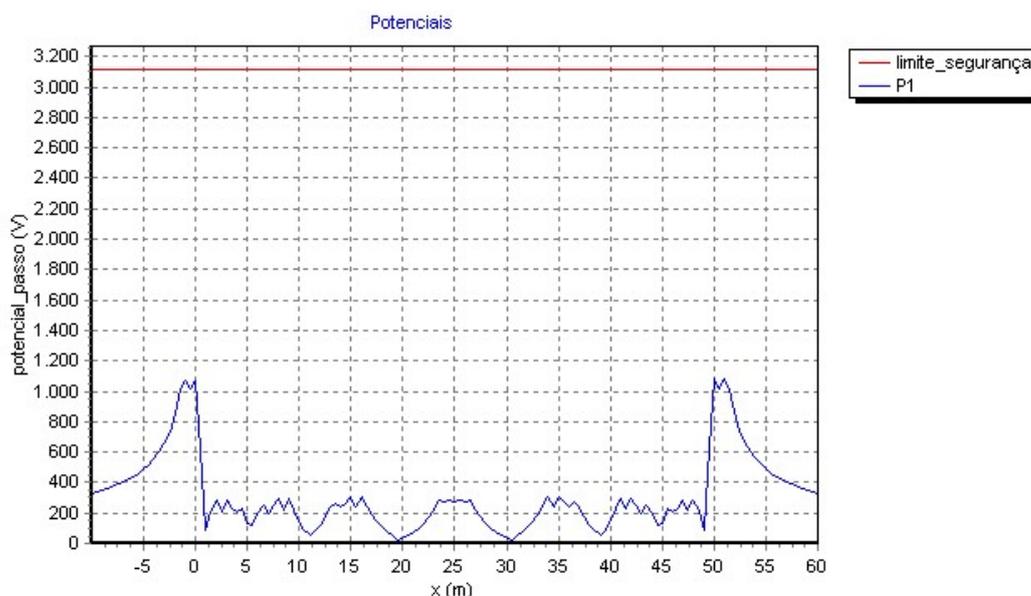


Figura 24. Potenciais de passo.

Feita uma análise da Figura 23, verifica-se uma redução acentuada nos potenciais nas extremidades da malha de aterramento. Comparando com o resultado da Figura 20, os potenciais nas extremidades sofreram uma redução de aproximadamente 800 V.

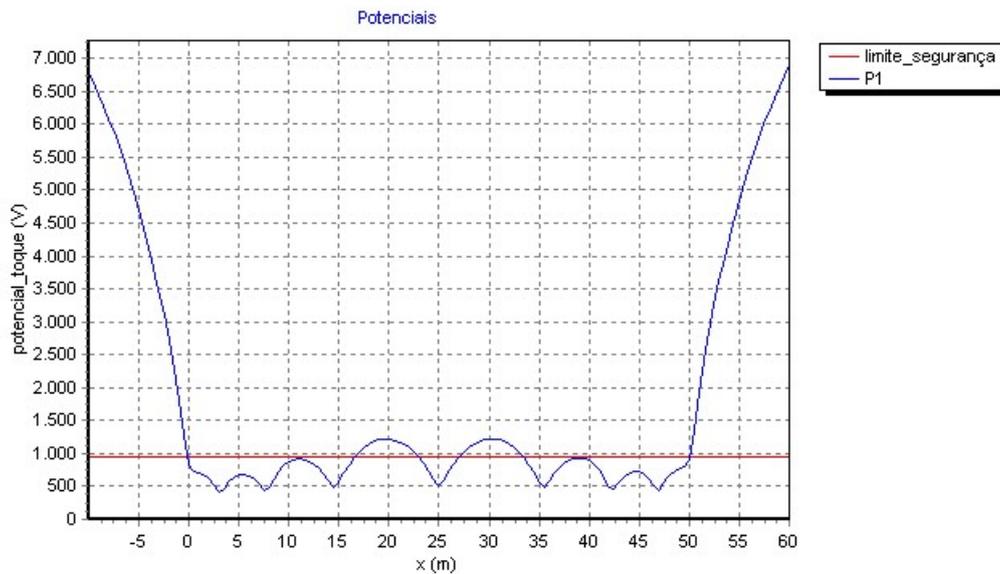


Figura 25. Potenciais de toque.

Para os potenciais de toque (Figura 25) houve uma redução ainda maior dos potenciais nas bordas da malha, um decaimento de aproximadamente 3000 V, entretanto, estes potenciais ainda apresentaram a maioria dos valores superiores ao limite de segurança.

A redução nos potenciais das extremidades é explicada pelo fato de haver um maior escoamento de corrente no caso das hastes mais profundas, logo, quanto maior o comprimento da haste menor serão os potenciais de passo e toque.

Na Figura 26 é apresentado o gráfico os potenciais da malha nas três dimensões.

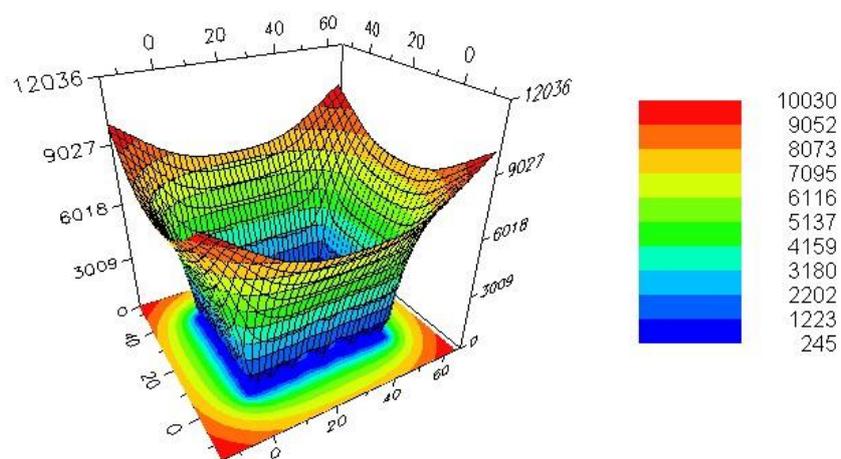


Figura 26. Gráfico dos Potenciais, em três dimensões, na malha com hastes mais profundas nas extremidades.

4 CONCLUSÃO

O dimensionamento adequado de um sistema de aterramento é necessário para um bom desempenho e segurança nos projetos de subestações, linhas de transmissão ou até mesmo de uma residência. Para tanto, a avaliação minuciosa de um sistema de aterramento é um tópico importante no contexto de expansão do sistema elétrico nacional.

Os projetos de engenharia devem contemplar suas normas específicas para garantir a segurança e confiabilidade para todos que estejam envolvidos no que lhe corresponde. Por outro lado, a avaliação do desempenho de um sistema de aterramento de uma subestação (SE) e de pés de torre, por meio de resultados de medições de resistência de aterramento, resistividade do solo e simulações de potencial de passo e toque devido a correntes de curto-circuito, torna-se fundamental para o cumprimento da norma específica, bem como para verificação da conformidade do projeto com aplicação do mesmo e vice-versa.

Os resultados das simulações dos potenciais de toque e passo na malha de aterramento da subestação, comprovaram o aumento da eficiência da malha proporcionalmente ao aumento da hastes nas suas bordas, refletindo, conseqüentemente em um aumento significativo nos custos do projeto, dado que em vez de hastes de cobre de 2,4m seriam utilizadas hastes de 12m.

5 BIBLIOGRAFIA

ABNT:NBR 5419 (2001): Proteção de estruturas contra descargas atmosféricas.

ABNT:NBR 7117 (2012): Medição da resistividade e determinação da estratificação do solo.

ABNT:NBR 13571 (1996): Haste de aterramento aço-cobreada e acessórios.

CHESF (Abril de 2007): Especificação técnica de serviços de uma linha de transmissão. Instalação do sistema de aterramento, estruturas autoportantes, DEPL 007/354.

CHESF (Setembro de 2009): Especificação técnica de serviços de linha de transmissão. Sistema de Aterramento.

COSTA, E. G.; NERI, M. G. G. Relatório Técnico – Medição e Análise de Resistência do Sistema de Aterramento. 2006. LAT- UFCG/ATECEL.

IEEE Recommended Practice for Powering and Grounding Electronic Equipment—IEEE Emerald Book, IEEE Std 1100-1999.

KINDERMANN, G. Aterramento Elétrico. Porto Alegre: Sagra-DC Luzzatto, 2002.

MAMEDE, J. F. Instalações Elétricas Industriais. 6ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2001.

MATTOS, M. A. F. Técnicas de Aterramento. Campinas: Okime, 2004. 244 p.

MEDEIROS Filho, S. de. Fundamentos de Medidas Elétricas. Recife, 1979.

MORENA, H., & Costa Fernandes, C. (s.d.). Aterramento Elétrico. São Paulo: PROCOBRE.

OLIVEIRA, J. T. de. Apostila do Curso de Aterramento de Sistemas Elétricos e Eletrônicos. UFRN, 1997.

VISACRO, S. F. Aterramentos Elétricos. São Paulo: Artliber Editora Ltda, 2002.