



Universidade Federal de Campina Grande

Centro de Engenharia Elétrica e Informática

Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

SAULO LIMA MARQUES

**PROJETO MALHA DE ATERRAMENTO DE UMA SUBESTAÇÃO:
UM ESTUDO DE CASO**

Campina Grande, Paraíba
Março de 2012

SAULO LIMA MARQUES

PROJETO MALHA DE ATERRAMENTO DE UMA SUBESTAÇÃO:
UM ESTUDO DE CASO

*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
Março de 2012

SAULO LIMA MARQUES

PROJETO MALHA DE ATERRAMENTO DE UMA SUBESTAÇÃO:
UM ESTUDO DE CASO

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

Dedico este trabalho a Deus,
Aos meus pais, Saulo e Eliana,
A namorada, Isabela Veras,
A irmã, Náina Veríssimo
Aos Familiares,
A todos os amigos.

AGRADECIMENTOS

A Deus, que me deu a vida, saúde e inteligência, e que me dá força para continuar a caminhada em busca dos meus objetivos.

Aos meus pais, irmã e namorada, pela dedicação e apoio que tem me dado e sem os quais não alcançaria essa conquista.

Aos professores do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande pelos ensinamentos e em especial ao meu orientador, Tarso Vilela Ferreira, que se dispôs e muito colaborou para o engrandecimento deste trabalho de conclusão de curso.

Aos amigos de curso pela alegria, companheirismo e por tornarem esses anos de faculdade muito especiais para mim.

RESUMO

O presente trabalho apresenta a elaboração e desenvolvimento do projeto da malha de aterramento a ser aplicada na proteção de uma subestação de média tensão (69/13,8 kV) no Polo industrial Petrobras situado na cidade de Guamaré-RN, que atenda as normas brasileiras vigentes e normas Petrobras, garantindo uma segurança satisfatória de equipamentos e pessoas que tenham contato com a mesma. O equipamento e o software empregado nas medições e análise das medidas foram o terrômetro e o software Microsoft Excel 2010. Para estratificação do solo e a medição da resistência de aterramento foram utilizados os Métodos de Wenner e o Método do Megger respectivamente. Com esses materiais e métodos obtém-se e analisam-se dados de campo, que possibilitam o desenvolvimento e implementação da malha de aterramento conforme especificações para configuração do solo e configuração da subestação.

Com os resultados das medições realizadas na malha implementada enquadrando-se dentro dos valores esperados, conclui-se que os cálculos foram bem realizados e atendem todos os critérios determinados ao projeto, e que não houve empecilhos a ponto de inviabilizar a realização do estudo.

Palavras-chave: Subestação, Aterramento, Proteção, Segurança, Resistividade, Solo.

ABSTRACT

This report presents the design and development of design ground grid to be applied in the protection of a medium voltage substation (69/13, 8 kV) at the industrial Polo Petrobras located in the city of Guamaré-RN, which meets the standards in Brazil Petrobras and existing standards, ensuring a satisfactory safety equipment and people who have contact with it. The equipment and software used in the measurements and analysis of the measures were the terrômetro and software Microsoft Excel 2010. For stratification of soil and ground resistance measurement methods were used and the Wenner method Megger respectively. With these materials and methods is obtained and analyzed field data, which enable the development and implementation of ground grid as setting specifications for soil and configuration of the substation.

With the results of measurements performed in the mesh fitting is implemented within the expected values, it is concluded that the calculations were done well and meet all criteria established for the project, and that no obstacles as to derail the study.

Keywords: Substation, Grounding, Protection, Safety, Resistivity, Ground.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1. Solo estratificado em varias camadas.....	5
Figura 2.2. Esquema de medição da resistência de terra	8
Figura 2.3. Demonstração de um indivíduo submetido a uma tensão de passo	9
Figura 2.4. Demonstração de um indivíduo submetido a uma tensão de toque	9
Figura 3.1. Fluxograma das etapas de elaboração do projeto	10
Figura 3.2. Quatro hastes cravadas no solo	11
Figura 3.3. Linhas de correntes elétricas	12
Figura 3.4. Ponto imagem	12
Figura 3.5. Imagem do ponto 1 e 4.....	13
Figura 3.6. Demarcação dos pontos onde sera realizada a medição	15
Figura 3.7. Metodo de Wenner.....	15
Figura 3.8. Curvas teóricas correspondentes	17
Figura 3.9. Representação do metodo do Megger	25

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 3.1. Curva de resistividade x espaçamento	29
Gráfico 3.2. Gráfico de sobreposição (k x h1) e (k x h2)	32
Gráfico 3.3. Curva de resistencia x espaçamento (x) para cada dy	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Resistividade de alguns solos em função da composição	5
Tabela 3.1. Dados Ponto A.....	26
Tabela 3.2. Dados Ponto B.....	26
Tabela 3.3. Dados Ponto C.....	26
Tabela 3.4. Dados Ponto D.....	27
Tabela 3.5. Dados Ponto E.....	27
Tabela 3.6. Medidas de resistividade por espaçamento.....	28
Tabela 3.7. Resistividade média para cada espaçamento sem desconsiderar desvios acima de 50%	28
Tabela 3.8. Valores dos desvios de medidas para cada espaçamento.....	28
Tabela 3.9. Valores calculados de resistividade de acordo com o espaçamento	29
Tabela 3.10. Valores do quinto ao sexto passo $a_1 = 1$ metro.....	31
Tabela 3.11. Valores do quinto ao sexto passo $a_2 = 4$ metros.....	32
Tabela 3.12. Dados iniciais da malha de aterramento	33
Tabela 3.13. Valores das especificações da malha de aterramento	38
Tabela 3.14. Dados de campo medidas de resistência	39

LISTA DE SÍMBOLOS

ρ	Resistividade do solo
R	Resistência
L	Indutância
C	Capacitância
h_n	Profundidade da camada de solo
ρ_a	Resistividade aparente do solo no local de fincamento da haste
l	Comprimento cravado da haste
R_x	Sistema de aterramento em ensaio
E_p	Eletrodo de Potencial
E_c	Eletrodo de Corrente
a	Distancia entre eletrodos
ρ_s	Resistividade da camada de superfície
V	Tensão
I	Corrente
C_1	Eletrodo de corrente
C_2	Eletrodo de corrente
P_1	Eletrodo de potencial
P_2	Eletrodo de potencial
R_{ch}	Resistencia do corpo humano
R_c	Resistencia de contato
I_{ch}	Corrente de choque pelo corpo humano

I_f	Corrente de falha do sistema
$\rho_m(\alpha_j)$	Resistividade medida para o respectivo espaçamento α_j
n	Numero de medições efetuadas para o respectivo espaçamento α_j
q	Numero de espaçamentos empregado
K	Coefficiente de reflexão
A_{min}	Área mínima da malha
N	Numero efetivo de condutores paralelos
L_p	Perímetro da Malha
K_m	Coefficiente de espaçamento
K_i	Coefficiente de correção para dispersão para corrente de malha
K_s	Coefficiente de espaçamento para tensão de passo
D	Distância entre condutores paralelos da malha
t	Tempo de atuação do relé de neutro
c_s	Fator corretivo para camada de brita
L_r	Comprimento de uma haste
N_a	Numero de condutores maior lado
N_b	Numero de condutores menor lado
L_c	Comprimento total de condutores
L_t	Comprimento equivalente de condutores
L_h	Comprimento total devido ao tamanho das hastes
A	Área da malha
I_m	Corrente de malha
S_f	Fator divisor de corrente de falha
$3I_0$	Corrente de falta fase-terra
Z_{eq}	Impedância equivalente do circuito
L_x	Comprimento de condutores na direção x

L_y	Comprimento de condutores na direção y
E_m	Tensão de malha
E_s	Tensão de passo na malha
d	Diâmetro da haste

SUMÁRIO

Agradecimentos	v
Resumo	vii
Abstract	viii
Lista de Ilustrações	ix
Lista de Gráficos	x
Lista de Tabelas	xi
Lista de Símbolos	xii
Sumário	xv
1 Introdução.....	1
1.1 Introdução ao aterramento elétrico.....	1
1.1.1 Influência da umidade temperatura e estratificação.....	2
1.1.2 Princípio de funcionamento	2
2 Embasamento teórico	5
2.1 Resistividade do solo	5
2.1.1 Estratificação do solo.....	6
2.1.2 Determinação da resistividade do solo	6
2.2 Resistência de aterramento.....	7
2.2.1 Medição de resistência de aterramento	7
2.3 Segurança em aterramento	8
3 Metodologia.....	10
3.1 Medição da resistividade do solo	11
3.1.1 Medição da resistividade utilizando o método de Wenner	14
3.1.2 Análise de medidas	15
3.1.3 Estratificação do solo.....	16
3.2 Dimensionamento do sistema de aterramento.....	18
3.2.1 Estimativa da área mínima da malha	18
3.2.1.1 Cálculo do número de condutores de cabo 70mm ² de cada lado.....	18
3.2.2 Cálculo do comprimento total de condutores de cabo de cobre 70 mm ²	18
3.2.3 Cálculo do comprimento equivalente total de condutores	18
3.2.4 Cálculo da resistência de aterramento da malha	19
3.2.5 Cálculo da corrente de malha	19
3.2.6 Cálculo de N.....	20
3.2.7 Cálculo dos coeficientes de malha.....	20
3.2.8 Cálculo do coeficiente de espaçamento para tensão de malha.....	21
3.2.9 Cálculo do coeficiente de irregularidade	21
3.2.10 Cálculo do coeficiente de superfície	21

3.2.11	Cálculo da máxima tensão de toque e passo	21
3.2.12	Cálculo da tensão de malha	22
3.2.13	Cálculo da tensão de passo na malha	24
3.2.14	Critério de segurança.....	24
3.3	Medição da resistência elétrica da malha de aterramento	24
3.3.1	Método de medição	25
4	Resultados	26
4.1	Medição da resistividade utilizando o método de Wenner.....	26
4.1.1	Análise das medidas de campo	29
4.1.2	Aplicação do método das duas camadas	31
4.2	Dimensionamento do sistema de aterramento.....	35
4.2.1	Estimativa da área mínima da malha	36
4.2.2	Cálculo das dimensões da malha	36
4.2.3	Cálculo do número de condutores de cabo 70mm ² de cada lado	36
4.2.4	Cálculo do comprimento total de condutores de cabo de cobre 70 mm ²	36
4.2.5	Cálculo do comprimento equivalente total de condutores	36
4.2.6	Cálculo da resistência de aterramento da malha	36
4.2.7	Cálculo da corrente de malha	37
4.2.8	Cálculo de N.....	37
4.2.8.1	Cálculo dos coeficientes de malha	38
4.2.8.1.1	Cálculo do coeficiente de espaçamento para tensão de malha	38
4.2.9	Cálculo do coeficiente de irregularidade	38
4.2.10	Cálculo do coeficiente de superfície	38
4.2.10.1	Cálculo da máxima tensão de toque e passo	39
4.2.11	Cálculo da tensão de malha	39
4.2.12	Cálculo da tensão de passo na malha	39
4.2.13	Critério de segurança.....	40
4.2.14	Valores calculados	40
4.2.15	Configuração da malha de terra.....	40
4.3	Medição da resistência elétrica da malha de aterramento	40
4.3.1	Coleta de resultados	41
4.3.2	Análise das medidas	41
5	Conclusão	43
	Bibliografia.....	44
	ANEXO A – Planta geral da subestação	45
	ANEXO B – Malha de Aterramento Planta e Detalhes	48

1 INTRODUÇÃO

1.1 INTRODUÇÃO AO ATERRAMENTO ELÉTRICO

Um sistema de aterramento projetado e montado corretamente é um dos requisitos fundamentais para o bom funcionamento de um sistema elétrico. Um bom aterramento se traduz na garantia de uma adequada continuidade de serviço, desempenho seguro do sistema de proteção e limites toleráveis (dos níveis) de segurança pessoal, devido a isto, é fundamental que o tema aterramento tenha uma atenção especial.

O cuidado com o aterramento deve ser traduzido na elaboração de projetos específicos, nos quais, com base em dados disponíveis e parâmetros pré-fixados, sejam consideradas todas as possíveis condições a que o sistema possa ser submetido. Os objetivos principais da elaboração de um bom projeto de aterramento são (KINDERMANN& CAMPAGNOLO, 1995):

- Obter um resistência de aterramento a mais baixa possível, para correntes de falta à terra;
- Manter os potenciais produzidos pelas correntes de falta dentro de limites de segurança de modo a não causar fibrilação do coração humano;
- Fazer com que equipamentos de proteção sejam mais sensibilizados e isolem rapidamente as falhas à terra;
- Proporcionar um caminho de escoamento para a terra de descargas atmosféricas;
- Usar a terra como retorno de corrente no sistema monofilar com retorno pela terra (MRT);
- Escoar as cargas estáticas geradas nas carcaças dos equipamentos.

A elaboração do projeto de um sistema de aterramento tem como base o conhecimento da resistividade do solo, e o estudo das características principais

como o tipo de solo, estratificação em camadas, o teor de umidade, temperatura dentre outras.

1.1.1 INFLUÊNCIA DA UMIDADE TEMPERATURA E ESTRATIFICAÇÃO

A umidade tem uma influência muito grande na resistividade do solo fazendo com que ela varie significativamente. Isso se deve ao fato de que uma maior quantidade de água dissolve os sais presentes no solo formando assim um meio eletrolítico que favorece a passagem da corrente iônica. Diante disto concluímos que durante períodos chuvosos os aterramentos melhoram suas características, em contra partida, nos períodos de seca suas características pioram.

Outro fator com influência na resistividade do solo é a temperatura: numa faixa de temperatura de 10°C a 60°C a resistividade não varia muito. Entretanto, a resistividade tem um aumento significativo quando a temperatura chega próximo a 100°C, quando o solo fica mais seco e com formação de bolhas internas, que dificulta a condução de corrente. Em temperaturas abaixo de zero essa resistividade também aumenta significativamente, pois com o gelo, ocorre uma mudança brusca no estado de ligação entre os grânulos que formam a concentração eletrolítica, tornando o solo mais seco.

Em sua grande maioria os solos não são homogêneos e sim compostos por várias camadas de resistividades e profundidades diferentes. Tais camadas geralmente são paralelas e horizontais à superfície do solo devido às formações geológicas. A variação de resistividade nessas diversas camadas provoca uma variação na dispersão da corrente de defeito ou de descarga, devendo-se levar em consideração essa estratificação no projeto do sistema de aterramento.

1.1.2 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

Em uma situação de defeito onde ocorra um curto-circuito ou defeito similar, é esperada a passagem de uma corrente elevada o suficiente, para que a proteção atue e o defeito seja eliminado o mais rápido possível. No intervalo enquanto a proteção não atua, a corrente de defeito escoar para o solo, e gera potenciais distintos nas massas metálicas e superfícies do solo.

Em um sistema em que a atenção é voltada para a segurança e eficiência, todas as partes metálicas que estão sujeitas a qualquer contato com as partes energizadas devem ser aterradas. Assim, em caso de algum defeito, o sistema estabelece um curto circuito fase terra, elevando as correntes a valores que possibilitam a atuação da proteção e, conseqüentemente, desenergizando o sistema. Portanto, diante da análise do solo, os equipamentos elétricos devem ser interligados ao melhor aterramento possível, possibilitando a sensibilização o mais rápido possível da proteção, e que os potenciais de toque e de passo fiquem abaixo dos limites críticos de fibrilação ventricular do coração humano.

Existem várias configurações de sistemas de aterramentos, que vão desde a uma haste a diversas formas de interligações de várias hastes (alinhas, triângulo, em círculo, etc.). Existem outras configurações possíveis, como as formadas por fios ou cabos estendidos. Dependendo do tamanho, complexidade e nível de tensão do sistema é feita a escolha da configuração mais adequada do aterramento. Atualmente, o sistema mais eficiente é o aterramento realizado através de malha de terra.

Para se projetar um sistema de aterramento são seguidas algumas etapas citadas a seguir:

- i. Definir previamente o local onde será feito o aterramento;
- ii. Realizar varia medições da resistividade do solo no local previsto;
- iii. A partir dessas medições, realizar a estratificação do solo com suas respectivas camadas;
- iv. Definir o tipo de sistema de aterramento necessário;
- v. Calcular a resistividade aparente do solo;
- vi. Dimensionar o sistema de aterramento, levando em consideração a sensibilidade dos relés, e os limites de segurança pessoal, isto é, da fibrilação ventricular do coração.

Reconhecendo-se a importância e o papel de destaque que o sistema de aterramento figura em sistemas elétricos, é proposto como objetivo, no presente trabalho, o estudo do solo e o desenvolvimento de uma malha de aterramento de subestação (SE). Tal malha deverá atender todas as normas vigentes, além de garantir a proteção de equipamentos e pessoas que compõem a SE. O caso estudado

é a SE situada no Pólo Industrial da Petrobras, Unidade de Tratamento de Processamento e Fluídos (UTPF) e Refinaria Potiguar Clara Camarão (RPCC), localizada na cidade de Guamaré/RN.

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

O embasamento teórico e os métodos envolvidos na medição de aterramento elétrico são apresentados no Capítulo 2, no qual serão abordados temas como medição e determinação da resistividade do solo e a resistência de aterramento. Faz-se, também, uma apresentação da aplicação e classificação de aterramento, bem como os conceitos básicos de segurança.

O Capítulo 3 traz a metodologia e os resultados das medições e coleta de dados do solo analisado para implementação da malha de aterramento, bem como as especificações e a descrição do software utilizado nos estudos e a apresentação da malha a ser implementada em campo.

As conclusões obtidas com o estudo são descritas no Capítulo 4.

2 EMBASAMENTO TEÓRICO

São inúmeras as bibliografias que se relacionam ao termo aterramento. Aterramento como o próprio nome já diz, refere-se à terra ou algo de grande massa que pode ser utilizado em seu lugar. Ao utilizar o termo “aterrado”, é dito que, determinado elemento está propositalmente ligado a terra.

O funcionamento correto de um sistema elétrico, mantendo a continuidade dos serviços e a segurança pessoal, necessita que todos os equipamentos, bem como o condutor neutro da rede de alimentação, estejam devidamente aterrados. Para que isso ocorra a elaboração de um projeto, baseado no dimensionamento correto dos aterramentos é de suma importância, proporcionando desta forma vantagens técnicas e econômicas.

2.1 RESISTIVIDADE DO SOLO

Podemos considerar o solo como um condutor por onde a corrente elétrica injetada no mesmo pode-se dissipar.

Devido a diversos fatores ambientais, a resistividade do solo sofre variações que são diretamente influenciadas por diferenças na porcentagem de umidade, tipo de material que compõe o solo, temperatura, idade de formações geológicas, entre outras.

Os solos que apresentam resistividade mais baixa são os que contêm resíduos vegetais, os pantanosos e os situados no fundo de vales e nas margens de rios. Os de maior resistividade são os arenosos, os rochosos e os situados em locais altos e desprovidos de vegetação. A Tabela 2.1 mostra alguns valores típicos de resistividade em função da composição do solo.

Tabela 2.1. Resistividade de alguns solos em função da composição

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

Na maioria dos sistemas reais não há solos homogêneos como os listados na Tabela 2.1, e sim, formados por diversas camadas com resistividades diferentes e normalmente horizontais e paralelas ao solo, que será a geometria utilizada neste estudo.

2.1.1 ESTRATIFICAÇÃO DO SOLO

O solo é constituído, em geral, por várias camadas horizontais com formação geológica diferente, sendo, por esta razão, modelado em camadas estratificadas, conforme mostrado na Figura 2.1, esta estratificação é alcançada a partir da determinação da resistividade do solo em suas varias camadas (KINDERMANN & CAMPAGNOLO, 1995, p.27).

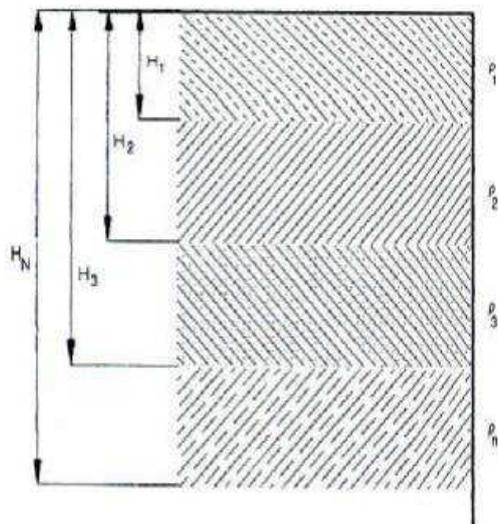


Figura 2.1. Solo estratificado em varias camadas.
(KINDERMANN & CAMPAGNOLO,1995)

2.1.2 DETERMINAÇÃO DA RESISTIVIDADE DO SOLO

Em um projeto de aterramento, a informação primordial a ser obtida são as características do solo onde se pretende implementar o mesmo, principalmente no que se diz respeito a sua constituição. Então, inicialmente, em um projeto de aterramento, temos que conhecer o valor da resistividade do solo. Há duas formas de realizar aferição de tal medida, sendo elas:

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

O método de determinação que pela sua facilidade operacional e precisão fornecida, é o mais utilizado no âmbito das concessionárias de energia, é o método de Frank Wenner. O desenvolvimento do método será mostrado no Capítulo 3, pois está diretamente ligado ao desenvolvimento do projeto.

2.2 RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO

Analisar os caminhos da corrente no solo não é tarefa simples como a análise no caso de condutores metálicos lineares, pois o solo apresenta uma geometria complexa. A corrente, ao ser injetada no solo, tende a se dispersar em todas as direções, percorrendo caminhos determinados pelas características do solo.

2.2.1 MEDIÇÃO DE RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO

Quando se deseja fazer a medição da resistência de aterramento, se faz necessário um circuito composto de 2 pontos, sendo um deles localizado onde a corrente será injetada e outra onde será removida. Nesse circuito temos a corrente injetada no sistema de aterramento a ser medido e retirada através de um aterramento ou terra auxiliar.

Para quantificar a resistência de aterramento pode ser realizada uma razão entre o potencial do sistema de aterramento e a corrente que se faz fluir entre ele e um ponto infinitamente afastado. Pela Lei de Ohm, temos que a corrente circulará pela terra e proverá uma tensão em sua superfície, a qual será o produto entre a corrente injetada, e

a resistência de terra até o ponto a ser medido. Assim, a medição da resistência de terra poderá ser feita utilizando um amperímetro e um voltímetro, ou através de um terrômetro ou Megger.

Pela facilidade na utilização de apenas um equipamento o método utilizado foi o método do Megger que disposto conforme a Figura 2.2 ira proporcionar as medidas de resistência de aterramento desejadas.

O método consiste na aplicação e monitoração de uma determinada corrente no sistema de aterramento em testes provocando a aparição de potenciais na superfície do solo, os quais são medidos através do eletrodo de potencial.

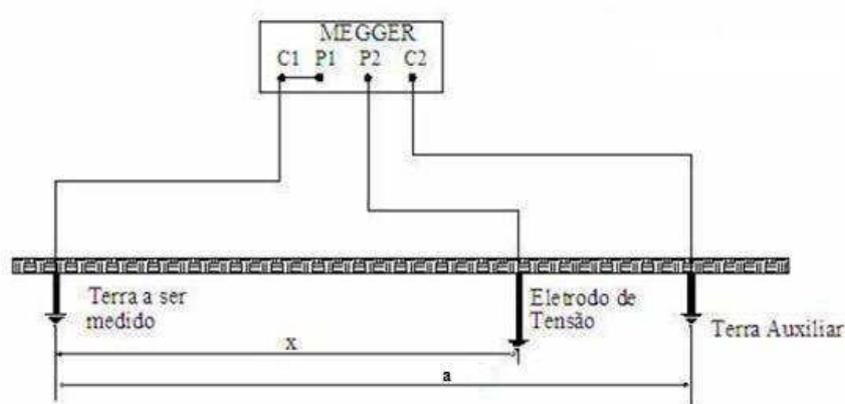


Figura 2.2. Esquema de ligação com 4 terminais utilizando Megger.
(KINDERMANN & CAMPAGNOLO,1995)

2.3 SEGURANÇA EM ATERRAMENTO

A segurança em aterramentos elétricos está diretamente relacionada a manter valores de potencial dentro de limites que proporcionem segurança de pessoas e animais, que acidentalmente venham a tocar ou a caminhar próximo a estruturas metálicas aterradas e energizadas. Parâmetros de restrição nos projetos elétricos são utilizados para garantir esses limites de segurança. Estes parâmetros são denominados tensão de passo, tensão de toque e tensão transferida.

A tensão de passo é definida como a tensão entre os pés de um individuo que se encontra dentro de uma malha de terra por onde naquele dado instante esta fluindo uma corrente de defeito, a Figuras 2.3 representa uma pessoa submetido à tensão de passo.

Se uma pessoa toca um equipamento aterrado ou o próprio condutor pode ser que se estabeleça, dependendo das condições de isolamento, uma diferença de potencial

entre as mãos e os pés diferença de potencial esta denominada tensão de toque que é ilustrada no esquema da Figura 2.4.

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

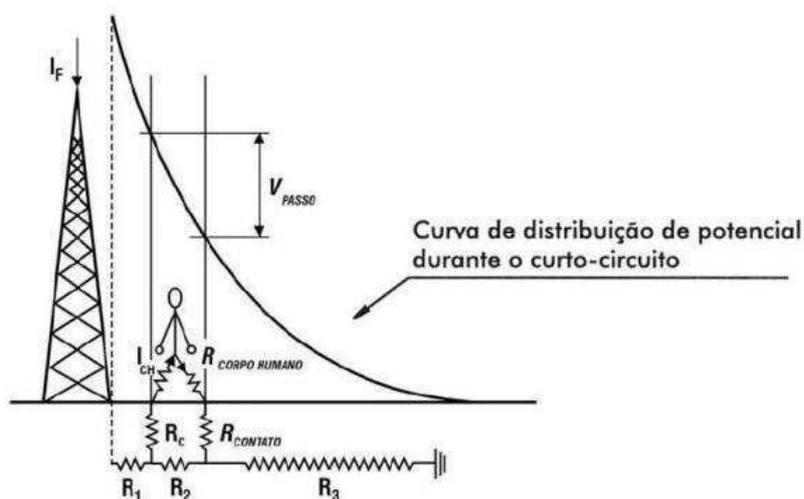


Figura 2.3. Demonstração de um indivíduo submetido a uma tensão de passo.
(KINDERMANN & CAMPAGNOLO,1995)

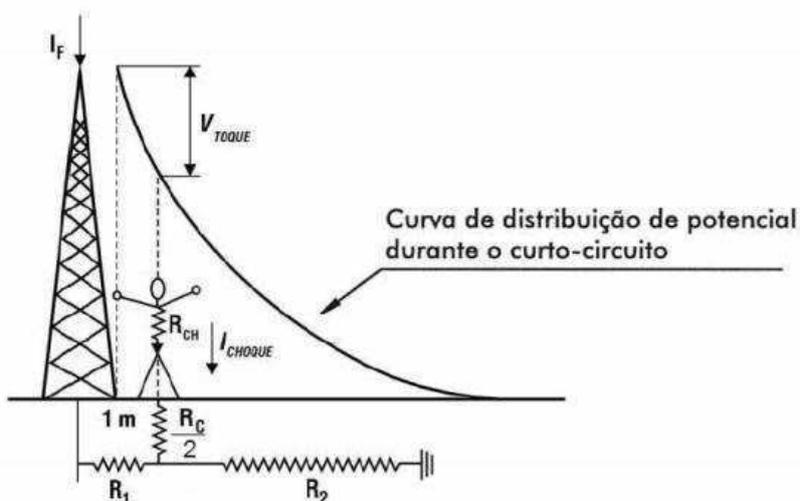


Figura 2.4. Demonstração de um indivíduo submetido a uma tensão de toque.
(KINDERMANN & CAMPAGNOLO,1995)

3 METODOLOGIA

No decorrer deste capítulo será apresentado o desenvolvimento do projeto da malha de aterramento da subestação 69/13.8 kV. Estão descritas desde a etapa de medições e estudo do solo onde será implantada, até o projeto e implementação em campo. O trabalho vai seguir o fluxograma presente na Figura 3.1, onde são destacadas as etapas do processo de estudo planejamento e aplicação.

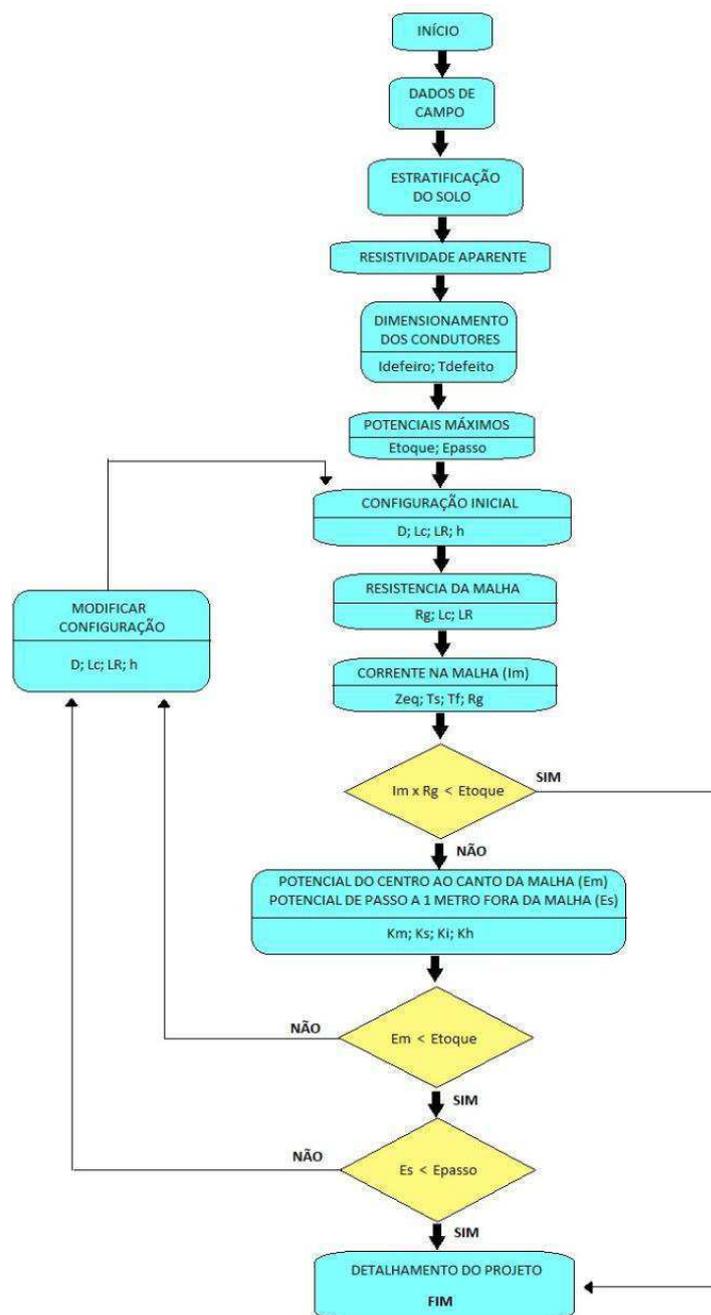


Figura 3.1. Fluxograma das etapas de elaboração do projeto.

Os dados coletados nesta etapa do processo são de extrema importância para que se possa dimensionar a malha de aterramento da referida subestação. A partir destes dados serão identificadas as necessidades do projeto tais como tamanho da malha, o material utilizado para sua construção, espaçamento, profundidade, geometria e onde serão localizadas as conexões com os equipamentos.

3.1 MEDIÇÃO DA RESISTIVIDADE DO SOLO

Na medição da resistividade do solo no local onde será construída a subestação de 69/13,8 kV, utilizaremos o método dos quatro pontos, também conhecido como método de WENNER, seguindo instruções da NBR 7117 “Medição da resistividade do solo pelo método dos quatro pontos” e Geraldo Kindermann “Aterramento Elétrico” o material utilizado para a referida medição é listado a seguir.

- 01 terrômetro digital modelo MTD20 KWe da Megabras;
- 05 cabos de conexão;
- 04 eletrodos auxiliares;
- 01 trena de 50 metros.

O método de WENNER para levantamento da curva de resistividade do solo faz uso de quatro hastes cravadas no solo com uma mesma profundidade, alinhadas e com um mesmo espaçamento entre elas, como pode ser visto na Figura 3.2.

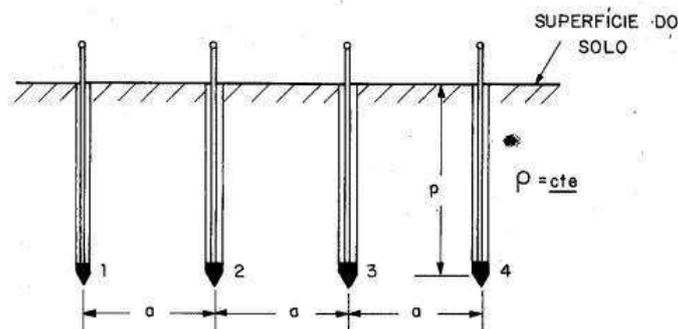


Figura 3.2. Quatro hastes cravadas no solo.
(KINDERMANN & CAMPAGNOLO,1995).

O método consiste na injeção de uma corrente elétrica I no ponto 1 da Figura 3.2 e é coletada no ponto 4 da figura, a corrente que passa do ponto 1 ao ponto 4 pelo solo produz um potencial nos pontos 2 e 3. Utilizando o método da imagem podemos obter

os potenciais nos pontos 2 e 3. O método é descrito como segue (Kindermann & Campgnolo, 1995):

Um ponto “c”, imerso sob a superfície de um solo homogêneo, emanando uma corrente elétrica I , produz um perfil de distribuição do fluxo de corrente como o mostrado na Figura 3.3.

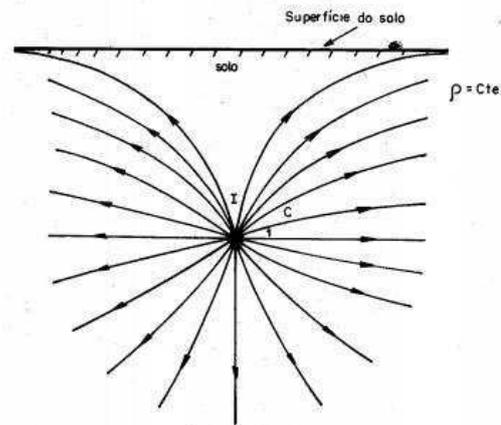


Figura 3.3. Linhas de correntes elétricas.
(KINDERMANN & CAMPAGNOLO,1995)

As linhas de correntes se comportam como se houvesse uma fonte de corrente pontual simétrica em relação a superfície do solo que é mostrado na Figura 3.4.

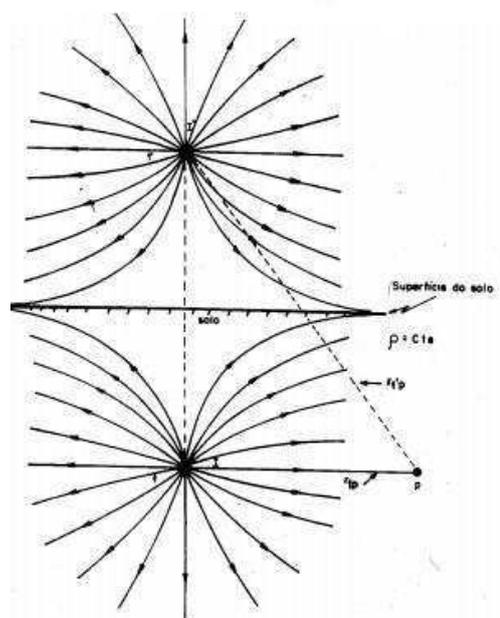


Figura 3.4. Ponto imagem.
(KINDERMANN & CAMPAGNOLO,1995)

O comportamento é idêntico a uma imagem real simétrica da fonte de corrente pontual. Portanto, para achar o potencial de um ponto p em

relação ao infinito, basta efetuar a superposição do efeito de cada fonte da corrente individualmente, considerando todo o solo homogêneo, inclusive o da sua imagem. Assim, para calcular o potencial do ponto p , basta usar duas vezes a expressão.

$$V_p = \frac{\rho I}{4\pi r_{1p}} + \frac{\rho I'}{4\pi r_{1'p}} \quad (1)$$

Como:

$$I' = I$$

$$V_p = \frac{\rho I}{4\pi} \left(\frac{1}{r_{1p}} + \frac{1}{r_{1'p}} \right) \quad (2)$$

Assim, baseando-se na Figura 3.5, podemos calcular o potencial nos pontos 2 e 3.

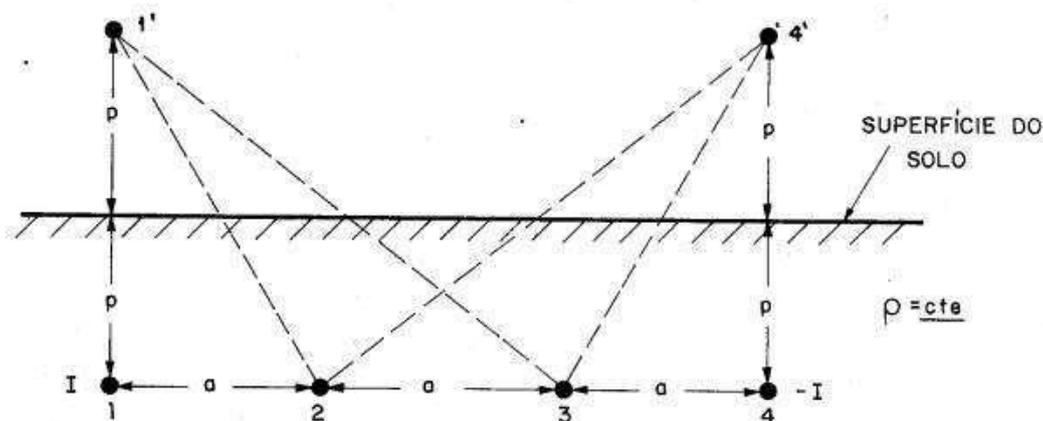


Figura 3.5. Imagem do ponto 1 e 4.
(KINDERMANN & CAMPAGNOLO, 1995)

Os potenciais nos pontos 2 e 3 são dados, respectivamente, por:

$$V_2 = \frac{\rho I}{4\pi} \left[\frac{1}{a} + \frac{1}{\sqrt{a^2 + (2p)^2}} - \frac{1}{2a} - \frac{1}{\sqrt{(2a)^2 + (2p)^2}} \right] \quad (3)$$

e

$$V_3 = \frac{\rho I}{4\pi} \left[\frac{1}{2a} + \frac{1}{\sqrt{(2a)^2 + (2p)^2}} - \frac{1}{a} - \frac{1}{\sqrt{a^2 + (2p)^2}} \right] \quad (4)$$

Portanto, a diferença de potencial nos pontos 2 e 3 é:

$$V_{23} = V_2 - V_3 = \frac{\rho I}{4\pi} \left[\frac{1}{a} + \frac{2}{\sqrt{a^2 + (2p)^2}} - \frac{2}{\sqrt{(2a)^2 + (2p)^2}} \right] \quad (5)$$

Para obter o valor da resistência elétrica R do solo, deve-se dividir o valor de V_{23} pela corrente I . Encontrando a expressão:

$$R = \frac{V_{23}}{I} = \frac{\rho}{4\pi} \left[\frac{1}{a} + \frac{2}{\sqrt{a^2 + (2p)^2}} - \frac{2}{\sqrt{(2a)^2 + (2p)^2}} \right] \quad (6)$$

A resistividade elétrica do solo é dada por:

$$\rho = \frac{4\pi a R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + (2p)^2}} - \frac{2a}{\sqrt{(2a)^2 + (2p)^2}}} \quad [\Omega.m] \quad (7)$$

3.1.1 MEDIÇÃO DA RESISTIVIDADE UTILIZANDO O MÉTODO DE WENNER

Inicialmente foram demarcados cinco pontos no local onde será realizado o serviço como mostra a Figura 3.6, esses pontos serão utilizados para realizar a medição da resistividade do solo.

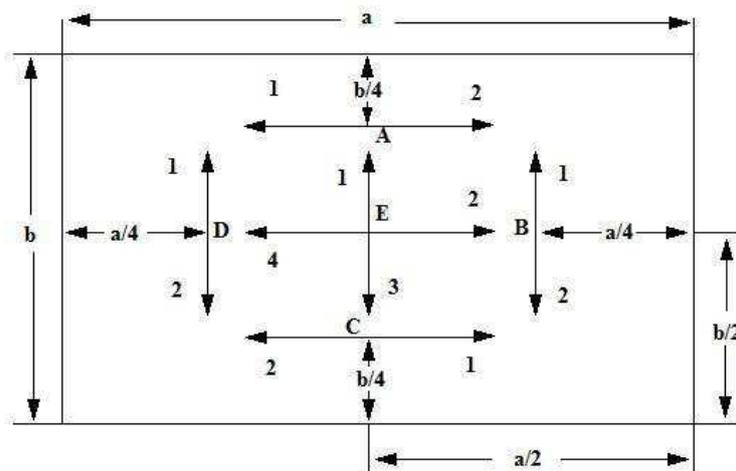


Figura 3.6. Demarcação dos pontos que será realizada a medição.

Após a marcação dos pontos supracitados, foram alinhados os quatro eletrodos e colocados simetricamente em relação ao ponto de medição, e as hastes foram fincadas a uma mesma profundidade de aproximadamente 25 cm e conectados ao terrômetro como indicado na Figura 3.7, no local da medição não houve problemas ao ficar as hastes nos locais pré-determinados possibilitando assim uma medição dentro do roteiro de medições estipulados na Figura 3.6.

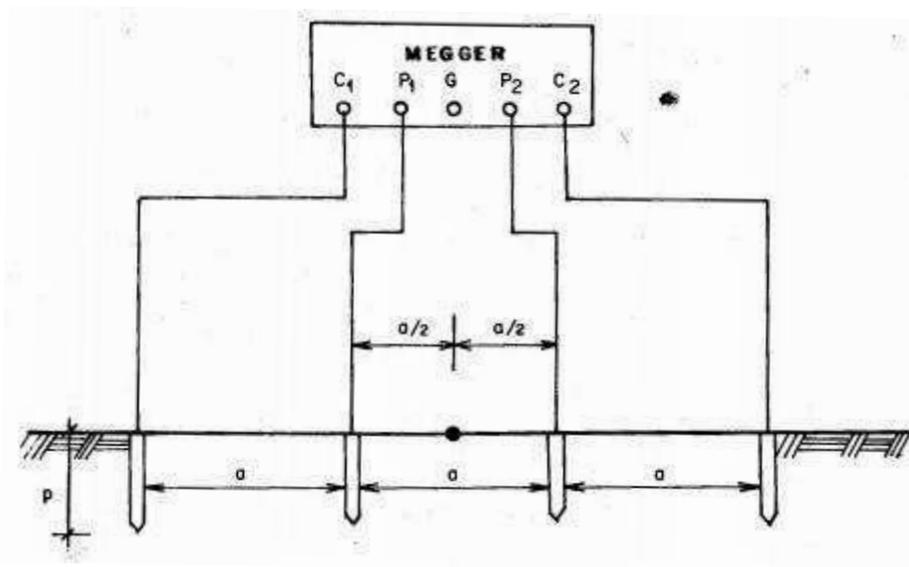


Figura 3.7. Método de Wenner.
(KINDERMANN & CAMPAGNOLO,1995)

3.1.2 ANÁLISE DE MEDIDAS

Para se ter certeza que os dados coletados em campo se enquadram nos valores aceitáveis, deve-se fazer uma avaliação desses dados, a qual é feita seguindo os itens abaixo:

1 - calcula-se a média aritmética dos valores da resistividade elétrica para cada espaçamento.

$$\rho_M(a_j) = \frac{1}{n} \sum \rho_i(a_j) \quad \forall \quad j = 1, q \quad i = 1, n, \quad (8)$$

em que $\rho_M(a_j)$ é a resistividade média para o respectivo espaçamento a_j ; n é o número de medições efetuadas para o respectivo espaçamento a_j ; $\rho_i(a_j)$ é o valor da i -ésima medição da resistividade com o espaçamento a_j e q é o número de espaçamentos empregados

2- Após o cálculo da Média aritmética deve-se calcular o desvio de cada medida em relação ao valor médio que é calculado como segue:

$$|\rho_i(a_j) - \rho_M(a_j)| \quad \forall \quad i = 1, n \quad j = 1, q. \quad (9)$$

Os valores com desvio abaixo de 50% em relação a média serão dados como valores válidos de resistividade e valores acima de 50% deverão ser desprezados. O calculo do desvio em porcentagem é calculado como segue:

$$\frac{|\rho_i(a_j) - \rho_M(a_j)|}{\rho_M(a_j)} \times 100 \quad \forall \quad i = 1, n \quad j = 1, q. \quad (10)$$

3.1.3 ESTRATIFICAÇÃO DO SOLO

A técnica utilizada para a modelagem do solo em nosso estudo será o Método de Estratificação de Duas Camadas utilizando curvas, que é sugerido pela IEEE STD 80-2000 em dez passos descritos a seguir.

1º passo: Traçar em um gráfico a curva $\rho(a)$ x a obtida pelo método de Wenner;

2º passo: Prolongar a curva $\rho(a)$ x a até cortar o eixo das ordenadas do gráfico. Neste ponto, é lido diretamente o valor de ρ_1 , isto é, a resistividade da primeira camada;

3º passo: Um valor de espaçamento a_1 é escolhido arbitrariamente, e levado na curva para obter o correspondente valor de $\rho(a_1)$;

4º passo: Pelo comportamento da curva $\rho(a)$ x a , determina-se o valor de K (coeficiente de reflexão). Isto é:

- Se a curva for descendente, o sinal de K é negativo e efetua-se o cálculo de $\rho(a_1)/\rho_1$;
- Se a curva for ascendente, o sinal de K é positivo e efetua-se o cálculo de $\rho_1/\rho(a_1)$;

5º passo: Com o valor de $\rho(a_1)/\rho_1$ ou $\rho_1/\rho(a_1)$ obtido, entra-se nas curvas teóricas correspondentes Figura 3.8 e traça-se uma linha paralela ao eixo da abscissa. Esta reta corta curvas distintas de K e (h/a) correspondentes, onde h é a profundidade da primeira camada do solo;

6º passo: Multiplicam-se todos os valores de (h/a) encontrados no quinto passo pelo valor de a_1 do terceiro passo. Assim com o quinto e sexto passo, gera-se uma tabela com os valores correspondentes de K , (h/a) e h ;

7º passo: Plota-se a curva K x h dos valores obtidos da tabela gerada no sexto passo;

8º passo: Um segundo valor de espaçamento $a_2 \neq a_1$ é novamente escolhido, e todo o processo é repetido, resultando numa nova curva K x h ;

9º passo: Plota-se esta nova curva no mesmo gráfico do sétimo passo;

10º passo: A intersecção das duas curvas K x h num dado ponto resultará nos valores reais de K e h , e a estratificação estará definida.

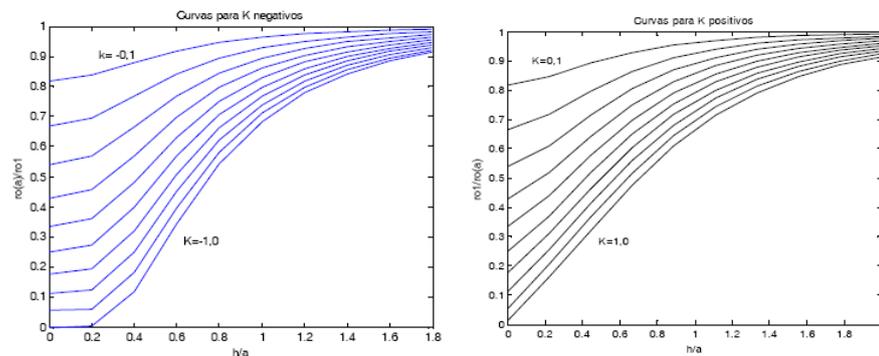


Figura 3.8. Curvas teóricas correspondentes.
(KINDERMANN & CAMPAGNOLO,1995)

3.2 DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE ATERRAMENTO

A descrição de como proceder os cálculos dos potenciais em conformidade com a IEEE std 80 de 30/01/2000 é feita nos tópicos a seguir.

3.2.1 ESTIMATIVA DA ÁREA MÍNIMA DA MALHA

A estimativa da área mínima é dada através do desenvolvimento da Equação 11:

$$R = \frac{\rho}{4} \sqrt{\frac{\pi}{A}}, \quad (11)$$

Desenvolvendo a Equação (11), obtemos a Equação (12) onde podemos obter diretamente a área mínima:

$$A_{\min} = \pi \left(\frac{\rho}{4R} \right)^2, \quad (12)$$

3.2.1.1 CÁLCULO DO NÚMERO DE CONDUTORES DE CABO 70MM² DE CADA LADO

O numero de condutores são dados pela Equação 13 e Equação 14:

$$N_a = \frac{a}{d_c} + 1 \quad (13)$$

e

$$N_b = \frac{b}{d_c} + 1 \quad (14)$$

em que a é o lado de maior tamanho e b o lado de menor tamanho e d_c a distância entre os condutores.

3.2.2 CÁLCULO DO COMPRIMENTO TOTAL DE CONDUTORES DE CABO DE COBRE 70 MM²

Para o calculo do comprimento total de condutores utilizaremos a Equação 15:

$$L_C = N_a l_b + N_b l_a \quad (15)$$

3.2.3 CÁLCULO DO COMPRIMENTO EQUIVALENTE TOTAL DE CONDUTORES

O cálculo total do comprimento de condutores (L_t) é dado pela soma do comprimento total de cabo de cobre de 70 mm^2 (L_c) mais o comprimento total devido ao tamanho das hastes (L_h). Portanto:

$$L_t = L_c + L_h \quad (16)$$

3.2.4 CÁLCULO DA RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO DA MALHA

A resistência de aterramento é obtida utilizando a Equação (17):

$$R = \rho_1 \left[\frac{1}{L_t} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left(1 + \frac{1}{1 + h\sqrt{\frac{20}{A}}} \right) \right], \quad (17)$$

em que ρ_1 é a resistividade da primeira camada do solo; h é a profundidade da malha e A é a área da malha;

Desenvolvendo a expressão, temos:

$$R = \rho \left(\frac{1}{L_t} + \frac{1 + \frac{5h}{\sqrt{5A}}}{10h + \sqrt{5A}} \right), \quad (18)$$

3.2.5 CÁLCULO DA CORRENTE DE MALHA

A corrente de malha é calculada utilizando a Equação (19).

$$I_m = S_f \times 3I_0, \quad (19)$$

em que I_m é a Corrente de malha; S_f é o fator divisor de corrente de falta e $3I_0$ é a corrente de falta fase-terra.

Seguindo orientações do Anexo C da IEEE std 80, tem-se que S_f é obtido segundo a Equação (20).

$$S_f = \left| \frac{Z_{eq}}{Rg + Z_{eq}} \right| \quad (20)$$

3.2.6 CÁLCULO DE N

O número efetivo de condutores paralelos em uma malha dada, N , pode ser aplicável às malhas retangulares ou irregulares representando o número de condutores paralelos de uma malha retangular equivalente. De acordo com o anexo B da norma IEEE std80, temos a Equação 21:

$$N = n_a n_b n_c n_d, \quad (21)$$

onde,

$$n_a = \frac{2L_c}{L_p};$$

$$n_b = 1 \text{ para malhas quadradas ou } n_b = \sqrt{\frac{L_p}{4\sqrt{A}}} \text{ para demais;}$$

$$n_c = 1 \text{ para malhas quadradas ou retangulares ou } n_c = \left(\frac{L_x L_y}{A} \right)^{\frac{0,7A}{L_x L_y}} \text{ para demais;}$$

$n_d = 1$ para malhas quadradas, retangulares e em formas de L ou

$$n_d = \frac{D_m}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \text{ para demais.}$$

3.2.7 CÁLCULO DOS COEFICIENTES DE MALHA

Para calcular a tensão de passo da malha, e o potencial do centro do retículo ao canto da malha (tensão de malha), é necessário o conhecimento de alguns coeficientes:

K_m = Coeficiente de espaçamento para tensão de malha;

K_i = Coeficiente de correção para dispersão para corrente de malha (coeficiente de irregularidade);

K_s = coeficiente de espaçamento para tensão de passo (coeficiente de superfície).

3.2.8 CÁLCULO DO COEFICIENTE DE ESPAÇAMENTO PARA TENSÃO DE MALHA

O coeficiente de malha (K_m) é dado pela Equação 22:

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{D^2}{16hd} + \frac{(D+2h)^2}{8Dd} - \frac{h}{4d} \right) + \frac{1}{\sqrt{1+h}} \ln \frac{8}{\pi(2N-1)} \right], \quad (22)$$

em que D é a distância entre os condutores paralelos da malha; h é a profundidade da malha ; N é o número efetivo de condutores paralelos e d é o diâmetro da haste.

3.2.9 CÁLCULO DO COEFICIENTE DE IRREGULARIDADE

O coeficiente de irregularidade (K_i) é dado pela Equação 23:

$$K_i = 0,644 + 0,148 \times N, \quad (23)$$

em que N é o número efetivo de condutores paralelos.

3.2.10 CÁLCULO DO COEFICIENTE DE SUPERFÍCIE

O coeficiente de superfície (K_s) é dado pela Equação 24:

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} (1 - 0,5^{N-2}) \right], \quad (24)$$

em que D é a distância entre os condutores paralelos da malha ; h é a profundidade da malha e N é o número efetivo de condutores paralelos.

3.2.11 CÁLCULO DA MÁXIMA TENSÃO DE TOQUE E PASSO

A tensão de toque é a diferença de potencial entre o ponto da estrutura metálica, situada ao alcance da mão de uma pessoa, e um ponto no chão situado a 1 metro da base da estrutura.

A tensão de passo é a diferença de potencial existente entre dois pés.

Para o cálculo destas máximas grandezas deve-se considerar duas situações de superfície;

- Sem brita;
- Com brita.

a) Sem Brita

A tensão de toque para uma pessoa de massa igual a 50 kg pode ser obtida através da Equação 25:

$$V_{\text{toque}} = \frac{116 + 0,174\rho_1}{\sqrt{t}}, \quad (25)$$

A tensão de passo para uma pessoa de massa igual a 50 kg pode ser obtida através da Equação 26:

$$V_{\text{passo}} = \frac{116 + 0,7\rho_1}{\sqrt{t}}, \quad (26)$$

em que t é o tempo de atuação do relé de neutro e ρ_1 é a resistividade da camada de superfície.

b) Com Brita

Para o cálculo tanto da tensão de passo quanto de toque, deve-se inserir o coeficiente C_s que representa um fator corretivo para computar o efeito resistivo na presença de uma camada fina de um material, neste caso brita. C_s é obtido pela Equação 27:

$$C_s = 1 - \frac{0,09 \left(1 - \frac{\rho_1}{\rho_s} \right)}{2h_s - 0,09}, \quad (27)$$

em que ρ_1 é a resistividade da primeira camada do solo; ρ_s é a resistividade da camada de superfície e h_s é a profundidade do material da superfície.

3.2.12 CÁLCULO DA TENSÃO DE MALHA

O potencial no centro do reticulado da malha é dado pela Equação 28:

$$E_m = \frac{\rho_1 \cdot K_i \cdot K_m \cdot I_m}{L_c + \left[1,55 + 1,22 \left(\frac{L_r}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \right) \right] L_R}, \quad (28)$$

em que ρ_1 é a resistividade da primeira camada do solo ; K_m é o Coeficiente de espaçamento para tensão de malha; K_i é o coeficiente de irregularidade; I_m é a corrente da malha; L_c é o comprimento total dos condutores dispostos na direção horizontal na malha, calculado no item 3.1.3.3; L_r é o comprimento de uma haste utilizada; L_R é o comprimento total das hastes; L_x é o comprimento de condutores na direção x e L_y é o comprimento da malha na direção y.

3.2.13 CÁLCULO DA TENSÃO DE PASSO NA MALHA

Será feito o cálculo do potencial de passo a um metro da malha, próxima a cerca da subestação, garantindo a segurança de qualquer indivíduo que esteja próximo a área. A Equação 39 possibilita o cálculo da tensão de passo:

$$E_s = \frac{\rho_1 K_i K_S I_m}{0,75L_c + 0,85L_R} \quad (29)$$

em que ρ_1 é a resistividade da primeira camada do solo; K_S é o coeficiente de espaçamento para tensão de passo; K_i é o coeficiente de irregularidade; I_m é a corrente da malha; L_c é o comprimento total dos condutores dispostos na direção horizontal na malha, calculado no item 3.1.3.3 e L_R é o comprimento total das hastes;

3.2.14 CRITÉRIO DE SEGURANÇA

Os critérios de segurança, indicados pela norma IEEE std80, no Anexo B, são:

$$E_m \leq V_{\text{toque}} \text{ e } E_s \leq V_{\text{passo}}$$

3.3 MEDIÇÃO DA RESISTÊNCIA ELÉTRICA DA MALHA DE

ATERRAMENTO

A medição da resistência elétrica da malha de aterramento da subestação de 69/13,8 kV, é descrito nos passos a seguir .

Material utilizado

- 01 terrômetro digital modelo MTD20 KWe da Megabras
- 03 cabos de conexão (100 metros cada)
- 02 eletrodos auxiliares
- 01 trena de 50 metros.

3.3.1 MÉTODO DE MEDIÇÃO

Para a medição da resistência elétrica realizou-se o seguinte procedimento:

1. Foi escolhido um dos poços de medição, para utilizar o eletrodo ligado a terra, como eletrodo de teste;
2. Determinou-se o número de curvas a serem traçadas;
3. Para cada tipo de curva determinou-se a quantidade de medições a serem feitas;
4. Para determinar os valores de distâncias do eletrodo de corrente (D_z) ao eletrodo de teste, é considerado o seguinte critério: D_z deve estar entre o valor da medida do menor lado e o valor de duas vezes a medida do maior lado da malha. No caso da SE em estudo, temos: $40 < D_z < 200$, visto que a malha possui como dimensões 40x100 metros;
5. Considerando o que foi dito anteriormente, escolhemos como valores para D_z , 60, 80 e 100 metros, gerando assim três curvas;
6. Para determinar os valores das distâncias do eletrodo de tensão (D_y) ao eletrodo de teste, é utilizada a Equação 30:

$$D_y = 0,618x(D_z + X) - X, \quad (30)$$

em que X é o desvio em relação ao centro elétrico do aterramento.

7. Para valores de X , foram escolhidos de forma arbitrária 0, 20, 40, 60 e 80 metros, gerando assim cinco medições por curva.
8. A Figura 3.9 representa de forma simbólica, o método de medição.

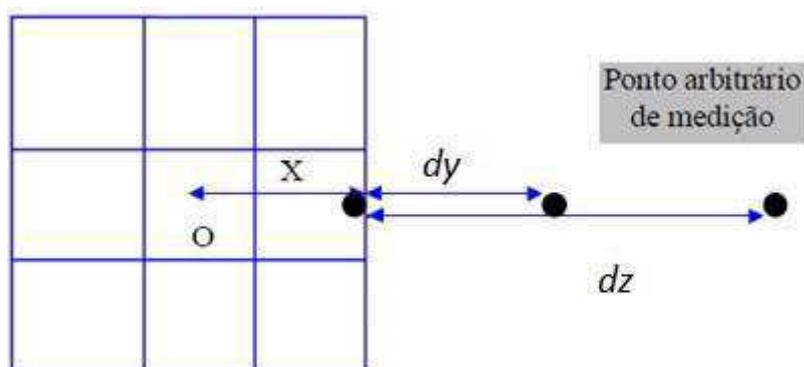


Figura 3.9. Representação do método do Megger.

4 RESULTADOS

4.1 MEDIÇÃO DA RESISTIVIDADE UTILIZANDO O MÉTODO DE WENNER

Após o arranjo dos eletrodos feitos como sugerido pelo método, os valores obtidos em campo e as características do solo no período das medições foram anotados, sendo elas:

Características do solo:

- Terraplanado: sim
 - Compactado: sim
 - Estado aparente de umidade: seco
 - Estação do ano: Verão
- Ponto A:

Tabela 3.1. Dados ponto A.

Espaçamento (a)	Direção 1		Direção 2	
	R(Ω)	ρ ($\Omega.m$)	R(Ω)	ρ ($\Omega.m$)
1	28,4	203,00	25,5	182,27

2	7,1	92,64	5,1	66,53
4	1,8	45,68	1,9	48,22
8	2,4	120,93	0,3	15,12
16	-	-	-	-
32	-	-	-	-

- Ponto B:

Tabela 3.2. Dados ponto B.

Espaçamento (a)	Direção 1		Direção 2	
	R(Ω)	ρ ($\Omega.m$)	R(Ω)	ρ ($\Omega.m$)
1	20,9	149,39	36,2	258,75
2	9,1	118,70	15,8	206,10
4	3,7	93,90	21,1	535,47
8	0,8	40,31	4,5	226,76
16	-	-	-	-
32	-	-	-	-

- Ponto C:

Tabela 3.3. Dados ponto C.

Espaçamento (a)	Direção 1		Direção 2	
	R(Ω)	ρ ($\Omega.m$)	R(Ω)	ρ ($\Omega.m$)
1	38,4	274,48	36,3	259,47
2	10,3	134,36	11,4	148,71
4	4,0	101,51	1,0	25,38
8	3,3	166,29	2,0	100,78
16	-	-	-	-
32	-	-	-	-

- Ponto D:

Tabela 3.4. Dados ponto D.

Espaçamento (a)	Direção 1		Direção 2	
	R(Ω)	ρ ($\Omega.m$)	R(Ω)	ρ ($\Omega.m$)
1	40,8	291,63	35,1	250,89
2	9,6	125,23	6,6	86,09
4	3,0	76,13	1,2	30,45
8	2,6	131,02	0,3	15,12
16	-	-	-	-

32	-	-	-	-
----	---	---	---	---

- Ponto E:

Tabela 3.5. Dados ponto E.

Espaçamento (a)	Direção 1		Direção 2		Direção 3		Direção 4	
	R (Ω)	ρ ($\Omega.m$)						
1	27,5	196,57	18,6	132,95	26,1	186,56	29,0	207,29
2	8,4	109,57	8,1	105,66	7,7	100,44	7,8	101,75
4	2,3	58,37	3,4	86,28	1,8	45,68	0,3	7,61
8	1,4	70,53	2,6	131,02	0,2	10,08	5,7	287,23
16	-	-	-	-	-	-	-	-
32	-	-	-	-	-	-	-	-

4.1.1 ANÁLISE DAS MEDIDAS DE CAMPO

Após as medidas obtidas na medição em campo serem anotadas esses dados vão ser analisados. A Tabela 3.6 descreve as resistividades separadas por espaçamentos.

Tabela 3.6. Medidas de resistividades por espaçamento.

Medições	Espaçamento 1 m Resistividade (ρ) ($\Omega.m$)	Espaçamento 2 m Resistividade (ρ) ($\Omega.m$)	Espaçamento 4 m Resistividade (ρ) ($\Omega.m$)	Espaçamento 8 m Resistividade (ρ) ($\Omega.m$)
1	203,00	92,62	45,68	120,93
2	182,27	66,53	48,22	15,12
3	149,39	118,70	93,90	40,31
4	258,75	206,10	535,47	226,76
5	274,48	134,36	101,51	166,29
6	259,47	148,71	25,38	100,78
7	291,63	125,23	76,13	131,02
8	250,89	86,09	30,45	15,12
9	196,57	109,57	58,37	70,53
10	132,95	105,66	86,28	131,02
11	186,56	100,44	45,68	10,08
12	207,29	101,75	7,61	287,23

É feito a média aritmética da resistividade de cada espaçamento de acordo com a Equação 8 e os valores dessas resistividades são apresentadas na Tabela 3.7, resistividades essa sem desconsiderar os valores dos desvios acima de 50%.

Tabela 3.7. Resistividade media para cada espaçamento sem desconsiderar desvios acima de 50%.

Espaçamento a (m)	Resistividade ($\Omega.m$)
1	216,10
2	116,31
4	96,22
8	109,61

O calculo dos desvios nas medidas de resistividades da Tabela 3.6 é feito utilizando a Equação 10 e mostrado na Tabela 3.8.

Tabela 3.8. Valores dos desvios de mediadas para cada espaçamento.

Medida	Espaçamento 1 m	Espaçamento 2 m	Espaçamento 4 m	Espaçamento 8 m
	Desvio (%)	Desvio (%)	Desvio (%)	Desvio (%)
1	6,062	20,37	52,52	10,33
2	15,65	42,80	49,89	86,13
3	30,87	2,05	2,41	63,22
4	19,74	77,21	456,51	106,87
5	27,01	15,51	5,50	51,71
6	20,07	27,86	73,62	8,06
7	34,95	7,67	20,88	19,70
8	16,10	25,97	68,35	86,21
9	9,037	5,79	39,34	35,65
10	38,47	9,15	10,33	19,53
11	13,67	13,64	52,53	90,80
12	4,077	12,52	92,09	162,05

- E eliminando os valores que apresentaram desvios acima de 50% (destacados em vermelho na Tabela 3.8) e de acordo com os cálculos anteriormente realizados, temos os valores representativos do solo medido, indicados na tabela abaixo.

Tabela 3.9. Valores calculados de resistividade de acordo com o espaçamento.

Espaçamento a (m)	Resistividade ($\Omega.m$)
1	216,10
2	108,15
4	77,41
8	110,86

4.1.2 APLICAÇÃO DO MÉTODO DAS DUAS CAMADAS

Traçando o gráfico $\rho(a) \times a$.

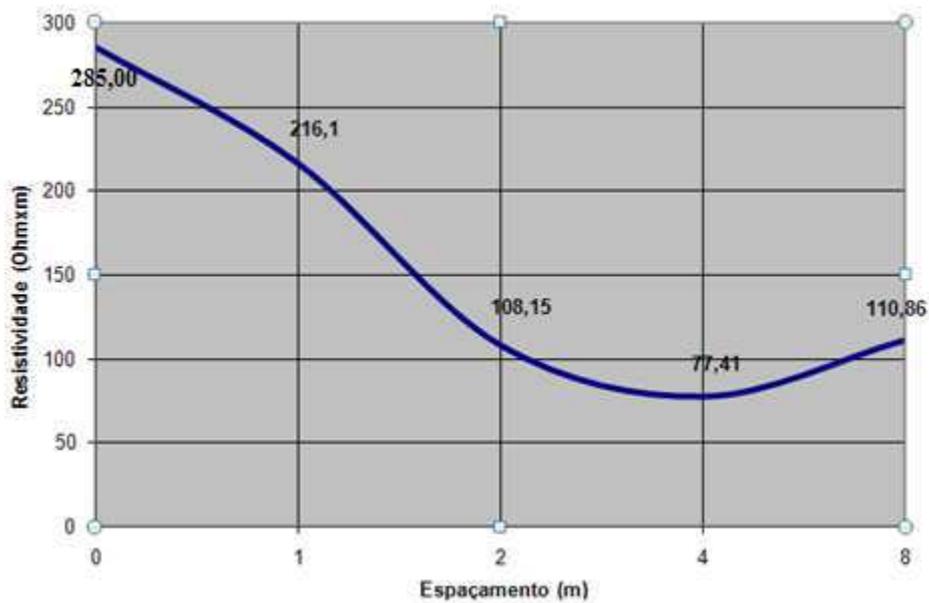


Gráfico 3.1. Curva de resistividade x Espaçamento

A resistividade da primeira camada do solo é encontrada prolongando o gráfico até que este intercepte o eixo das ordenadas, neste ponto é obtido o valor. Observando o Gráfico 3.1 e seguindo o procedimento descrito, temos que a resistividade da primeira camada do solo (ρ_1) é 285,00 Ω .m.

➤ Cálculo da resistividade da segunda camada do solo

O cálculo da resistividade da segunda camada do solo é feito através dos passos descritos no item 3.1.2.

1º passo: Traçar em um gráfico a curva $\rho(a) \times a$ obtida pelo método de Wenner; realizado anteriormente.

2º passo: Prolongar a curva $\rho(a)$ x a até cortar o eixo das ordenadas do gráfico. Neste ponto é lido diretamente o valor de ρ_1 , isto é, a resistividade da primeira camada;

Passo realizado anteriormente, com valor encontrado de 285 Ω .m.

3º passo: Um valor de espaçamento a_1 é escolhido arbitrariamente e levado na curva para se obter o correspondente valor de $\rho(a_1)$;

O espaçamento escolhido será de 2 m com resistividade correspondente de 108,15 Ω .m.

4º passo: Pelo comportamento da curva $\rho(a)$ x a , determina-se o valor de K (coeficiente de reflexão).

Como a curva apresenta um comportamento descendente, o valor de K é negativo devendo, portanto, efetuar o cálculo de $\rho(a_1)/\rho_1$, então:

$$\frac{\rho(a_1)}{\rho_1} = \frac{108,15}{285,00} = 0,38$$

5º passo: Com o valor de $\rho(a_1)/\rho_1$ ou $\rho_1/\rho(a_1)$ obtido, entra-se nas curvas teóricas correspondentes e traça-se uma linha paralela ao eixo das abscissa. Esta reta corta curvas distintas de K e (h/a) correspondentes, onde h é a profundidade da primeira camada do solo;

Como K é negativo e com valor $\rho(a_1)/\rho_1$ igual a 0,38 levado na família de curvas teóricas da Figura 3.8, precede-se a leitura dos respectivos K e h/a . Assim, gera-se a Tabela 3.10 a seguir proposta no 6º passo.

Tabela 3.10. Valores do quinto ao sexto passo $a_1=2m$.

	$a_1=2m$	$\rho(a_1)/\rho_1 = 0,38$
K	h/a	h (m)
-0,1	-	-
-0,2	-	-
-0,3	-	-
-0,4	-	-
-0,5	0,21	0,42
-0,6	0,35	0,70
-0,7	0,45	0,90
-0,8	0,51	1,02
-0,9	0,56	1,12
-1,0	0,62	1,24

8º passo: Um segundo valor de espaçamento $a_2 \neq a_1$ é novamente escolhido, e todo o processo é repetido;

Escolhendo um valor de $a_2 = 4$ m, a resistividade associada é de 77,41 Ω .m.

Como a curva em sua maioria apresenta um comportamento descendente, temos um valor de K negativo, então efetua-se o cálculo de $\rho(a_2)/\rho_2$:

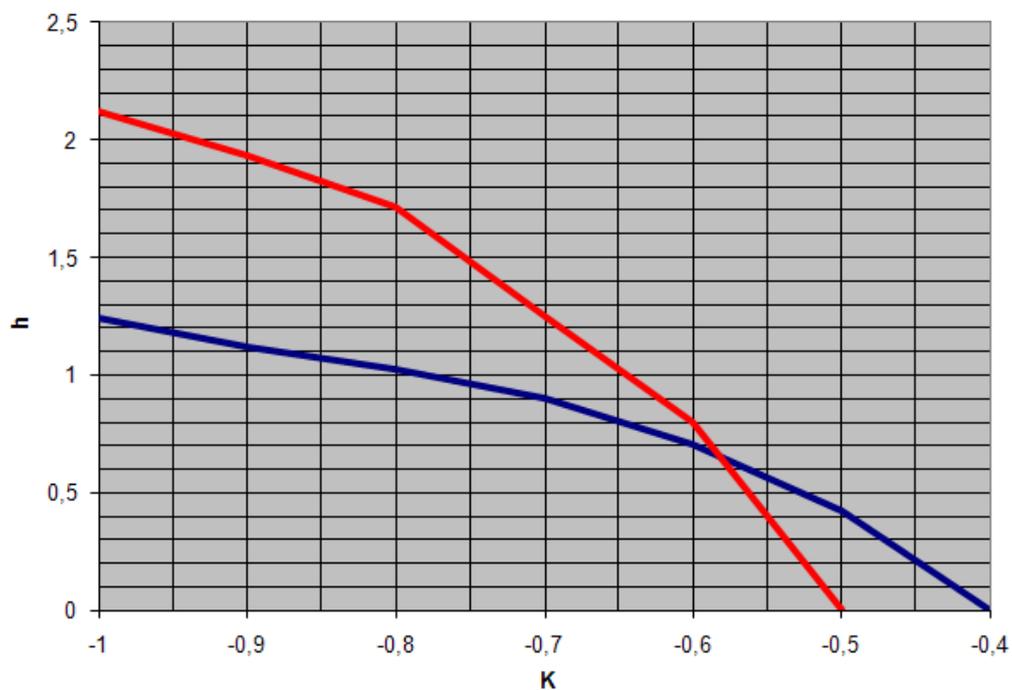
$$\frac{\rho(a_2)}{\rho_2} = \frac{77,41}{285,00} = 0,27$$

Sendo o valor $\rho(a_2)/\rho_2$ igual a 0,27 levado na família de curvas teóricas da Figura 3.8, precede-se a leitura dos respectivos K e h/a. Assim, gera-se a tabela a seguir proposta no 6º passo.

Tabela 3.11. Valores do quinto ao sexto passo $a_2=4m$.

$a_2= 4m$		$\rho(a_2)/ \rho_2 = 0,27$
K	h/a	h (m)
-0,1	-	-
-0,2	-	-
-0,3	-	-
-0,4	-	-
-0,5	-	-
-0,6	0,200	0,800
-0,7	0,313	1,252
-0,8	0,428	1,712
-0,9	0,483	1,93
-1,0	0,53	2,12

Feito as tabelas, traça-se os gráficos $K \times h_1$ e $K \times h_2$, sobrepostos conforme o Gráfico 3.2.

Gráfico 3.2. Gráfico de sobreposição ($K \times h_1$) e ($k \times h_2$)

Analisando o gráfico, observamos que o ponto de intersecção das curvas é em $K = -0,57$ e $h = 0,65$ m.

Utilizando a Equação 31:

$$k = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1}, \quad (31)$$

substituindo K por -0,57 e ρ_1 por 285,0 $\Omega.m$, encontramos um valor de ρ_2 igual a 78,06 $\Omega.m$, que é a resistividade da segunda camada do solo.

4.2 DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE ATERRAMENTO

Através dos dados coletados e calculados nos itens anteriores será dimensionado um sistema de aterramento em configuração de malha e calculados os potenciais desenvolvidos em conformidade com a IEEE std 80 de 30/01/2000.

Dados iniciais para dimensionamento da malha;

Tabela 3.12. Dados iniciais da malha de aterramento

Descrição	Quantidade	Unidade
Diâmetro do Cabo de 70mm ²	8,90	mm
Profundidade da Malha	1,00	m
Resistividade da 1ª Camada	285,0	$\Omega \times m$
Profundidade da 1ª Camada	0,65	m
Resistividade da 2ª Camada	78,06	$\Omega \times m$
Resistividade Superficial (camada de brita)	3.000,00	$\Omega \times m$
Altura da Camada de Brita	0,20	m
Comprimento da Haste Utilizada	3,00	m
Corrente de Curto Fase-Terra Máxima	30	kA
Tempo de Abertura do Relé de Neutro	0,10	s
Resistência Máxima da Malha de Terra	<5,00	Ω

O cabo escolhido é o de bitola de área 70 mm², segundo orientação da N – 2039.

Para dimensionar a corrente de curto fase-terra máxima, superestimou-se este valor para 30 kA, dando mais confiabilidade ao dimensionamento da malha. Simulando o circuito da subestação no software PTW32, foi obtido um valor de curto

fase-terra de 11,54 kA, então o valor de 30 kA é bastante superior ao obtido na simulação, garantindo uma confortável margem de segurança.

4.2.1 ESTIMATIVA DA ÁREA MÍNIMA DA MALHA

Substituindo ρ Pelo valor da resistividade aparente 285 $\Omega.m$ e R por 5 Ω .

$$A_{\min} = \pi \left(\frac{285}{4 \times 5} \right)^2 = 637,94 \text{m}^2$$

4.2.2 CÁLCULO DAS DIMENSÕES DA MALHA

Observando a planta geral da subestação , através do Anexo A temos que suas dimensões são 105x49m=5145m², portanto escolheremos uma malha de terra de dimensões 100x40 m, cuja área é 4000 m² que atende a estimativa da área.

4.2.3 CÁLCULO DO NÚMERO DE CONDUTORES DE CABO 70MM² DE CADA LADO

Considerando a distância entre os condutores de 4m temos:

$$N_a = \frac{100}{4} + 1 = 26; N_b = \frac{40}{4} + 1 = 11$$

4.2.4 CÁLCULO DO COMPRIMENTO TOTAL DE CONDUTORES DE CABO DE COBRE 70 MM²

$$L_c = N_a l_b + N_b l_a = 26 \times 40 + 11 \times 100 = 2140 \text{m}$$

4.2.5 CÁLCULO DO COMPRIMENTO EQUIVALENTE TOTAL DE CONDUTORES

Substituindo os valores de L_c e L_h :

$$L_t = L_c + L_h = 2140 + 100 \times 3 = 2.440 \text{m}$$

4.2.6 CÁLCULO DA RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO DA MALHA

$$\rho_l = 285,0 \Omega \cdot \text{m}; h = 1,00 \text{ m}; A = 4000 \text{ m}^2$$

$$R = 285 \left[\frac{1}{2440} + \frac{1 + \frac{5 \times 1,0}{\sqrt{5 \times 4000}}}{10 \times 1,0 + \sqrt{5 \times 4000}} \right] \therefore R = 2,07 \Omega$$

4.2.7 CÁLCULO DA CORRENTE DE MALHA

$$Z_{\text{eq}} = 0,455 + j0,241$$

Iremos considerar R_g (resistência vista malha) como sendo a resistência da malha de terra, ou seja, $2,07 \Omega$.

Assim I_m é dada por:

$$I_m = 30000 \left| \frac{0,455 + j0,241}{2,07 + 0,455 + j0,241} \right|$$

$$I_m = 6.090 \text{ A}$$

4.2.8 CÁLCULO DE N

No nosso caso, teremos: $n_a = \frac{2L_c}{L_p}$, $n_b = \sqrt{\frac{L_p}{4\sqrt{A}}}$, $n_c = 1$ e $n_d = 1$.

Sendo:

L_c = Comprimento total dos condutores dispostos na direção horizontal na malha, calculado no item 3.2.4.4 (2140 m); L_p = Perímetro da malha ($100 \times 2 + 40 \times 2 = 280$ m); A = Área da malha (4000 m^2).

Assim:

$$N = \frac{2L_c}{L_p} \times \sqrt{\frac{L_p}{4\sqrt{A}}} \times 1 \times 1$$

$$N = \frac{2 \times 2140}{280} \times \sqrt{\frac{280}{4\sqrt{4000}}}$$

$$N \cong 16$$

4.2.8.1 CÁLCULO DOS COEFICIENTES DE MALHA

Nesta seção serão calculados os coeficiente K_m , K_i e K_s .

4.2.8.1.1 CÁLCULO DO COEFICIENTE DE ESPAÇAMENTO PARA TENSÃO DE MALHA

Valores das variáveis:

$$D = 4\text{m}; h = 1,0 \text{ m}; N = 16; d = 0,0089 \text{ m}$$

Substituindo os valores, temos:

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{4^2}{16 \times 1,0 \times 0,0089} + \frac{(4 + 2 \times 1,0)^2}{8 \times 4 \times 0,0089} - \frac{1,0}{4 \times 0,0089} \right) + \frac{1}{\sqrt{1+1,0}} \ln \frac{8}{\pi(2 \times 16 - 1)} \right]$$

$$K_m = 0,57$$

4.2.9 CÁLCULO DO COEFICIENTE DE IRREGULARIDADE

$$K_i = 0,644 + 0,148 \times N$$

$$K_i = 0,644 + 0,148 \times 16$$

$$K_i = 3,012$$

4.2.10 CÁLCULO DO COEFICIENTE DE SUPERFÍCIE

Valores das variáveis:

$$D = 4\text{m}; h = 1,0 \text{ m}; N = 16$$

Portanto:

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2 \times 1,0} + \frac{1}{4 + 1,0} + \frac{1}{4} (1 - 0,5^{16-2}) \right] = 0,302$$

4.2.10.1 CÁLCULO DA MÁXIMA TENSÃO DE TOQUE E PASSO

a) Sem Brita

$$V_{\text{toque}} = \frac{116 + 0,174\rho_1}{\sqrt{t}} = \frac{116 + 0,174 \times 285}{\sqrt{0,1}} = 523,64\text{V}$$

$$V_{\text{passo}} = \frac{116 + 0,7\rho_1}{\sqrt{t}} = \frac{116 + 0,7 \times 285}{\sqrt{0,1}} = 997,70\text{V}$$

b) Com Brita

$$V_{\text{toque}} = \frac{116 + 0,174C_s\rho_s}{\sqrt{t}} = \frac{116 + 0,174 \times 0,739 \times 3000}{\sqrt{0,1}} = 1.586,70\text{V}$$

$$V_{\text{passo}} = \frac{116 + 0,7 \times C_s \times \rho_s}{\sqrt{t}} = \frac{116 + 0,7 \times 0,739 \times 3000}{\sqrt{0,1}} = 5.274,36\text{V}$$

4.2.11 CÁLCULO DA TENSÃO DE MALHA

Valor das variáveis:

$$\rho_l = 285\Omega\cdot\text{m}; K_m = 0,57; K_i = 3,012; I_m = 6.090\text{A}; L_c = 2140\text{m}; L_r = 3,00\text{m}; L_R = 3 \times 100 = 300\text{m}; L_x = 100\text{m}; L_y = 40\text{m}$$

Portanto:

$$E_m = \frac{285 \times 3,012 \times 0,57 \times 6090}{2140 + \left[1,55 + 1,22 \left(\frac{3}{\sqrt{100^2 + 40^2}} \right) \right] \times 300}$$

$$E_m = 1139,43\text{V}$$

4.2.12 CÁLCULO DA TENSÃO DE PASSO NA MALHA

Valor das variáveis:

$$\rho_l = 285 \Omega\cdot\text{m}; K_s = 0,302; K_i = 3,012; I_m = 6.090\text{A}; L_c = 2140\text{m}; L_R = 3 \times 100 = 300\text{m}$$

Substituindo os valores temos:

$$E_s = \frac{285 \times 3,012 \times 0,302 \times 6090}{2140 \times 0,75 + 0,85 \times 300} = 848,81V$$

4.2.13 CRITÉRIO DE SEGURANÇA

Como os valores de V_{toque} e V_{passo} considerado serão para o solo com a camada de brita, nota-se que a malha projetada adequa-se aos níveis de seguranças indicados pela referida norma.

4.2.14 VALORES CALCULADOS

São encontrados na Tabela 3.13 todos os valores anteriormente calculados.

Tabela 3.13. Valores das especificações da malha de aterramento.

Descrição	Quantidade	Unidade
Espaçamento da malha (submalhas quadradas)	4,00	m
Número de hastes utilizadas (periferia)	100,00	un
Comprimento da malha (maior dimensão)	100,00	m
Largura da malha (menor dimensão)	40,00	m
Seção mínima do cabo	70,00	mm ²
Comprimento total dos condutores	2440	m
Tensão de passo máxima	5.274,36	V
Tensão de toque máxima	1.586,70	V
Tensão de passo da malha	848,81	V

4.2.15 CONFIGURAÇÃO DA MALHA DE TERRA

Para configuração da malha de terra, ramificações e interligações com equipamentos e estruturas, bem como arranjos e detalhes de construção ver Anexo B : Malha de Aterramento Planta e Detalhes.

4.3 MEDIÇÃO DA RESISTÊNCIA ELÉTRICA DA MALHA DE

ATERRAMENTO

Os resultados da medição da resistência elétrica da malha são mostrados nos tópicos subsequentes.

4.3.1 COLETA DE RESULTADOS

As medidas realizadas foram reunidas na Tabela 3.14.

Tabela 3.14. Dados de campo de medidas de resistência.

X (m)	Dy (Tensão) (m)	Dz (Corrente) (m)	RESISTÊNCIA MEDIDA (Ω)
0	37	60	0,29
20	29	60	0,20
40	22	60	0,34
60	14	60	0,44
80	07	60	0,28
0	50	80	0,23
20	42	80	0,22
40	34	80	0,25
60	27	80	0,21
80	19	80	0,25
0	62	100	0,49
20	54	100	0,54
40	47	100	0,37
60	39	100	0,52
80	31	100	0,34

4.3.2 ANÁLISE DAS MEDIDAS

De acordo com os dados coletados, obtemos as seguintes curvas R x X, para cada Dy.

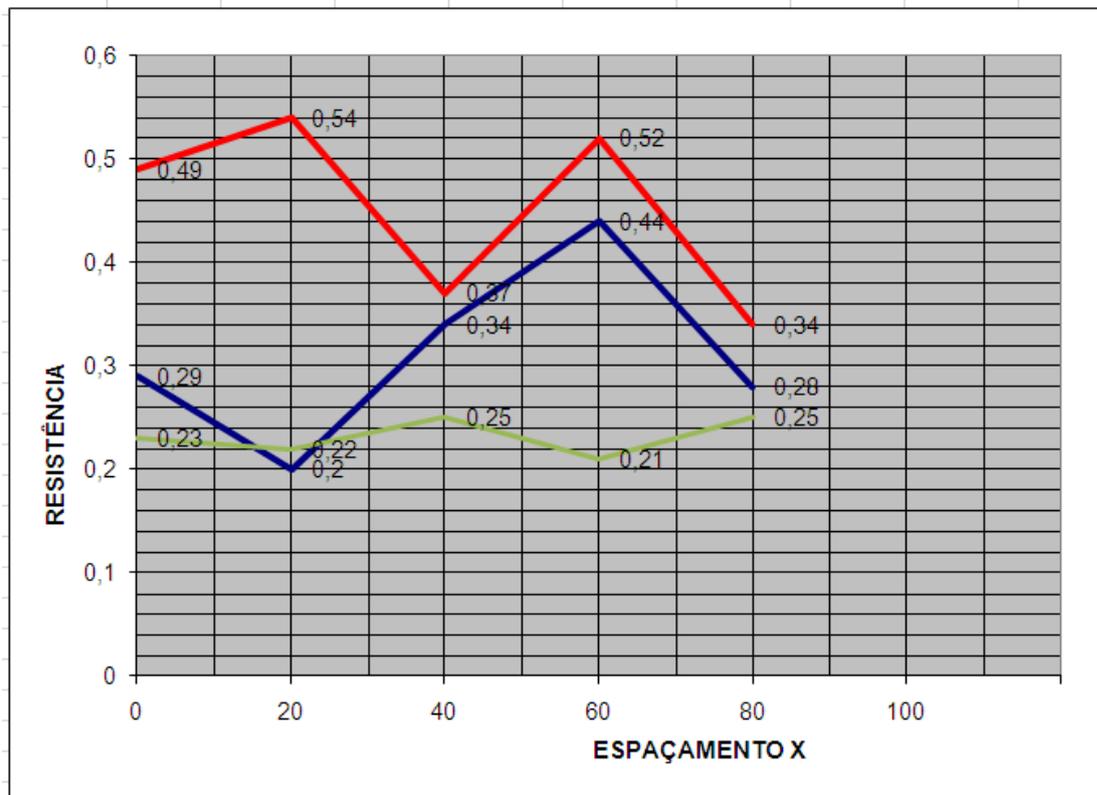


Gráfico 3.3 Curvas de resistência x espaçamento (x) para cada dy.

Curva azul – Referente a um Dz igual a 60 metros.

Curva verde – Referente a um Dz igual a 80 metros.

Curva vermelha – Referente a um Dz igual a 100 metros.

Observando as curvas, observa-se que as três curvas não se interceptam no mesmo ponto, não podendo determinar de forma exata o valor da resistência, porém como as medidas foram muito baixas (inferiores a 1Ω), podemos atestar que a resistência elétrica da malha da SE é inferior a 5Ω , corroborando assim a eficácia da malha

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho mostrou todas as diretrizes para análise do solo, abordando os modelos de estratificação a serem adotados no projeto de malhas de aterramentos, e a implementação de um projeto de malha de aterramento adequado às exigências previstas em normas.

Inicialmente, para contextualização das realizações do trabalho, procedeu-se a uma abordagem objetiva e simplificada do projeto de malhas de aterramento de subestações, considerando-se as atividades e procedimentos envolvidos. Particularmente, foi realizado um estudo sobre os métodos de estratificação dos solos em especial o método de Wenner que por sua simplicidade na aplicação foi o método escolhido para análise do solo.

Em seguida, foi realizado o estudo do solo com a aplicação do método de Wenner e determinação da resistividade do solo, que consiste no principal parâmetro a ser calculado para dar início ao projeto da malha de aterramento, de posse da resistividade do solo passou-se para os cálculos dos demais parâmetros exigidos para conclusão e implementação do projeto da malha de terra, que após ser implantada, passou por testes de resistência de aterramento atestando assim que o nível dessa resistência estava dentro dos limites indicados por norma.

Considerou-se, como contribuição de maior relevância, mostrar de uma maneira simplificada as diretrizes para análise do solo e projeto de um sistema de aterramento adequado ao objetivo proposto, tendo uma importante contribuição no estudo de aterramentos elétricos que nos dias atuais ainda se traduz, na maioria das vezes, em grande número de dúvidas quanto às normas e procedimentos para sua realização. O estudo mostrou os procedimentos e normas de forma detalhada e que depois de aplicados garantisse um sistema de aterramento confiável e eficaz, tornando assim este documento uma importante fonte de consulta a posteriores projetos de aterramentos elétricos.

Foi verificado a viabilidade de se utilizar este modelo para condições práticas usuais, considera-se que a continuidade natural deste trabalho consistiria no

desenvolvimento de artifícios computacionais para facilidade na obtenção dos parâmetros calculados através de análise de medidas e gráficos.

BIBLIOGRAFIA

KINDERMANN, G.; Campagnolo, J. M. **Aterramento Elétrico**. 3. ed. Porto Alegre: Sagra-D.C. Luzzatto, 1995.

BRASIL. **Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade – NR 10**. Ministério do Trabalho e Emprego. Portaria n° 3214/78, 2004.

MAMEDE FILHO, J. Sistemas de aterramento., **Instalações elétricas industriais**. 6.ed. Rio de Janeiro: LTC. 2001. p. 497-533.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, **Guide for safety in substation grounding**, IEEE STD 80, 1976 (Revised 1986).

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

Da Luz, M. V. F., **Notas de Aula - Sistemas de Aterramento**, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

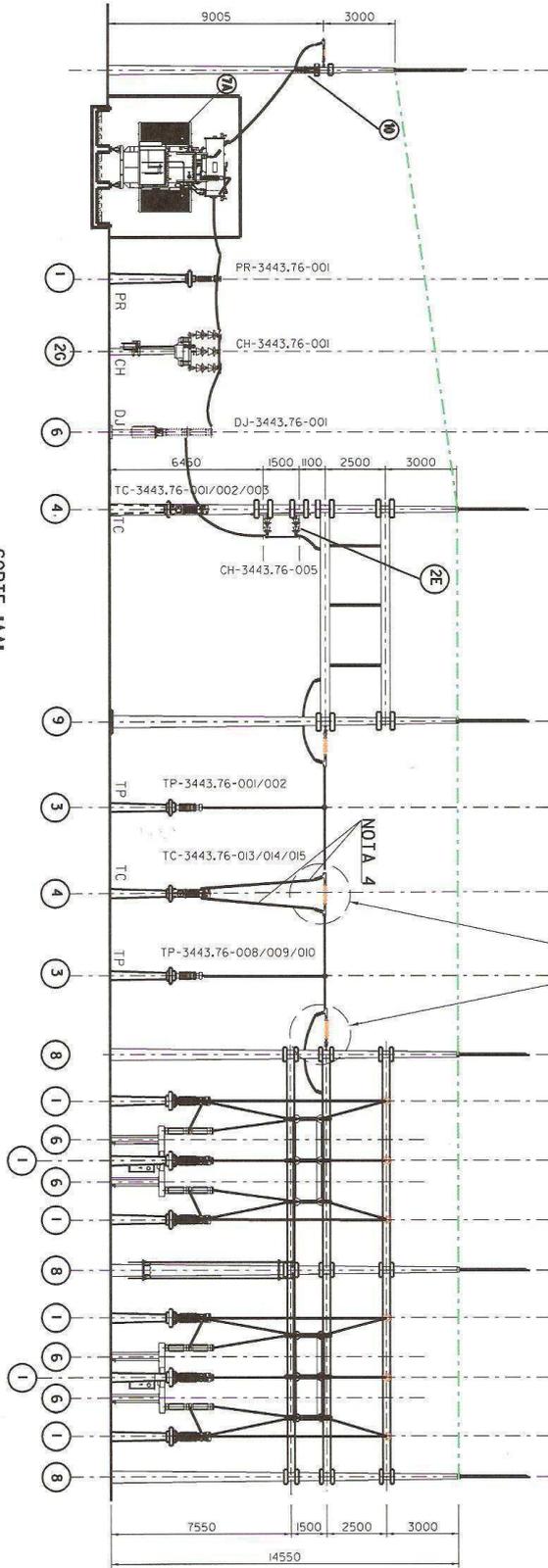
Ferreira, L. I., **Sistemas de Aterramento**. Porto Alegre, 2005. Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Elétrica, Centro de Tecnologia, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul.

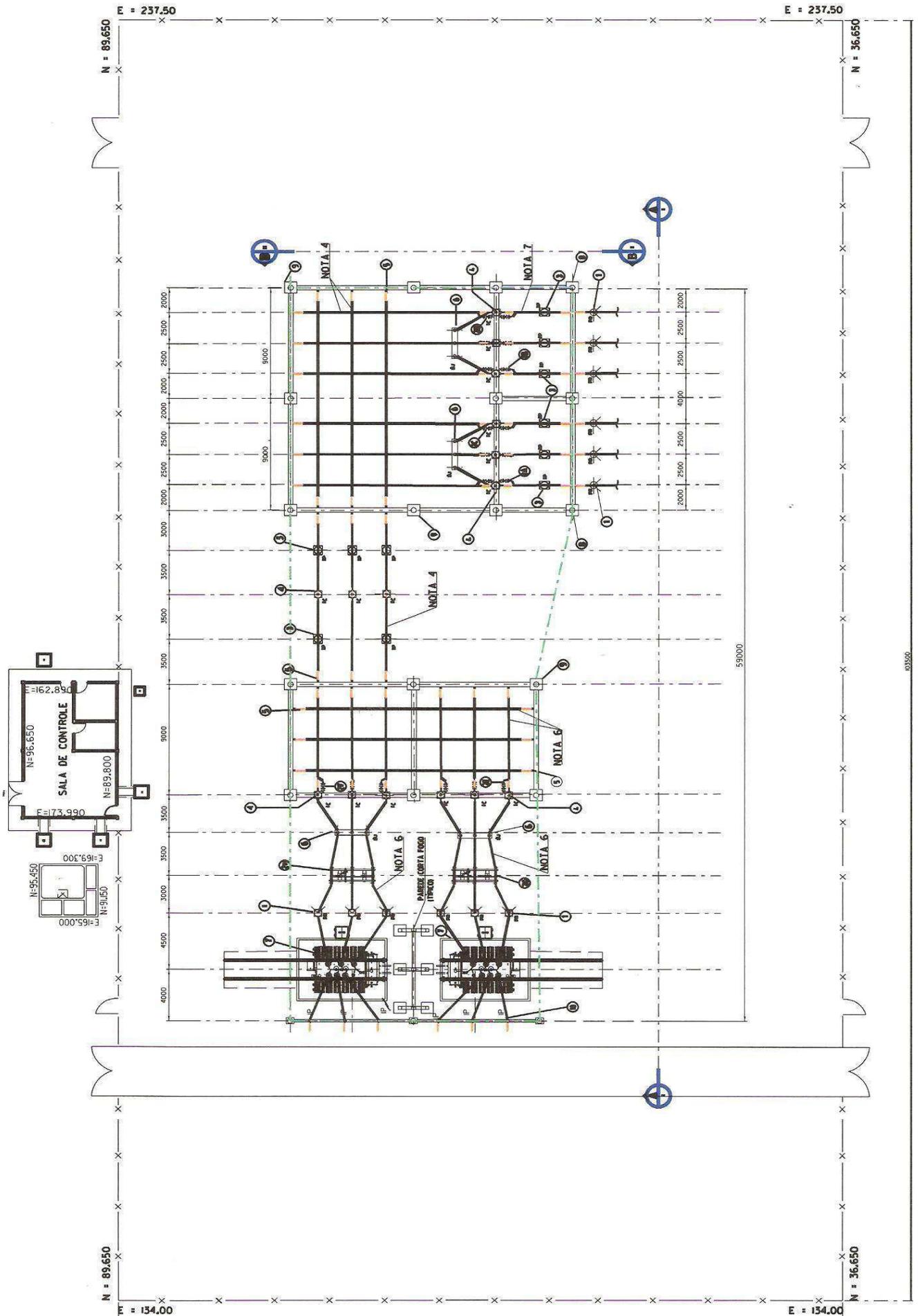
ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 6533 -Estabelecimento de Segurança aos Efeitos da Corrente Elétrica Percorrendo Corpo Humano - especificação**. Rio de Janeiro: ABNT, 1981.

EMPRESA ENERGÉTICA DO MATO GROSSO DO SUL. Aterramento seguro. **Revista P&D**, Brasília. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br>>. Acesso em: 20dez 2011.

ANEXO A – PLANTA GERAL DA SUBESTAÇÃO

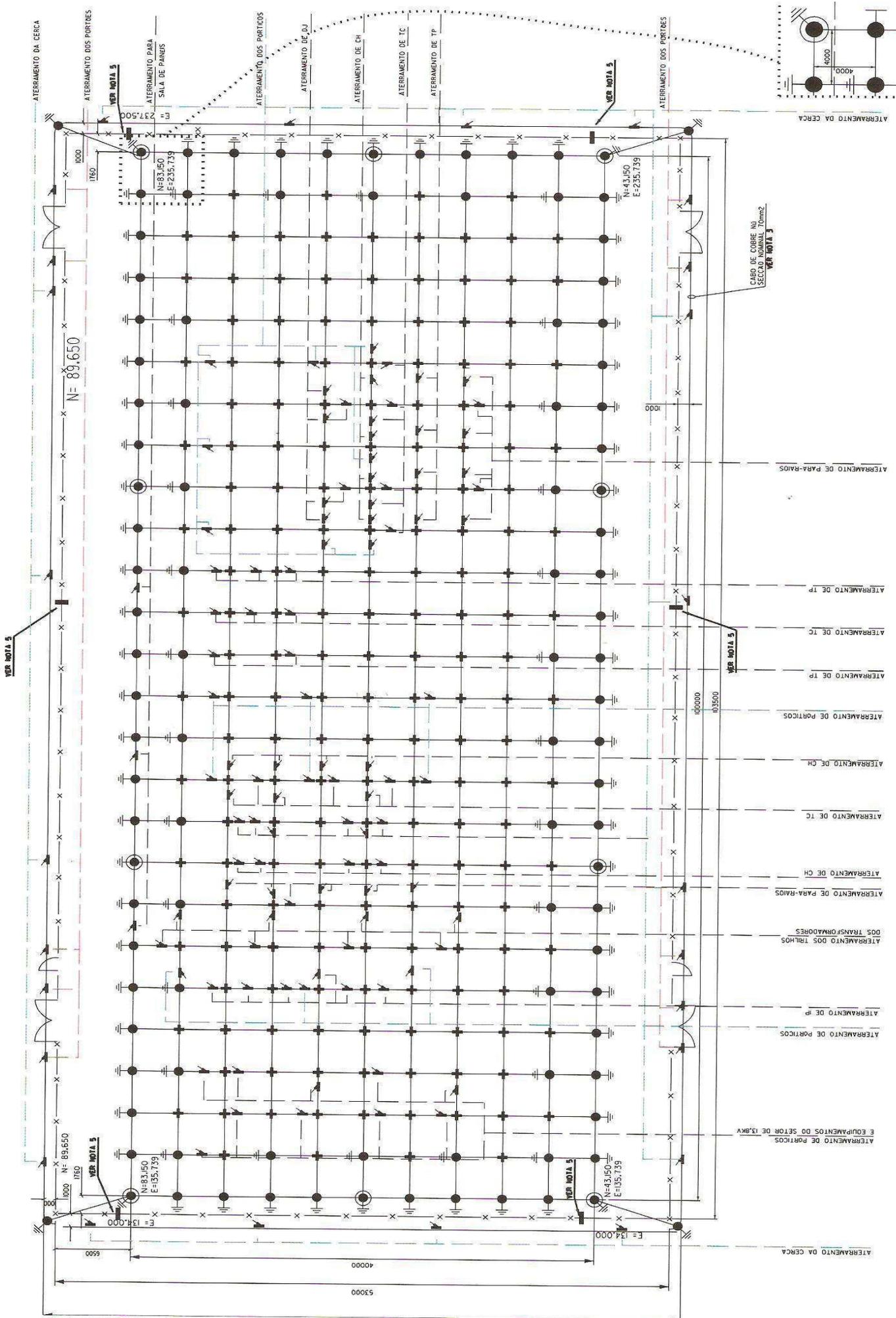
CORTE "AA"
S/ ESCALA





ANEXO B – MALHA DE ATERRAMENTO PLANTA E

DETALHES



MALHA DE ATERRAMENTO
ESCA: 1:200

DETALHE DA DISTANÇA ENTRE CONDUTORES
5' / ESC.

