



Universidade de São Paulo
Escola de Engenharia de São Carlos
Departamento de Engenharia Elétrica
e de Computação

SEL0444-Projeto de Formatura II
Trabalho de Conclusão de Curso

**Utilização de fórmulas simplificadas no
dimensionamento de malhas de terra e
suas limitações em relação a um software**

Aluno: Vinícius Costantini Gibertoni

Orientador: Prof. Dr. Ruy Alberto Corrêa Altafim

São Carlos

2013

VINÍCIUS COSTANTINI GIBERTONI

**Utilização de fórmulas simplificadas
no dimensionamento de malhas de
terra e suas limitações em relação a
um software**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
à Escola de Engenharia de São Carlos da
Universidade de São Paulo

Curso de Engenharia Elétrica com Ênfase em
Sistemas de Energia e Automação

ORIENTADOR: Prof. Dr. Ruy Alberto Corrêa Altafim

São Carlos

2013

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

G437u

Gibertoni, Vinícius Costantini
Utilização de fórmulas simplificadas no
dimensionamento de malhas de terra e suas limitações em
relação a um software / Vinícius Costantini Gibertoni;
orientador Ruy Alberto Corrêa Altafim. São Carlos,
2013.

Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica com
ênfase em Sistemas de Energia e Automação) -- Escola de
Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo,
2013.

1. Malhas de Aterramento. 2. Métodos Simplificados.
3. Segurança das pessoas. 4. Software Comercial. 5.
Subestação. 6. Faltas. I. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: Vinicio Costantini Gibertoni

Título: "Utilização de fórmulas simplificadas no dimensionamento de malhas de terra e suas limitações em relação a um software"

*Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado
em 20/06/2013;*

com NOTA 9,0 (nove, zero), pela Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Ruy Alberto Corrêa Altafim (orientador)
SEL/EESC/USP

Prof. Dr. José Carlos de Melo Vieira Júnior - SEL/EESC/USP

Prof. Dr. Rogério Andrade Flauzino - SEL/EESC/USP

**Coordenador da CoC-Engenharia Elétrica - EESC/USP:
Prof. Associado Homero Schiabel**

Dedicatória

Aos meus pais, Jorge e Maria Ap., por toda a dedicação e apoio durante todos esses anos e sem eles eu não conseguiria realizar este sonho.

Agradecimentos

Primeiramente gostaria de agradecer a toda minha família, pelo grande apoio e aconselhamentos que tenho recebido, sem os quais não conseguiria estar alcançando esta conquista.

Agradeço também aos amigos da república de São Carlos (Dudu, Arthur, Gustavo, Gabriel e Bisan) por todas as risadas, festas e pela convivência durante esses anos.

Gostaria de agradecer a todos os amigos de faculdade, por todo apoio nos estudos, nas noites em claro nas vésperas de provas e pelas festas, durante todos os anos de faculdade e, principalmente, queria agradecer ao Edson Gerald, por sempre estar disposto a auxiliar nos estudos e pela grande amizade.

Agradeço também a USP São Carlos e ao departamento de engenharia elétrica por toda a infraestrutura, qualidade dos professores, funcionários e pelo alto nível de ensino fornecido. Em especial, gostaria de agradecer ao Prof. Dr. Ruy Altafim por toda orientação prestada neste trabalho e por ter me ajudado a tomar uma decisão profissional muito importante.

Gostaria de agradecer ao pessoal da república de Guarulhos (Vamp, Marcão e Presunto), a todas as pessoas da ABB que me ajudaram neste período de estágio e ao José Otani, por toda ajuda e apoio prestados neste projeto.

Finalmente, queria agradecer a todos os meus amigos de Taquaritinga e tantos outros que contribuíram para meu crescimento pessoal, acadêmico e profissional.

Sumário

Sumário	xi
Listas de Figuras.....	xv
Listas de Tabelas.....	xvii
Lista de Siglas.....	xviii
Resumo	xx
Abstract	xxi
1. Introdução	1
2. Definições	3
2.1. Aterramento Elétrico.....	3
2.2. Hastes de Aterramento	3
2.3. Dc offset	4
2.4. Característica do sistema (X/R).....	4
2.5. Fator de Decremento (Df)	4
2.6. Malha de Terra	4
2.7. Sistema de Aterramento	4
2.8. Potenciais Perigosos.....	4
2.9. Tensão de Passo	5
2.10. Tensão de Toque.....	5
2.11. Tensão de Transferência (GPR)	5
2.12. Tensão de Toque Metal-Metal.....	5
2.13. Resistência de Aterramento.....	5
2.14. Resistividade	6
2.15. Resistividade Aparente	6
2.16. Corrente de Malha	6
2.17. Subestação.....	6
2.18. Geração, transmissão e distribuição	7
3. Introdução a Malhas de Aterramento	8
3.1. Introdução Geral	8
3.2. Resistividade do Solo.....	8
3.3. A influência da estratificação	9
3.4. Materiais usados na malha segundo normas IEEE	9
3.4.1. Cobre	10

3.4.2.	Aço Cobreado (Copper-clad steel)	10
3.4.3.	Alumínio	10
3.4.4.	Aço.....	11
3.5.	A influência da umidade, temperatura e tratamentos químicos.....	11
3.6.	Projeto de Malhas de Aterramento.....	12
4.	Medição usando o método de Wenner.....	13
4.1.	Método de Wenner.....	13
4.2.	Direções a serem medidas	13
4.3.	Medições da Resistividade do Solo	15
4.4.	Análise das Medidas.....	17
4.5.	Exemplo de Medição do Solo.....	18
4.6.	Cuidados na Medição	21
5.	Estratificação do Solo.....	22
5.1.	Introdução.....	22
5.2.	Solo Homogêneo.....	22
5.3.	Solo Estratificado em 2 Camadas Horizontais	23
6.	Fatores de segurança para dimensionamento do projeto	26
6.1.	Importância da rapidez na eliminação da falta	26
6.2.	Valor máximo da corrente tolerável.....	27
6.3.	Resistência do corpo humano.....	27
6.4.	Critérios para Potenciais de Passo e de Toque:	28
6.4.1.	Tensão de Passo	29
6.4.2.	Tensão de Toque	30
6.5.	Efeito da Frequência.....	31
6.6.	Efeito da camada de brita na superfície	31
6.7.	Fator de Decremento	32
7.	Faltas elétricas e parâmetros das linhas de transmissão.....	34
7.1.	Introdução.....	34
7.2.	Caminho da Corrente de Sequência Zero do Curto-Circuito	34
7.3.	Impedância equivalente dos cabos para-raios das Linhas de Transmissão (LTs) que chegam na SE.....	37
7.3.1.	Cálculo da Impedância Própria (Z_p), [Ω/km]	37
7.3.2.	Cálculo da Impedância Mútua entre cabos para-raios e cabos fase (Z_m), [Ω/km]	38
7.4.	Modelos Concentrados para o circuito terra da linha de transmissão	39

7.4.1. Modelo Ladder Infinito.....	40
7.4.2. Modelo Ladder Finito.....	41
7.5. Fator de divisão da corrente de falta (Split Factor)	42
7.6. Corrente de Malha	43
8. Malha de Aterramento	46
8.1. Introdução	46
8.2. Itens necessários ao projeto	47
8.3. Dimensionamento dos Condutores.....	47
8.4. Estratificação do solo	48
8.5. Resistividade Aparente.....	49
8.5.1. Coeficiente de Penetração (α).....	49
8.5.2. Coeficiente de Divergência (β)	50
8.5.3. Resistividade Aparente para solo em duas camadas.....	50
8.6. Critérios de potencial de passo e de toque	51
8.7. Malha inicial	51
8.8. Resistência de aterramento da malha e do sistema de transmissão	53
8.8.1. Resistência da malha em solo homogêneo.....	54
8.8.2. Resistência da malha em solo biestratificado	54
8.9. Cálculo da corrente de malha.....	56
8.10. Potencial de Toque máximo da malha em relação ao infinito (GPR).....	56
8.11. Potenciais Máximos a Serem Verificados.....	57
8.12. Potencial de rede	57
8.13. Potencial de Passo na Malha	61
8.14. Potencial de Toque na cerca Perimetral da Malha	62
8.15. Fluxograma de Dimensionamento da Malha de Terra	64
9. Dimensionamento de Malhas através de Software.....	67
9.1. Introdução	67
9.2. Resultados obtidos com o uso do Software	67
9.3. Análise dos Potencias na superfície da SE.....	69
9.4. Taxa de Compressão do Condutor, dimensionamento da malha com Potencial Constante.....	80
9.5. Modelo da malha otimizada	83
10. Conclusão	86
11. Referências Bibliografias.....	90

12.	Apêndice A – Estudo de caso de Malhas de Terra.....	92
13.	Apêndice B – Faltas Fase-terra e Fase-fase-terra.....	112

Listas de Figuras

Figura 1 - A esquerda uma haste de aterramento cravada no chão (com um conector cunha já instalado) e a direita dois tipos de hastes.....	3
Figura 2 - Potenciais Perigosos.....	6
Figura 3 – Fotos de Subestações e alguns equipamentos.....	7
Figura 4 - Fonte de Geração (UHE e UTE), Linhas de Transmissão de Energia Elétrica(LTs), Distribuição de Energia e Subestações (SEs).....	7
Figura 5 - Efeitos da umidade, temperatura e concentração de sal sobre a resistividade do solo.....	11
Figura 6 - Método de Wenner	13
Figura 7 - Disposição dos Pontos de Medição.....	14
Figura 8 - Disposição dos pontos de medição em áreas com geometria diferentes de retângulo	14
Figura 9- Medição da resistividade do solo, método de Wenner.....	15
Figura 10 - Gráfico do valor da resistividade do solo de acordo com sua profundidade	20
Figura 11 – Modelo de Solo Uniforme	23
Figura 12 - Estratificação do solo em duas camadas	23
Figura 13 - Método Gráfico de Sunde	24
Figura 14 – Modelo de Duas Camadas	25
Figura 15 - Tensão de Passo	29
Figura 16 - Tensão de toque	30
Figura 17 - Caminho da Corrente de Falta pelo solo	35
Figura 18 - Corrente de neutro.....	35
Figura 19 - Retorno da corrente de sequência zero a subestação	36
Figura 20-Exemplo de silhuetas de torres	39
Figura 21 - Circuito equivalente para o cálculo da impedância Z do cabo pára raios	40
Figura 22 - Efeito da adição de uma unidade série-paralela	40
Figure 23 - Injeção de uma corrente i no circuito Ladder.....	41
Figura 24 - Modelo equivalente para o cálculo do Ladder Finito.	42
Figura 25 - Corrente de Malha	43
Figura 26 - Solo Equivalente com duas Camadas.....	49
Figura 27 - Curva da Resistividade Aparente	51
Figura 28 - Projeto inicial da Malha.....	52
Figura 29 - Correntes pelas bordas da Malha.....	57
Figura 30 - Hastes no Perímetro da Malha	61
Figura 31 - Ilustração da distância x	64

Figura 32 - Fluxograma de dimensionamento da malha	65
Figura 33 - Exemplo de configuração de uma Subestação	68
Figura 34 - Modelo Inicial da malha	69
Figura 35 -Primeira Iteração - Tensão de passo, toque e GPR na superfície da malha.	71
Figura 36 - Gráfico representado nos eixos x, y e z, dos potenciais de toque na ocorrência da falta fase-terra, na malha simplificada.	72
Figura 37 - Segunda iteração - Malha com um número maior de condutores.....	73
Figura 38 - Segunda Iteração - Tensão de passo, toque e GPR na superfície da malha.	
.....	74
Figura 39 - Segunda Iteração - Gráfico representado nos eixos x, y e z, das dimensões dos níveis de tensão de toque na superfície da malha.....	75
Figura 40 - Terceira iteração – Malha com hastes de aterramento em sua periferia	76
Figura 41- Terceira Iteração - Tensão de passo, toque e GPR na superfície da malha.	76
Figura 42 - Terceira Iteração - Gráfico representado nos eixos x, y e z, dos níveis de tensão de toque na superfície da malha.....	77
Figura 43 - Quarta iteração – Malha com hastes de aterramento concetradas nos vértices.....	78
Figura 44 - Quarta Iteração - Tensão de passo, toque e GPR na superfície da malha.	79
Figura 45 - Quarta Iteração - Gráfico representado nos eixos x, y e z, dos níveis de tensão de toque na superfície da malha.....	80
Figura 46 - Malha de Aterramento considerando $c=0,8$	81
Figura 47 - Malha utilizando o fator de compressão.....	83
Figura 48 - Quinta Iteração - Tensão de passo, toque e GPR na superfície da malha ..	84
Figura 49 - Quinta Iteração - Gráfico representado nos eixos x, y e z, dos níveis de tensão de toque na superfície do terreno da subestação.....	84

Listas de Tabelas

Tabela 1 - Variação da resistividade em função do tipo de solo [2].....	9
Tabela 2 - Valores de Resistência do Solo	16
Tabela 3 - Valores de Resistividade	17
Tabela 4 - Medições da Resistência dos Perfis do Solo.....	18
Tabela 5 - Valores de Resistividade	19
Tabela 6 - Desvios em relação à média.....	19
Tabela 7 - Valores Médios da Resistividade.....	20
Tabela 8 - Medidas das Silhuetas das Torres.....	39
Tabela 9 - Valores Médios da Resistividade.....	70
Tabela 10 - Comparação entre os valores do 1º Modelo de Malha.....	72
Tabela 11 - Comparação entre os valores do 2º Modelo de Malha.....	74
Tabela 12 - Comparação entre os valores do 3º Modelo de Malha.....	77
Tabela 13 - Valores da 4º Malha.....	79
Tabela 14 - Resultados última malha.....	85

Lista de Siglas

Símbolo	Descrição
SE	Subestação
LT	Linha de transmissão de energia
ρ	Resistividade do solo [$\Omega \cdot m$]
ρ_s	Resistividade da camada de brita (ou do material adicionado à superfície do solo) [$\Omega \cdot m$].
ρ_a	Resistividade aparente do solo [$\Omega \cdot m$]
ρ_1	Resistividade da primeira camada do solo [$\Omega \cdot m$]
ρ_2	Resistividade da segunda camada do solo [$\Omega \cdot m$]
$3I_0$ ou I_f	Corrente de falta simétrica em uma subestação [A]
A	Área total protegida pela malha de aterramento, [m^2]
C_s	Fator de correção de potenciais devido a adição da camada de brita
S	Seção transversal do condutor da malha, [mm^2]
D	Distancia entre dois condutores paralelos consecutivos [m]
D_f	Fator de decremento para determinação do I_f
V_m	Potencial de rede da malha [V]
V_s	Potencial de passo da malha [V]
V_{passo}	Tensão de passo tolerável para uma pessoa [V]
V_{toque}	Tensão de toque tolerável para uma pessoa [V]
V_m	Potencial de rede que uma pessoa possa estar sujeita dentro de uma SE [V]
V_s	Potencial de passo na malha que uma pessoa possa estar sujeita dentro de uma SE [V]
h	Profundidade dos condutores da malha [m]
h_s	Espessura da camada superficial [m]
I_M	Parcela da corrente de falta que será absorvida pela malha de aterramento [A]
K	Fator de reflexão entre diferentes resistividades
K_h	Fator de correção que aumenta os efeitos da profundidade da malha, método simplificado
K_i	Fator de correção para a geometria da malha, método simplificado
K_{ii}	Fator de correção ajustado para efeitos de condutores internos na rede, método simplificado
K_m	Fator de espaçamento para tensão de rede, método simplificado

K_s	Fator de espaçamento para tensão de passo, método simplificado
L_c	Tamanho total dos condutores da malha [m]
L_h	Tamanho total das hastes de aterramento [m]
L_r	Tamanho das hastes de aterramento de cada posição [m]
L_s	Tamanho efetivo dos $L_c + LR$ para cada tensão de passo, [m]
L_T	Tamanho efetivo total dos condutores e hastes de aterramento do sistema de aterramento [m]
N	Fator geométrico compensado de fatores n_a, n_b, n_c , e n_d
R_M	Resistência da malha de aterramento [Ω]
S_f	Fator de divisão da corrente de falta (split factor)
t_s	Tempo de atuação da proteção de retaguarda, considerado nos cálculos de dimensionamento da malha [s]
T	Tempo de duração do choque [s]

Resumo

GIBERTONI, V. C. - Utilização de fórmulas simplificadas no dimensionamento de malhas de terra e suas limitações em relação a um software. 2013. 116 p. Trabalho de Conclusão de Curso – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

Malhas de aterramentos de subestações são projetadas com o intuito de evitar acidentes elétricos envolvendo pessoas e prevenir danos aos equipamentos que se encontram dentro de subestações, em casos de anomalias no sistema de transmissão de energia elétrica. Elas fornecem caminhos para o fluxo de corrente para a terra, quando da ocorrência de faltas e descargas elétricas. Nos dias de hoje, os projetos de malhas de aterramentos são feitos por empresas, que adquirem softwares comerciais específicos para seu dimensionamento, mas existem vários estudos de fórmulas simplificadas que possibilitam fazer o dimensionamento destas malhas. Sendo assim, o trabalho apresenta um estudo sobre as fórmulas simplificadas usadas nos projetos das malhas de aterramento e quais são suas restrições em relação a um software comercial. Será feito um estudo de caso de uma malha de aterramento utilizando os recursos apresentados no trabalho, seguindo a norma IEEE 80-2000, e as limitações das fórmulas simplificadas serão contrastadas com o software. O fluxograma com as etapas necessárias para a obtenção do modelo final da malha e análises gráficas dos potenciais que surgem na superfície da subestação, nos casos de faltas elétricas ou anomalias no sistema de transmissão, também serão apresentados no trabalho.

Palavras Chaves: Malha de aterramento, faltas, segurança das pessoas, subestação, métodos simplificados, software comercial.

Abstract

GIBERTONI, V. C. - Simplified formulas used in the design of grounding grids and their limitations in relation to a software. 2013. 116 p. Course Final Paper- School of Engineering of São Carlos, University of São Paulo, São Carlos, 2013.

Substation grounding grids are designed in order to avoid electrical accidents involving people and prevent damage to equipment that are within substations, in cases of anomalies in the system of power transmission. They provide paths for electric current to ground, upon the occurrence of faults and lightning. Nowadays, designs of grounding grids are made by companies that purchase commercial software for your specific sizing, but there are several studies of simplified formulas that allow performing these projects. Therefore, this work presents a study on the simplified formulas used in the design of grounding grids, and what are its restrictions against commercial software. There will be a case study of a grounding grid using the resources presented in this paper, following the IEEE 80-2000, and limitations of simplified formulas will be contrasted with the software. The flowchart with essentials steps to obtain the final model of the grid and graphical analysis of the potentials that arise on the surface of the substation, in case of electrical faults or anomalies in the transmission system, will also be presented in the work.

Key Words: Grounding grids, faults, people safety, substation, simplified methods, commercial software.

1. Introdução

O trabalho irá abordar o dimensionamento de uma malha de aterramento, partindo desde a medição e análise dos valores de resistividade do solo até a instalação dos componentes da malha. Para o cálculo dos parâmetros envolvidos no projeto são utilizadas fórmulas simplificadas, que resultam em valores muito próximos quando comparados a métodos que utilizam análises longas e complexas utilizadas para o cálculo destes. As fórmulas simplificadas utilizadas no trabalho estão de acordo com as normas do IEEE std 80-2000 e são usadas no dimensionamento de malhas de aterramento existentes sendo que serão explanados neste projeto, entre outros, o modelo equivalente do solo bi-estratificado, os máximos potenciais de toque e passo permitidos, a corrente de falta à terra, a seção dos cabos e hastes da malha, as dimensões da malha e os gradientes de potencial na subestação.

Com isso o projeto tem como objetivo apresentar uma base teórica necessária para projetos de malhas de aterramento, os meios externos de influência sobre a mesma, gráficos do comportamento dos potenciais existentes no solo de subestações em casos de faltas fase-terra e o contraste entre os resultados de estudo de caso de uma malha projetada com o uso de fórmulas simplificadas e através de um software.

O presente trabalho aplica-se somente a subestações de alta tensão do tipo convencional com isolamento em ar, considerando os fenômenos a 60 Hz. Portanto o seguinte estudo não pode ser usado em aplicações para subestações do tipo blindadas a SF6.

“Deve-se ressaltar que o dimensionamento de uma malha de aterramento é um processo iterativo. A partir de uma configuração inicial, verificam-se os potenciais, na superfície da malha, levando em consideração o pior caso de falta que pode ocorrer no sistema. Se os máximos valores dos potenciais encontrados na malha forem inferiores aos valores máximos suportáveis por um ser humano, parte-se para o detalhamento da malha. Caso contrário, modifica-se o projeto inicial da malha até se estabelecer as condições de segurança exigidas”[1]

As seguintes considerações devem ser feitas no dimensionamento de malhas de aterramento:

- O dimensionamento da malha para projeto, incluindo a bitola do condutor, a configuração do reticulado e a profundidade da malha;
- Os critérios de segurança estabelecidos, considerando faltas para a terra, e os

resultados das simulações realizadas, onde se destacam a resistência de aterramento da malha, a fração de corrente de falta dissipada pela malha para o solo, os perfis de potencial na superfície do solo, e os potenciais de passo e toque máximos previstos.

Tem-se, portanto, que o conhecimento das características da malha de aterramento, considerando a magnitude da fração da corrente de falta dissipada pela mesma, vem a ser um parâmetro fundamental para a avaliação do seu desempenho.

2. Definições

Segue abaixo, para melhor entendimento, algumas definições de nomenclaturas e parâmetros utilizados nos projetos de malha de aterramento e explicações sobre os materiais usados em sua construção.

2.1. Aterramento Elétrico

Um aterramento elétrico consiste em uma ligação elétrica proposital de um sistema físico (elétrico, eletrônico ou corpos metálicos) ao solo. Este se constitui basicamente de 3 componentes:

- Eletrodos de aterramento;
- Conexões elétricas que ligam um ponto do sistema aos eletrodos;
- Terra que envolve os eletrodos;

2.2. Hastes de Aterramento

São condutores elétricos constituídos de hastes cilíndricas, normalmente formadas de alma de aço e revestidas com uma camada de cobre (copperweld). Estas hastes são cravadas no solo com o objetivo de dissipar a corrente da malha de aterramento para a terra. Elas são usadas principalmente nas periferias das malhas, onde o potencial geralmente é mais elevado e são utilizadas nos aterramento de estruturas e fundações de equipamentos. Hastes de aterramento são uma boa alternativa para diminuir a resistência de aterramento da malha, quando o solo do terreno onde ela será instalada possui uma alta resistividade e, além disso, a área disponível para a instalação é limitada. A figura 1 mostra um tipo de haste de aterramento.



Figura 1 - A esquerda uma haste de aterramento cravada no chão (com um conector cunha já instalado) e a direita dois tipos de hastes. (Fonte: adaptado de “www.intelli.com.br”)

2.3. Dc offset

Diferença entre a onda da corrente senoidal e a onda da corrente presente no sistema durante uma condição de regime transiente. Matematicamente, esta corrente de falta presente no sistema pode ser separada em duas partes, uma componente alternada simétrica e uma componente unidirecional (dc). A componente unidirecional pode ser de qualquer polaridade, mas esta não sofre mudança de polaridade, sendo que ela irá diminuir a uma taxa pré-determinada.

2.4. Característica do sistema (X/R)

É um indicativo da taxa de decaimento do componente dc offset. Um alto valor de X/R corresponde a uma alta constante de tempo e uma baixa taxa de decaimento.

2.5. Fator de Decremento (D_f)

É um fator de ajuste usado junto com o parâmetro de corrente de falta fase-terra simétrica em cálculos para segurança em sistemas de aterramento. Ele determina o valor rms equivalente da onda de corrente assimétrica para o tempo de duração da falta, (t_f), contribuindo para o efeito do dc offset inicial e sua atenuação durante a falta.

2.6. Malha de Terra

Conjunto de eletrodos de aterramento horizontais e/ou verticais interconectados formando nós e malhas e enterrados no solo sob os equipamentos elétricos e as estruturas metálicas da subestação.

2.7. Sistema de Aterramento

Conjunto formado pela malha de terra, pelos aterramentos e pelas partes metálicas interconectadas, que dissipam para a terra as correntes elétricas normais e anormais impostas a esse sistema.

2.8. Potenciais Perigosos

Potenciais que podem provocar efeitos danosos ao corpo humano quando a ele aplicados. São tensões de passo, toque, transferência, toque metal-metal. Apresentados na figura 2.

2.9. Tensão de Passo

Máxima diferença de potencial entre os pés (arbitra-se uma distância de 1 m entre os mesmos) a que ficaria submetida uma pessoa, eventualmente presente na região do aterramento, durante o fluxo de corrente pelo mesmo. Ver Figura 2.

2.10. Tensão de Toque

Máxima diferença de potencial entre mão e pés a que ficaria submetida uma pessoa, eventualmente presente na região de aterramento, que tivesse contato com uma parte metálica ligada aos eletrodos de aterramento, durante o fluxo de corrente pelo aterramento (consideram-se ambos os pés afastados 1 m da estrutura tocada). Ver Figura 2.

2.11. Tensão de Transferência (GPR)

É a elevação de potencial total da malha referida ao infinito, usualmente designada GPR (*Grounding Potential Rise*). Constitui-se no potencial a que ficaria submetida uma pessoa posicionada no terra remoto (grande distância da malha) que tivesse contato com uma parte metálica eventualmente conectada com os eletrodos de aterramento, durante o fluxo de corrente pelo mesmo. Ver Figura 2

2.12. Tensão de Toque Metal-Metal

Máxima diferença de potencial entre mão e mão ou mão e pés a que ficaria submetida uma pessoa, eventualmente presente na região de aterramento, que tivesse contato com objetos metálicos (estruturas dentro de uma SE, por exemplo) estando apenas um deles interligado ao sistema de aterramento, durante o fluxo de corrente pelo aterramento. Ver Figura 2.

2.13. Resistência de Aterramento

É a resistência equivalente do sistema de aterramento oferecida à passagem de corrente elétrica de defeito para a terra. Essa resistência é composta dos seguintes elementos:

- Resistência dos condutores e conexões que compõem a malha;
- Resistência de contato entre os elementos acima citados e a terra circundante;
- Resistência da própria terra que circula os condutores da malha;

2.14. Resistividade

Grandeza intrínseca do material definida a partir da relação $E=\rho J$, onde E é o campo elétrico e J a densidade de corrente, medidos em cada ponto.

2.15. Resistividade Aparente

Valor de resistividade equivalente das diversas camadas de diferentes resistividades que compõem um solo não homogêneo.

2.16. Corrente de Malha

Parcela da corrente de curto-circuito que flui pela resistência de aterramento da malha da subestação e que contribui efetivamente para o aparecimento de potenciais perigosos na superfície do solo.

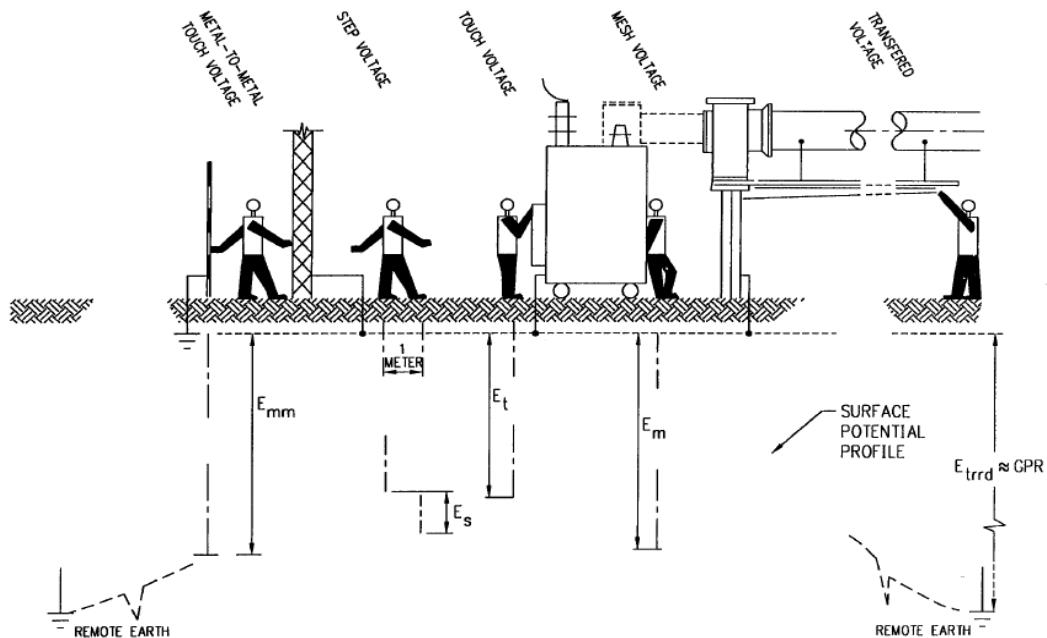


Figura 2 - Potenciais Perigosos.

Fonte: IEEE std 80-2000, 2000, p.24.

2.17. Subestação

Uma subestação (SE) é um conjunto de equipamentos de manobra, transformação, compensação de reativos ou da combinação destes, usados para dirigir o fluxo de energia, em sistema de alta potência e possibilitar a sua diversificação através de rotas alternativas, possuindo ainda dispositivos de proteção capazes de detectar os diferentes

tipos de faltas que ocorrem no sistema e de isolar os trechos onde estas faltas ocorrem. A Figura 3 são exemplos de subestações existentes.



Figura 3 – Fotos de Subestações e alguns equipamentos.

2.18. Geração, transmissão e distribuição

A matriz de energia elétrica é constituída de 3 sistemas. O sistema de geração, onde a energia elétrica é obtida através de processos químicos, como a queima de combustíveis nas usinas termoelétricas (UTEs) ou pela conversão de energia mecânica para energia elétrica, como ocorre nas usinas hidroelétricas. O sistema de transmissão, composto por várias torres e linhas de transmissão de energia elétrica. Por último, o sistema de distribuição de energia, que através de transformadores de baixa tensão irão reduzir o nível de tensão e fazer sua distribuição para os clientes finais. A interface destes 3 sistemas será feita por subestações, onde a malha de aterramento será implementada. A figura 4 mostra a interação entre os sistemas citados.



Figura 4 - Fonte de Geração (UHE e UTE), Linhas de Transmissão de Energia Elétrica(LTs), Distribuição de Energia e Subestações (SEs). (Fonte: Curso ABB Ltda: Modelos de Para-Raios)

3. Introdução a Malhas de Aterramento

3.1. Introdução Geral

O objetivo de uma malha de aterramento é de garantir a segurança de pessoas que transitam dentro das subestações e de proteger equipamentos contra potências perigosos, sendo que ela deve assegurar que os níveis de potenciais de passo e de toque dentro do terreno da subestação estejam dentro dos limites estabelecidos para a segurança dos seres humanos. A malha possibilita um caminho de baixa impedância para as correntes originadas por faltas fase-terra ou descargas elétricas.

Os projetos de aterramento precisam assegurar que as correntes de curto-circuito permaneçam em um nível seguro até que a proteção de retaguarda seja ativada. Estas condições são obtidas pela geometria da malha de aterramento compatível com a resistividade do solo no local de implantação da subestação, com o cálculo correto da parcela da corrente de curto circuito a ser dissipada pela malha e com os tempos de atuação das proteções instaladas.

3.2. Resistividade do Solo

Estimativas baseadas apenas em classificação de solos produzem aproximações grosseiras da resistividade do terreno. Portanto, testes reais de resistividade são imprescindíveis. Estes devem ser realizados em vários pontos e repetidos diversas vezes dentro do campo de análise. Com isso, os terrenos de subestações serão classificados como sendo homogêneo ou heterogêneo, que é o caso onde a resistividade do solo apresenta elevada variação.

O objetivo das medições e análise dos terrenos é de determinar se existem grandes variações de resistividade em contraste com a profundidade do solo. Deve-se também levar em conta a necessidade de realizar um maior número de leituras onde há grandes variações nos valores das medidas, especialmente quando o valor de resistividade de algumas leituras for elevado a ponto de sugerir um possível problema de segurança.

Segue tabela 1, com valores característicos de resistividade em relação ao tipo de solo.

Tabela 1 - Variação da resistividade em função do tipo de solo [2]

Tipo de Solo	Resistividade Média ($\Omega \cdot m$)
Solos alagadiços, limo, humo, lama	Até 150
Solos aráveis, argilo-arenosos	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

3.3. A influência da estratificação

A interação entre o perfil de estratificação do solo e a malha de aterramento do projeto irá afetar diretamente no projeto. Ela irá determinar à resistência de aterramento da malha, que está em função da geometria da mesma, das estruturas metálicas enterradas no solo dentro de sua área de influência e do perfil do solo, na região onde a malha se encontra.

3.4. Materiais usados na malha segundo normas IEEE

Cada elemento do sistema de aterramento, incluindo os condutores da malha, conexões, cabos de ligação e todos os eletrodos primários, deverão atender normas técnicas regulamentadoras. Estas normas são de grande importância para o projeto para que haja uma padronização de critérios de dimensionamento.

A norma mais utilizada no Brasil para a regulamentação dos sistemas de aterramento é a IEEE std. 80-2000 [3]. Esta apresenta critérios de projetos que devem ser considerados na construção dos sistemas de aterramento, abordando assuntos como o desempenho do sistema de aterramento, no que diz respeito à segurança de pessoas, frente a defeitos no sistema elétrico.

A norma do IEEE também especifica quais são as características mecânicas e elétricas dos materiais usados na subestação e algumas constantes, que são utilizadas como base nos cálculos de dimensionamento dos condutores. Os seguintes itens irão descrever os principais tipos de matérias usados nos condutores da malha.

3.4.1. Cobre

O cobre é o material mais usado em malhas de aterramento de subestações. As características que levam a sua preferência são a alta condutividade elétrica e a vantagem de ser resistente à maioria das causas de corrosão que ocorrem em materiais aterrados no solo. Esta última característica se deve ao fato do cobre se comportar como catodo em relação a grande parte dos demais materiais, que são usualmente aterrados na proximidade da malha de aterramento.

3.4.2. Aço Cobreado (Copper-clad steel)

Este tipo de material é constituído por um condutor composto por aço e revestido por uma camada de cobre. Ele é geralmente usado em hastes de aterramento, que são utilizadas para auxiliar no escoamento da corrente de falta para a terra. O aço cobreado também é uma boa escolha para malhas de aterramento em si, especialmente nos casos onde há problemas com furto, sendo que tal material, por possuir como característica a elevada resistência mecânica, dificulta o ato do furto.

3.4.3. Alumínio

O alumínio, mesmo sendo considerado um bom condutor, é usado com menor frequência em malhas de aterramento. Isto se deve ao fato deste tipo de material possuir as seguintes desvantagens:

- a) O alumínio, quando não está protegido por algum material de sacrifício, fica sujeito a corrosão em certos tipos de solo. Além disso, a camada de alumínio que sofrer o efeito da corrosão irá se tornar um material de baixa condutividade.
- b) A corrosão gradual causada por correntes alternadas também é um problema agravante.
- c) O alumínio possui características de metal de sacrifício em relação a muitos metais, sendo que sua interação com qualquer um destes metais pode ocasionar sua corrosão.

Portanto, o alumínio pode ser usado somente depois de uma análise criteriosa de todas estas situações.

3.4.4. Aço

O aço pode ser utilizado tanto em condutores quanto em hastes de aterramento, sempre levando em consideração os efeitos de corrosão que ele está sujeito. O uso de galvanização ou de um aço resistente a corrosão, combinado com um catodo de proteção, são algumas das alternativas que são geralmente empregadas para o aço, em sistemas de aterramento.

3.5. A influência da umidade, temperatura e tratamentos químicos.

A condução elétrica em solos ocorre essencialmente de forma eletrolítica e, por esta razão, a resistividade da maioria dos solos sobe abruptamente quando a porcentagem de umidade é menor que 15% do peso do solo. A quantidade de umidade depende do tipo de solo, de sua compactação e da variação do tamanho dos grãos. No entanto, como mostra a curva 2 da Figura 5, a resistividade é pouco afetada uma vez que o teor de umidade for superior a cerca de 22% de umidade em relação ao peso do solo, como mostrado no IEEE Std 142-1991 [4].

Analizando a curva 3, podemos notar que o efeito da temperatura sobre a resistividade do solo é quase insignificante para temperaturas acima do ponto de fusão. A 0 °C, a água no solo começa a congelar e a resistividade sofre um rápido aumento. A curva 3 mostra a variação típica de resistividade de um solo arenoso, quando o mesmo está congelado e contendo 15,2% de umidade por peso.

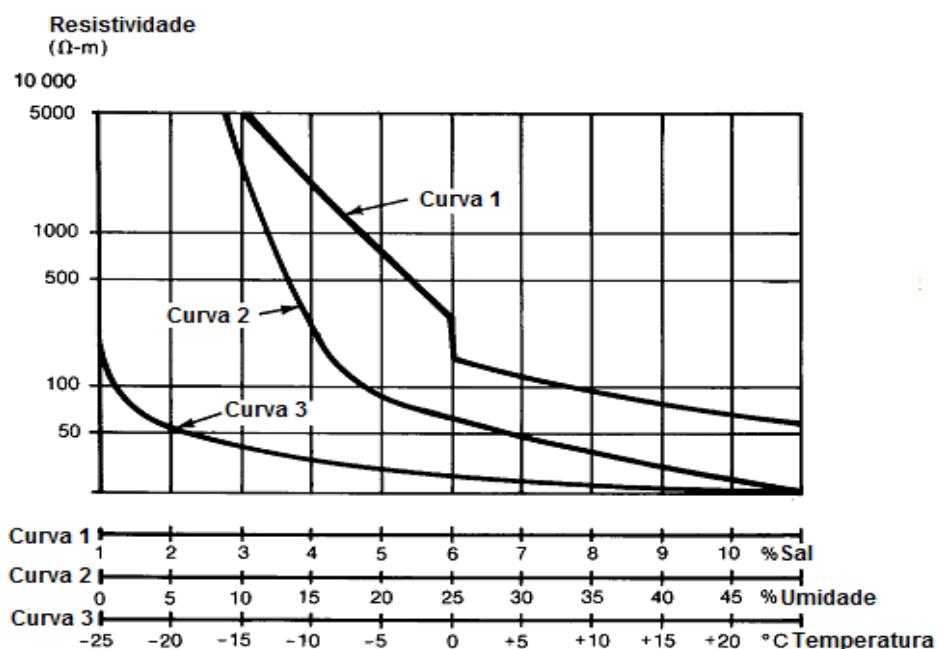


Figura 5 - Efeitos da umidade, temperatura e concentração de sal sobre a resistividade do solo.

Fonte: IEEE std 80-2000, 2000, p.50.

A composição e a quantidade de sais solúveis, ácidos ou alcalinos presentes no solo podem afetar consideravelmente a sua resistividade do solo. A curva 1 da Figura 5 ilustra o efeito típico de sal (cloreto de sódio) sobre a resistividade do solo contendo 30% de umidade por peso. A Figura 5 não deve ser utilizada para efeitos de cálculo, sendo que ela somente apresenta o comportamento global dos solos quando expostos a diferentes condições. Para determinar a resistividade real de um solo em análise, testes tais como os descritos na norma NBR 7117-1982 [2] devem ser realizados em campo.

3.6. Projeto de Malhas de Aterramento

Para o dimensionamento de uma malha, parte-se de uma configuração inicial, verificam-se os potenciais na superfície da malha, levando em consideração o pior caso de falta que pode ocorrer no sistema. Se os máximos valores dos potenciais encontrados na malha forem inferiores aos valores máximos suportáveis por um ser humano, parte-se para o detalhamento da malha. Caso contrário, modifica-se o projeto inicial da malha até se estabelecer as condições de segurança exigidas.

Para projetar adequadamente o sistema de aterramento devem-se seguir as seguintes etapas:

- a) Definir o local de aterramento;
- b) Providenciar todas as medições necessárias no local e os dados de tensão do sistema e da corrente de curto circuito;
- c) Realizar a estratificação do solo nas suas respectivas camadas;
- d) Calcular a resistividade aparente do solo para o respectivo sistema de aterramento;
- e) Dimensionar o sistema de aterramento, levando em consideração o tempo de atuação da proteção do sistema e os limites de tensão para a segurança humana, isto é, para que não ocorra a fibrilação ventricular do coração [1].

No capítulo 8, os itens acima serão abordados detalhadamente e um fluxograma, contendo as etapas do projeto do sistema de aterramento, será apresentado.

4. Medição usando o método de Wenner

4.1. Método de Wenner

Para o cálculo da resistividade do solo, optou-se pelo uso do método de Wenner (sendo este um dos mais utilizados em medições de solo em projetos de malha de terra [3]). O método consiste em se cravar quatro eletrodos alinhados e dispostos em relação ao ponto de medição e espaçados entre si de uma mesma distância, como mostrado na figura 6. Os eletrodos devem ser cravados firmemente no solo, todos a uma mesma profundidade do terreno onde a malha de aterramento será implantada.

Através dos dois eletrodos externos (eletrodos de corrente C1 e C2), faz-se circular uma corrente (I) e entre os dois eletrodos internos (P1 e P2) é medida a tensão (V). Com a relação entre a tensão e a corrente (V/I) obtém-se a resistência (R) em Ohms, a partir da qual é calculado o valor da resistividade do solo até uma determinada profundidade, que é aproximadamente igual à distância (a) entre eletrodos.

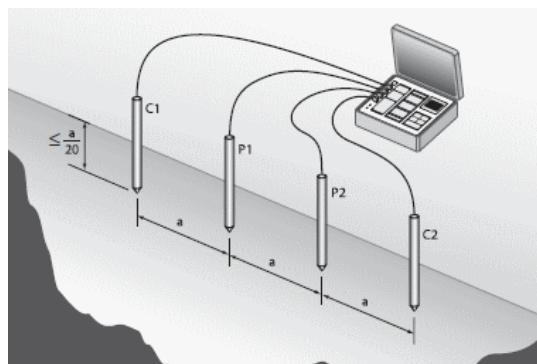
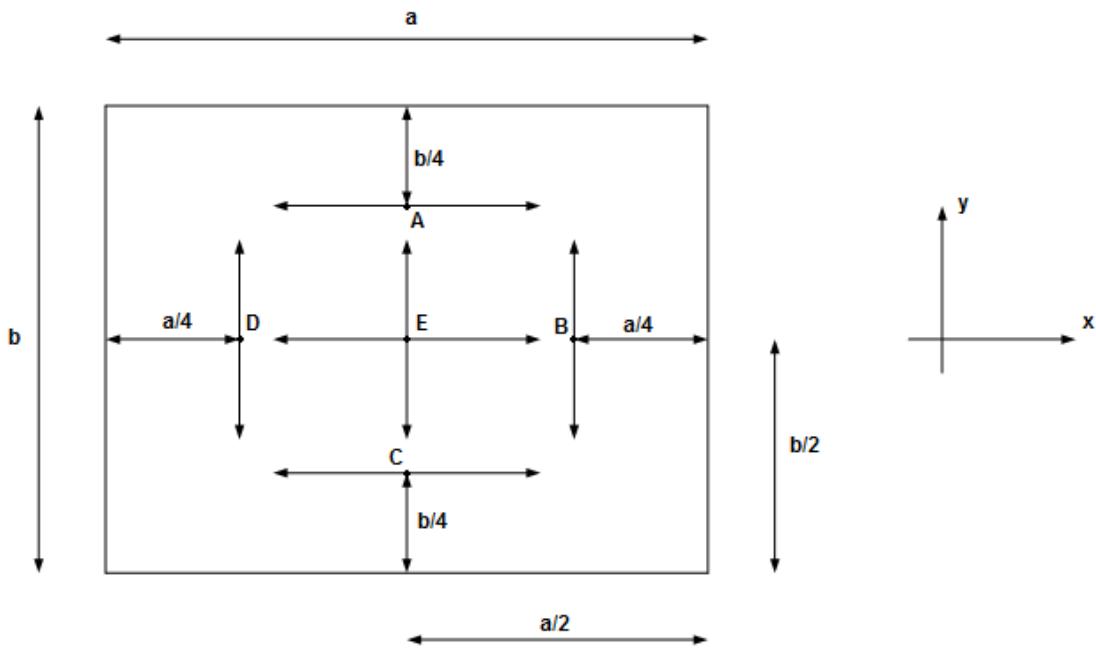


Figura 6 - Método de Wenner

O método de Wenner está de acordo com a norma NBR-7117 [2] (Medição da Resistividade do solo pelo Método dos quatro pontos).

4.2. Direções a serem medidas

A norma NBR-7117 traz orientações para as medições de resistividade do solo, sendo que as medidas feitas no terreno devem cobrir toda a área a ser abrangida pela malha de aterramento. No caso de uma área retangular de 10.000 m², recomenda-se um mínimo de cinco pontos de medição, como ilustrado na Figura 7.



Pontos de Medição: A, B, C, D e E
Direções de medição: x e y

Figura 7 - Disposição dos Pontos de Medição

Fonte: Adaptado de NBR 7117, 1981, p. 8.

Caso a geometria da área seja diferente, deve-se traçar um retângulo imaginário circunscrito a ela e alocar os cinco pontos de medição conforme representado na figura 8. Para área superior a 10.000 m², sugere-se a divisão desta em retângulos menores, procedendo da mesma maneira para cada um deles.

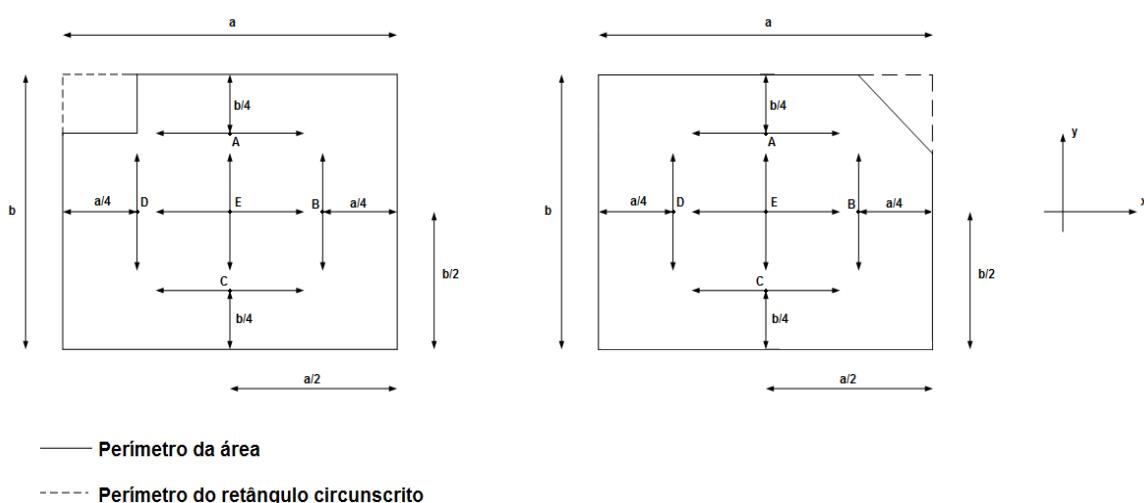


Figura 8 - Disposição dos pontos de medição em áreas com geometria diferentes de retângulo

Fonte: Adaptado de NBR 7117, 1981, pag. 9

4.3. Medições da Resistividade do Solo

Para a análise das medições feitas no solo, temos que o método de Wenner considera que mais da metade da distribuição da corrente elétrica que passa entre as hastes externas atingem uma profundidade igual à distância “a” entre as hastes, conforme figura 9.

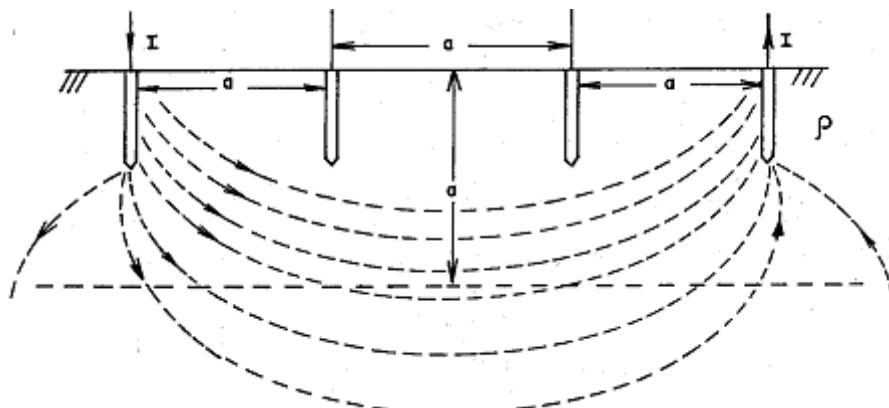


Figura 9- Medição da resistividade do solo, método de Wenner.

Fonte: Kindermann; Campagnolo, 1995, p.21

Com um maior espaçamento entre as hastes de medição, a corrente irá atingir uma profundidade maior, sendo que haverá uma parte dos valores de resistividade que deverão ser desconsiderados. Portanto, para efeito do Método de Wenner, considera-se que o valor da resistência elétrica lida no aparelho é relativo a uma profundidade “a” do solo, de acordo com as normas IEEE std 80-2000 e NBR 7117.

As hastes usadas no método devem ter aproximadamente 50 cm de comprimento com diâmetro entre 10 a 15 mm. Lembrando que diversas leituras devem ser feitas, para vários espaçamentos e com as hastes sempre alinhadas [1].

A Tabela 2 apresenta os valores padrões de “a” para os espaçamentos entre as hastes de medição, segundo a norma NBR 7117, o valor da profundidade “b” que as hastes devem ser aterradas no solo e os valores de suas respectivas resistências de acordo com a distância “a” entre as hastes. As medidas devem ser feitas de acordo com os perfis de terrenos abordados no item 4.2 deste trabalho.

Tabela 2 - Valores de Resistência do Solo

EIXO DE MEDIDA		A	B	C	D	E
a (m)	b (m)	R (omhs)				
2	0,20	-	-	-	-	-
4	0,20	-	-	-	-	-
8	0,20	-	-	-	-	-
16	0,20	-	-	-	-	-
32	0,20	-	-	-	-	-

Com os valores das resistências obtidos na tabela acima, os valores das resistividades do solo deverão ser calculados através da fórmula 4.1:

$$\rho = \frac{4\pi a R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}} \quad (4.1)$$

Onde:

ρ = Resistividade do solo [$\Omega \cdot m$];

R = Resistência do solo [Ω];

a = Distância entre os eletrodos [m];

b = Profundidade dos eletrodos [m].

Para o caso de $a > 20 \cdot b$, a equação acima pode ser simplificada e obter-se a seguinte equação:

$$\rho = 2\pi \cdot a \cdot R \quad (4.2)$$

Através das fórmulas apresentadas anteriormente, os valores de resistividade em função da distância entre eletrodos serão calculados de acordo com a tabela a seguir:

Tabela 3 - Valores de Resistividade

Eixo/ Dist.	A (ohms.m)	B (ohms.m)	C (ohms.m)	D (ohms.m)	E (ohms.m)
2	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-
16	-	-	-	-	-
32	-	-	-	-	-

4.4. Análise das Medidas

Após as medições de resistência do solo terem sido realizadas nos perfis exigidos, seus resultados serão analisados para que os mesmos possam ser avaliados em relação a sua aceitação ou expuração. Esta avaliação deverá ser feita da seguinte forma:

- 1) Deve-se calcular a média aritmética dos valores da resistividade elétrica com relação aos respectivos espaçamentos adotados, isto é:

$$\rho_m(a_j) = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \rho_i(a_j) \quad (4.3)$$

Onde:

$\rho_M(a_j)$ = Resistividade média para o respectivo espaçamento a_j

n = Número de medições efetuadas para o respectivo espaçamento a_j

$\rho_i(a_j)$ = Valor da i -ésima medição da resistividade com o espaçamento a_j

- 2) Calcular o desvio de cada medida em relação ao valor de média calculado, como segue abaixo:

$$|\rho_i(a_j) - \rho_m(a_j)| \quad (4.4)$$

Observação (a): Os valores de resistividade que possuírem um desvio maior que 50% em relação à média devem ser expurgados, isto é:

$$\frac{|\rho_i(a_j) - \rho_m(a_j)|}{\rho_m(a_j)} \cdot 100 \geq 50\% \quad (4.5)$$

Observação (b): Os valores de resistividade que possuírem um desvio menor que 50% em relação à média serão tomados como representativos.

Observação (c): Caso seja observado um acentuado número de medidas com desvios acima de 50%, deve-se proceder com novas medições na respectiva região. Se os desvios ocorrerem novamente, então a região em questão será considerada como independente para o efeito da modelagem.

3) Então, com as resistividades médias do solo de acordo com seus respectivos espaçamentos, podemos traçar a curva $\rho \times a$ para obter o modelo equivalente de solo estratificado, assunto este, que será abordado no capítulo seguinte.

4.5. Exemplo de Medição do Solo

Os valores da resistência do solo, em função da distância entre eletrodos e conforme perfil da figura 8, estão mostrados na tabela 4:

Tabela 4 - Medições da Resistência dos Perfis do Solo

EIXO DE MEDAÇÃO		A	B	C	D	E
a (m)	b (m)	R (ohms)				
2	0,20	14,79	16,17	6,81	15,73	9,23
4	0,20	8,29	5,89	4,22	5,74	5,45
8	0,20	2,60	2,34	2,61	2,38	2,77
16	0,20	0,92	1,00	1,17	0,79	1,23
32	0,20	---	---	---	0,55	0,59

Através da equação (4.2), os valores de resistividade foram calculados, em função da distância entre eletrodos e os mesmos seguem na tabela a seguir:

Tabela 5 - Valores de Resistividade

Eixo/ Dist.	A (ohms.m)	B (ohms.m)	C (ohms.m)	D (ohms.m)	E (ohms.m)
2	185,76	203,10	85,53	197,57	115,93
4	208,24	147,96	106,01	144,19	136,90
8	130,62	117,56	131,13	119,57	139,16
16	92,44	100,48	117,56	79,38	123,59
32	-	-	-	96,01	103,99

De forma a avaliar se todos os dados de resistividade podem ser considerados, foram calculados os desvios em relação à média, conforme tabela 6:

Tabela 6 - Desvios em relação à média

Eixo/ Dist.	A (%)	B (%)	C (%)	D (%)	E (%)
2	17,89	28,89	-45,72	25,38	-26,43
4	40,08	-0,47	-28,69	-3,01	-7,91
8	2,36	-7,87	2,76	-6,30	9,06
16	-9,98	-2,15	14,48	-22,70	20,35
32	-	-	-	-3,51	3,51

Observa-se que todos os valores contêm desvios menores que 50%, e serão utilizados para a obtenção das resistividades médias expostas na tabela abaixo:

Tabela 7 - Valores Médios da Resistividade

Distância dos eletrodos	Média (ohms.m)
2	157,6
4	148,7
8	127,6
16	102,7
32	99,5

Os valores da tabela acima serão usados para obtenção de um modelo equivalente de solo. Abaixo encontra-se o gráfico característico de resistividade do solo e os valores do modelo equivalente de solo estratificado em duas camadas, obtido através de um software, usando os dados da tabela 7.

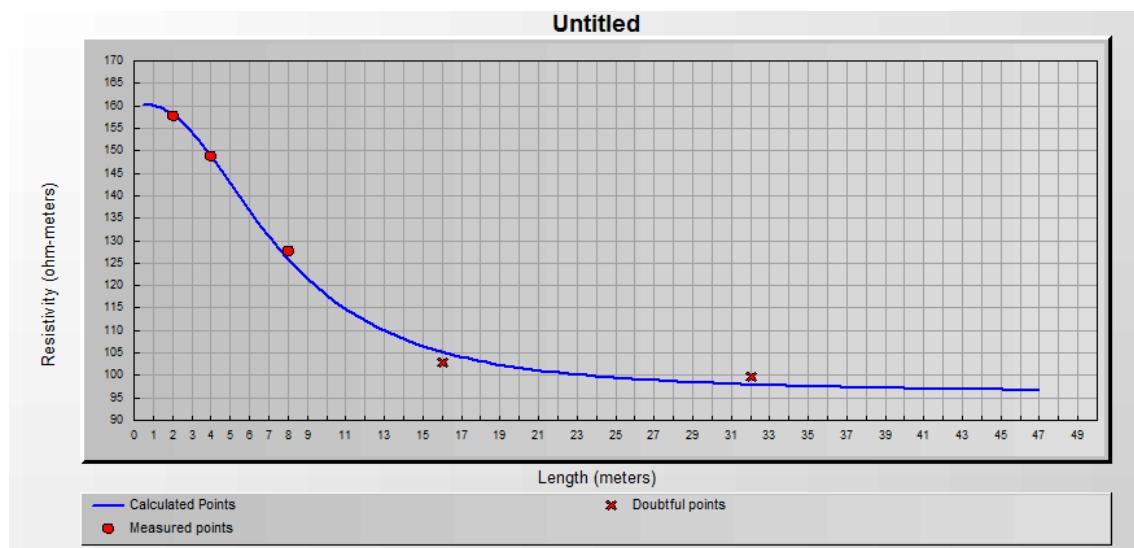


Figura 10 - Gráfico do valor da resistividade do solo de acordo com sua profundidade

$$\text{Altura da } 1^{\circ} \text{ camada, } h = 4,47 \text{ m}$$

$$\text{Resistividade da } 1^{\circ} \text{ camada, } \rho_1 = 160,34 \text{ } \Omega\text{-m}$$

$$\text{Resistividade da } 2^{\circ} \text{ camada, } \rho_2 = 95,7 \text{ } \Omega\text{-m}$$

4.6. Cuidados na Medição

Durante a medição devem ser observados os itens abaixo:

- As hastes devem estar alinhadas;
- As hastes devem estar igualmente espaçadas;
- As hastes devem estar cravadas no solo a uma mesma profundidade (recomenda-se 20 a 30 cm);
- O aparelho deve estar posicionado simetricamente entre as hastes
- As hastes devem estar bem limpas, principalmente isentas de óxidos e gorduras para possibilitar bom contato com o solo;
- A condição do solo (seco, úmido, etc) durante a medição deverá ser anotada;
- Não devem ser feitas medições sob condições atmosféricas adversas, tendo-se em vista a possibilidade de ocorrências de raios;
- Deve-se utilizar calçados e luvas de isolação apropriada para executar as medições;
- Verificar o estado do aparelho de medição, inclusive a carga de bateria.

5. Estratificação do Solo

5.1. Introdução

Para simplificação dos cálculos dos itens fundamentais do projeto, o solo, no qual as hastes de aterramento e condutores da malha ficarão aterrados, será estratificado e aproximado para um modelo equivalente de uma ou duas camadas. Tanto para os casos dos solos homogêneos como para os estratificados em mais de uma camada, temos que os valores da resistência da malha e dos potenciais que surgem no terreno, serão proporcionais a sua resistividade.

É importante destacar que há casos onde os solos não possuem comportamento homogêneo de resistividade e, devido a variação deste valor em sua configuração, ele deverá ser aproximado para um modelo equivalente. Para os casos de solos heterogêneos, o terreno irá apresentar variações de resistividade com relação a sua profundidade, sendo que também há casos onde ocorrem variações horizontais deste parâmetro.

Para auxiliar nos cálculos dos projetos de malha de terra foram desenvolvidos modelos equivalentes de representação dos solos. Em situações práticas, estes terrenos podem ser apresentados por diversas camadas de espessura definida, cada qual com valor específico de resistividade, sendo que neste capítulo serão apresentados os modelos mais usados em projeto de malha, que são o modelo de solo homogêneo e o heterogêneo, estratificado em duas camadas.

Para a medição do terreno será usado o método de Wenner (visto no capítulo anterior) e, com os resultados obtidos nas medições, serão calculados os modelos de estratificação do solo com um ou dois layers, caracterizados por valores definidos de resistividade e da altura da primeira camada. Modelos contendo várias camadas são muito complexos de serem definidos sendo que, na maioria dos casos de análises, os modelos de até duas camadas mostram-se adequados para maior parte dos casos encontrados. [5]

5.2. Solo Homogêneo

Com os valores das resistências já obtidos através do método de Wenner, calculam-se as resistividades do solo, de acordo com a sua profundidade. Com isso, faz-se a média dos valores que correspondem a uma mesma profundidade e todos os valores são comparados entre si. Se os resultados destas medições tiverem variações de até 30%

entre os valores médios referentes a mesma profundidade, o solo é classificado como sendo homogêneo [6] e o valor da resistividade do terreno será a média dos valores médios obtidos (ρ_{aM}). A figura 11 mostra um modelo equivalente de solo homogêneo, no qual somente o valor da resistividade do solo é calculado.

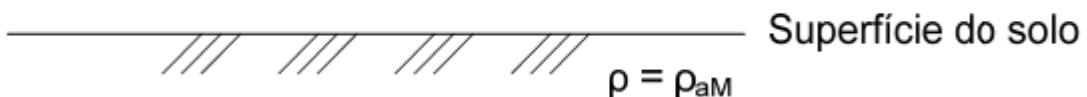


Figura 11 – Modelo de Solo Uniforme

5.3. Solo Estratificado em 2 Camadas Horizontais

Para os casos onde os valores das resistividades médias tenham entre si uma variação superior a 30% e os gráficos de $\rho \times a$, obtidos através dos dados da medição de Wenner tenham comportamento semelhante aos gráficos da figura 12, será usado o modelo equivalente de solo estratificado em duas camadas.

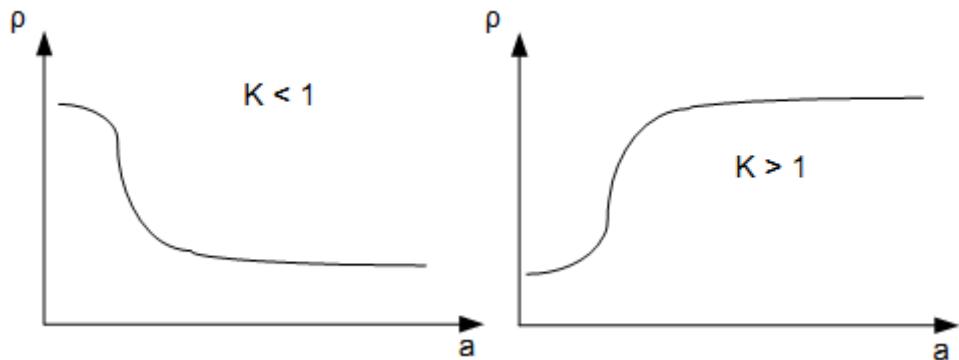


Figura 12 - Estratificação do solo em duas camadas

Os parâmetros ρ_1 e ρ_2 são obtidos por inspeção do gráfico de $\rho \times a$ sendo que, a altura h da primeira camada do solo é obtida através do Método gráfico de Sunde. Abaixo seguem os procedimentos para o cálculo deste modelo.

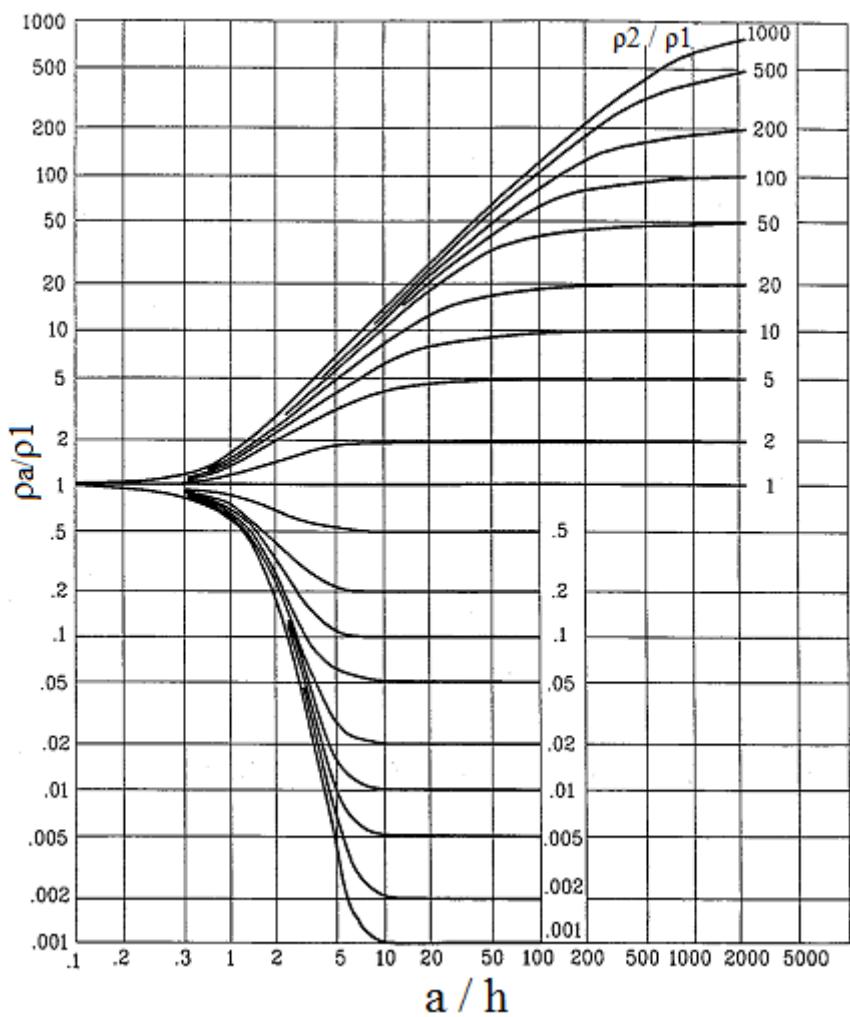


Figura 13 - Método Gráfico de Sunde

Fonte: IEEE std 80-2000, 2000, p.59.

- Construir o gráfico dos espaçamentos das hastes de medição versus resistividade média aparente ($a \times \rho_a$). Estes dados são obtidos pelos cálculos mostrados no item 4.4
- Estimar ρ_1 e ρ_2 do gráfico construído no item a). Sendo que, o valor de ρ_a correspondente ao menor espaçamento entre as hastes de medição, fica determinado como o valor de ρ_1 e, para o maior espaçamento entre elas, fica determinado o valor de ρ_2 . Caso o campo de dados seja insuficiente, é necessário estender a resistividade aparente do gráfico até ambas as extremidades, para que seja possível obter estes valores extremos de resistividade. [3]
- Determinar ρ_2 / ρ_1 e selecionar a curva no gráfico de Sunde da figura 13, ou interpolar e desenhar uma nova curva no gráfico.

- d) Selecionar o valor no eixo y de ρ_a / ρ_1 com a região escolhida da respectiva curva ρ_2 / ρ_1 da figura 13.
- e) Obter o correspondente valor de a/h no eixo x;
- f) Calcular o valor de ρ_a multiplicando o valor selecionado, ρ_a / ρ_1 no item d), por ρ_1 .
- g) Obter o correspondente valor do espaçamento da haste de medição, referente ao valor da resistividade aparente encontrado no gráfico do item a).
- f) Calcular h , profundidade da 1º camada, usando o valor apropriado do distanciamento da haste de medição (a).

Com isso obtem-se o modelo de solo considerado na figura 14:

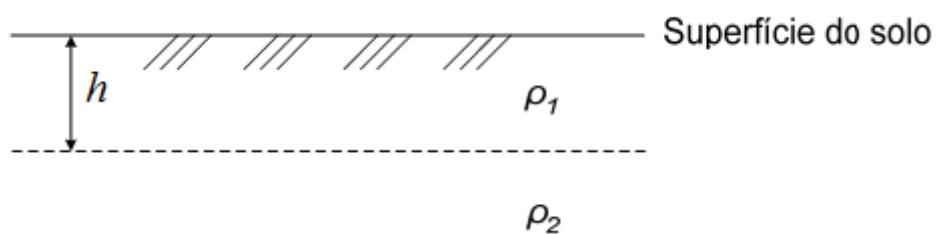


Figura 14 – Modelo de Duas Camadas

O método supracitado mostra uma maneira prática e aproximada para o cálculo do modelo equivalente do terreno estratificado em duas camadas. Tem-se que umas das grandes dificuldades para o dimensionamento do sistema de aterramento através de fórmulas simplificadas é a obtenção do modelo equivalente de solo, sendo que o cálculo deste com o auxílio de um software de malhas de aterramento poderá melhorar o nível de precisão do projeto.

6. Fatores de segurança para dimensionamento do projeto

6.1. Importância da rapidez na eliminação da falta

Na ocorrência de uma falta, a rapidez da eliminação desta ao solo é vantajosa por duas razões:

- a) A probabilidade de uma pessoa estar exposta ao choque é reduzida devido ao baixo tempo necessário para a eliminação da falta, em contraste com situações na qual a corrente de falta possa persistir por vários minutos ou até possivelmente por horas.
- b) Alguns testes e experiências mostram que as chances de lesões graves ou morte são reduzidas significativamente, mesmo uma pessoa estando sujeita a altos níveis de tensões, se o tempo de duração da corrente que passa através dela for o menor possível. [7]

O valor da corrente permitida deve, portanto, ser baseada no tempo máximo de atuação dos dispositivos de proteção primária ou da proteção de retaguarda. Uma situação considerada ideal seria usando o tempo de atuação primaria por causa da baixa probabilidade de uma possível má atuação do relé combinado a outros fatores adversos necessários para que ocorra um acidente. Mas, será mais conservador escolher o tempo de atuação do relé de retaguarda, pois este assegura uma maior margem de segurança.

Outra referência pesquisada para que sejam utilizados tempos de atuação dos disjuntores menores ou iguais a 0,5 s são as pesquisas feitas por Biegelmeier e Lee [8]. Suas pesquisas procuraram evidenciar que o coração humano torna-se crescentemente mais sensível a vibrilação ventricular quando sua exposição a correntes elétricas ocorrerem em grandes períodos. Mas, para tempos de exposição do coração as correntes elétricas entre 0,06 à 0,3s, as chances de evitar graves lesões são maiores.

Na realidade, altos gradientes de potenciais originados de faltas elétricas são geralmente raros, e casos em que pessoas ficam expostas a choques elétricos provenientes de altos gradientes de potenciais são ainda menos frequentes. Adicionalmente, ambos os eventos citados anteriormente são, na maioria dos casos, de curta duração. Portanto, não seriam adequados projetos feitos para choques elétricos que não causassem riscos a segurança humana, isto é, para correntes elétricas abaixo do limiar de fibrilação ventricular [1].

6.2. Valor máximo da corrente tolerável

Charles Dalziel [9] concluiu, após pesquisa, que 99,5% das pessoas com peso de 50kg ou mais podem suportar, sem a ocorrência de fibrilação ventricular, a corrente elétrica determinada pela expressão:

$$I_{\text{choque}} = \frac{0,116}{\sqrt{t}} \quad (6.1)$$

Para pessoas acima de 70 kg, as mesmas podem aguentar a corrente elétrica determinada pela expressão:

$$I_{\text{choque}} = \frac{0,157}{\sqrt{t}} \quad (6.2)$$

Sendo:

$0,03 \leq t \leq 3\text{s}$, onde t = tempo da duração do choque.

6.3. Resistência do corpo humano

Para corrente contínua ou alternada com frequência em 50 ou 60 Hz, o corpo humano pode ser aproximado para uma resistência R , quando da ocorrência de um choque elétrico, o caminho que a corrente irá percorrer geralmente é considerado partindo de uma mão para ambos os pés ou de um dos pés para o outro. Segundo Dalziel [9], a resistência interna do corpo humano é aproximadamente 300Ω , porém valores de resistência do corpo incluindo a pele podem variar de 500Ω até 3000Ω . Ressaltando que, o valor da resistência do corpo humano pode sofrer diminuição por danos ou perfuração da pele no ponto de contato.

Dalziel conduziu vários testes usando água com sal em mãos e pés molhados para determinar uma corrente que não cause sérios danos as pessoas. Os valores obtidos destas experiências usando corrente alternadas em homens foram os seguintes: a corrente utilizada foi de 9 mA; a tensão correspondente foi de 21 V passando de uma extremidade da mão a outra e 10,2V passando de uma mão até um pé. Consequentemente, a resistência calculada para uma corrente passando de uma extremidade das mãos a outra é igual a $21,0/0,009$ ou 2330Ω e a resistência calculada

para uma corrente percorrendo uma mão até um dos pés é igual a 10,2/0,009 ou 1130 Ω , baseado neste experimento. Portanto, de acordo com as normas do IEEE std80-2000, as seguintes resistências, em série com a resistência do corpo humano, são assumidas como:

- a) Os contatos das mãos e pés são assumidos como resistências de valores iguais a zero;
- b) Resistências de luvas e sapatos são assumidas como sendo iguais a zero.

O valor de 1000 Ω , o qual representa a resistência do corpo humano considerando a resistência a partir de uma mão aos pés e também a resistência a partir de uma mão até a outra, ou de um pé até o outro pé, será usado para os cálculos deste trabalho, de acordo com as recomendações da norma IEEE std 80-2000.

Portanto,

$$R_{ch} = 1000 \Omega \quad (6.3)$$

Com,

R_{ch} - resistência do corpo humano;

6.4. Critérios para Potenciais de Passo e de Toque:

A segurança de uma pessoa depende do fato de uma quantidade crítica de eletricidade ser absorvida antes que a falta seja eliminada e o sistema seja desenergizado. Sendo assim, aliado à rápida eliminação da falta elétrica pelo sistema de proteção da subestação, a malha de aterramento deve atender certos critérios para garantir a segurança das pessoas que trabalham em sua operação e manutenção.

Os valores que serão calculados e usados como base para o dimensionamento da malha de aterramento são as tensões de passo e de toque, que surgem na superfície da subestação quando houver uma falta elétrica no sistema de transmissão de energia.

A malha será projetada com o objetivo de evitar que os níveis de tensão dentro do perímetro da malha e ao redor da mesma ultrapassem os níveis de tensão de segurança adotados pelas normas do IEEE std 80-2000.

6.4.1. Tensão de Passo

É definida como sendo a máxima diferença de potencial que irá surgir entre os pés de uma pessoa (arbitra-se uma distância de 1 m entre os mesmos), eventualmente presente na região do aterramento, durante o caso de uma falta.

Pela Figura 15, temos a seguinte fórmula para a tensão de passo:

$$V_{passo} = (R_{ch} + 2R_c) \times I_{choque} \quad (6.4)$$

Onde,

R_{ch} = resistência do corpo humano = 1000Ω ;

R_c = $3\rho_s$ (resistividade superficial do solo) de acordo com recomendações da norma IEEE Std. 80-2000

I_{choque} = Corrente de choque atravessa o corpo humano

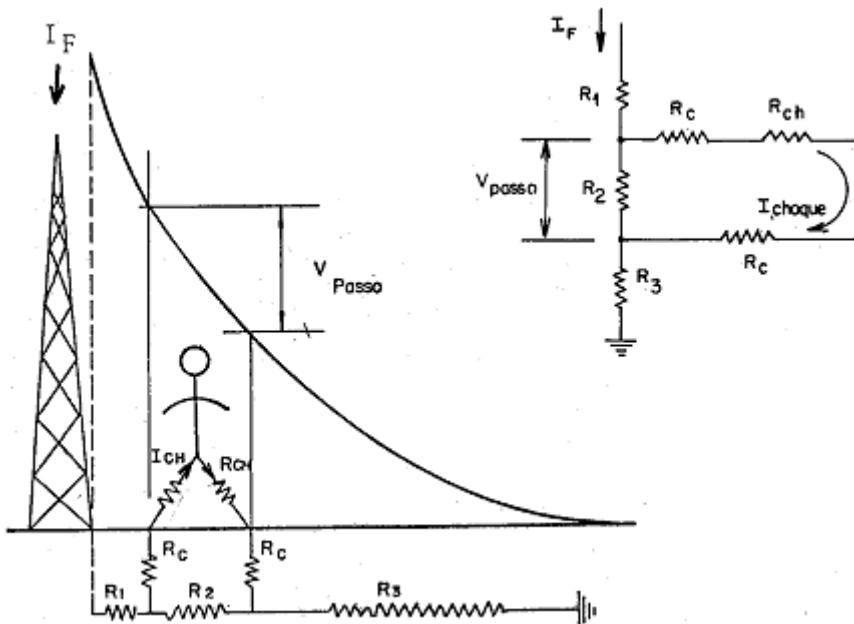


Figura 15 - Tensão de Passo

Fonte: Kindermann; Campagnolo, 1995, p. 131.

Com $R_c = 3\rho_s$, tem-se:

$$V_{passo} = (1000 + 6\rho_s) \cdot I_{choque} \quad (6.5)$$

O potencial de passo máximo permitível, para que não ocorra a fibrilação ventricular para uma pessoa acima de 70kg, é obtido segundo a equação 6.2 da corrente de Dalziel. Com isso temos que:

$$V_{passo MAX} = (1000 + 6 \cdot \rho_s) \times \frac{0,157}{\sqrt{t_s}} \quad (6.6)$$

Deve-se acrescentar ainda para o potencial de passo máximo admissível a correção (C_s) devido à adição da camada de brita na superfície da subestação. Com isso, tem-se:

$$V_{passo MAX} = (1000 + 6 \cdot C_s \cdot \rho_s) \times \frac{0,157}{\sqrt{t_s}} \quad (6.7)$$

6.4.2. Tensão de Toque

É definida com sendo a máxima diferença de potencial entre mão e pés, a que ficaria submetida uma pessoa, eventualmente presente na região de aterramento, que tivesse contato com uma parte metálica ligada aos eletrodos de aterramento, durante o fluxo de corrente pelo aterramento (consideram-se ambos os pés afastados 1 m da estrutura tocada).

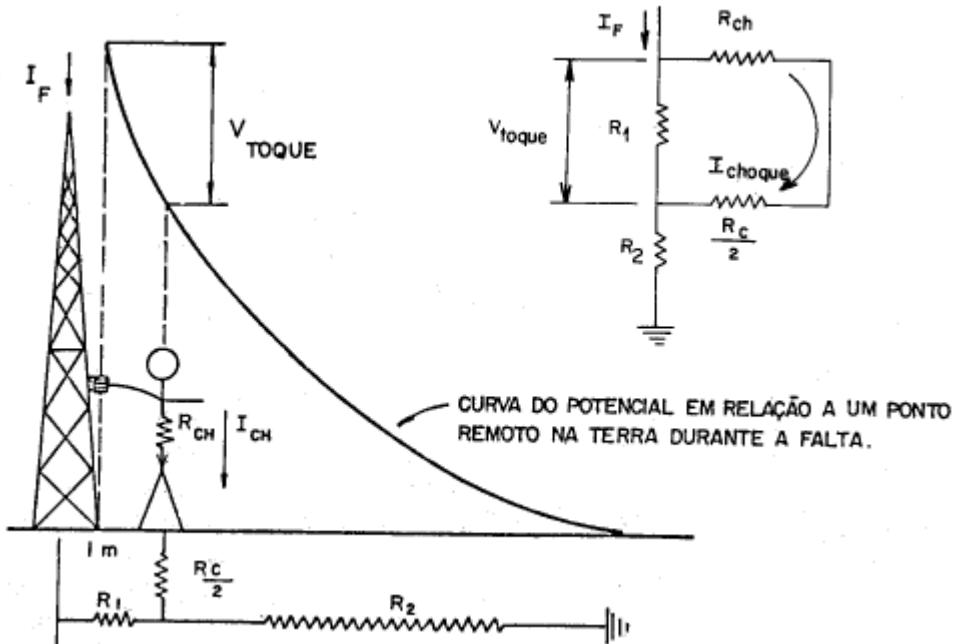


Figura 16 - Tensão de toque

Fonte: Kindermann; Campagnolo, 1995, p. 128.

A máxima tensão de segurança tolerada para qualquer acidente não deve exceder os limites que seguem.

$$V_{toque} = \left(R_{ch} + \frac{R_c}{2} \right) \times I_{choque} \quad (6.8)$$

O potencial de toque máximo permitido entre a mão e o pé, para que não ocorra a fibrilação ventricular, é obtido segundo a equação 6.2 da corrente de Dalziel.

Com isso temos que:

$$V_{toque_{MAX}} = (1000 + 1,5 \cdot \rho_s) \times \frac{0,157}{\sqrt{t_s}} \quad (6.9)$$

Seguindo o exemplo do caso anterior, deve-se acrescentar o fator de correção (C_s), devido à adição de brita na superfície da subestação.

Desta forma, tem-se:

$$V_{toque_{MAX}} = (1000 + 1,5 \cdot C_s \cdot \rho_s) \times \frac{0,157}{\sqrt{t_s}} \quad (6.10)$$

Será adotado $t_s = 0,5$ s (tempo de atuação da proteção de retaguarda), conforme norma IEEE std 80-2000.

6.5. Efeito da Frequência

As frequências de correntes mais perigosas ao corpo humano encontram-se na faixa entre 20 e 100 Hz [10]. Correntes contínuas são menos propensas a causarem fibrilação ventricular, a não ser se aplicadas durante um instante curto, específico e vulnerável ao ciclo cardíaco. Já correntes de frequência muito elevadas tendem a circular pela parte externa do corpo, devido ao efeito pelicular, tendo como principal consequência graves queimaduras na pele.

6.6. Efeito da camada de brita na superfície

Para aumentar o nível de isolamento na superfície do solo, uma camada de 8 a 15 cm de material de alta resistividade, tal como brita, geralmente é espalhado sobre a superfície

da terra, acima da malha de aterramento, para aumentar a resistência de contato entre o solo e os pés das pessoas que estiverem no terreno da subestação.

Caso o solo que estiver abaixo da camada do material isolante possuir uma resistividade menor do que o material de superfície, apenas uma parcela da corrente de malha irá atingir a superfície da fina camada material isolante e o potencial de superfície será menor quando comparado a um sistema de aterramento sem a camada deste material. No caso de uma falta, a corrente que irá passar pelo corpo será reduzida consideravelmente com a adição do material de superfície, devido à alta resistência de contato entre a terra e os pés da pessoa.

O inverso deste princípio também verdadeiro. Se o solo que estiver abaixo da camada de brita possuir uma resistividade mais elevada do que o material de superfície, uma porção substancial da corrente da malha de aterramento irá atingir a camada superficial do solo. Portanto, ao contrário do caso descrito no parágrafo anterior, os potenciais de superfície irão ser alterados substancialmente, devido à concentração de corrente perto da superfície. Sendo assim, a resistividade efetiva do material de superfície não deve ser melhorada sem levar em conta a resistividade dos solos da subestação. [3]

O fator “ C_s ”, nos casos em que for adicionada na superfície do sistema de aterramento uma fina camada de material de alta resistividade, será considerado nos cálculos de tensão de toque e tensão de passo. Segue a expressão deste fator,

$$C_s = 1 - \frac{0,09(1 - \frac{\rho_a}{\rho_s})}{2h_s + 0,09} \quad (6.11)$$

Onde,

C_s - Fator de correção de potenciais devido à adição da camada de brita;

h_s - Espessura da camada de brita;

ρ_a - resistividade aparente do solo;

ρ_s - resistividade da camada de brita (ou do material adicionado à superfície do solo).

6.7. Fator de Decremento

É um fator de ajuste usado junto com o parâmetro de corrente de falta fase-terra simétrica em cálculos para segurança em sistemas de aterramento. Ele determina o valor RMS equivalente da onda de corrente assimétrica para o tempo de duração da

falta (t), contribuindo para o efeito do dc offset inicial e sua atenuação durante a falta. A expressão do fator de decremento é:

$$D_f = \sqrt{1 + \frac{T_a}{t} \cdot (1 - e^{\frac{-T_a}{t_f}})} \quad (6.12)$$

Onde,

D_f - Fator de decremento para determinação do I_G ;

t - Duração da corrente de falta para determinação do fator de decremento [s];

T_a - Constante de tempo do sistema

Sendo que o período de tempo T_a é calculado pela expressão,

$$T_a = \frac{X}{120\pi f R} \quad (6.13)$$

Com isso temos que,

$$I_f = D_f \cdot I_{cc1\emptyset T} \quad (6.14)$$

7. Faltas elétricas e parâmetros das linhas de transmissão

7.1. Introdução

Este capítulo irá tratar dos caminhos das correntes que surgem nas faltas elétricas, irão percorrer na ocorrência de faltas fase-terra ou fase-fase-terra e a influência destas anomalias, que ocorrem no sistema de transmissão de energia, com relação ao dimensionamento da malha de aterramento. Outro assunto que também será abordado diz respeito às parcelas da corrente de falta elétrica, que irão contribuir para o aparecimento dos potenciais perigosos no terreno da subestação. Temos que, para os casos de falta fase-terra e fase-fase-terra, os fatores de corrente de sequência negativa e positiva não contribuirão para os potenciais que aparecerão no solo da subestação, sendo que a componente de sequência zero será a parcela que irá impactar nestas situações.

Além dos temas supracitados outros dois fatores serão apresentados, que são a impedância equivalente das linhas de transmissão que chegam à subestação e a divisão do fluxo de corrente entre a malha de aterramento e o sistema de transmissão de energia (fator *split factor*).

7.2. Caminho da Corrente de Sequência Zero do Curto-Circuito

Os tipos de falta que originam correntes que irão trafegar pela malha de aterramento são:

- Faltas fase-terra;
- Faltas fase-fase-terra.

Na ocorrência destes dois tipos de faltas são geradas as correntes de sequência zero. Elas são as únicas que irão retornar à subestação, percorrendo o caminho do cabo de cobertura ou da terra, sendo que parte desta corrente retorna pelo cabo-guarda do sistema de transmissão ou pelo cabo neutro do sistema de distribuição multi-aterrado e o restante retorna pelo solo do terreno. A parcela da corrente que irá retornar pela terra está atrelada com a resistência de aterramento da subestação. A figura 14 apresenta o caminho que a corrente irá percorrer no solo, devido a uma falta no sistema. Pode-se notar que a corrente necessita de um caminho fechado para poder circular pelo sistema, de acordo com a figura 17. [1]

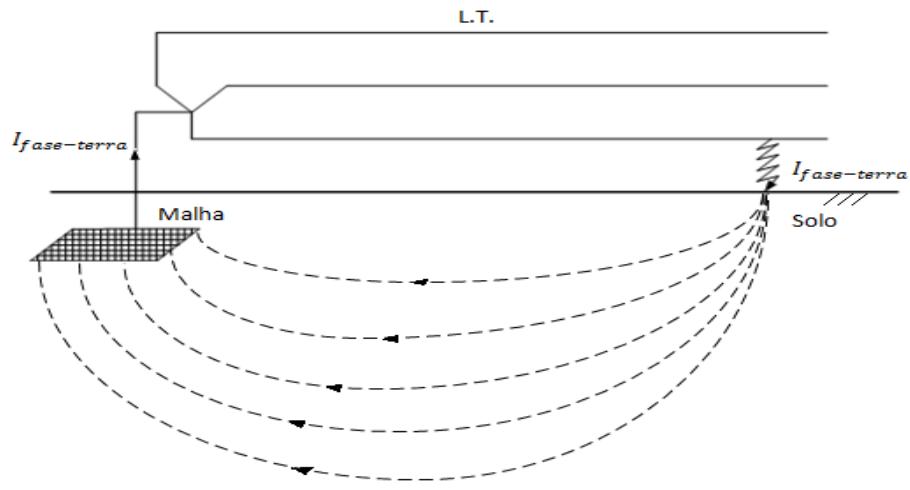


Figura 17 - Caminho da Corrente de Falta pelo solo

Fonte: adaptado de Kindermann; Campagnolo, 1995, p. 160.

Pela figura abaixo temos a representação das correntes percorrendo as três fases da linha de transmissão e seu retorno pelo cabo de neutro.

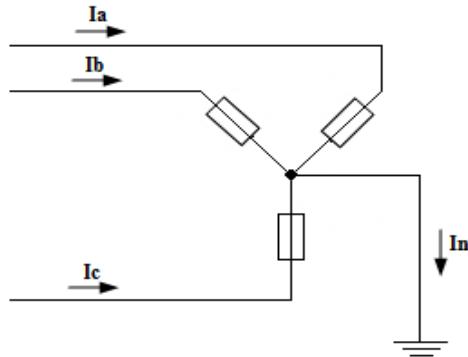


Figura 18 - Corrente de neutro

Sendo assim, pela figura 18, temos que:

$$I_n = I_a + I_b + I_c \quad (7.1)$$

Pela análise dos componentes simétricos das correntes acima (Anexo B), temos abaixo os cálculos da corrente de neutro do sistema:

$$\begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (7.2)$$

Da equação 7.2 obtemos: $I_{a0} = \frac{1}{3} \cdot (I_a + I_b + I_c)$

Portanto, $I_{a0} = \frac{1}{3} \cdot I_n$ ou seja, $I_n = 3 \cdot I_{a0}$

Sendo assim, fica demonstrado que a corrente de falta fase-terra será originada apenas pela parcela de sequência zero da corrente e a equação da corrente de falta fica definida conforme fórmula abaixo,

$$I_f = 3 \cdot I_{a0} \text{ ou } I_f = 3 \cdot I_0 \quad (7.3)$$

Observa-se que as correntes de sequência zero, nos casos de falta fase-terra, ficam em fase entre si e, portanto, geram um campo magnético que enlaça e se concatena com o cabo guarda da Linha de Transmissão. Devido a este enlace e pelo princípio da ação e reação, irá originar uma corrente induzida de retorno, conhecida como corrente auto-neutralizada. Temos que esta corrente auto-neutralizada irá retornar acompanhado o traçado da linha de transmissão, ou seja, a corrente percorre o caminho através do cabo guarda até a subestação. Além disso, temos o fato de que a terra abaixo da linha de transmissão também encontra-se em paralelo com o cabo guarda. Sendo assim, temos que o fluxo magnético originado das correntes de sequência zero também irá se concatenar com a terra abaixo da Linha de Transmissão, o que irá induzir nesta, uma corrente pela terra sob a Linha Transmissão, chamada de corrente de retorno. Esta corrente irá percorrer o caminho do solo à subestação, seguindo o traçado da Linha de Transmissão.

O restante da parcela da corrente de falta irá, então, retornar pelo solo percorrendo o menor traçado, que vai do ponto do curto-círcuito à subestação.

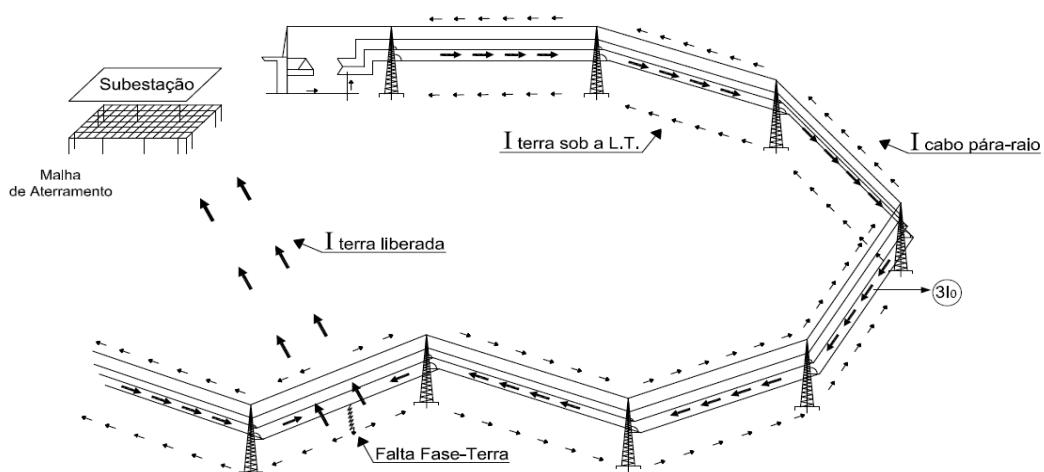


Figura 19 - Retorno da corrente de sequência zero a subestação

Pelas análises feitas acima com relação a figura 19, obtém-se a seguinte equação:

$$I_f = 3I_o = I_{Cabo\ para-raio} + I_{terra\ sob\ a\ LT} + I_{terra\ liberada} \quad (7.4)$$

Onde,

$I_{Cabo\ para-raio}$ - corrente auto-neutralizada

$I_{terra\ sob\ a\ LT}$ - enlace entre LT e terra ou corrente de retorno

$I_{terra\ liberada}$: - parcela da falta que escoa para a malha pelo menor caminho possível percorrendo o solo.

7.3. Impedância equivalente dos cabos para-raios das Linhas de Transmissão (LTs) que chegam na SE

Como descrito nos itens anteriores deste capítulo, no caso de uma falta ocorrer próxima a subestação, uma parte da corrente de falta irá ser absorvida pela malha e o restante seguirá o caminho dos cabos para-raios. Para o dimensionamento da malha de aterramento, o valor da corrente deve ser calculado e, para isso, é necessário encontrar tanto o valor da resistência da malha de aterramento, quanto o valor da resistência equivalente dos cabos para-raios.

Abaixo seguem as fórmulas utilizadas no cálculo da impedância equivalente dos cabos para-raios, que será usada para determinar a razão entre a resistência da malha de aterramando e a impedância dos cabos pára-raios (*split factor*).

7.3.1. Cálculo da Impedância Própria (Z_p), [Ω/km]

A impedância própria dos cabos para-raios será obtida pela seguinte equação, [11]

$$Z_p = (r_e + 0,0593) + j.(0,1736.\log(\frac{D_e}{RM_{Gsr}})) \quad (7.5)$$

Onde,

$$D_e = 658,368 \cdot (\frac{\rho}{f})^{\frac{1}{2}} \quad (7.6)$$

é a profundidade equivalente do condutor de retorno fictício,

sendo que,

r_e - a resistência dos cabos para-raios;

RMG_{sr} - Raio médio geométrico dos “n” cabos pára-raios

$$RMG_{sr} = \sqrt[n^2]{(RMG_{g1} \cdot RMG_{g2} \dots RMG_{gn}) \cdot (d_{g1g2} \cdot d_{g1g3} \dots d_{g1gn}) \dots (d_{gneg2} \cdot d_{gneg3} \dots d_{gngn-1})} \quad (7.7)$$

Onde,

$$Z_{op} = Z_p \cdot V\ddot{a}o_{m\'edio} \quad (7.8)$$

Com,

$V\ddot{a}o_{m\'edio}$ – vão médio das linhas de transmissão [Km];

Z_{op} - Impedância própria equivalente dos cabos-guarda nos vãos [Ω]

7.3.2. Cálculo da Impedância Mútua entre cabos para-raios e cabos fase (Z_m), [Ω/km]

A distância média geométrica entre o grupo dos cabos para-raios e o grupo dos cabos fase (m) será obtida pela seguinte expressão,

$$Z_m = 0,178 + j \cdot (0,5208 \cdot \log(\frac{De}{DMG_{fg}})) \quad (7.9)$$

Onde,

DMG_{fg} – Distância média geométrica entre os “n” cabos pára-raios e os cabos das fases:

$$DMG_{fg} = \sqrt[3n]{(d_{ag1} \cdot d_{bg1} \cdot d_{cg1}) \cdot (d_{ag2} \cdot d_{bg2} \cdot d_{cg2}) \dots (d_{agn} \cdot d_{bgn} \cdot d_{cgn})} \quad (7.10)$$

E na figura 20 seguem alguns exemplo de silhuetas de torres de transmissão e suas medidas, com a tabela 8 mostrando as distâncias entre os cabos das fases e os cabos para-raios das torres de transmissão.

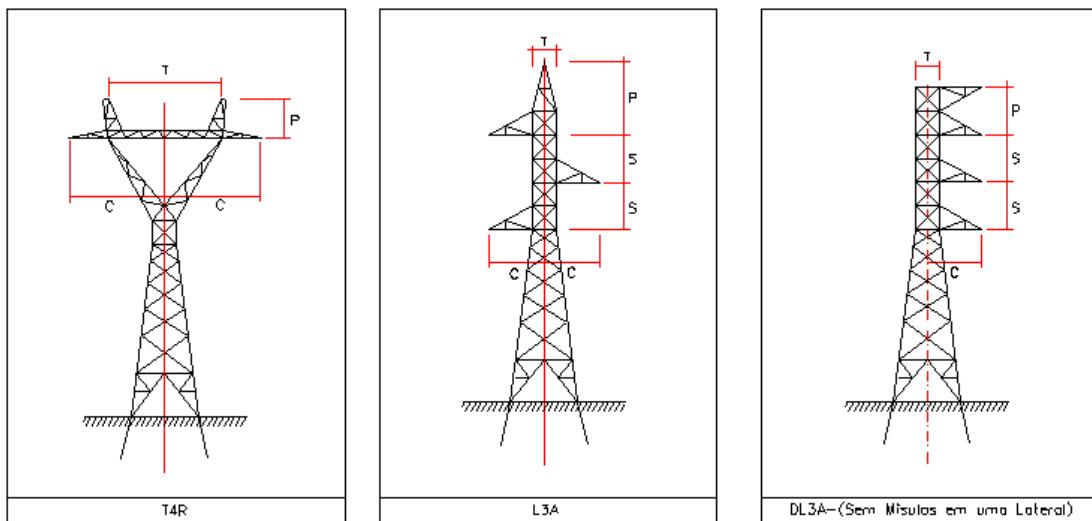


Figura 20-Exemplo de silhuetas de torres

Tabela 8 - Medidas das Silhuetas das Torres

TIPO DE ESTRUTURAS	DIMENSÕES EM METROS			
	T	P	S	C
T4R	4,40	2,20	-	3,50
L3A	1,10	4,38	1,86	2,50
DL3A	1,60	2,06	3,72	3,00

7.4. Modelos Concentrados para o circuito terra da linha de transmissão

O modelo do equivalente ladder, junto com o valor da resistência equivalente da malha de aterramento, é utilizado para calcular qual parcela da corrente que irá, no caso de uma falta fase-terra, retornar para as linhas de transmissão e qual será a parcela absorvida pela malha de aterramento. O cabo-guarda ligado à malha de aterramento será o dissipador de parte da corrente de curto-círcuito, através das torres da linha de transmissão.

7.4.1. Modelo Ladder Infinito

Para linhas com configurações onde há mais de 20 torres de transmissão (situação existente na maioria dos projetos), utiliza-se o modelo do equivalente ladder infinito. Este modelo representa a impedância equivalente dos cabos pára-raios e das torres de transmissão, que o sistema irá considerar nos casos de faltas fase-terra. Através do modelo do circuito da figura 21, podemos obter a impedância Z equivalente. [11]

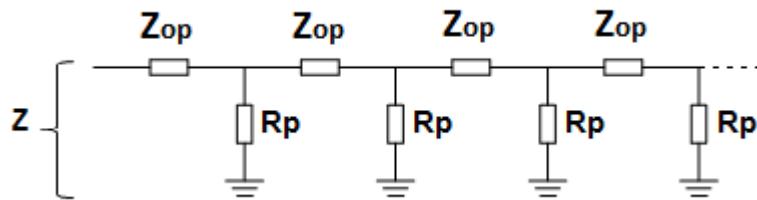


Figura 21 - Circuito equivalente para o cálculo da impedância Z do cabo pára raios

Para configuração acima, com a adição de mais uma unidade série-paralelo, representada na figura 21, temos que a impedância total Z não sofrerá alteração.

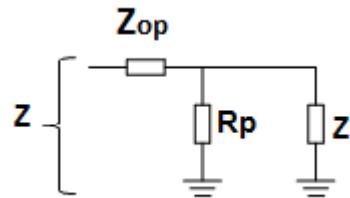


Figura 22 - Efeito da adição de uma unidade série-paralela

Desta forma temos que:

$$R_p // Z_{op} + Z_{op} = Z, \text{ ou seja, } \frac{Rp \cdot Z}{Rp + Z} + Z_{op} = Z$$

Resolvendo a equação em Z , temos na equação 7.11 o modelo ladder finito:

$$Z = \frac{Z_{op}}{2} + \sqrt{\left(\frac{Z_{op}}{2}\right)^2 + Z_{op} \cdot R_p} \quad (7.11)$$

Onde:

Z – Impedância equivalente da linha;

Z_{op} – Impedância própria equivalente do cabo-guarda nos vãos;

R_p – Resistência de pé de torre.

No caso da figura 23, onde temos a injeção de corrente no início do circuito ladder, a distribuição de corrente tem a seguinte configuração:

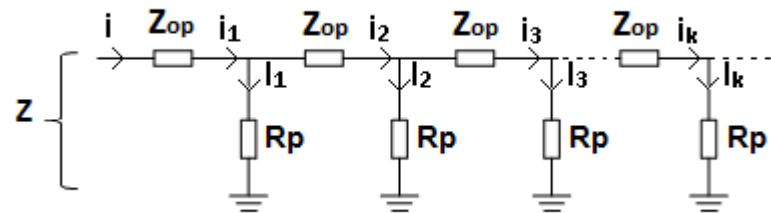


Figure 23 - Injeção de uma corrente i no circuito Ladder

Em que:

$$i_1 = i \quad (7.12)$$

$$i_2 = i_1 \cdot \frac{R_p}{R_p + Z}, \quad i_3 = i_2 \cdot \frac{R_p}{R_p + Z} \quad (7.13)$$

De forma genérica

$$I_k = i \cdot \left(\frac{R_p}{R_p + Z} \right)^{k-1} \quad (7.14)$$

Para as correntes nas torres, pela lei das correntes de kirchhoff tem-se:

$$I_k = i_k - i_{k+1} \quad (7.15)$$

7.4.2. Modelo Ladder Finito

No cálculo para a resistência equivalente, considerando menos de 20 torres de transmissão, utiliza-se o modelo do ladder finito. Considerando que as torres estão interligadas por subestação, considera-se que a última resistência do sistema será a resistência da malha de aterramento (R_M).

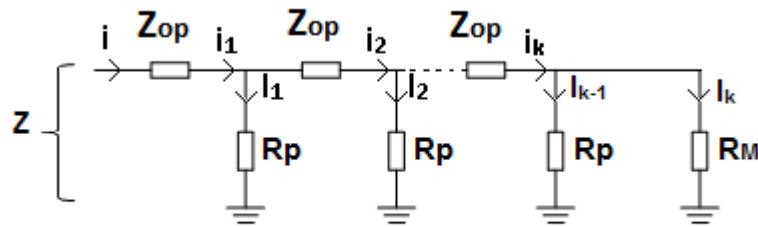


Figura 24 - Modelo equivalente para o cálculo do Ladder Finito.

Pela figura 24, considerando um modelo composto por uma torre de transmissão, obtem-se a seguinte expressão:

$$Z_1 = Z_{op} + R_p // R_M \quad (7.16)$$

Para duas torres de transmissão temos que,

$$Z_2 = Z_{op} + Z_1 // R_p \quad (7.17)$$

Para três torres de transmissão temos que,

$$Z_3 = Z_{op} + Z_2 // R_p \quad (7.18)$$

Portanto, para as situações onde $1 < n \leq 20$ iremos ter,

$$Z_n = \sum_{k=2}^n (Z_{op} + Z_{n-1} // R_p) \quad (7.19)$$

Com,

$$Z_1 = Z_{op} + R_p // R_M .$$

7.5. Fator de divisão da corrente de falta (Split Factor)

A relação entre a impedância equivalente do sistema de transmissão com a soma deste último com a resistência da malha de aterramento representa o fator de divisão de corrente de falta ou fator split factor. Ela determina qual a fração da corrente de falta que a malha de aterramento absorve [11] [13]. Este fator é dado pela expressão,

$$S_f = \frac{Z_{eq}}{Z_{eq} + R_{malha}} \quad (7.20)$$

Onde,

S_f : fator de divisão da corrente de falta;

Z : impedância equivalente do sistema de transmissão;

R_M : resistência da malha de aterramento.

Lembrando que parte da corrente de falta irá retornar pelo cabo pára-raio e a outra parcela será absorvida pela malha de aterramento, conforme descrito no item anterior.

7.6. Corrente de Malha

A corrente de malha I_M é a parcela da corrente de falta que irá ser absorvida pela malha de aterramento.

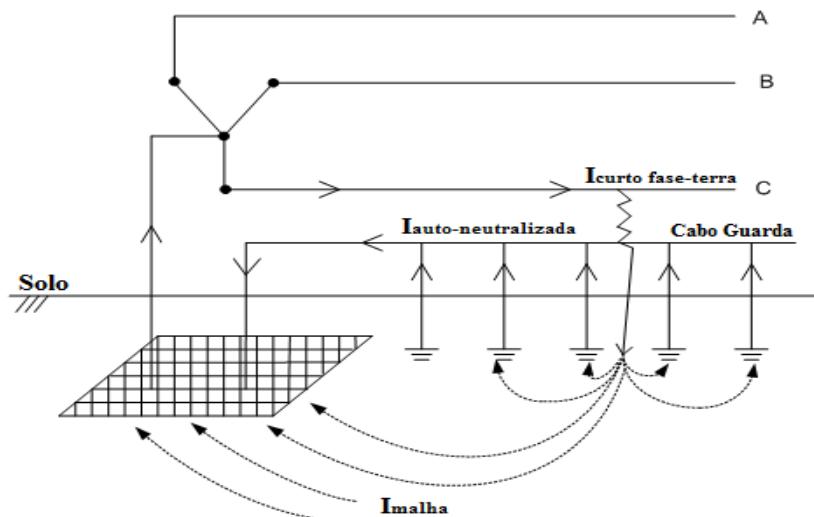


Figura 25 - Corrente de Malha

Fonte: adaptado de Kindermann; Campagnolo, 1995, p. 201.

As tensões de passo e de toque serão geradas por ela, portanto, a corrente de malha é a que deve ser considerada no cálculo do dimensionamento da malha, para que esta atenda aos requisitos de segurança humana da subestação.

Então podemos considerar a corrente da malha de aterramento como:

$$I_M = I_f \cdot \frac{Z_{eq}}{Z_{eq} + R_{malha}} \quad (7.21)$$

Onde:

I_f Correntes de curto-círcuito monofásico na barra da subestação;

Z_{eq} Impedância equivalente de todas as linhas de transmissão da subestação;

R_{malha} Resistência da malha de terra da subestação.

É importante salientar que a corrente de malha (I_M) será sempre menor que a corrente de falta ($I_f = 3I_o$) e seu valor está relacionado aos seguintes fatores:

- Geometria dos condutores da malha de aterramento;
- Configuração das linhas de transmissão conectadas a subestação;
- Resistividade do solo;
- Seção transversal dos condutores fase e cabo guarda;
- Resistividade dos condutores envolvidos;

Sendo que, o valor da corrente de malha pode variar numa faixa larga [1], como indica, por exemplo, a expressão abaixo:

$$I_M = \begin{cases} 0,1 \\ \text{à} \\ 0,64 \end{cases} I_{falta} \quad (7.22)$$

Vale destacar que há projetos onde as correntes de neutro dos transformadores e as auto-neutralizadas são levadas em consideração, sendo que eles utilizam uma análise mais detalhada da configuração do sistema da subestação além de usar ferramentas computacionais para o cálculo da corrente de neutro dos transformadores. Portanto, levando em consideração as duas correntes supracitadas, temos que o valor calculado da corrente de malha (I_M) será menor. Com isso, torna-se viável o dimensionamento de uma malha que utilize menos material em sua fabricação, levando em consideração que ela terá como parâmetro um valor menor de corrente de malha.

Como o objetivo desta parte do trabalho é o dimensionamento da malha de terra através de fórmulas simplificadas, a equação 7.19 será a utilizada no cálculo da corrente

de malha, sendo que ela garante os requisitos de segurança determinados no projeto, tendo em vista que o projeto fará uso de uma quantidade maior de material.

Segue abaixo a fórmula com a corrente auto-neutralizada e a corrente de retorno do trafo (respectivamente I_R e I_N).

A corrente auto-neutralizada pode ser facilmente obtida pela expressão abaixo:

$$I_R = \left(\frac{Z_m}{Z_p} \right) \cdot I_f \quad (7.23)$$

Então podemos considerar para a corrente da malha a seguinte fórmula:

$$I_M = (I_f - I_R - I_N) \cdot \frac{Z_{eq}}{Z_{eq} + R_M} \quad (7.24)$$

Onde:

I_f Correntes de curto-circuito monofásico na barra da subestação;

I_R Componente autoneutralizada total da corrente nos cabos pára-raios;

I_N Soma das correntes de neutro dos transformadores da subestação;

Z_{eq} Impedância equivalente de todas as linhas de transmissão da subestação;

R_M Resistência da malha de terra da subestação.

8. Malha de Aterramento

8.1. Introdução

Nesta parte do trabalho iremos apresentar os passos necessários para o dimensionamento de malhas de aterramento através de fórmulas simplificadas, ao invés de utilizar longas análises envolvendo o método das imagens [3]. Para início do dimensionamento da malha será necessário obter alguns dados da subestação, tais como as dimensões da área de seu terreno e as características do solo onde a malha será instalada. Possuindo estas informações, a resistividade do terreno deverá ser medida através do método de Wenner e, com isso, através de métodos gráficos o modelo equivalente do solo, que será usado no cálculo dos dimensionamentos posteriores, será obtido. Em situações reais, há alguns dados da rede básica que deverão ser obtidos através de informações da ONS (software ANAFAS-CEPEL), tais como a estimativa da máxima corrente de falta do sistema e os parâmetros das linhas de transmissão, mas neste trabalho iremos usar valores simbólicos para exemplificar alguns casos. Já para o tempo da atuação da proteção de retaguarda dos relés (t_s) iremos utilizar o tempo estabelecido pela norma do IEEE std 80-2000, a qual também será usada para o cálculo do tamanho dos cabos condutores da malha. Em paralelo a esses cálculos, os máximos potenciais de passo e toque serão determinados para atender as condições de segurança humana, além de garantir a integridade dos equipamentos de dentro da subestação. Além de todos os fatores citados anteriormente para estimativas iniciais da malha, também deverão ser considerados os espaçamentos entre os condutores e a localização das hastes de aterramento, os quais serão dimensionados de acordo com a corrente I_M (corrente de malha) e a área da subestação a ser protegida. Sendo assim, com todos os procedimentos supracitados e com malha atendendo a todos os critérios de segurança estabelecidos, já podemos começar a fase de otimização do projeto. Mas, caso alguma critério não seja atendido, a malha deverá ser melhorada e todos os cálculos deverão ser refeitos até satisfazerem integralmente os critérios de segurança da subestação. Os itens de dimensionamento da malha serão abordados a seguir.

8.2. Itens necessários ao projeto

Para iniciar o dimensionamento da malha de aterramento da subestação, algumas informações do local da construção da subestação e dimensões das ligações elétricas e linhas de transmissão são necessárias. São eles:

- a) Através do método de Wenner, realizar a medição do terreno onde a malha será implementada, com o objetivo de coletar os dados necessários para o cálculo do modelo equivalente de estratificação do solo;
- b) Definir qual material irá ser adicionado na camada superficial do solo. Normalmente utiliza-se brita no terreno, com o objetivo de formar uma camada mais isolante entre a malha aterrada e a superfície do solo, contribuindo assim para a segurança humana. Para os cálculos dos potenciais neste trabalho, o valor que será adotado para resistividade da camada de brita é o de $\rho_s = 3000 \Omega \cdot m$.
- c) Valor da corrente de curto-circuito máxima ($I_f = 3 I_o$) geralmente obtido pelo software ANAFAS (fornecido pela a ONS);
- d) Determinação do tempo de atuação da proteção de retaguarda (t_s) para a máxima corrente de curto-circuito fase-terra ou fase-fase-terra, de acordo com o IEEE std 80-2000 estabelecido em 0,5 s;
- e) Área disponível para malha de aterramento, lembrando que a área da malha sempre será maior do que a subestação protegida por ela. Normalmente adota-se 1 m de comprimento da malha além da cerca de proteção ao redor da subestação;
- f) Valor máximo da resistência da terra de modo a ser compatível com a sensibilidade da proteção (referência do terra local).

Passa-se a descrever nos demais itens, os procedimentos e fórmulas a serem considerados no dimensionamento da malha de terra.

8.3. Dimensionamento dos Condutores

Os condutores que serão usados na malha devem suportar o fluxo de corrente para o pior caso de falta fase-terra. Portanto, a pior situação para o valor de $3I_o$ deve ser considerada para os cálculos de dimensionamento da seção transversal do condutor.

Segue abaixo a fórmula usada para dimensionamento do condutor,

$$S = 3I_o \cdot \sqrt{\frac{t_s \cdot \alpha r \cdot \rho r \cdot 10^4}{\ln [1 + \left(\frac{Tm - Ta}{Ko + Ta} \right)]}} \quad (8.1)$$

Onde,

S - Área da secção do cabo [mm^2];

$3I_o$ - Corrente de curto circuito fase-terra [kA];

t_s - Tempo de duração da falta [s] (Adota-se o tempo de atuação da proteção de retaguarda)

T_m - Temperatura máxima do condutor após a falta [$^\circ\text{C}$];

T_a - Temperatura ambiente [$^\circ\text{C}$];

αr - Coeficiente térmico de resistividade à temperatura de referência;

ρr - Resistividade do condutor à temperatura de referência [$\mu\Omega/\text{cm}^3$];

TCAP - Coeficiente de capacidade térmica [$\text{J}/\text{cm}^3 \cdot ^\circ\text{C}$];

α_0 = Coeficiente térmico de resistividade a 0°C ;

$Ko = 1/\alpha_0 = 1/\alpha r - Tr.$

Com isso, tomando como base as vantagens e desvantagens expostas no item 3.4 dos materiais da malha de terra e considerando os tipos de hastes de aterramento e condutores que são usados em projetos, nos dias de hoje, serão utilizados cabos de cobre nu e hastes de aterramento em aço com revestimento de cobre, do tipo Copperweld, para o dimensionamento dos parâmetros da malha. Lembrando que eles ficarão enterrados a 0,6 m de profundidade da superfície do solo e todas as conexões da malha e das hastes deverão ser do tipo solda molecular exotérmica.

A tabela contendo as especificações dos materiais dos cabos e dos valores das constantes usadas acima se encontra na norma IEEE std 80-2000.

8.4. Estratificação do solo

Pela medição do solo realizada de acordo com o método de Wenner, descrito no item 4.1 e usando o métodos de classificação e estratificação do solo do item 5, chega-se a um modelo equivalente de solo homogêneo ou estratificado em duas camadas.

8.5. Resistividade Aparente

Para solos que apresentam modelos equivalentes contendo mais de uma camada de estratificação é necessário calcular a resistividade aparente, para obtermos os níveis dos potenciais na superfície da malha, através das fórmulas simplificadas. A resistividade aparente (ρ_a) será a aproximação da resistividade para um modelo de solo homogêneo que produza um efeito semelhante quando comparado aos modelos de solos de múltiplas camadas. Como se trata de uma aproximação, quanto maior for o número de camadas do modelo equivalente de solo em questão, pior será o nível de exatidão nos cálculos feitos usando este valor.

O presente trabalho irá abordar somente a resistividade aparente em solos de duas camadas, pois este método possui um bom nível de precisão para os cálculos de dimensionamento da malha, diferentemente dos solos estratificados em mais de duas camadas. Abaixo seguem os procedimentos para o cálculo da resistividade aparente [1].

8.5.1. Coeficiente de Penetração (α)

O coeficiente de penetração (α) indica o grau de penetração das correntes escoadas pelo aterramento no solo equivalente. Ele é dado por:

$$\alpha = \frac{r}{d_{eq}} \quad (8.2)$$

Onde d_{eq} está representado na figura 26, como sendo a espessura da camada equivalente do solo.

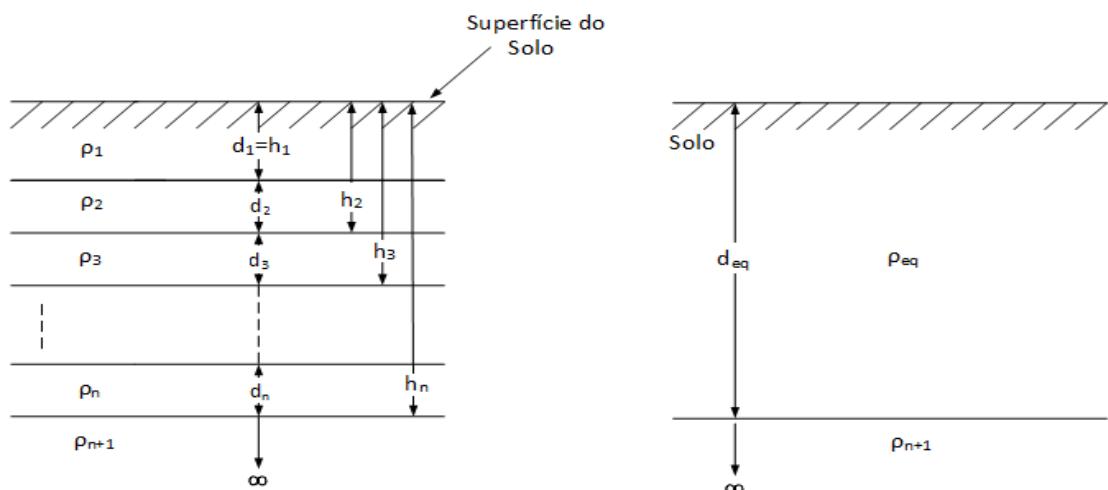


Figura 26 - Solo Equivalente com duas Camadas

No caso de uma malha de aterramento sem hastas, temos que:

$$r = \frac{A}{D_m} \quad (8.3)$$

Onde:

r - raio do anel equivalente do sistema de aterramento considerado;

A - área do aterramento elétrico;

D_m - maior dimensão do aterramento.

Por exemplo, no caso da malha de terra de uma subestação, a maior dimensão será a diagonal da malha.

8.5.2. Coeficiente de Divergência (β)

Na aplicação para o solo de duas camadas, o coeficiente de divergência (β) é a razão entre a resistividade da camada inferior do solo pela resistividade da primeira superior, ambos considerando o modelo equivalente de duas camadas.

$$\beta = \frac{\rho_{n+1}}{\rho_{eq}} \quad (8.4)$$

O coeficiente é similar ao coeficiente entre duas camadas.

8.5.3. Resistividade Aparente para solo em duas camadas

Com (α) e (β) determinados, a resistividade aparente (ρ_a), com relação ao solo de duas camadas, já pode ser determinada. Usando as curvas da figura 27, desenvolvidas por Endrenyi [12], onde (α) é o eixo das abscissas e (β) é a curva correspondente, se obtém o valor de N pela expressão 8.5:

$$N = \frac{\rho_a}{\rho_{eq}} \quad (8.5)$$

Assim temos que,

$$\rho_a = N \cdot \rho_{eq} \quad (8.6)$$

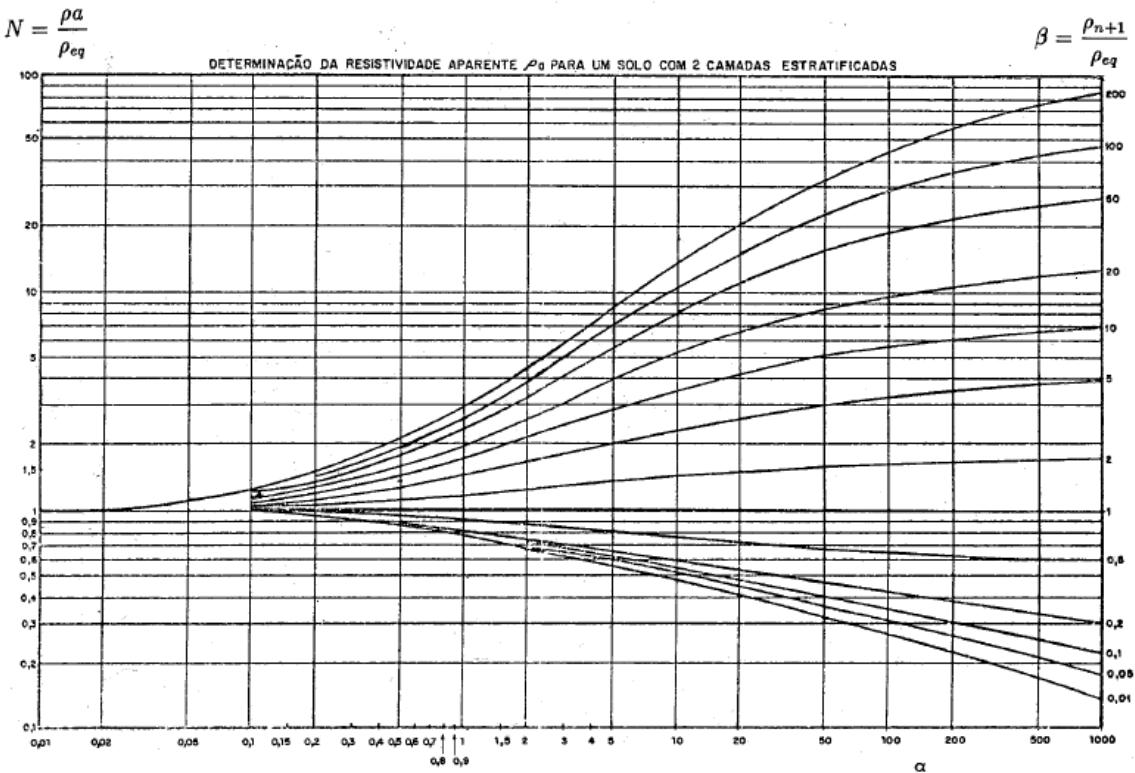


Figura 27 - Curva da Resistividade Aparente

Fonte: adaptado de Kindermann; Campagnolo, 1995, p. 110.

8.6. Critérios de potencial de passo e de toque

A malha de aterramento, de acordo com o item 6.4 deste trabalho, terá que garantir os limites dos níveis de tensão dentro de sua região de proteção, de acordo com as fórmulas 8.7 e 8.8,

$$V_{toque_{MAX}} = (1000 + 1,5 \cdot C_s \cdot \rho_s) \frac{0,157}{\sqrt{t_s}} \quad (8.7)$$

$$V_{passo_{MAX}} = (1000 + 6 \cdot C_s \cdot \rho_s) \times \frac{0,157}{\sqrt{t_s}} \quad (8.8)$$

8.7. Malha inicial

Para o dimensionamento da malha de terra parte-se de um protótipo inicial que esteja de acordo com as dimensões da subestação a ser construída e do tamanho do terreno. Como o dimensionamento será feito de forma iterativa, o valor da resistência de aterramento será calculado e os potenciais ao longo da superfície da malha serão verificados a cada novo design obtido. Este procedimento será realizado até que os critérios das equações que serão vistas no item 8.11 sejam atendidas.

Normalmente as medidas iniciais das malhas de aterramento já seguem um padrão pré-estabelecido, sendo assim, para gerar um projeto inicial será necessário padronizar um espaçamento entre os condutores e definir se serão usadas hastes de aterramento no protótipo inicial.

Com isso, geralmente é adotado como espaçamento inicial entre condutores valores que estejam entre 5% e 10% do comprimento dos lados da subestação e a profundidade da malha com relação ao solo, "h", ficará definida em 0,6 m. Estes valores serão tomados apenas como referência para dimensionar o modelo da 1º malha. A figura 28 ilustra o exemplo de um projeto inicial.

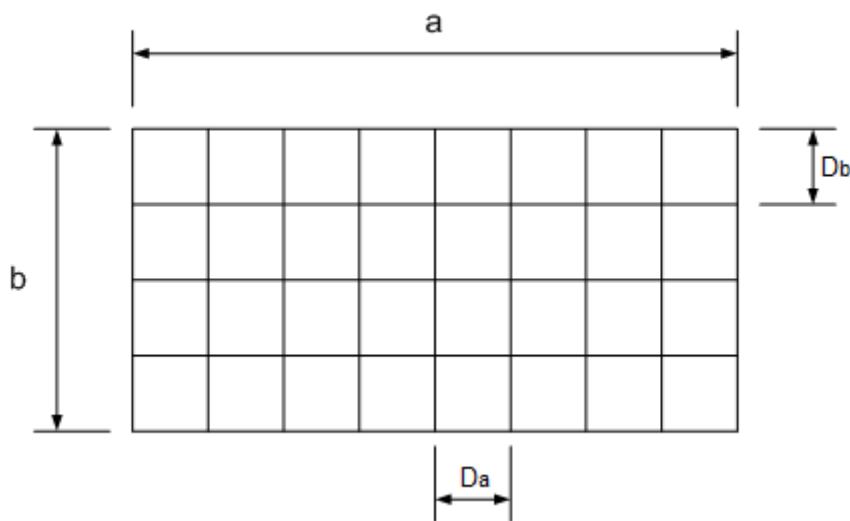


Figura 28 - Projeto inicial da Malha

Para as fórmulas usadas nos cálculos de dimensionamento, serão consideradas inicialmente redes de malhas com formato quadrado, isto é $D_a = D_b$. Este tipo configuração é o modelo o mais simples de malha e é o que apresenta maior facilidade para o cálculo de seus parâmetros. Porém ele possui certas desvantagens, que serão destacadas no capítulo 9, com relação a outras configurações.

Para o número inicial de condutores, seguem as fórmulas abaixo:

$$N_a = \frac{a}{D_a} + 1 \quad (8.9)$$

$$N_b = \frac{b}{D_b} + 1 \quad (8.10)$$

N_a : Número de condutores verticais da malha;

N_b : Número de condutores horizontais da malha;

O comprimento total dos condutores que formam a malha é dado pela expressão:

$$L_c = aN_b + bN_a \quad (8.11)$$

E, caso seja necessário diminuir os valores dos potenciais nos cantos da malha ou em regiões específicas, adicionam-se hastes de aterramento nos pontos onde houver o problema. Sendo assim, deve-se somar o valor dos comprimentos das hastes adicionados ao resto dos condutores existentes, conforme equação 8.12, para calcular o novo valor de resistência.

$$L_T = L_c + L_h \quad (8.12)$$

Onde,

L_c : Comprimento total de condutores da malha;

L_h : Comprimento total de hastes de aterramento cravadas na malha;

L_T : Comprimento total das hastes e condutores da malha.

8.8. Resistência de aterramento da malha e do sistema de transmissão

Para o cálculo da resistência de aterramento serão usadas fórmulas simplificadas que possuem um bom nível de precisão quando comparadas aos resultados obtidos através de softwares de aterramento. Os métodos são baseados na manipulação teórica do método do momento numérico e da imagem das correntes. As fórmulas estão em função dos parâmetros da malha de aterramento da subestação, tais como profundidade “d” da malha, área, número de redes, diâmetro dos condutores e, além disso, de acordo com a resistividade do solo. A comprovação da eficiência dos resultados obtidos destas fórmulas com relação aos resultados obtidos através do uso de software são apresentados em várias trabalhos, como por exemplo em [1], [2], [14] e [15].

8.8.1. Resistência da malha em solo homogêneo

Quando as medições de resistividade do solo apresentarem variações menores que 30% em relação à resistividade média, como descrito no item 5.2 deste trabalho, podemos aproximar a característica de resistividade do solo para um modelo de solo homogêneo. A resistividade do terreno será equivalente ao valor de uma constante e, nestas condições, podemos usar a fórmula 8.13 desenvolvida por Sverak [16] para calcular a resistência da malha.

$$R_M = \rho \left[\frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left(1 + \frac{1}{1 + h\sqrt{20/A}} \right) \right] \quad (8.13)$$

Onde,

R_M - resistência da malha de aterramento [Ω]

ρ - resistividade equivalente do solo [$\Omega \cdot m$]

L_T - comprimento total dos condutores e hastes da malha de aterramento [m]

h - profundidade da malha [m]

A - área ocupada pela malha de aterramento [m^2]

A fórmula 8.13 possui algumas limitações, levando em consideração que ela poderá ser usada somente para modelos de solos homogêneos, para malhas que possuam espaçamento constante entre seus condutores e redes quadradas. Porém, ela apresenta um bom nível de precisão quando comparada aos resultados do software e, por melhor os resultados do dimensionamento do projeto, ela será usada para os cálculos dos estudos de caso, Anexo A.

8.8.2. Resistência da malha em solo biestratificado

O terreno onde a malha irá ser implantada pode ser aproximado para um modelo equivalente de solo estratificado em duas camadas. De acordo com item 5.3, se o gráfico das medidas da resistividade do solo versus distanciamento entre as hastes de medição possuir um comportamento similar ao da figura 12 podemos determinar a resistividade da primeira camada e sua respectiva profundidade e, com isso, achar o valor da resistividade da segunda camada. Com estes valores e com as dimensões da

malha de aterramento, obtém-se o valor da resistência da malha em um solo estratificado em duas camadas através das seguintes expressões:

$$R_M = \frac{\rho_2}{4\sqrt{\pi}} \quad (\rho_2 < \rho_1, a < h) \quad (8.14)$$

$$R_M = \frac{\rho_2 \sqrt{\pi} \cdot A + a \cdot \rho_1 \cdot \pi \left(23,16 \cdot \ln \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} + 31,9 \right) - 78 \right) x \left(1 + 1,95 \cdot e^{-20 \cdot \frac{a \cdot \sqrt{\pi}}{\sqrt{A}}} - 0,3 \cdot e^{0,5 \cdot \frac{a \cdot \sqrt{\pi}}{\sqrt{A}}} \right)}{4 \cdot A + 4 \cdot a \cdot \sqrt{\pi} \cdot A \left(23,16 \cdot \ln \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} + 31,9 \right) - 78 \right) x \left(1 + 1,95 \cdot e^{-20 \cdot \frac{a \cdot \sqrt{\pi}}{\sqrt{A}}} - 0,3 \cdot e^{0,5 \cdot \frac{a \cdot \sqrt{\pi}}{\sqrt{A}}} \right)} \quad (\rho_2 < \rho_1, a \geq h) \quad (8.15)$$

$$R_M = \frac{\rho_2 \sqrt{\pi} \cdot A + a \cdot \rho_1 \cdot \pi \left(23,16 \cdot \ln \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} + 31,9 \right) - 78 \right) x \left(1 + 1,55 \cdot e^{-15 \cdot \frac{a \cdot \sqrt{\pi}}{\sqrt{A}}} - 0,1 \cdot e^{-0,25 \cdot \frac{a \cdot \sqrt{\pi}}{\sqrt{A}}} + 0,2 \cdot e^{-\frac{a \cdot \sqrt{\pi}}{\sqrt{A}}} \right)}{4 \cdot A + 4 \cdot a \cdot \sqrt{\pi} \cdot A \left(23,16 \cdot \ln \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} + 31,9 \right) - 78 \right) x \left(1 + 1,55 \cdot e^{-15 \cdot \frac{a \cdot \sqrt{\pi}}{\sqrt{A}}} - 0,1 \cdot e^{-0,25 \cdot \frac{a \cdot \sqrt{\pi}}{\sqrt{A}}} + 0,2 \cdot e^{-\frac{a \cdot \sqrt{\pi}}{\sqrt{A}}} \right)} \quad (\rho_2 \geq \rho_1) \quad (8.16)$$

R_M = Resistência da malha de aterramento

A - área ocupada pela malha de aterramento [m^2]

ρ_1 - resistividade equivalente da camada superior do solo [$\Omega \cdot m$]

ρ_2 - resistividade equivalente da camada inferior do solo [$\Omega \cdot m$]

a - profundidade da primeira camada em relação a superfície do solo

h - profundidade da malha [m].

Estas fórmulas são apresentadas em [15], sendo que a resistência da malha de aterramento (R_M) está em função da camada superior e inferior do solo estratificado (ρ_1 e ρ_2), da área da malha e da altura "a" da primeira camada do solo. O valor R_M será a representação da resistência equivalente da malha, vista pela corrente de curto circuito.

Apesar de ser considerado um método novo e o estudo apresentando em [15] garantir que trata-se de um método com resultados muito próximos aos valores calculados através de software, ele não apresentou resultados satisfatórios para o trabalho. Mesmo que o método englobe alguns fatores externos em seu cálculo, ele não leva em consideração a adição de hastes de aterramento e o aumento do número de condutores

em suas variáveis. Sendo assim, mesmo com o aumento da quantidade de material empregada na malha, sua resistência não sofrerá alteração, portanto esta fórmula não será usada nos cálculos do Anexo A.

8.9. Cálculo da corrente de malha

A malha de aterramento será projetada com base na parcela da corrente de falta máxima que ela poderá absorver e conforme abordado no item 7.6, a equação 7.19 será utilizada para o cálculo da corrente de malha.

8.10. Potencial de Toque máximo da malha em relação ao infinito (GPR)

É a elevação de potencial total da malha referido ao infinito, usualmente designado GPR (*Grounding Potential Rise*). Constitui-se do máximo potencial a que ficaria submetida uma pessoa posicionada no terra remoto, que tivesse contato com algum objeto que conduza eletricidade e que esteja eventualmente conectado com o sistema de aterramento, durante uma situação de falta , onde o fluxo de corrente estiver circulando pela malha. O GPR é dado pela expressão abaixo:

$$\text{GPR} = I_M \cdot R_M \quad (8.17)$$

Caso o potencial de toque máximo do design preliminar da malha seja menor que a tensão de toque tolerável, não haverá mais necessidade de análises. Somente condutores adicionais serão necessários para fazer o aterramento dos demais equipamentos.

$$\text{GPR} = I_M \cdot R_M \leq V_{toque} \quad (8.18)$$

Caso contrário, se o valor do GPR não atender à condição acima, não significa que a malha esteja necessariamente inadequada com relação às condições de segurança. Deve-se então realizar os cálculos de V_m e V_s , que serão descritos a seguir e verificar se a malha atende aos critérios estabelecidos para segurança humana.

8.11. Potenciais Máximos a Serem Verificados

No item 7.6, foram definidas as fórmulas da máxima tensão de passo e de toque, mostrou-se também o cálculo destes potências e o tempo que uma pessoa poderia ficar exposta a estas condições sem que ocorresse a fibrilação ventricular. Os itens de segurança de tensão na malha de aterramento serão projetados com base nos valores destas duas tensões. Portanto, a malha deverá atender as seguintes condições definidas com relação aos potenciais de sua superfície:

$$V_{toque} \leq V_{toque\ máximo} \quad (8.19)$$

$$V_{passo} \leq V_{passo\ máximo} \quad (8.20)$$

Sendo que o não atendimento a tais critérios de segurança levará a reconfiguração das dimensões do projeto, conforme fluxograma que será apresentado no item 8.15.

8.12. Potencial de rede

O potencial de rede (V_m) é definido com sendo a tensão de toque máximo que uma pessoa dentro da subestação pode estar sujeita, quando da ocorrência de uma falta fase-terra nas proximidades da subestação.

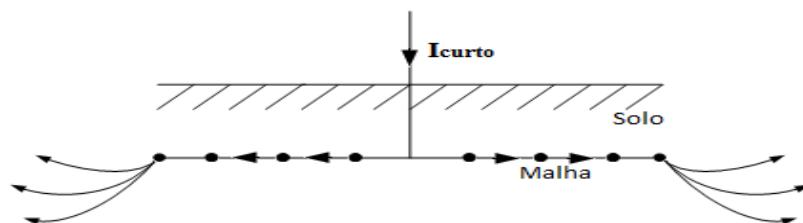


Figura 29 - Correntes pelas bordas da Malha

Fonte: adaptado de Kindermann; Campagnolo, 1995, p. 142.

Nestes casos de falta, a corrente elétrica de defeito irá escoar preferencialmente pelos cantos e pela periferia da malha, conforme figura 29. O fato de a corrente percorrer este caminho deve-se à interação que ocorre entre os condutores da malha, o que força o escoamento da maior parte da corrente para as bordas da mesma, este comportamento da corrente é ilustrado pelos gráficos de potencial do capítulo 9. Com isto, temos que o

máximo potencial de toque, que ocorre na periferia da malha, pode ser calculado pela seguinte expressão:

$$V_m = \frac{\rho_a \cdot I_M \cdot K_m \cdot K_i}{L_c + L_h} \quad (8.21)$$

Com,

ρ_a - resistividade aparente vista pela malha;

I_M - corrente que escoa para malha quando ocorrem faltas fase-terra ou fase-fase-terra.;

Para variações com relação ao tipo de configuração inicial apresentada no item 8.6 (rede quadrada e sem hastas), uma série de fatores de correção são utilizados para aumentar a precisão dos valores dos potenciais que surgem na SE. Abaixo estes fatores são apresentados.

K_m é definido com sendo o coeficiente que representa a influência da profundidade da malha, do diâmetro dos condutores e do espaçamento entre os mesmos, com relação ao potencial desenvolvido na superfície da malha.

O valor é dado pela expressão 8.22:

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \cdot \left[\ln \left[\frac{D^2}{16 \cdot h \cdot d} + \frac{(D+2 \cdot h)^2}{8 \cdot D \cdot d} - \frac{h}{4 \cdot d} \right] \right] + \frac{K_{ii}}{K_h} \cdot \ln \left[\frac{8}{\pi(2n-1)} \right] \quad (8.22)$$

Onde:

h - profundidade da malha [m];

D - Espaçamento entre condutores paralelos ao longo da malha [m]

d - Diâmetro do condutor [m]

De acordo com o formato das malhas, o fator de ajuste “n” será aplicado da seguinte maneira,

Para malhas com hastas de aterramento em torno de seu perímetro ou com hastas de aterramento próximos de seus vértices, ou para ambos os casos citados anteriormente, temos que

K_{ii} - 1 para grid com hastas de aterramento

Para malhas sem hastes de aterramento instaladas ou com poucas hastes, sendo que elas não estejam localizadas nos cantos e nos perímetros da malha, temos que

$$K_{ii} = \frac{1}{(2n)^{\frac{2}{n}}} \quad (8.23)$$

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_0}} \quad (8.24)$$

Com $h_0 = 1\text{m}$ (profundidade de referência da malha)

Onde,

K_h - Fator de correção de profundidade;

K_{ii} - Fator de correção para os efeitos de hastes de aterramento nos cantos ou perímetro da malha, método simplificado.

Para os quatro diferentes modelos de malhas, apresentados em [16], o número efetivo de condutores paralelos, "n", podem ser aplicados para modelos retangulares ou irregulares de malha e, com isso, ficando representados por um modelo de malha retangular equivalente.

$$n = n_a \cdot n_b \cdot n_c \cdot n_d \quad (8.25)$$

Onde,

$$n_a = \frac{2 \cdot L_c}{L_p} \quad (8.26)$$

$n_b = 1$ para malhas quadradas;

$n_c = 1$ para malhas quadradas ou retangulares;

$n_d = 1$ para malhas quadradas, retangulares ou em formato de L.

Para condições diferentes das vistas acima temos que,

$$n_b = \sqrt{\frac{L_p}{4 \cdot \sqrt{A}}} \quad (8.27)$$

$$n_c = \left[\frac{L_x \cdot L_y}{A} \right]^{\frac{0.7 \cdot A}{L_x \cdot L_y}} \quad (8.28)$$

$$n_d = \frac{D_m}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \quad (8.29)$$

Sendo,

L_p - perímetro da malha de terra em metros [m].

L_x – Tamanho dos condutores da malha na direção x [m]

L_y – Tamanho dos condutores da malha na direção y [m]

Com isto temos a seguinte expressão,

$$k_i = 0,644 + 0,148 \cdot n \quad (8.30)$$

O coeficiente k_i é definido com sendo o coeficiente de irregularidade, que irá ponderar os efeitos da não uniformidade de distribuição da corrente pela malha.

Novamente, para os casos de malhas sem hastes de aterramento ou com poucas hastes, sendo que estas não estejam localizadas nos cantos e nos perímetros da malha, temos que o comprimento efetivo dos condutores aterrados, é

$$L_T = L_C + L_h \quad (8.31)$$

Onde,

L_h - comprimento total de todas as hastes de aterramento cravadas no solo [m].

Nos casos onde hastes de aterramento são instaladas próximas aos vértices da malha e também ao longo de seu perímetro, figura 30, estas farão com que uma parcela da corrente de curto circuito atinja camadas mais profundas do solo, alterando assim, a tensão de malha calculada na equação 8.21.

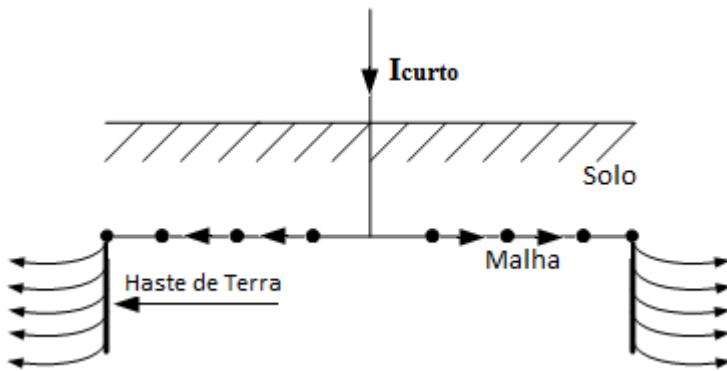


Figura 30 - Hastes no Perímetro da Malha

Fonte: adaptado de Kindermann; Campagnolo, 1995, p. 144.

Considerando este caso, temos que o comprimento efetivo dos condutores aterrados, L_T , para tal configuração é,

$$L_T = L_C + \left[1.55 + 1.22 \left(\frac{L_r}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \right) \right] \cdot L_h \quad (8.32)$$

Onde,

L_r - tamanho das hastes de aterramento [m].

O valor de V_m será comparado com a tensão de toque calculada na equação 6.10 do item 6.4.2, com o objetivo de verificar se a tensão da superfície da malha atende aos padrões de segurança. Sendo assim, a condição abaixo deve ser válida,

$$V_m < V_{toque\ máximo}$$

Para que a subestação esteja dentro dos padrões de segurança.

8.13. Potencial de Passo na Malha

O potencial de passo (V_S) é definido como sendo a máxima tensão de passo que uma pessoa dentro da subestação pode estar sujeita, quando da ocorrência de um falta fase-terra ou fase-fase-terra nas proximidades da subestação. Nestes casos de falta, os

níveis dos potenciais de passo serão maiores nos cantos e periferia da malha. Ele pode ser calculado pela expressão:

$$V_S = \frac{\rho_a \cdot I_M \cdot K_s \cdot K_i}{L_S} \quad (8.33)$$

Onde K_s é definido com sendo o coeficiente de passo, que representa a influência no cálculo da maior diferença de potencial entre dois pontos distanciados de 1 m. Este coeficiente relaciona todos os parâmetros da malha que induzem tensões na superfície da terra.

O valor de K_s é dado pela seguinte expressão:

$$K_s = \frac{1}{\pi} \cdot \left[\frac{1}{2 \cdot h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} \cdot (1 - 0,5^{n-2}) \right] \quad (8.34)$$

Para malhas que possuem ou não possuem hastes de aterramento, o valor de L_S é dado pela expressão abaixo:

$$L_S = 0,75L_c + 0,85L_h \quad (8.35)$$

O valor de V_s será comparado com a tensão de passo calculada na equação 6.7 do item 6.4.1, com o objetivo de verificar se a tensão da superfície da malha atende aos padrões de segurança. Sendo assim, a condição 8.36 deve ser válida, para que a subestação esteja dentro dos padrões de segurança.

$$V_S < V_{passo MAX} \quad (8.36)$$

8.14. Potencial de Toque na cerca Perimetral da Malha

A cerca perimetral também deve ser levada em consideração na elaboração do projeto, sendo que ela pode apresentar um risco ao público em geral, pois ela em muitos casos é de fácil acesso as pessoas. O dimensionamento do aterramento da subestação deve garantir que o potencial de contato na cerca irá estar dentro do potencial de toque

máximo calculado e seu potencial de passo também deve ser verificado para constatar que não haja nenhum problema relacionado a ele.

Geralmente, costuma-se cercar a subestação através de:

- Muro de alvenaria;
- Cerca metálica.

A cerca metálica é a mais utilizada nos projetos por possuir um menor preço, quando comparada a cerca de alvenaria, mas pelo fato de ser considerada uma boa condutora de eletricidade, ela fica exposta às tensões que surgem das correntes de curto-círcuito na subestação. Por este motivo, o potencial de toque na cerca deverá ser analisado e calculado de forma a verificar que seu valor seja inferior ao valor limite de potencial de toque tolerável. O potencial de toque máximo na cerca (V_{cerca}) é dado pela expressão:

$$V_{cerca} = \frac{\rho_a \cdot I_M \cdot K_c \cdot K_i}{L_{cerca}} \quad (8.37)$$

Onde, K_c é definido como sendo o coeficiente que representa a influência da malha em relação à posição da pessoa que está tocando a cerca metálica. Seu valor é dado pela seguinte expressão:

$$K_c = \frac{1}{2\pi} \left\{ \ln \left[\frac{(h^2+x^2) \cdot [h^2+(e+x)^2]}{h \cdot d \cdot (h^2+x^2)} \right] + 2 \ln \left\{ \left[\frac{2e+x}{2e} \right] \left[\frac{3e+x}{3e} \right] \dots \left[\frac{(N-1)e+x}{(N-1)e} \right] \right\} \right\} \quad (8.38)$$

Onde:

x = distância da periferia da malha ao ponto considerado [m]

N = Máximo (N_a, N_b)

A Figura 31 ilustra a distância x de uma pessoa em relação a cerca,

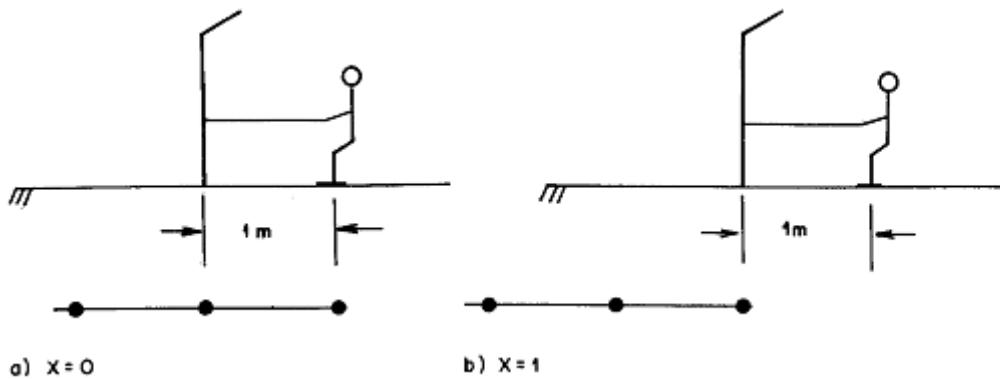


Figura 31 - Ilustração da distância x

Fonte: adaptado de Kindermann; Campagnolo, 1995, p. 150.

Outra consideração que deve ser feita é nos casos em que a malha possua hastes de cobre aterradas em sua periferia e nos seus cantos. Com isso, sua expressão de potencial da cerca será alterada para:

$$V_{cerca} = \frac{\rho_a I_M K_c K_i}{L_{cabo} + 1,15 L_{hastes}} \quad (8.39)$$

Sendo que em todos os casos o potencial da cerca deverá respeitar a condição da equação 8.38:

$$V_{cerca} \leq V_{toque\ máximo} \quad (8.40)$$

E, caso não seja possível utilizar uma cerca metálica no terreno da subestação, podemos optar pela cerca de alvenaria, que por possuir uma condutividade baixa apresentará um risco menor em casos de faltas no sistema de transmissão.

8.15. Fluxograma de Dimensionamento da Malha de Terra

Dimensionar uma malha de aterramento é, na verdade, verificar se os potenciais que podem surgir no solo da subestação, em seus equipamentos ou em algum lugar distante sobre sua influência, estão dentro dos limites de segurança. Para obter uma malha que cumpra os critérios estabelecidos e no sentido de otimizar a relação entre custo versus segurança, deve-se iterativamente, redimensionar a malha até atingir o modelo esperado. O processo iterativo para o projeto da malha é mostrado no fluxograma da Figura 32.

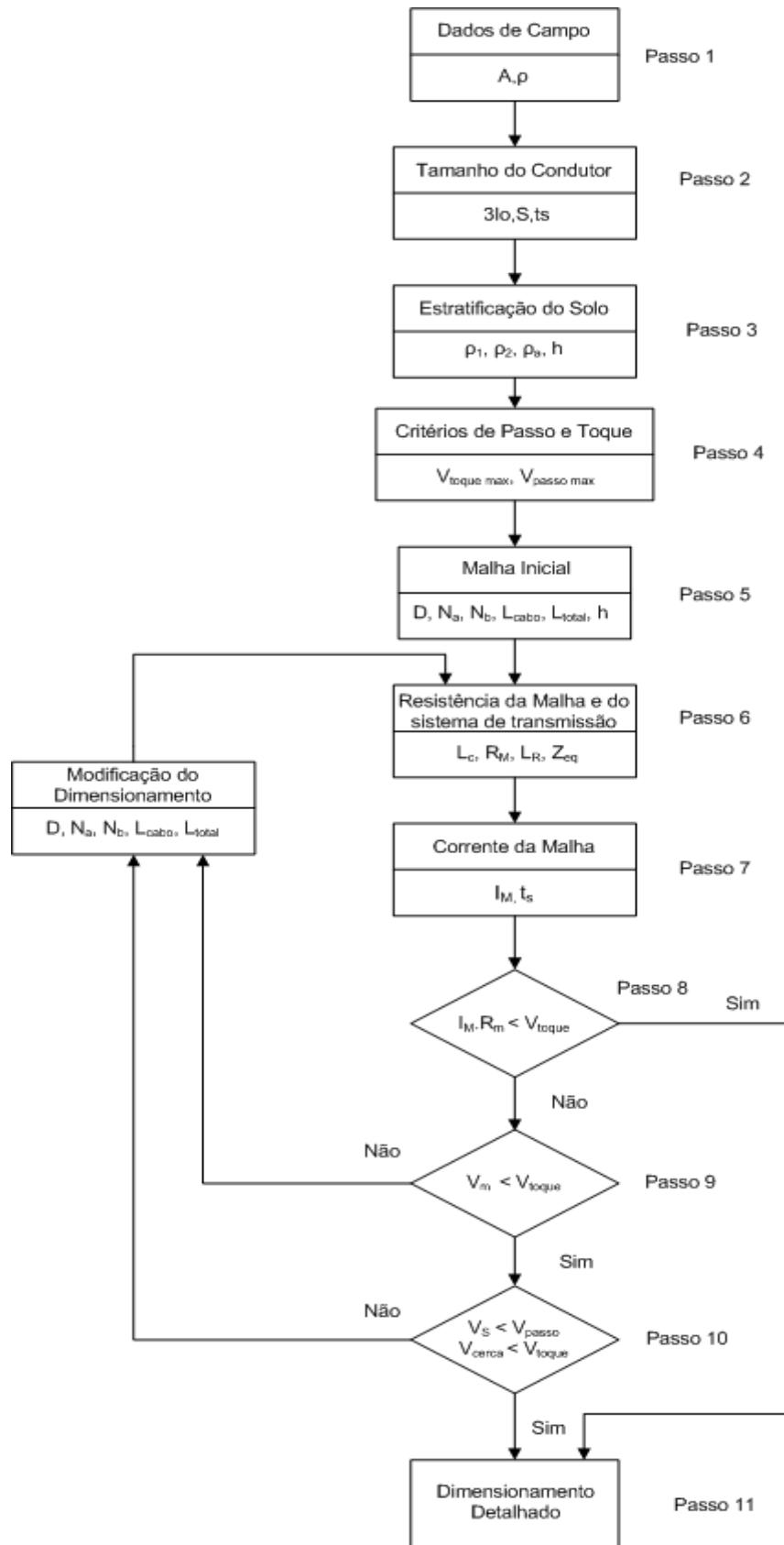


Figura 32 - Fluxograma de dimensionamento da malha

O passo 11 do fluxograma acima será usado para sua otimização, sendo que no item 9.4 será apresentado um método para diminuir a quantidade de material usado na malha e melhor seu desempenho.

Com todas as etapas necessárias para o projeto de malha de aterramento já abordadas, o capítulo 9 irá discutir sobre as vantagens do software em relação as fórmulas simplificadas. Para finalizar o trabalho, com o objetivo de comparar os resultados obtidos entre software e as fórmulas apresentadas e exemplificar os métodos descritos, no Anexo A foi feito um estudo de caso de uma malha de aterramento, utilizando os mesmo dados que serão usados nas simulações do capítulo abaixo.

9. Dimensionamento de Malhas através de Software

9.1. Introdução

Este capítulo tem como objetivo contrastar o dimensionamento da malha de aterramento feito com auxílio de fórmulas simplificadas com os resultados obtidos através do uso de uma ferramenta computacional usada em projetos de malha. Portanto, para melhor ilustrar esta situação projetou-se uma malha de terra através do software e foram destacadas quais são suas vantagens e principais diferenças em relação ao uso das equações simplificadas, que foram explanadas nos capítulos anteriores.

Sendo assim, a partir de medições e dados pré-estabelecidos a ferramenta verifica se os potenciais na superfície do solo, na ocorrência da falta fase-terra, são inferiores aos máximos potenciais permissíveis a uma pessoa sem causar fibrilação ventricular e provocar danos aos equipamentos presentes na subestação. A ferramenta realiza a estratificação do solo, fornece as tensões máximas de passo, toque e GPR, o valor da resistência equivalente da malha de aterramento e os potenciais presentes no solo da subestação. Por tratar-se de um processo iterativo, inicialmente é realizado o dimensionamento de um modelo simples de malha, como é ilustrado na figura 28 do capítulo 8 e, a partir deste protótipo, melhorias são testadas na malha com o objetivo de diminuir os potenciais presentes terreno até que um modelo final que atenda as medidas de segurança seja obtido. Com isso, melhorias são feitas na malha com o objetivo de diminuir a quantidade de material utilizado. Lembrando que, mesmo com as readequações feitas na malha para redução de material, ela ainda deve garantir as condições de segurança humana e a integridade dos equipamentos da subestação.

9.2. Resultados obtidos com o uso do Software

Com o intuito de facilitar a análise do comportamento da malha de aterramento de uma subestação, no caso de uma falta fase-terra, iremos considerar a configuração ilustrada na figura 33. A dimensão do terreno, considerando a grade de proteção, será de 34 x 25 m. Os equipamentos que compõem a subestação abaixo são a chaves seccionadoras, disjuntor, TC, TP, transformador e para-raio. Deve-se também levar em consideração a casa de comando e controle, que está representada no canto superior esquerdo da figura abaixo.

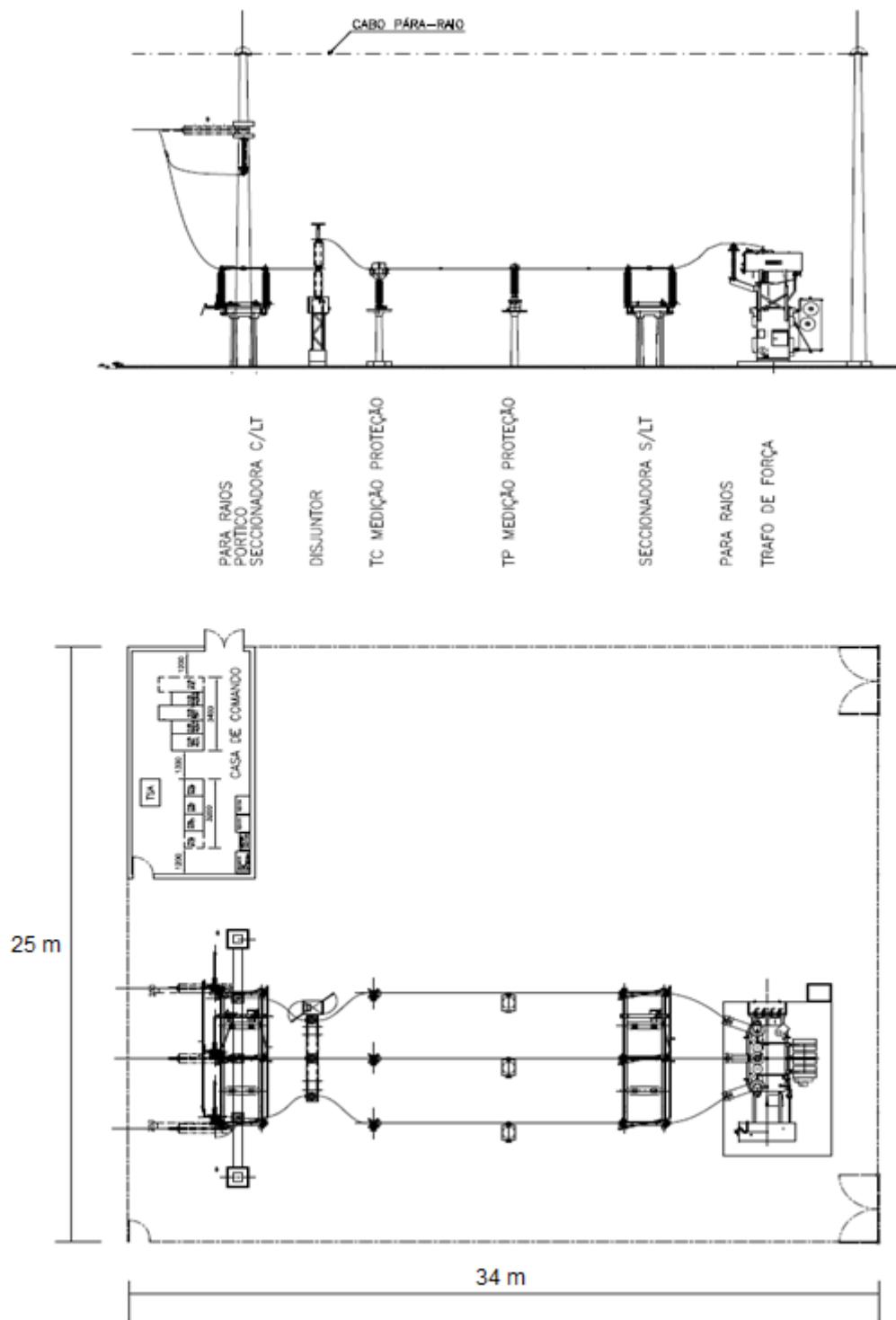


Figura 33 - Exemplo de configuração de uma Subestação

Com base no caso acima, parte-se de uma malha simples, com os condutores igualmente espaçados, com redes quadradas e sem o uso de hastes de aterramento na periferia da malha. Através do software, pode-se evidenciar onde os potencias de passo

e de toque serão mais elevados, quais configurações de malha terão melhor desempenho para reduzir os potenciais do solo e quais tratarão menor uso de material na sua confecção. Destaca-se que as fórmulas simplificadas não proporcionam os valores de todos os potenciais ao longo do terreno da subestação, sendo que, neste caso somente a maior tensão da periferia da malha é calculada. O modelo de solo usado nas simulações do software será o homogêneo, pois as fórmulas simplificadas usadas para o cálculo da resistência da malha em solos heterogêneos não possuem uma boa precisão, como abordado no item 8.8.2.

9.3. Análise dos Potenciais na superfície da SE

A configuração inicial adotada será o modelo de malha de aterramento com espaçamentos iguais entre os condutores, redes quadradas, sem hastes de aterramento e a dimensão escolhida para malha, considerando 1 m além do muro, é de 36 x 27m. Esta configuração é o tipo mais simples, mas ela apresenta algumas limitações com relação a outros modelos, sendo que estas serão abordadas a seguir. A figura 34 representa a 1° primeira configuração da malha, modelada pelo software, utilizando as equações do item 8.7.

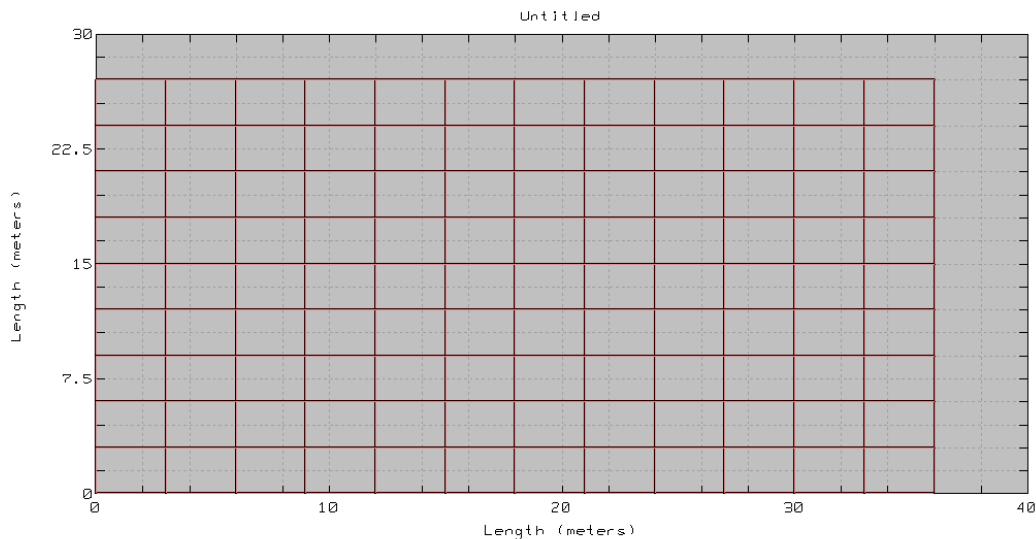


Figura 34 - Modelo Inicial da malha

Usando como base o item 8.7, a malha inicial que será simulada possui 10 condutores horizontais ($n_x = 10$), 13 condutores verticais ($n_y = 13$) e as redes da malha possuem dimensões de 3x3m ($D = 3$ m).

Considerando que o comportamento da malha será afetado pela característica da resistividade do solo encontrado no sistema, o modelo equivalente de resistividade do terreno para as análises que serão feitas será o homogêneo. Com os valores das resistividades médias apresentadas na tabela 9 e seguindo a norma NBR 7117, obtém-se a resistividade do solo, apresentada abaixo.

Tabela 9 - Valores Médios da Resistividade

Distância dos eletrodos	Média (ohms.m)
2	165,7
4	141,5
8	150,0
16	158,5
32	134,3

Como os valores médios de resistividade apresentam uma variação menor que 30% em relação a média dos mesmos, o solo é classificado como homogêneo e seu valor de resistividade é $\rho_a = 150 \Omega.m$. Este resultado é pré-requisito para obter os demais parâmetros do projeto.

O perfil em análise para o caso de uma falta fase-terra na Subestação será a linha diagonal formada entre os pontos (0;0) e os pontos (36;27), da figura 34. Para o gráfico dos potenciais da malha, figura 35, o eixo y representa os valores das tensões existentes na superfície da SE e o eixo x representa a distância, em metros, do ponto (0;0) até um determinado ponto sobre a linha diagonal que cruza a subestação.

O valor de *split factor* deve ser calculado e usado como dado de entrada no software, sendo que seu cálculo é apresentado no Anexo A e o valor do fator é de $S_f = 0,468$.

A figura 35 apresenta o máximo potencial de passo, toque e GPR estabelecido para segurança humana (que são respectivamente, $V_{passo\ MAX} = 3518,35 V$, $GPR = 8681,44V$ e $V_{toque\ MAX} = 1046,11 V$) e as curvas dos potenciais da subestação. Pela análise da figura 35, temos que a curva do potencial de superfície (GPR, que está representada em vermelho) e do potencial de passo (representada em verde) do gráfico, estão dentro dos

níveis máximos de tensão estabelecidos para atender os critérios de segurança da malha, sendo que na maior parte dos casos estes dois níveis de tensão apresentam maior facilidade para serem atendidos. Para o potencial de toque (representado em azul), existem locais na SE que não se encontram dentro dos limites de segurança, que estão representados pelas linhas pontilhadas do gráfico. Pode-se notar que os níveis de tensão de toque perto das bordas da subestação apresentam os maiores valores de potenciais, sendo que o maior encontrado dentro da SE para este caso é de $V_{toque} = 2149,08$ V.

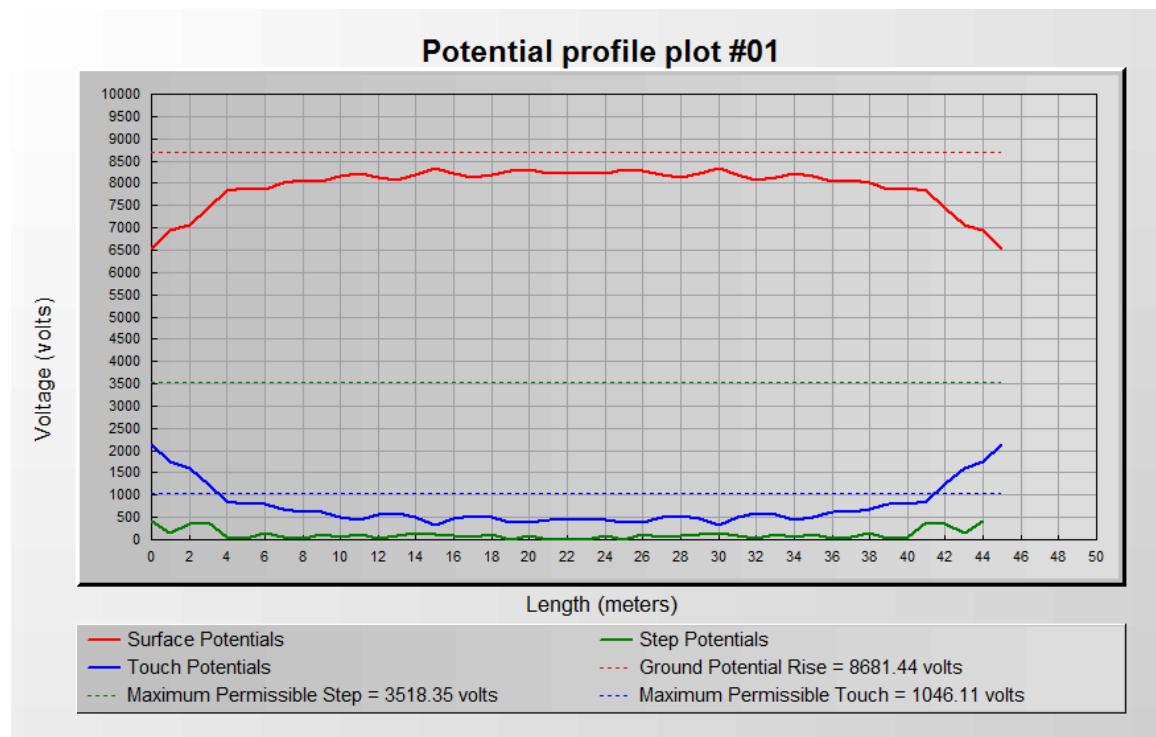


Figura 35 -Primeira Iteração - Tensão de passo, toque e GPR na superfície da malha.

Como o potencial de toque calculado na superfície da SE não se encontra dentro dos níveis de tensão máximos, estipulados pelo software, uma nova malha deverá ser modelada e seus potenciais deverão ser recalculados. A estratégia usada para diminuir o potencial de toque nas bordas da malha será o de aumentar o número de condutores onde o nível de tensão se encontra acima do limite estabelecido e, se mesmo assim os critérios de segurança não forem atendidos, hastes de aterramento serão instaladas nas bordas da malha.

Em comparação com as equações de V_m , V_s e GPR do capítulo 8, que apresentam somente o valor máximo de tensão dentro do terreno, nota-se que o gráfico fornece o

valor de tensão em cada ponto do terreno com relação ao posicionamento do mesmo. Outro fato que fica constatado são os valores da tensão de toque, que apresentam maiores níveis de tensão quando se encontram próximos aos cantos da malha, devido ao efeito da proximidade dos condutores na malha, conforme abordado no item 8.9 deste trabalho.

Segue abaixo tabela comparando os valores obtidos acima, com os encontrados no Anexo A, A1 - 1º Modelo de Malha , considerando $L_c = 711$ m e $L_h = 0$ m

Tabela 10 - Comparaçao entre os valores do 1º Modelo de Malha

1º Caso	R_M	$V_{passo\ max}$	$V_{toque\ max}$
Fórmulas	2,29 Ω	1576,5 V	1493,85 V
Software	2,13 Ω	463,98 V	2469,16 V

Para melhor ilustrar os locais da SE onde os níveis de potenciais de toque são mais elevados, segue abaixo a figura 36, onde fica fácil visualizar os valores críticos de tensão. Fica fácil ver que os grandes níveis de tensão encontram-se na periferia e principalmente nos vértices da malha e, pela tabela acima, verifica-se a diferença dos potenciais encontrados pelo software e pelas fórmulas. Nesta figura, as tensões de todos os pontos da malha são representadas.

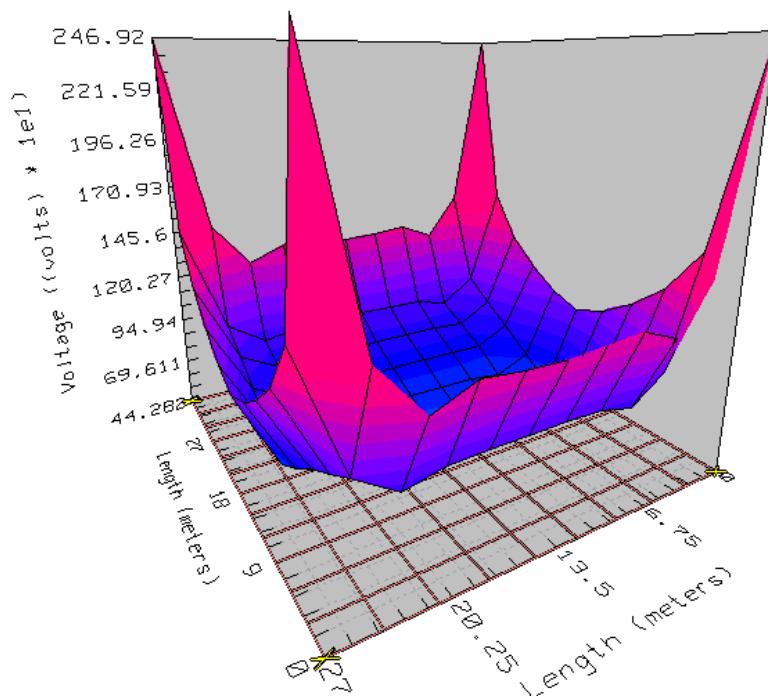


Figura 36 - Gráfico representado nos eixos x, y e z, dos potenciais de toque na ocorrência da falta fase-terra, na malha simplificada.

Partindo para a 2º configuração, a malha da figura 37 será simulada com a adição de 9 condutores horizontais ($N_a = 16$) e 6 condutores verticais ($N_b = 21$), mantendo-se constante o espaçamento entre os mesmos e as redes quadradas, com $D = 1,8$ m. Pela fórmula do item 8.8, conclui-se que com o aumento do número de condutores, a resistência de aterramento do sistema irá diminuir, facilitando o escoamento do fluxo de corrente para o solo. Com isso, haverá a diminuição dos níveis de tensões que irão surgir na malha.

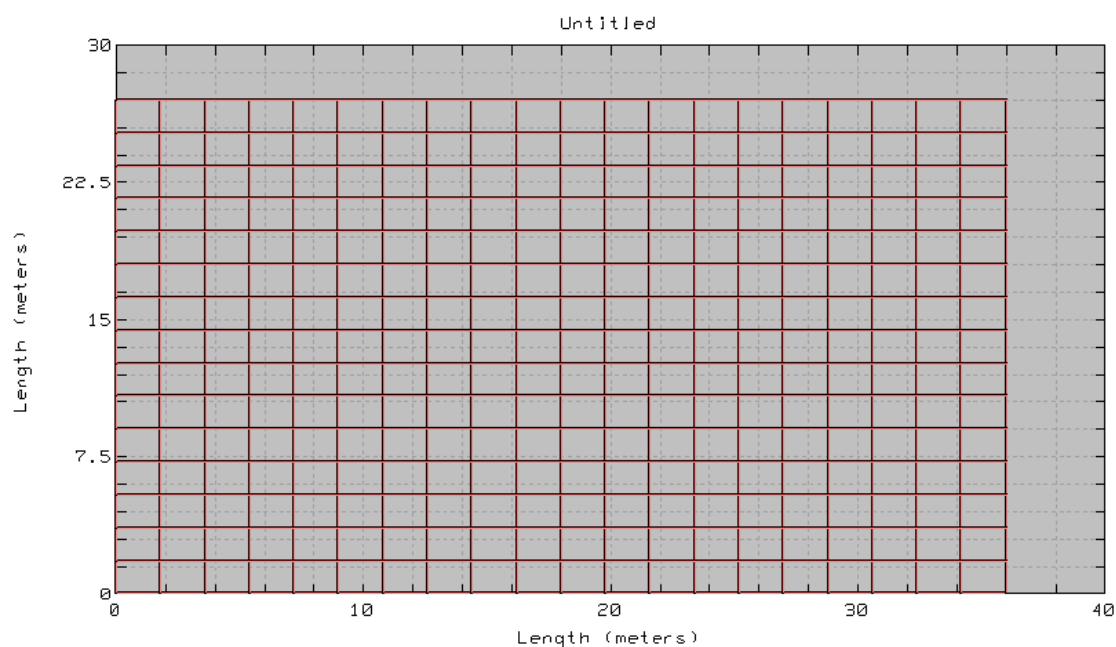


Figura 37 - Segunda iteração - Malha com um número maior de condutores

Realizando novamente a simulação para o mesmo nível de tensão, corrente de curto-circuito e perfil analisado, verifica-se o decaimento do nível de todos os potenciais da superfície da SE. Mas, a figura abaixo mostra alguns pontos do terreno onde os potenciais de toque ainda não atendem as condições de segurança estabelecidas.

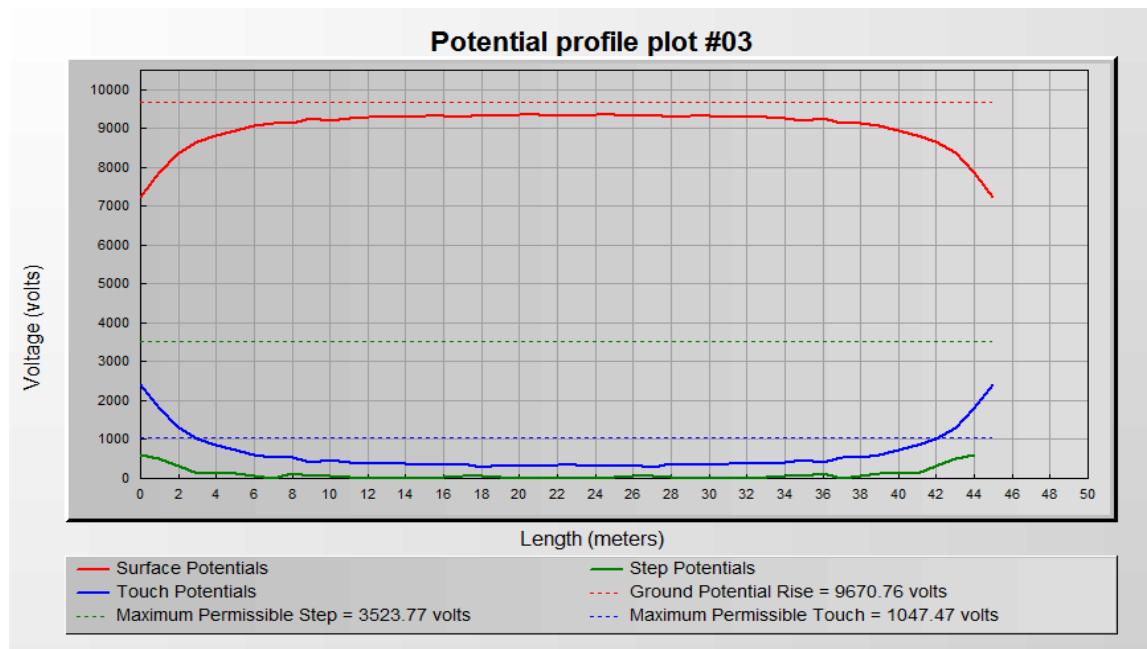


Figura 38 - Segunda Iteração - Tensão de passo, toque e GPR na superfície da malha.

Sendo assim, com a adição de condutores horizontais e verticais na malha de aterramento, houve uma diminuição da resistência R_g e, consequentemente, os níveis de tensão também diminuíram. Mas, mesmo assim, os níveis de tensão de toque na periferia e no vértice da malha de terra ainda estão acima dos limites estabelecidos.

Segue abaixo tabela comparando os valores obtidos acima, com dados que se encontram no Anexo A2 - 2º Modelo de Malha, considerando $L_C = 1143$ m e $L_h = 0$ m.

Tabela 11 - Comparação entre os valores do 2º Modelo de Malha

2º Caso	R_M	$V_{passo\ max}$	$V_{toque\ max}$
Fórmulas	2,21 Ω	1717,8 V	969,29 V
Software	2,13 Ω	548,55 V	2170,73 V

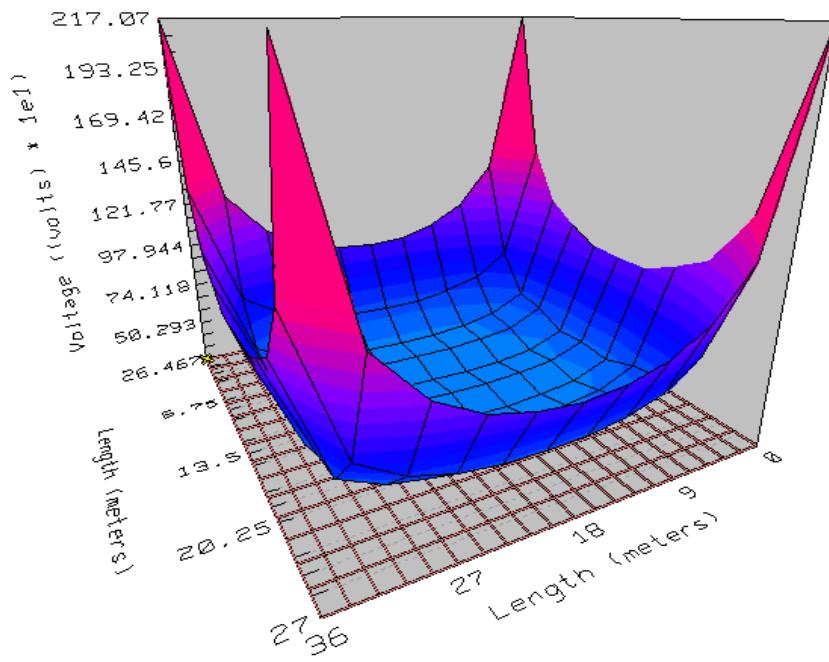


Figura 39 - Segunda Iteração - Gráfico representado nos eixos x, y e z, das dimensões dos níveis de tensão de toque na superfície da malha.

Pelas tabelas 10, 11 e com a figura acima, pode-se constar que os valores de tensão de toque encontrados pelas fórmulas simplificadas são muito próximos aos valores encontrados na periferia da malha, mais afastados dos vértices. Com isso, pode-se constatar que o principal problema apresentado nos níveis de potencial acima são os vértices e, com a diminuição destes valores, o nível de precisão das fórmulas simplificadas irá aumentar.

Uma das alternativas encontradas para reduzir o nível de tensão da periferia da malha será a adição de hastes de aterramento ao redor da mesma, para que o nível da tensão de toque se reduza até atingir um valor de potencial tolerável. A simulação será feita mantendo o mesmo espaçamento D, o mesmo número de condutores da malha da segunda iteração e, inicialmente, será adicionando 18 hastes de aterramento de 3 m cada, sendo que elas serão distribuídas uniformemente pela periferia da malha. A figura 40 apresenta a malha modelada.

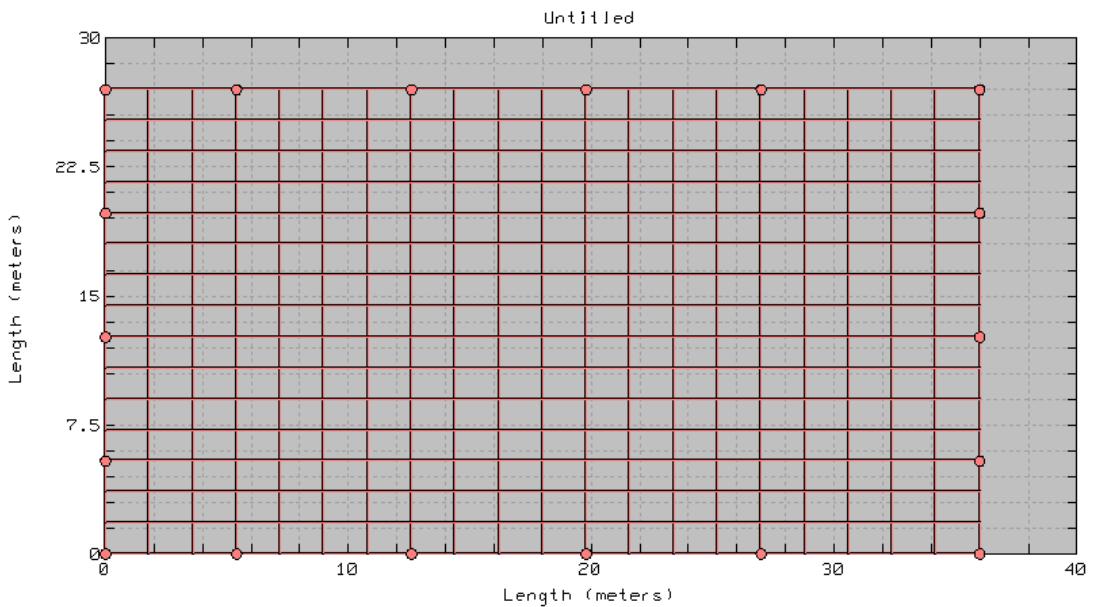


Figura 40 - Terceira iteração – Malha com hastes de aterramento em sua periferia

Pela figura abaixo pode-ser constatar que os níveis de tensão de toque diminuíram em todas as regiões, sendo que a região do vértice da malha representa problemas para a escolha da configuração adequada.

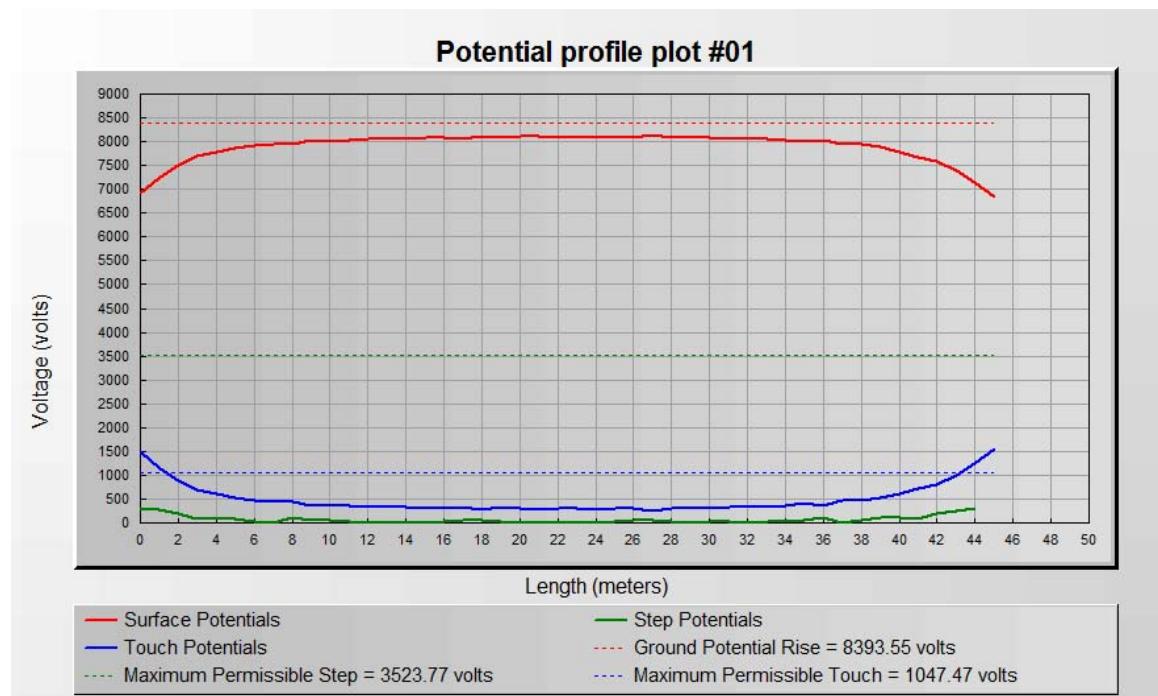


Figura 41- Terceira Iteração - Tensão de passo, toque e GPR na superfície da malha.

Para alcançar o nível de tensão de toque desejado, uma alternativa será o de aumentar o número de hastes de aterramento somente nos vértices da malha e realizar a verificação dos potencias através da simulação.

Segue abaixo tabela comparando os valores obtidos acima, com os dados que se encontram no Anexo A, A3 - 3º Modelo de Malha, considerando $L_C = 1143$ m e $L_h = 54$ m.

Tabela 12 - Comparaçao entre os valores do 3º Modelo de Malha

3º Caso	R_M	$V_{passo\ max}$	$V_{toque\ max}$
Fórmulas	2,20 Ω	1795,3 V	688,2 V
Software	2,01 Ω	316,36 V	1545,3 V

Nota-se pela figura abaixo o efeito da adição das hastes de aterramento na malha com relação ao comportamento do potencial de passo. Os níveis de tensão diminuíram consideravelmente em relação ao modelo anterior. Portanto, com a adição de novas hastes de aterramento nas regiões do vértice da malha já será possível obter um modelo de malha adequado.

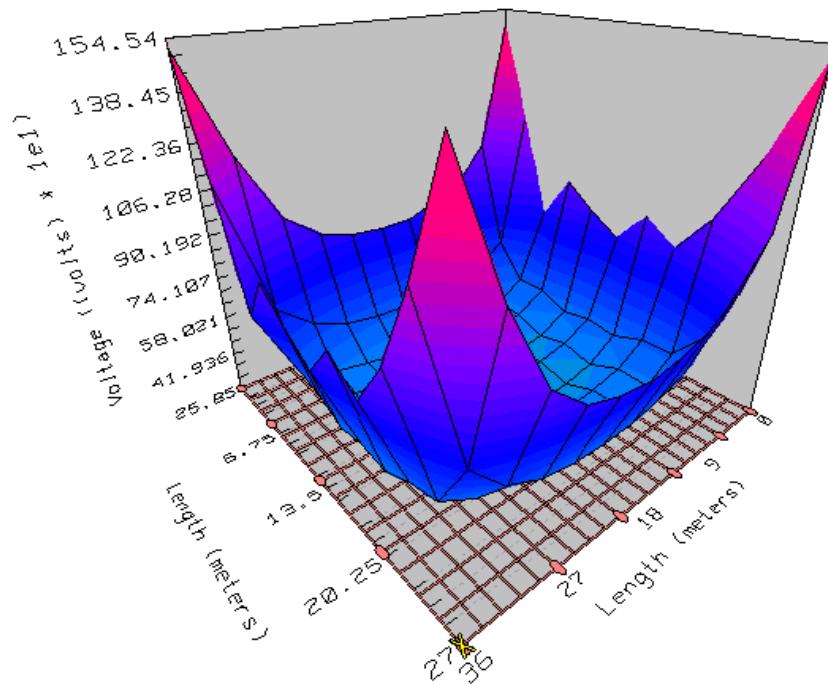


Figura 42 - Terceira Iteração - Gráfico representado nos eixos x, y e z, dos níveis de tensão de toque na superfície da malha.

Considerando os resultados das fórmulas simplificadas, temos que as condições de potenciais de segurança da malha já estão dentro dos valores solicitados e que um modelo final de malha já poderia ser implementado. Mas, fica evidente pela figura acima que, com o 3º modelo de malha instalado no solo, alguns pontos do terreno da SE poderiam estar sujeitos a altos potenciais. Portanto, haveria riscos de acidentes ou até mesmo de morte com relação aos funcionários ou pessoas que estivessem dentro da Subestação em um caso de falta fase-terra.

Para melhorar a eficiência da malha nesses casos e diminuir a probabilidade de situações como descritas anteriormente ocorram, algumas medidas podem ser aplicadas. Uma delas seria o aumento do valor da corrente de curto-circuito considerada para os cálculos do dimensionamento ou o aumento de número de condutores e hastes de aterramento próximos à periferia e vértices da malha. Ambas as soluções não são aconselhadas e, além disso, acabam usando uma quantidade de material muito acima do necessário para a confecção da malha. Nestes casos, o uso de métodos mais eficientes ou as simulações dos potenciais feitas através de software é a mais indicada.

No último modelo de redes quadradas, hastes de aterramento serão adicionadas nas regiões dos vértices da malhas, para que o nível da tensão de toque se reduza até atingir um valor de potencial tolerável. A simulação será feita mantendo o mesmo espaçamento D, o mesmo número de condutores da malha da terceira iteração e alocando no total 38 hastes de aterramento de 3m cada, concentradas principalmente nos vértices da SE. A figura 43 apresenta a malha modelada.

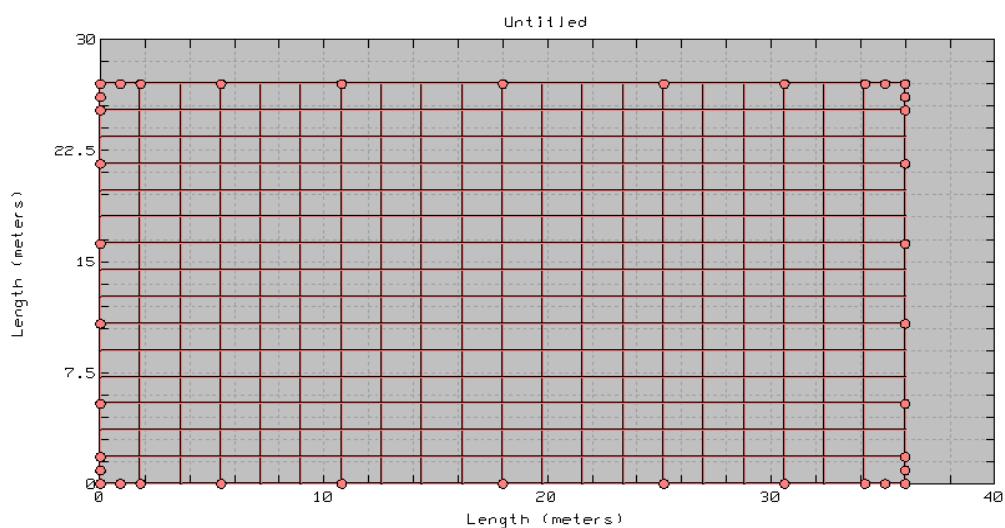


Figura 43 - Quarta iteração – Malha com hastes de aterramento concentradas nos vértices

Pelos resultados obtidos, pode-se observar na figura 43 que todos os potenciais estão dentro dos limites de segurança estabelecidos e que nenhum ponto do perfil analisado representa um nível de tensão perigoso. A adição de hastes de aterramento facilita o fluxo de corrente na região mais crítica da malha de aterramento (periferia), fazendo com que o nível de tensão dessa área diminua, atingindo assim valores dentro dos limites estabelecidos.

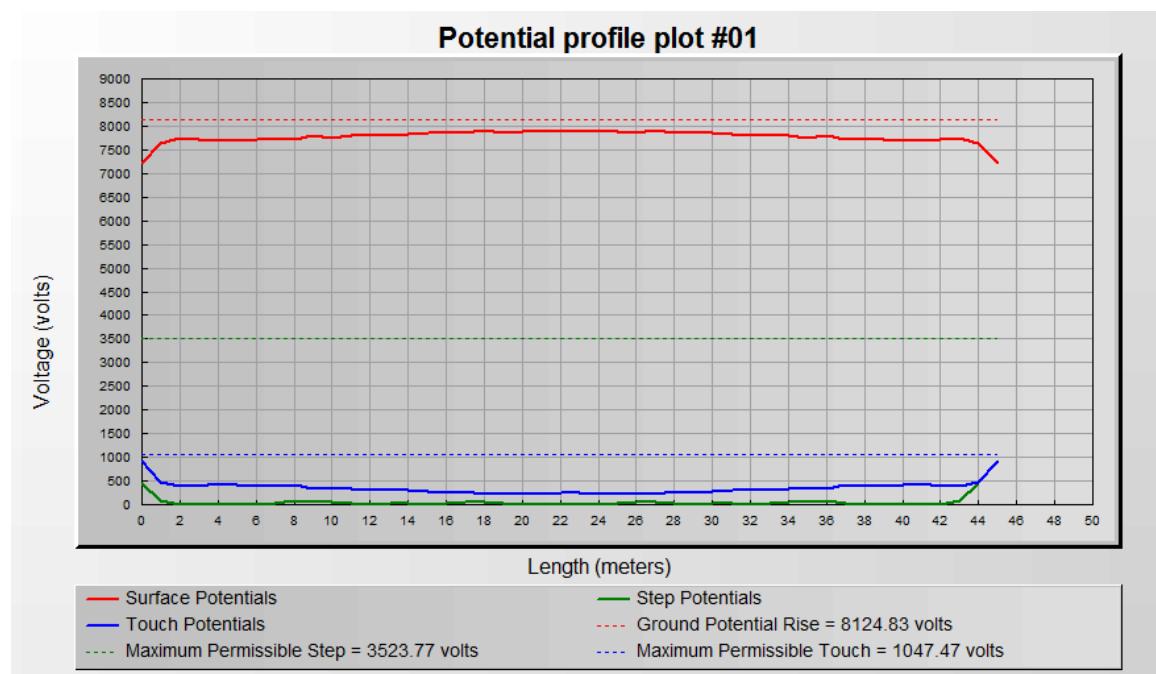


Figura 44 - Quarta Iteração - Tensão de passo, toque e GPR na superfície da malha.

Segue abaixo tabela com os resultados do último modelo de malha, considerando $L_c = 1143\text{ m}$ e $L_h = 54\text{m}$.

Tabela 13 - Valores da 4º Malha

4º Caso	R_M	$V_{passo\ max}$	$V_{toque\ max}$
Software	1,96 Ω	437,78 V	919,9 V

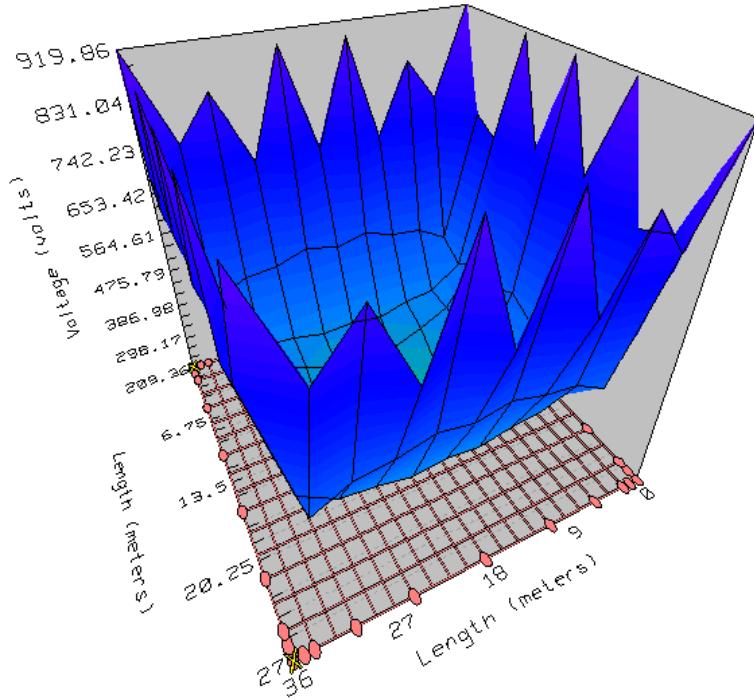


Figura 45 - Quarta Iteração - Gráfico representado nos eixos x, y e z, dos níveis de tensão de toque na superfície da malha.

Com isso, finalmente chega-se a um modelo de malha de aterramento que pode ser utilizado na proteção da subestação. Mas ainda é possível obter uma configuração mais econômica, que atenda aos critérios de segurança estabelecidos e utilize uma quantidade menor de material.

Com alteração do espaçamento dos condutores da malha, pode-se obter uma configuração que utilize um menor número de condutores e de hastes de aterramento, aumentando assim a qualidade do design da malha e, devido ao uso de uma quantidade menor de material, reduzindo o preço final da mesma. No item 9.4 será apresentado um tipo de configuração de malha usada para diminuir a quantidade de material que será utilizada em sua montagem e o item 9.5 simula um protótipo de malha usando da configuração apresentada logo abaixo.

9.4. Taxa de Compressão do Condutor, dimensionamento da malha com Potencial Constante.

A taxa de compressão “c” apresentada em [17] será utilizada para o dimensionamento de malhas de aterramento com potencial constante. Levando em consideração as

figuras 34, 37, 40 e 43 onde se evidenciaram níveis de tensões mais elevados na periferia da SE e diferentemente das malhas de aterramentos com condutores igualmente espaçados, apresentados no item anterior, sugere-se o dimensionamento de malhas com espaçamentos desiguais entre seus condutores. Com isso, para que a malha possa ter um nível de tensão constante em sua superfície, uma constante “c” irá multiplicar o espaçamento dos condutores consecutivos, iniciando pelos condutores do centro da malha. Para os valores de compressão “c” menores que 1, a quantidade de condutores em direção à periferia da malha apresentará uma maior concentração em relação aos condutores do centro e para o caso em que “c” for igual a 1 a malha de aterramento terá espaçamentos regulares.

Abaixo encontra-se um exemplo de malha com fator de compressão igual a 0,8

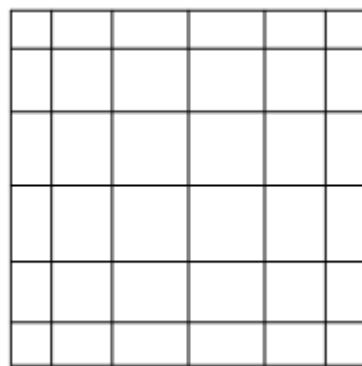


Figura 46 - Malha de Aterramento considerando c=0,8.

O fator de compressão (c) está relacionado à separação máxima entre condutores (d_{max}), as dimensões da malha e o número de condutores na malha. A distância d_{max} ocorre no centro da malha. Sendo N o número de condutores perpendiculares a um dos eixos da malha e L o comprimento total do eixo. A distância d_{max} é dada pelas expressões:

$$d_{max} = \frac{L(1-c)}{1+c-2c\left(\frac{N}{2}\right)^{+1}} \quad \text{para } N \text{ par} \quad (9.1)$$

$$d_{max} = \frac{L(1-c)}{2\left(1-c\left(\frac{N-1}{2}\right)\right)} \quad \text{para } N \text{ ímpar} \quad (9.2)$$

Para o estudo apresentado em [17] foram abordados 3 diferentes configurações de solo: Solo com a resistividade da 1° camada 10 vezes maior que a resistividade da 2° camada, solo com a resistividade da 1° camada com 1/10 do valor da resistividade da 2° camada e o modelo de solo homogêneo.

Os resultados dos fatores de compressão utilizados em diferentes tipos de modelos de solos mostraram que:

- Solos com valores de resistividade da 1° camada superiores aos da 2° camada, tendo que as espessuras da 1° camada sejam superiores a 3 m, o fator de compressão a ser usado deve variar de 0,8 a 0,9. Com espessuras da 1° camada de solo menores que 3 m, o fator de compressão utilizado deve ser próximo de 0,6;
- Solos com valores de resistividade da 1° camada inferior ao da 2° camada, tendo que as espessuras da 1° camada sejam inferiores a 10m, o fator de compressão a ser usado deve variar de 0,2 a 0,3. Com espessuras da 1° camada do solo maiores que 10 m, o fator de compressão utilizado varia de 0,4 a 0,5;
- No caso de solos homogêneos, fatores de compressão variando entre 0,6 a 0,8 apresentam os menores valores de potenciais de toque na superfície da subestação.

Vale ressaltar que os resultados apresentados acima condizem aos resultados de modelos de solo estudados na referência [17] e serão considerados apenas como valores exemplos para o uso do fator de compressão “c”.

Neste trabalho, a seguinte metodologia será utilizada para os projetos:

- Obter uma malha de aterramento com espaçamentos regulares e que atendam as condições de segurança do projeto, definindo assim o número de condutores utilizados em cada eixo da malha;
- Através do modelo de estratificação do solo, um fator de compressão adequado será definido e, com isso, deve-se retirar os condutores que ultrapassarem as dimensões da malha, tomando como referência a aplicação deste fator;
- A nova configuração dos condutores da malha (espaçamentos desiguais) será analisada, levando em consideração as tensões de toque e de passo máximas encontradas na superfície da SE;
- Se a malha atender aos critérios de segurança da SE, será obtida uma malha de aterramento com menor custo (menor quantidade de material) em comparação a 1° malha de aterramento projetada;
- Caso a nova malha não atenda aos critérios de segurança, um novo fator de compressão deverá ser escolhido e a simulação dos potenciais da malha deverão ser executados novamente.

9.5. Modelo da malha otimizada

Escolhendo um fator de compressão adequado com relação à resistividade do terreno, o fator utilizado para o modelo de solo homogêneo, especificado no item 9.2, foi de $c = 0,8$. Inicialmente, parte-se de uma malha que já atenda aos critérios de segurança determinados (malha da 4° iteração), para obter uma modelo de malha de aterramento com superfície equipotencial que utilize uma quantidade menor de condutores e de hastes de aterramento e que, portanto, tenha um menor custo para o projeto.

Os valores da corrente de curto circuito (I_C), *split-factor*, característica do sistema e quantidade de brita adicionada no solo são os mesmos que foram utilizados no item 9.2. Para as dimensões da malha, temos $L_c = 819\text{ m}$, $L_h = 123\text{ m}$, sendo que este modelo possui 41 hastes de aterramento de 3 m.

Considerando estes valores, tem-se como resultado a malha de superfície equipotencial da figura 47.

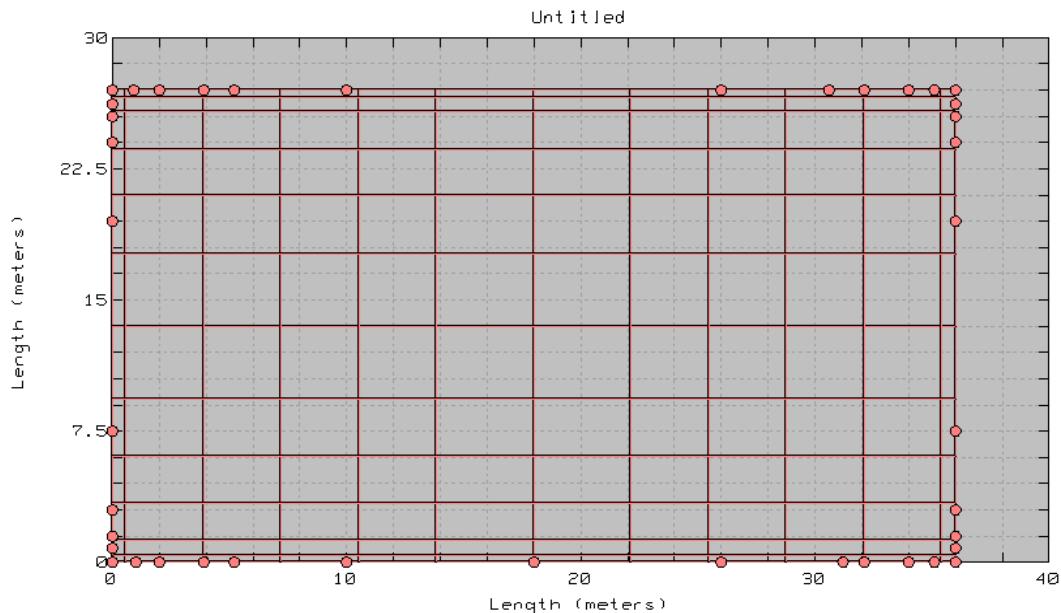


Figura 47 - Malha utilizando o fator de compressão

A malha possui uma maior concentração de condutores em direção a sua periferia e um número total de condutores menor, com relação à malha da figura 43. Com a simulação dos níveis de potencial da superfície do terreno pode-se visualizar que a malha acima atende todos os critérios de tensão de toque, tensão de passo e GPR máximos admissíveis a uma pessoa. Temos também que houve a redução de 8 condutores

verticais e 3 condutores horizontais sendo que no total a quantidade em metros de material retirado da malha de aterramento foi de 324 m.

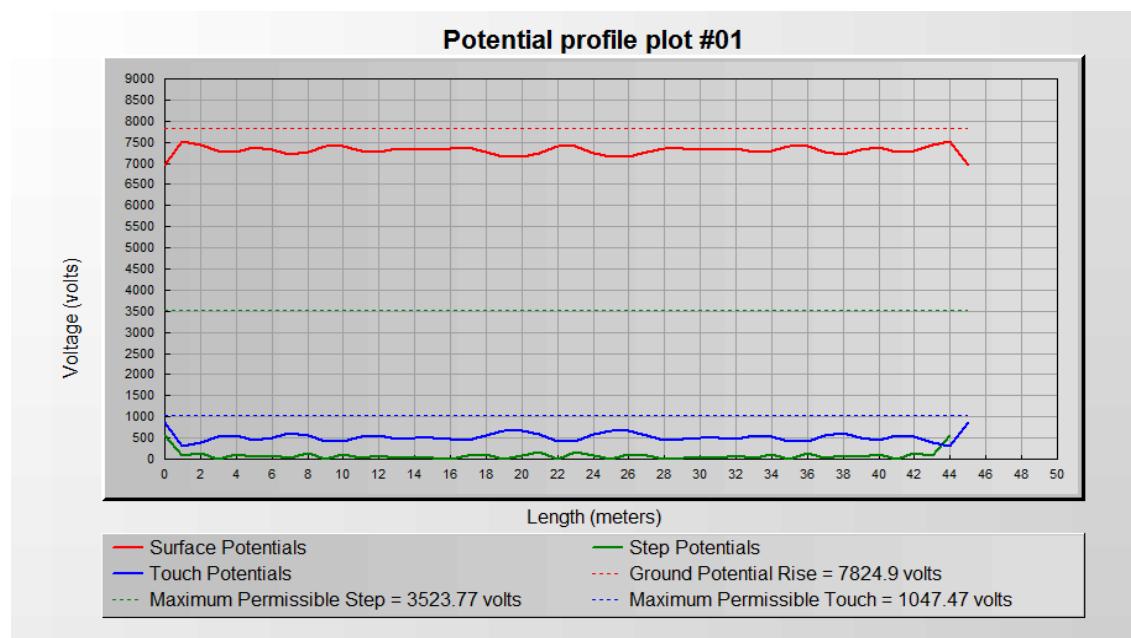


Figura 48 - Quinta Iteração - Tensão de passo, toque e GPR na superfície da malha

Na figura 48 fica fácil visualizar a mudança de comportamento do potencial da superfície. O gráfico mostra que a variação de tensão de toque diminui, quando comparado as malhas anteriores e na Figura 49 é possível verificar o comportamento do potencial de toque em todos os pontos do terreno da SE.

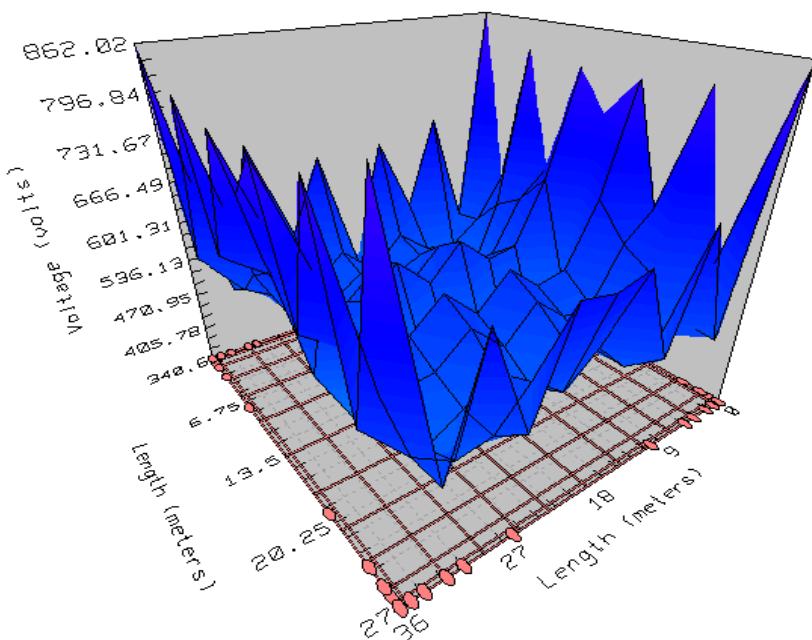


Figura 49 - Quinta Iteração - Gráfico representado nos eixos x, y e z, dos níveis de tensão de toque na superfície do terreno da subestação.

Tabela 14 - Resultados última malha

Último caso	R_M	$V_{passo\ max}$	$V_{toque\ max}$
Software	2,00 Ω	567,36 V	862,02 V

O modelo de malha de superfície equipotencial foi apresentado neste item com o objetivo de analisar o comportamento das tensões do solo da SE e mostrar a diferença desta configuração para a configuração de malha com redes quadradas. Deve-se ressaltar que as fórmulas apresentadas neste trabalho não são adequadas para o dimensionamento deste tipo de configuração.

Portanto, chega-se a uma malha com uma relação custo *versus* segurança melhor quando comparada aos outros modelos vistos anteriormente e temos o modelo final do trabalho, que poderá ser instalado no terreno da subestação.

10. Conclusão

O primeiro objetivo do trabalho foi de apresentar as fórmulas e a teoria para dimensionar uma malha de aterramento. Portanto, o projeto iniciou-se apresentando as definições que são usadas em estudos de malha de aterramento com o objetivo de esclarecer termos específicos da disciplina. Os materiais que farão parte da malha de terra e os principais parâmetros a serem calculados foram brevemente descritos para auxiliar no entendimento dos capítulos posteriores. Com isso, foi explicada a função de uma malha de aterramento em uma subestação, sua iteração com os fatores externos que a cercam, tais como características do solo, temperatura do ambiente e umidade do solo e a ordem dos procedimentos a serem empregados para o dimensionamento dos condutores e das hastes de aterramento.

Com a idéia global do projeto definida, nos capítulos de 4 à 8 foram descritos os métodos usados para o dimensionamento de malhas de aterramento. Para medição das características do solo, o procedimento abordado no capítulo 4, de acordo com a NBR 7117-1981, foi o método de Wenner. Suas etapas foram comentadas e um exemplo do cálculo da resistividade do terreno foi apresentado. Vale ressaltar que a escolha pelo método de Wenner foi feita por ele ser um dos mais utilizados para a obtenção das resistividades dos terrenos das subestações.

No Capítulo 5, para o cálculo do modelo de resistividade equivalente do terreno, o solo de característica homogênea não apresentou dificuldades na obtenção de seu modelo equivalente porém, para o solo de característica heterogênea, a maioria dos métodos encontrados possuía um alto nível de complexidade, sendo que para terrenos com variação de resistividade elevada são necessários utilização de softwares específicos para a obtenção de seus modelos. Como o objetivo do trabalho foi o de apresentar fórmulas simplificadas para o cálculo da malha e suas limitações o modelo de solo estratificado em duas camadas apresentou um nível satisfatório de precisão para a maior parte das situações encontradas, sendo que o método gráfico de Sundue foi apresentado neste capítulo para o cálculo da resistividade do solo biestratificado.

O capítulo 6 apresentou, primeiramente, a importância na rapidez da atuação do sistema de proteção da subestação, para garantir a segurança humana em sua superfície. Através de pesquisas de artigos conclui-se que o corpo humano suporta poucos segundos de exposição a choques elétricos, sendo que a malha de aterramento é projetada considerando este período de exposição a falta elétrica como um dos principais pontos para seu dimensionamento. O tempo usado em projetos, referente a atuação da proteção do sistema também foi citado, considerando que o período

estipulado para atuação da proteção secundária, caso a proteção principal falhe e para a completa eliminação da falta, é de 0,5 s. Com esta informação, os limites máximos de potenciais admissíveis a segurança humana, são calculados através das fórmulas de “tensão de passo” e “tensão de toque”. Todas elas, mais os valores dos parâmetros referentes a estes cálculos, usados durante o trabalho, foram retirados da norma IEEE std 80-2000.

No capítulo 7, os casos dos tipos de falta fase-terra e falta fase-fase-terra foram explicados, considerando principalmente como ocorre sua contribuição para a corrente de malha da subestação. Os fatores que devem ser considerados para calcular a quantidade de corrente que a malha de aterramento irá absorver também foram destacados. Através deste, foi possível verificar que a contribuição da corrente de falta para a malha será definida pelos valores das resistências equivalentes da malha de aterramento e da linha de transmissão, sendo que somente a parcela de sequência zero irá contribuir para a corrente de malha. Além disso, as equações utilizadas para o cálculo da impedância equivalente das linhas de transmissão foram deduzidas e explicadas.

Com a teoria necessária das definições sobre as malhas de aterramento e meios externos que influenciam em seu dimensionamento abordadas no capítulo 8 foram descritas as etapas necessárias para o projeto de malha através de fórmulas simplificadas. Foram citados também os trabalhos do site do IEEE que comprovam o resultados satisfatórios que tais fórmula fornecem. Apesar disso, na prática os métodos para o cálculo da resistência da malha em solos estratificados em duas camadas não apresentaram resultados próximos aos resultados do software, portanto, o modelo de solo homogêneo, que apresentou melhores resultados, foi o escolhido para os cálculos dos estudos de caso do anexo A. Já para os modelos equivalentes de resistividade do solo, conclui-se que as fórmulas apresentadas para estratificação do solo são eficazes somente para terrenos com característica de solo homogêneo e heterogêneo, conforme resultados apresentados nas pesquisas que foram consultadas. Sendo que para os demais casos, é necessário o uso de ferramentas computacionais para se obter o modelo de solo equivalente adequado.

Ainda no capítulo 8, para os níveis de potenciais de rede e potenciais de passo, nota-se que as equações abrangem diferentes configurações de malhas de aterramento e fornecem um resultado próximo aos potenciais máximos de toque, que foram obtidos pelos gráficos do software, nas regiões de periferia do terreno. Porém as mesmas não permitem ter a visualização dos potenciais que surgem ao longo da superfície da SE,

sendo que somente o potencial mais elevado do terreno é encontrado. No final do capítulo foi desenvolvido um fluxograma com as etapas usadas no dimensionamento da malha e toda a dinâmica do processo iterativo dos cálculos foi descrita.

O capítulo 9 apresentou o dimensionamento de uma malha através de um software, começando por seu modelo mais simples até obter um design com o item custo *versus* segurança melhorado e a cada iteração os resultados eram comparados aos resultados obtidos no anexo A. Pode-se concluir dos resultados obtidos neste capítulo que as fórmulas simplificadas podem ser empregadas em projetos de malhas de aterramento, porém, nota-se nos gráficos de potenciais que os vértices da malha possuem níveis de potenciais de toque que não são calculados pelas fórmulas. Por isso, para usar estas equações em projetos de malha de aterramento é necessário estar ciente que, mesmo que as fórmulas forneçam resultados que afirmam que os potenciais da malha estão dentro dos valores máximos toleráveis a segurança humana, pode haver regiões da Subestação, como os vértices do terreno, que se encontram fora destes critérios. Portanto, para estes casos, a adição de hastes de aterramento ou até mesmo de novos condutores devem ser feitos nestes pontos críticos do terreno. As malhas projetadas através de softwares possuem a vantagem de fornecer uma melhor precisão nos resultados dos parâmetros envolvidos, sendo que os gráficos dos potenciais com representação nas 3 dimensões podem ser utilizados para facilitar a análise dos pontos críticos da malha. Com isso é possível detectar as regiões da malha que apresentam problema e diminuir o potencial somente daquela região. Sendo assim, é possível obter uma economia nos materiais usados na montagem da malha, como foi mostrado no item 9.5, e ao mesmo tempo garantir o atendimento de todos os critérios de segurança.

O objetivo do capítulo 9, ademais dos fatos destacados acima, foi o de apresentar alguns recursos computacionais existentes nos estudos de malha de terra e mostrar através de gráficos o comportamento dos potenciais existentes dentro do terreno de uma subestação, para o caso da falta fase-terra.

Portanto, neste trabalho a teoria inicial de malhas de aterramento, suas fórmulas, os meios externos que influenciam em seu dimensionamento, métodos gráficos usados para melhor o entendimento a análise e a visualização do comportamento de seus níveis de potenciais que surgem na superfície da subestação foram todos apresentados e explicados. Sendo assim, o trabalho abordou os itens necessários para fazer um projeto de estudo de malha de aterramento e destacou a limitações das fórmulas simplificadas.

11. Referências Bibliografias

- [1] Kindermann, G.; Campagnolo, J. M; Aterramento Elétrico. 3. Ed., Edição do Autor, Porto Alegre, RS, 1995.
- [2] NBR 7117 “Medição da resistividade do solo pelo método dos quatro pontos (Wenner)” pp 3, ABNT, Dez. 1981.
- [3] IEEE Std 80-2000 (Revision of IEEE Std 80-1986); “IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding” pp. 53, Ago. 2000.
- [4] IEEE Std 142-2007 (Revision of IEEE Std 142-1991); “IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems”, Jun. 2007.
- [5] Raggi, L.M.R., “ Projeto de malhas de aterramento: contribuição ao cômputo da estratificação do solo” Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Orientador: Prof. Silvério Visacro Filho, Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, Belo Horizonte, 2009.
- [6] A. P. R. Coura, ENERSUL; C. M. V. Tahan; J. A. Jardini; R. P. Casolari; J. G. M. Andrade; M. Lopes, EPUSP/PEA1 “Otimização de Sistemas de Aterramento em Subestações 34,5 / 13,8 kV”.
- [7] Dalziel, C. F., “Dangerous electric currents,” AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. 65, pp. 579–585, 1123–1124, 1946.
- [8] Biegelmeier, U. G., And Lee, W. R., “New considerations on the threshold of ventricular fibrillation for AC shocks at 50–60 Hz,” Proceedings of the IEEE, vol. 127, pp. 103–110, 1980.
- [9] Dalziel, C. F., “Dangerous electric currents,” AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. 65, pp. 579–585, 1123–1124, 1946.
- [10] SENAI, “Curso Básico NR10 – Segurança em Instalações e Serviços em eletricidade”, Apostila de Curso, Rede SENAI de Ensino a Distância, São Paulo, 2008
- [11] S .T. Sobral , C. A. O.Peixoto , J. Amon F., D.S.Rezende, A.A.Menezes, “Transmission lines using aluminium cable steel reinforced ground wires nearby power substations ”, pp. 57 – 64, Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America (T&D-LA), 2010 IEEE/PES

- [11] Endrenyi, J.: 'Analysis of transmission tower potentials during ground faults', IEEE Trans., 1967, PAS-86, (10), pp. 1274–1283.
- [12] J. Endrenyi. Evaluation of resistivity tests for design of station grounds in nonuniform soil. *AIEE Transactions*, December, 1963. pp.966-970.
- [13] C.N. Chang, "computation of current-division factors and assessment of earth-grid safety at 161/69kV indoor-type and outdoor-type substations" IEE proc.-Gener. Transm. Distrib., Vol. 152, No. 6, November 2005.
- [14] X. Cao, G. Wu, W. Zhou, And R. Li, "New method for calculating ground resistance of grounding grids buried in horizon two-layer soil," in Proc. Int. Conf. High Voltage Eng. Appl., 2008, pp. 241–244.
- [15] Y. L. Chow, M M A Salama, "A Formula for Resistance of Substation Grounding Grid in Two-Layer Soil", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 10, No. 3, July 1995
- [16] Sverak, G. J.; "Progress in Step and Touch Voltage Equations of ANSI/IEEE Std 80 – Historical Perspective" IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 13, No. 3, July 1998.
- [17] Hyung-Soo Lee , Jung-Hook Xim, Farid P. Dawalibl, Jinxi Ma - "EFFICIENT GROUND GRID DESIGNS IN LAYERED SOILS" IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 13, No. 3, July 1998.

12. Apêndice A – Estudo de caso de Malhas de Terra

12.1. Dados Iniciais do Projeto

Dados considerados nos cálculos:

Tabela A1 - Valores pré-estabelecidos

Duração da falta fase-terra, t	0,5s
Tensão da linha de transmissão	138 kV
Resistividade da camada de Brita, ρ_s	3000 Ω.m
Corrente de falta considerado pior caso, I_f	8,5 kA
Espessura da camada de Brita, h_s	0,1 m
Profundidade da malha, h	0,5 m
Área da subestação, A_{SE}	850 m ²
Característica do sistema, X/R	8,7
Frequência do sistema	60 Hz
Projetado para pessoas com o peso acima de,	70 kg

Para obtermos um modelo de malha de aterramento que cumpra os critérios de segurança exigidos no projeto, considerou-se os passos do fluxograma da figura 32 do item 8.15. A malha será dimensionada com o auxílio das fórmulas simplificadas apresentadas neste trabalho, levando em consideração os critérios de tensão de passo e de toque máximo que podem surgir dentro do terreno da subestação. O objetivo é de comparar os resultados obtidos através do software, com as fórmulas simplificadas, verificar a precisão dos métodos apresentados no trabalho e ressaltar até qual tipo de configuração é possível utilizar estas fórmulas.

Ressaltando que elas são usadas somente para os casos em que a malha tenha um espaçamento regular entre seus condutores adjacentes. Portanto, elas não poderão ser usadas para cálculos de malhas de aterramento com superfície equipotencial.

A1 – 1º Modelo de Malha: Design Inicial

1º passo: Dados de Campo

A figura A1 mostra as dimensões do local onde a malha de aterramento será instalada, lembrando que deverá ser considerado para a malha 1 metro a mais de comprimento e largura, levando em consideração os casos em que possa haver uma pessoa que esteja

tocando a cerca do terreno do lado de fora da subestação, quando ocorrer uma falta elétrica.

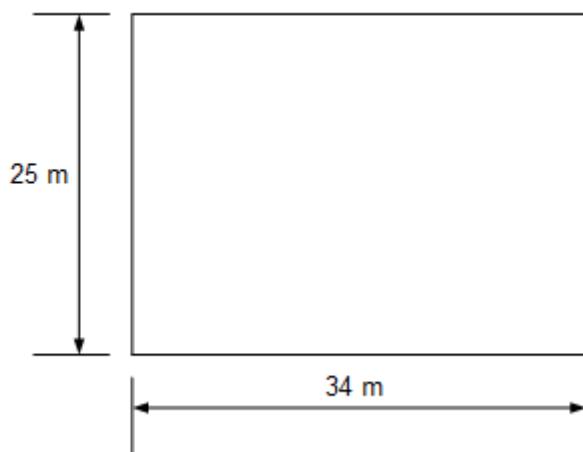


Figura A1 - Dimensões do terreno da subestação

Esta extensão da malha deve ser considerada para garantir que, caso uma pessoa do lado de fora da subestação esteja em contato com o muro, ela fique com o mesmo potencial existente na malha.

O material adicionado na superfície da subestação será a brita, sendo que uma camada de 10 cm deverá ser colocada no terreno e seu valor de resistividade considerado nos cálculos do projeto será $\rho_s = 3000 \Omega \cdot m$.

2º passo: Determinação do diâmetro do condutor

Com os valores da característica do sistema “X/R” e da corrente de curto-circuito máxima “ I_f ” pré-determinados na tabela A1, parte-se para o 2º passo do fluxograma.

Com isso, deve-se calcular o fator de decremento para o ajuste do valor da corrente de falta fase-terra. Segue abaixo cálculo

$$t = 0,5 \text{ s} ; X/R = 8,7 ; T_a = \frac{X}{120\pi R} = 0,023$$

$$D_f = \sqrt{1 + \frac{T_a}{t} \cdot (1 - e^{-\frac{T_a}{t}})} = 1,001$$

Com isso temos o seguinte valor de corrente de falta,

$$I_f = D_f \cdot I_{cc1\theta T} = 8,51 \text{ kA}$$

$$\text{Ou seja, } 3I_o = I_f = 8,51 \text{ kA}$$

Adotamos para o dimensionamento da seção do cabo o maior curto-circuito, independentemente da corrente que será dispersa pela malha, pois toda a corrente percorrerá a malha e produzirá o aquecimento do cabo. Portanto, o maior valor de I_f deve ser considerado nos cálculos de dimensionamento do tamanho da seção transversal. O parâmetro t_s será a duração da corrente de falta para o dimensionamento do condutor de aterramento.

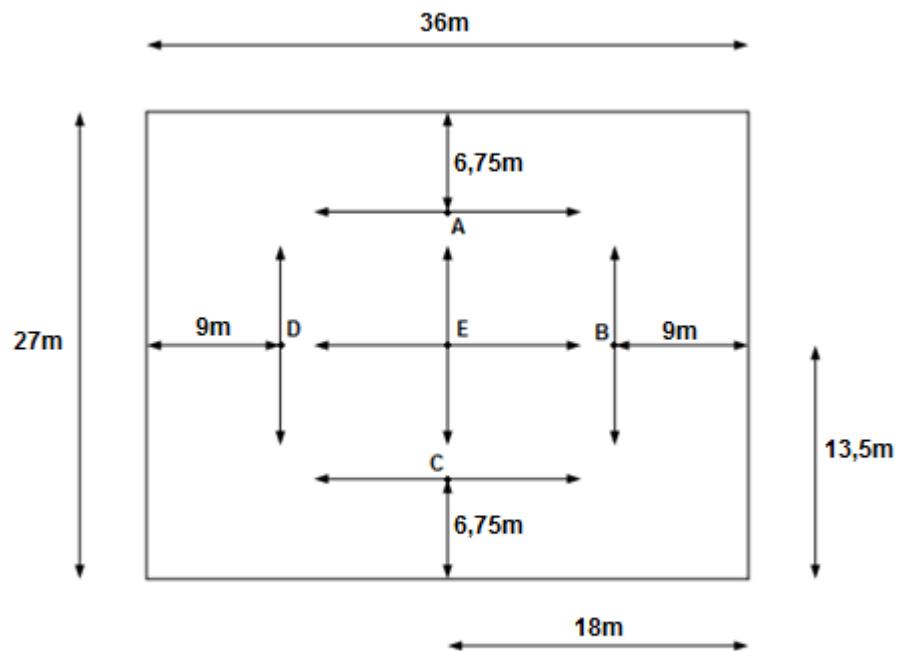
Será usado na malha de aterramento o condutor “*Commercial Hard Copper Wire*” de condutividade 97. Usando os dados da tabela 1, da página 42 da norma IEEE std 80-2000, segue abaixo os cálculos da área da seção transversal do condutor,

$$S = 3I_o \cdot \sqrt{\frac{\frac{t_s \cdot ar \cdot \rho r \cdot 10^4}{TCAP}}{\ln [1 + \left(\frac{Tm - Ta}{Ko + Ta} \right)]}} = 23,02 \text{ mm}^2$$

Da equação acima, temos que $S = 23,02 \text{ mm}^2$, sendo assim, o raio do condutor é $r = 0,00271 \text{ m}$. Com base neste cálculos, um condutor de #4 AWG poderia ser usado, mas considerando que a seção mínima de cabos de cobre nus usados em projetos de malha é de 75 mm^2 , um condutor de 2/0 AWG com diâmetro de $d=0,0105 \text{ m}$ e seção transversal de $86,6 \text{ mm}^2$ é tido como uma melhor escolha e será usado na malha de aterramento.

3º passo: Estratificação do solo

Para a medição do terreno será usado o método de medição de Wenner, abordado no capítulo 4 deste trabalho. As medidas do solo da subestação foram feitas nos perfis de solo A, B, C, D e E, como é mostrado na figura A2. Os valores usados são obtidos através da medição de resistência do solo.



Pontos de Medição: A, B, C, D e E
Direções de medição: x e y

Figura A2 - Perfis usados na medição

Segue abaixo tabela A2, com os valores da resistividade média do solo em função da distância entre os eletrodos de medição.

Tabela A5 - Valores médios de resistividade

Distância dos eletrodos	Média (ohms.m)
2	134,3
4	141,5
8	150,0
16	115,7
32	158,5

Como a resistividade do terreno não possui variações maiores que 30% em relação ao valor médio, a resistividade do solo é considerada com sendo homogênea e seu valor é de $\rho = 150,0 \Omega.m$.

4º Passo: Critério de passo e toque

Os critérios de tensão de passo e toque são de primordial importância para a malha de aterramento. Eles devem ser atendidos com o intuito de evitar acidentes fatais na ocorrência de faltas elétricas. Se uma pessoa estiver dentro da subestação ou em uma região que tenha algum elemento conectado a mesma, a malha deve garantir a segurança desta pessoa e a integridade dos equipamentos da SE até o momento de atuação do sistema de proteção.

Seguem abaixo os cálculos das tensões de passo e de toque máximas toleráveis por uma pessoa, quando da presença de uma falta.

Cálculo do efeito da adição da camada de brita no terreno,

$$C_s = 1 - \frac{0,09(1 - \frac{\bar{\rho}a}{\rho_s})}{2h_s + 0,09} = 1 - \frac{0,09(1 - \frac{150}{3000})}{2,01 + 0,09} = 0,705$$

Para os potenciais de toque e de passo máximos temos os seguintes resultados,

$$V_{toque_{MAX}} = (1000 + 1,5 \cdot C_s \cdot \rho_s) \times \frac{0,157}{\sqrt{t_s}} = 926,42 \text{ V}$$

$$V_{passo_{MAX}} = (1000 + 6 \cdot C_s \cdot \rho_s) \times \frac{0,157}{\sqrt{t_s}} = 3039,61 \text{ V}$$

5º Passo: Design Inicial

Com a área do terreno da subestação e com os dados da resistividade do solo já conhecidos, um design inicial da malha é escolhido. Caso este modelo de malha atenda todos os padrões de segurança no decorrer da extensão da subestação e suas partes adjacentes, a malha de aterramento poderá ser usada para a proteção do sistema. Mas, caso houver algum setor da subestação onde os critérios de segurança ainda não sejam atendidos a malha deverá ser redimensionada podendo usar as seguintes técnicas:

- aumento do número de seus condutores;
- adicionar hastes de aterramento ao redor de seu perímetro;
- diminuir a distância dos conectores adjacentes na região da periferia da malha;

- ou através de outras estratégias.

Como optou-se pelo projeto de uma malha com espaçamentos iguais entre os condutores adjacentes, iremos utilizar o modelo com a redes quadradas. Sendo assim, os valores iniciais utilizados são de $D = 3\text{ m}$ e $h = 0,5\text{ m}$. Segue abaixo os cálculos das dimensões da malha.

$$N_a = \frac{36}{3} + 1 = 13$$

$$N_b = \frac{27}{3} + 1 = 10$$

$$L_c = aN_b + bN_a = 36.10 + 27.13 = 711\text{ m}$$

$$L_T = L_c + L_h = (36.10 + 27.13) + 0 = 711\text{ m}$$

$$L_p = 36.2 + 27.2, L_p = 126\text{m}$$

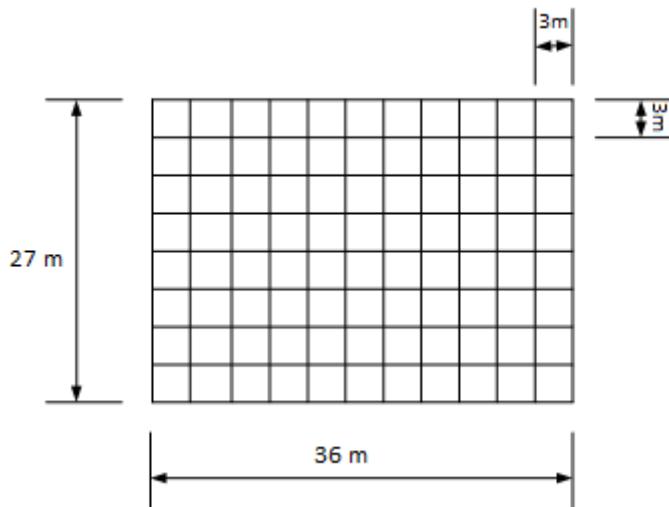


Figura A4 – 1º Modelo de malha aterrramento

6º Passo: Determinação da resistência e da corrente da malha

Como o solo da subestação possui um terreno de resistividade homogênea, a fórmula utilizada para calcular a resistência da malha de aterramento será a do item 8.8.1.

Portanto, segue abaixo a equação que será utilizada neste cálculo,

$$R_M = \rho \left[\frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left(1 + \frac{1}{1 + h\sqrt{20/A}} \right) \right]$$

$$R_M = 2,29 \Omega$$

Nos casos de falta (fase-terra por exemplo) teremos parte da corrente de falta escoando pela malha e a outra parcela sendo escoada pelos cabos guarda. Para determinarmos qual parcela de corrente irá percorrer os caminhos citados anteriormente, devemos além de ter o valor da resistência da malha de aterramento, também devemos calcular a resistência equivalente do sistema de transmissão. Segue abaixo a figura representando as resistências do sistema.

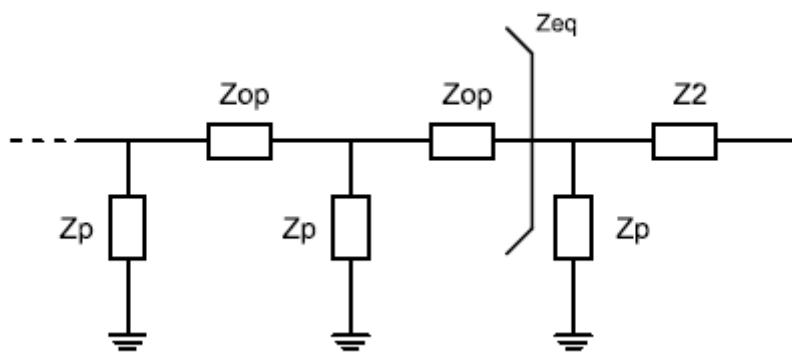


Figura A5 - R1 representando a resistência dos cabos para raio, Rp é o valor da resistência equivalente de pé de torre e R2 o valor do vão de entrada da linha

Onde,

Z_{eq} – Resistência equivalente até o vão de entrada da subestação;

Z_{op} – Resistência equivalente dos cabos no vão de entrada;

Z_p – Resistência de pé de torre;

Para o cálculo da impedância equivalente dos cabo pára-raios das linhas de transmissão, que chegam na SE, temos abaixo os dados dos cabos do sistema de transmissão.

- Cabos na extensão da linha de transmissão: OPGW 14,4 mm e Dotterel
- Quantidade de cabos na linha de transmissão: 2;
- Vão médio: 397 m;
- Quantidade de cabos no vão de entrada: 2 cabos (um OPGW e um Dotterel);)

- Vão de entrada: 56 m;
- Resistência dos cabos: OPGW 14,4 mm = 0,486 Ω/km, Dotterel = 0,4145 Ω/km;
- Resistência do pé da torre: 20 Ω.

Estes dados são para linhas de transmissão longas (mais de 20 vãos) e, por isso, iremos usar o modelo ladder infinito para determinar a resistência equivalente dos cabos pára-raios. Segue abaixo os cálculos,

Profundidade equivalente do condutor de retorno fictício (m)

$$D_e = 658,368 \cdot \left(\frac{\rho_s}{f}\right)^{\frac{1}{2}} = 658,368 \cdot \left(\frac{3000}{60}\right)^{\frac{1}{2}} = 4,655 \times 10^3 \text{ m}$$

Resistência equivalente dos n cabos pára-raios (Ω/km)

$$r_e = \frac{rg_{OPGW} \cdot rg_{Dotterel}}{rg_{OPGW} + rg_{Dotterel}} = 0,224 \text{ Ω/km}$$

RMG dos cabos guardas individuais (m) (dados do fabricante)

RMGg1 = 0,0056	RMG do cabo OPGW
RMGg2 = 0,0060	RMG do cabo Dotterel

Distância dos cabos guarda na torre (m)

$$\begin{aligned} dg1g2 &= 5,6 \text{ m} \\ dg2g1 &= 5,6 \text{ m} \end{aligned}$$

Sendo assim, temos que;

$$RMGsr = \sqrt[n^2]{(RMGg1 \cdot RMGg2) \cdot (dg1g2) \cdot (dg2g1)} = 0,18 \text{ Ω/Km}$$

A impedância própria dos cabos guarda [Ω/km] é calculada abaixo:

$$Z_p = (r_e + 0,0593) + j \cdot (0,1736 \cdot \log(\frac{D_e}{RMGsr})) = 0,283 + 0,766i$$

$$Z_{op} = Z_p \cdot V_{\text{vão médio}} = (0,283 + 0,766i) \cdot 0,397 = 0,112 + 0,304i$$

Círculo tipo ladder infinito (Ω):

$$Z = \frac{Z_{op}}{2} + \sqrt{\left(\frac{Z_{op}}{2}\right)^2 + Z_{op} \cdot R_p} = 2,142 + 1,613i \Omega$$

$$|Z| = 2,6814 \Omega$$

Quantidade de cabos no vão de entrada:

Na entrada da SE existirão 2 cabos, um OPGW e um Dotterel;

$$R_{CaboOPGW-Entrada} = \frac{r_{OPGW} \cdot L_{Entrada}}{R_{CaboOPGW-Entrada}} = \frac{0,486 \cdot 0,056}{1} = 0,0272 \Omega$$

$$R_{CaboDotterel-Entrada} = \frac{r_{OPGW} \cdot L_{Entrada}}{R_{CaboOPGW-Entrada}} = \frac{0,4145 \cdot 0,056}{1} = 0,0232 \Omega$$

$$Z_2 = \frac{(R_{CaboOPGW-Entrada} \times R_{CaboDotterel-Entrada})}{(R_{CaboOPGW-Entrada} + R_{CaboDotterel-Entrada})}$$

$$\text{Portanto, } Z_2 = 0,0125 \Omega$$

Sendo assim:

$$Z_{cabo_guarda} = R_2 + \frac{(Z_{eq} \cdot z_p)}{(Z_{eq} + z_p)} = 0,0125 + 2,6814 = 2,693 \Omega$$

Onde, Z_{cabo_guarda} é a resistência equivalente total dos cabos guarda das linhas de transmissão.

Este valor será usado para o cálculo da corrente que efetivamente fluirá pela malha da subestação.

7º Passo: Corrente máxima de malha I_M e o Split Factor S_f

Segue abaixo o circuito que representa a resistência equivalente da malha de aterramento, a corrente de falta fase-terra e a resistência equivalente dos cabos para-raio.

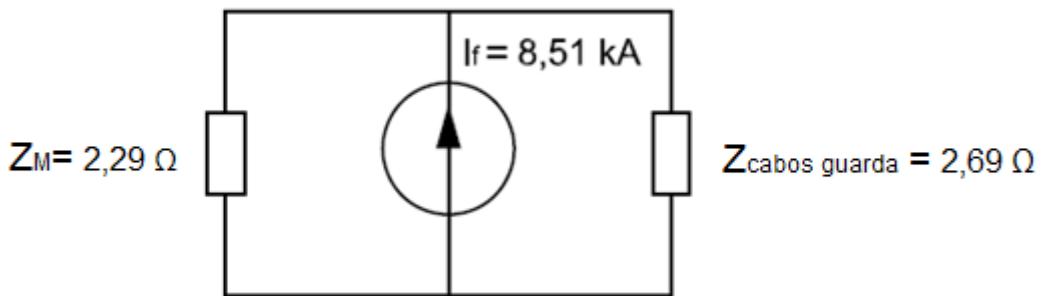


Figura A7 – Divisão da Corrente de Falta

Assim, a divisão de corrente entre os circuitos da malha e dos cabos guarda da linha de transmissão é:

$$I_M = \left(\frac{2,69}{2,29+2,69} \right) \times I_f = 4,59 \text{ kA}$$

$$I_{retorno} = \left(\frac{2,29}{2,29+2,69} \right) \times I_f = 3,91 \text{ kA}$$

Com isso, temos que o fator de split factor será de:

$$S_f = \frac{I_M}{3I_o} = 0,540$$

8º Passo: GPR

O GPR é a elevação de potencial total da malha referido ao infinito. Segue abaixo o cálculo do fator,

$$GPR = R_M \cdot I_M$$

$$GPR = 2,29 \times 4,59 \text{ kA} = 10511,1 \text{ V}$$

Temos que $GPR \geq V_{toque}$, sendo assim, como esse valor excede o valor de toque máximo tolerável, as análises dos potenciais da malha continuarão normalmente.

9º Passo: Tensão de rede

O potencial de rede é representado pela fórmula abaixo:

$$V_m = \frac{\rho_a \cdot I_M \cdot K_m \cdot K_i}{L_c + L_h}$$

Da equação acima, somente os fatores K_m e K_i ainda não foram definidos. Segue abaixo os cálculos destes fatores,

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \cdot \left[\ln \left[\frac{D^2}{16 \cdot h \cdot d} + \frac{(D+2 \cdot h)^2}{8 \cdot D \cdot d} - \frac{h}{4 \cdot d} \right] + \frac{K_{ii}}{K_h} \cdot \ln \left[\frac{8}{\pi(2 \cdot n - 1)} \right] \right]$$

Onde,

$$n = n_a \cdot n_b \cdot n_c \cdot n_d$$

Como a malha em questão possui formato retangular, os valores de n_c e n_d serão iguais a 1 e n_a e n_b calculados. Segue abaixo a resolução,

$$n_a = \frac{2 \cdot L_c}{L_p} = \frac{2.711}{36x2+27x2} = 11,29$$

$$n_b = \sqrt{\frac{L_p}{4 \cdot \sqrt{A}}} = \sqrt{\frac{126}{4 \cdot \sqrt{972}}} = 1,005$$

$n_c = 1$, para malha retangular

$n_d = 1$, para malha retangular

$$n = n_a \cdot n_b \cdot n_c \cdot n_d = 11,34$$

Assim temos,

$$K_{ii} = \frac{1}{(2n)^{\frac{2}{n}}} = \frac{1}{(2 \cdot 11,34)^{\frac{2}{11,34}}} = 0,577$$

e,

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_0}} = \sqrt{1 + \frac{0,5}{1,0}} = 1,225$$

Finalmente temos,

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \cdot \left[\ln \left[\frac{3^2}{16 \cdot 0,5 \cdot 0,01} + \frac{(3+2 \cdot 0,5)^2}{8 \cdot 3 \cdot 0,01} - \frac{0,5}{4 \cdot 0,01} \right] + \frac{0,577}{1,225} \cdot \ln \left[\frac{8}{\pi(2 \cdot 11,34 - 1)} \right] \right] = 0,653$$

$$k_i = 0,644 + 0,148 \cdot n = 0,644 + 0,148 \cdot 11,34 = 2,322$$

$$V_m = \frac{150 \cdot 4590 \cdot 0,649 \cdot 2,377}{711+0} = 1493,85 \text{ V}$$

A malha deverá atender a seguinte condição $V_m < V_{toque\ máxim o}$. Como o valor de $V_{toque_{MAX}}$ é 926,42 V, a condição não foi atendida e a malha deverá ser modificada.

10º Passo: Tensão de passo

Segue abaixo a fórmula do cálculo do potencial de malha, para efeitos de comparação com os resultados obtidos do software. Ressaltando que este critério apresenta maior facilidade para atender as exigências de segurança.

$$V_S = \frac{\rho_a I_M K_s K_i}{L_S}$$

Os valores de K_s e L_S ainda, não foram obtidos, portanto, segue abaixo as fórmulas e os cálculos destes fatores,

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

$$K_s = \frac{1}{\pi} \cdot \left[\frac{1}{2 \cdot 0,5} + \frac{1}{3+0,5} + \frac{1}{3} \cdot (1 - 0,5^{11,34-2}) \right] = 0,515$$

Para os condutores da malha temos a equação abaixo,

$$L_S = 0,75L_c + 0,85L_h = 0,75 \times 711 + 0,85 \times 0 = 533,25 \text{ m}$$

Finalmente temos que,

$$V_S = \frac{150 \cdot 4590 \cdot 0,515 \cdot 2,322}{522,25} = 1576,5 \text{ V}$$

O potencial máximo de passo permitido para o dimensionamento da SE é de $V_{passo_{MAX}} = 3039,61 \text{ V}$, portanto temos que $V_S < V_{passo_{MAX}}$.

A2 – 2º Modelo de malha : Aumento do número de condutores

Para este modelo, o número de condutores da malha será aumentado, sendo que os valores utilizados para malha são D é 1,8 m e h = 0,5 m. Segue abaixo os cálculos das dimensões do projeto.

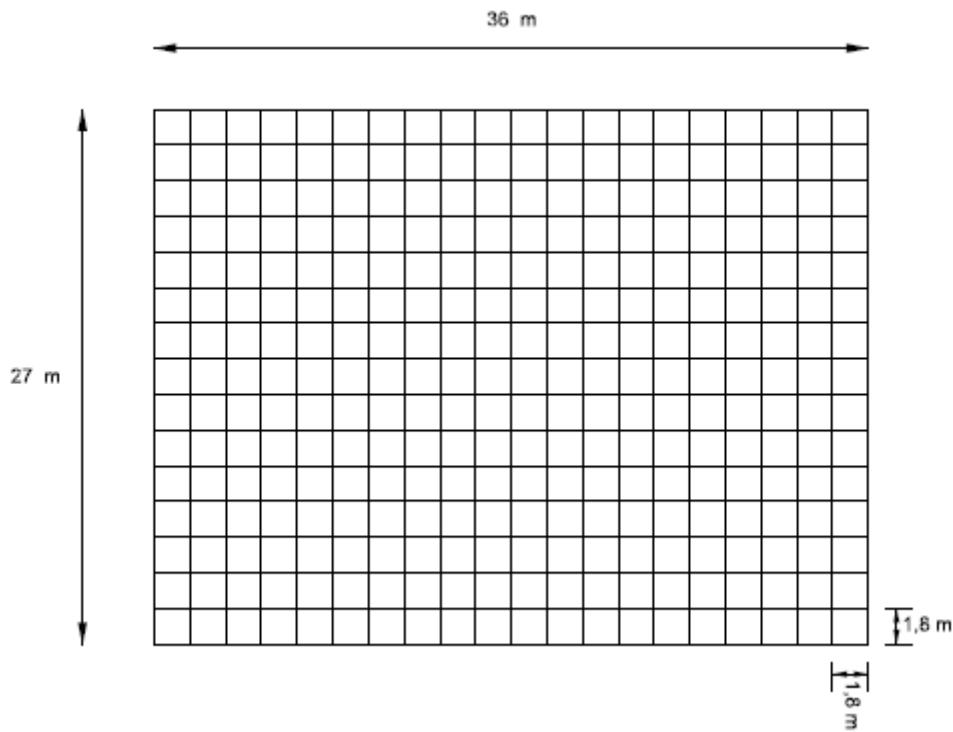


Figura A8 – 2º Modelo de malha de Aterramento – adição de condutores

$$N_a = \frac{36}{1,8} + 1 = 21$$

$$N_b = \frac{27}{1,8} + 1 = 16$$

$$L_c = aN_b + bN_a = 16 \times 36 + 21 \times 27 = 1143 \text{ m}$$

$$L_T = L_c + L_h = (16 \times 36 + 21 \times 27) + 0 = 1143 \text{ m}$$

$$L_p = 36.2 + 27.2, L_p = 126 \text{ m}$$

6º Passo: Determinação da resistência e da corrente da malha

$$R_M = \rho \left[\frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left(1 + \frac{1}{1 + h\sqrt{20/A}} \right) \right]$$

$$R_M = 2,21 \Omega$$

7º Passo: Corrente máxima de malha I_M e o Split Factor S_f

Com a divisão de corrente entre os circuitos da malha e dos cabos guarda da linha de transmissão temos:

$$I_M = \left(\frac{2,69}{2,21+2,69} \right) \times I_f = 4,67 \text{ kA}$$

$$I_{retorno} = \left(\frac{2,21}{2,21+2,69} \right) \times I_f = 3,83 \text{ kA}$$

Com isso, temos que o fator de split factor será de:

$$S_f = \frac{I_M}{3I_o} = 0,549$$

8º Passo: GPR

$$\text{GPR} = 2,21 \times 4,67 \text{ kA} = 10320,7 \text{ V}$$

Para que as condições de segurança da malha sejam atendidas, o seguinte critério deve ser válido, $\text{GPR} \leq V_{toque}$. Como o GPR excede o valor de toque máximo tolerável, as análises dos potencias da malha continuarão normalmente.

9º Passo: Tensão de rede

Segue abaixo os cálculos de K_m

Como a malha em questão possui formato retangular, os valores de n_c e n_d serão iguais a 1 e n_a e n_b serão calculados. Segue abaixo a resolução,

$$n_a = \frac{2L_c}{L_p} = \frac{2.1134}{36x2+27x2} = 18,0$$

$$n_b = \sqrt{\frac{L_p}{4 \cdot \sqrt{A}}} = \sqrt{\frac{126}{4 \cdot \sqrt{972}}} = 1,005$$

$n_c = 1$, para malha retangular

$n_d = 1$, para malha retangular

$$n = n_a \cdot n_b \cdot n_c \cdot n_d = 18,09$$

$$K_{ii} = \frac{1}{(2n)^{\frac{2}{n}}} = \frac{1}{(2 \times 18,09)^{\frac{2}{18,09}}} = 0,673$$

e,

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_0}} = \sqrt{1 + \frac{0,5}{1,0}} = 1,225$$

Portanto,

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \cdot \left[\ln \left[\frac{1,8^2}{16,0,5,0,01} + \frac{(1,8+2,0,5)^2}{8,1,8,0,01} - \frac{0,5}{4,0,01} \right] + \frac{0,673}{1,225} \cdot \ln \left[\frac{8}{\pi(2 \times 18,09 - 1)} \right] \right] = 0,472$$

$$k_i = 0,644 + 0,148 \cdot n = 0,644 + 0,148 \cdot 18,09 = 3,321$$

Finalmente temos,

$$V_m = \frac{150 \cdot 4670 \cdot 0,472 \cdot 3,321}{1134+0} = 969,29 \text{ V}$$

A malha deverá atender a seguinte condição $V_m < V_{toque \text{ } m\text{áximo}}$. Como o valor de $V_{toque MAX}$ é 926,42 V, a condição não foi atendida e a malha deverá ser modificada.

10º Passo: Tensão de passo

Segue abaixo a fórmula do cálculo do potencial de malha, para efeitos de comparação a exemplo do modelo anterior.

$$K_s = \frac{1}{\pi} \cdot \left[\frac{1}{2,0,5} + \frac{1}{1,8+0,5} + \frac{1}{1,8} \cdot (1 - 0,5^{18,09-2}) \right] = 0,633$$

Para os condutores da malha temos a equação abaixo,

$$L_s = 0,75L_c + 0,85L_h = 0,75 \times 1143 + 0,85 \times 0 = 857,25 \text{ m}$$

Finalmente temos que,

$$V_S = \frac{150.4670.0,633.3,321}{857,25} = 1288,35 \text{ V}$$

O potencial máximo passo permitido para o dimensionamento da SE é de $V_{\text{passo MAX}} = 3039,61 \text{ V}$, portanto temos que $V_S < V_{\text{passo MAX}}$.

A3 – 3º Modelo de malha: Adição de hastas de aterramento ao redor da malha

Para este modelo, o número de condutores da malha é mantido, porém hastas de aterramento são adicionadas em sua periferia com o objetivo de diminuir o potencial de toque. O valor utilizado para D é de 1,8 m, $h = 0,5 \text{ m}$ e 18 hastas de 3m cada são alocadas ao redor da malha, com mostra a figura abaixo. Segue abaixo os cálculos das dimensões da malha.

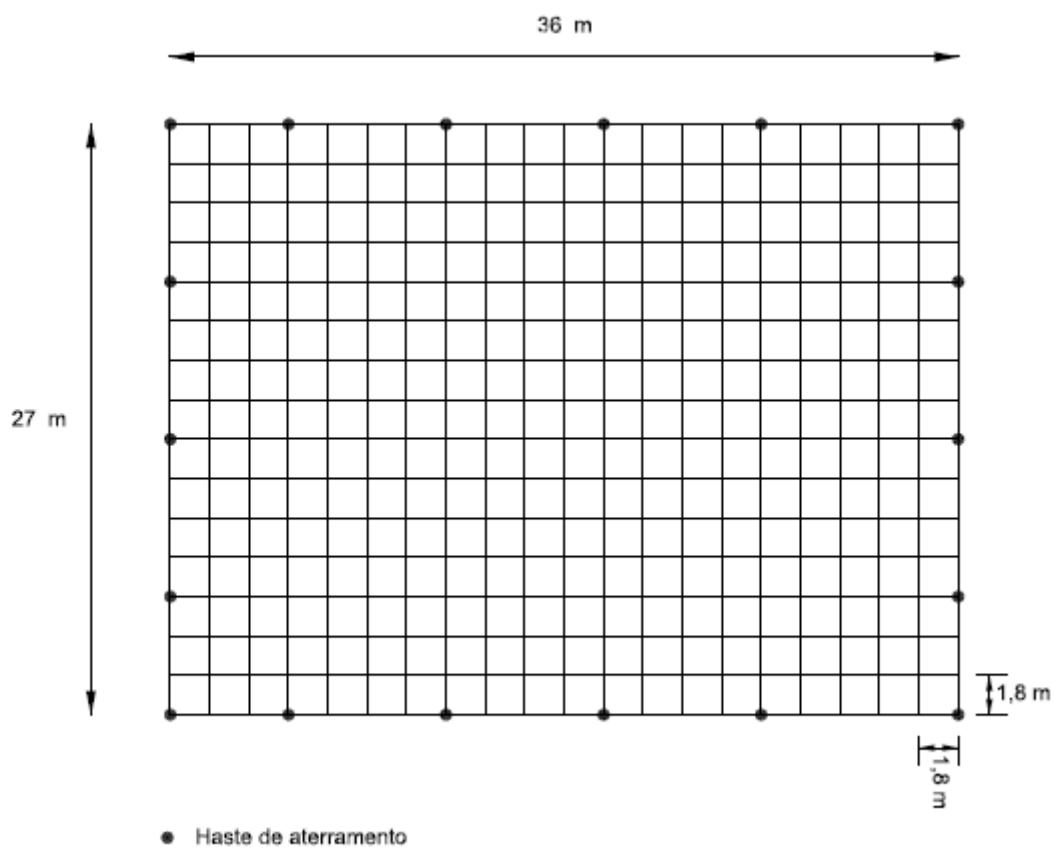


Figura A9 – 3º Modelo de malha de Aterramento – Adição de hastes de aterramento na periferia da malha

$$N_a = \frac{36}{1,8} + 1 = 21$$

$$N_b = \frac{27}{1,8} + 1 = 16$$

$$L_c = aN_b + bN_a = 16 \times 36 + 21 \times 27 = 1134 \text{ m}$$

$$L_T = L_c + L_h = (16 \times 36 + 21 \times 27) + 18 \times 3 = 1188 \text{ m}$$

$$L_p = 36.2 + 27.2, L_p = 126 \text{ m}$$

6º Passo: Determinação da resistência e da corrente da malha

$$R_M = \rho \left[\frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left(1 + \frac{1}{1 + h\sqrt{20/A}} \right) \right]$$

$$R_M = 2,20 \Omega$$

7º Passo: Corrente máxima de malha I_M e o Split Factor S_f

A divisão de corrente entre os circuitos da malha e dos cabos guarda da linha de transmissão é mostrada abaixo:

$$I_M = \left(\frac{2,69}{2,20+2,69} \right) \times I_f = 4,68 \text{ kA}$$

$$I_{retorno} = \left(\frac{2,20}{2,20+2,69} \right) \times I_f = 4,49 \text{ kA}$$

Com isso, temos que o fator de split factor será de:

$$S_f = \frac{I_M}{3I_o} = 0,55$$

8º Passo: GPR

$$\text{GPR} = R_M \cdot I_M$$

$$GPR = 2,20 \times 4,68k = 10296,0 \text{ V}$$

Para que as condições de segurança da malha sejam atendidas, o seguinte critério deve ser válido, $GPR \leq V_{toque}$. Como o GPR excede o valor de toque máximo tolerável, as análises das potências da malha continuarão normalmente.

9º Passo: Tensão de rede

Como a malha em questão possui formato retangular, os valores de n_c e n_d serão iguais a 1 e n_a e n_b calculados. Segue abaixo a resolução,

$$n_a = \frac{2L_c}{L_p} = \frac{2.1134}{36x2+27x2} = 18,00$$

$$n_b = \sqrt{\frac{L_p}{4\sqrt{A}}} = \sqrt{\frac{126}{4\sqrt{972}}} = 1,005$$

$$n_c = 1, \text{ para malha retangular}$$

$$n_d = 1, \text{ para malha retangular}$$

$$n = n_a \cdot n_b \cdot n_c \cdot n_d = 18,09$$

Para malhas com hastes de aterrramento,

$$K_{ii} = 1$$

e,

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_0}} = \sqrt{1 + \frac{0,5}{1,0}} = 1,225$$

Portanto,

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \cdot \left[\ln \left[\frac{1,8^2}{16 \cdot 0,5 \cdot 0,01} + \frac{(1,8+2,0,5)^2}{8 \cdot 1,8 \cdot 0,01} - \frac{0,5}{4 \cdot 0,01} \right] + \frac{1,0}{1,225} \cdot \ln \left[\frac{8}{\pi(2x18-1)} \right] \right] = 0,361$$

$$k_i = 0,644 + 0,148 \cdot n = 0,644 + 0,148 \cdot 18 = 3,308$$

Finalmente temos,

$$V_m = \frac{\rho_a \cdot I_M \cdot K_m \cdot K_i}{L_C + \left[1.55 + 1.22 \left(\frac{L_r}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \right) \right] \cdot L_h} = \frac{150 \cdot 4680 \cdot 0,360 \cdot 3,328}{1134 + \left[1.55 + 1.22 \left(\frac{3}{\sqrt{36^2 + 27^2}} \right) \right] \cdot 54} = 688,20 \text{ V}$$

A malha deve atender a seguinte condição $V_m < V_{toque\ máx}.$ Como o valor de $V_{toque\ MAX}$ é 688,20 V, a condição anterior é válida e os demais itens da malha serão calculados.

10º Potencial de Passo na Malha

Os valores de K_s e L_s ainda não foram obtidos, portanto, segue abaixo suas respectivas fórmulas e os cálculos destes fatores,

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

$$K_s = \frac{1}{\pi} \cdot \left[\frac{1}{2 \cdot 0,5} + \frac{1}{1,8+0,4} + \frac{1}{1,8} \cdot (1 - 0,5^{18,09-2}) \right] = 0,693$$

Para os condutores da malha temos a equação abaixo,

$$L_s = 0,75L_c + 0,85L_h = 0,75 \times 1134 + 0,85 \times 54 = 896,4 \text{ m}$$

Finalmente temos que,

$$V_s = \frac{150.4680.0,693.3,308}{896,4} = 1795,28 \text{ V}$$

Temos que o potencial máximo permitido para o dimensionamento da SE é de $V_{passo\ MAX} = 3039,61 \text{ V}.$ Portanto, $V_s < V_{passo\ MAX}$ e a malha está dentro dos critérios de tensão estabelecidos.

Potencial de Toque na Cerca Perimetral

Considera-se que a malha do estudo de caso em questão está delimitada por uma cerca metálica. Nestes casos o potencial da cerca também deve ser verificado. Segue abaixo os cálculos e critérios que devem ser atendidos,

$$V_{cerca} = \frac{\rho_a \cdot I_M \cdot K_c \cdot K_i}{L_{cerca}}$$

Os valores de K_c ainda não foram obtidos, portanto, segue abaixo a fórmula e o cálculo deste fator,

$$K_c = \frac{1}{2\pi} \left\{ \ln \left[\frac{(h^2+x^2) \cdot [h^2+(e+x)^2]}{h \cdot d(h^2+x^2)} \right] + 2 \ln \left\{ \left[\frac{2e+x}{2e} \right] \left[\frac{3e+x}{3e} \right] \cdots \left[\frac{(N-1)e+x}{(N-1)e} \right] \right\} \right\}$$

Para $K_c(x=0)$ e $K_c(x=1)$ temos os seguintes valores,

$$K_c(x=0) = 1,17$$

$$K_c(x=1) = 1,55$$

$$\text{Sendo assim, } K_c = K_c(x=1) - K_c(x=0) = 0,38$$

$$V_{cerca} = \frac{150 \cdot 4680 \cdot 0,38 \cdot 3,308}{1134 + 1,15 \cdot 54} = 737,766 \text{ V}$$

Portanto, temos que $V_{cerca} \leq V_{toque\ máximo}$, e assim, chega-se a um modelo final de malha.

13. Apêndice B – Faltas Fase-terra e Fase-fase-terra

13.1. Falta Fase-terra

Este é o tipo de falta com o maior índice de ocorrência (grau de incidência de 70%).

Seguem os cálculos para definir a equação para a corrente de falta fase-terra.

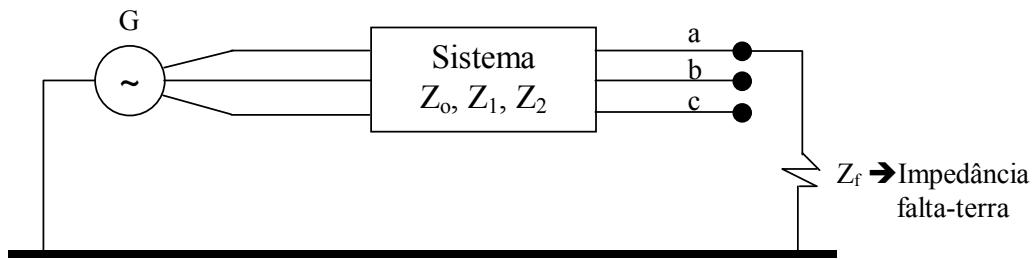


Figura B1 – Configuração da falta fase-terra

Sendo Z_a, Z_b, Z_c : impedâncias do sistema, vistos a partir do ponto de defeito;

E_a, E_b, E_c : tensões equivalentes – f.e.m. de sequência positiva

a) Condições no ponto de falta:

$$V_a = Z_f \cdot I_a$$

$$I_b = 0$$

$$I_c = 0$$

Desprezam-se as correntes de carga.

a1) Correntes:

$$\begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$I_{a0} = I_{a1} = I_{a2} = \frac{1}{3} \cdot I_a$$

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ E_1 \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_1 & 0 \\ 0 & 0 & Z_2 \end{bmatrix} \cdot \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} I_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$V_{a0} = -Z_0 \cdot \frac{1}{3} \cdot I_a$$

$$V_{a1} = E_1 - Z_1 \cdot \frac{1}{3} \cdot I_a$$

$$V_{a2} = -Z_2 \cdot \frac{1}{3} \cdot I_a$$

Retomando $V_a = Z_f \cdot I_a$

$$I_a = \frac{V_a}{Z_f} = \frac{\frac{-Z_0 \cdot I_a}{3} + E_1 - \frac{Z_1 \cdot I_a}{3} - \frac{Z_2 \cdot I_a}{3}}{Z_f}$$

Tirando I_a :

$$I_a = \frac{3E_1}{Z_0 + Z_1 + Z_2 + 3Z_f}$$

$$\frac{I_a}{3} = I_{ao} = I_{a1} = I_{a2} = \frac{3E_1}{Z_0 + Z_1 + Z_2 + 3Z_f}$$

Portanto, em uma ligação delta-estrela:

$$I_{ao} = \frac{1}{3} I_n \quad \text{e} \quad \therefore I_n = 3 I_{ao}$$

Corrente na fase A

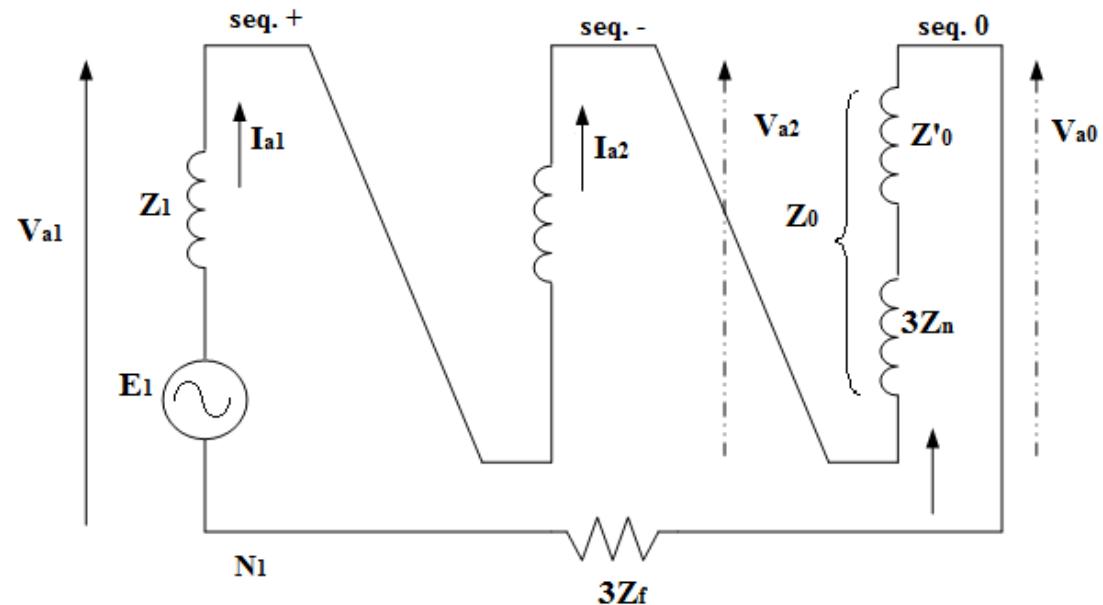


Figura B2 – Circuito Elétrico da configuração de falta fase-terra

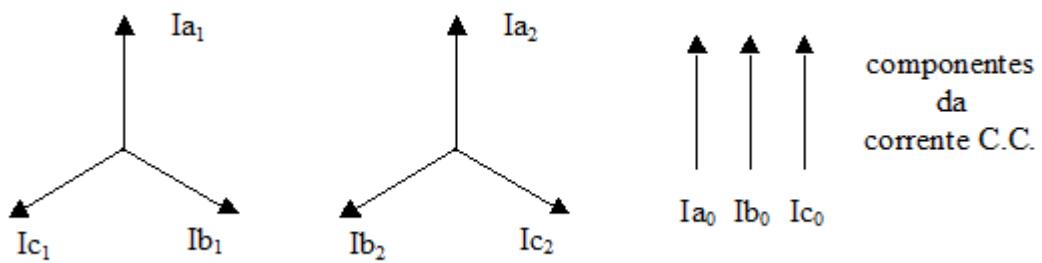


Figura B3 – Representação das sequências positivas, negativas e zero

13.2. Falta entre Fase-Fase

Este é o tipo de falta possui índice de ocorrência de 10% (grau de incidência de 10%).
Segue abaixo análises e fórmulas,

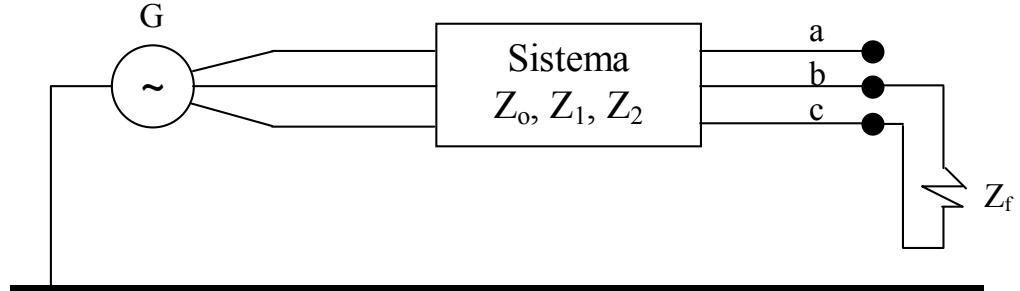


Figura B4 – Configuração da falta fase-fase

$$V_b - V_c = Z_f \cdot I_b \quad , \quad I_a = 0 \quad \text{e} \quad I_b = -I_c$$

Componentes Simétricos da corrente:

$$\begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ -I_c \\ I_c \end{bmatrix}$$

$$I_{a0} = 0, \therefore I_{b0} = I_{c0} = 0$$

$$I_{a2} = -I_{a1}$$

Componentes Simétricos da corrente:

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ E_1 \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_1 & 0 \\ 0 & 0 & Z_2 \end{bmatrix} \cdot \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} I_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$V_{a0} = -Z_0 \cdot I_{a0} = 0, \quad V_{a1} = E_{a1} - Z_1 \cdot I_{a1} = 0, \quad V_{a2} = Z_2 \cdot I_{a1} = 0$$

Analogamente:

$$V_{b0} = -Z_0 \cdot I_{b0} = 0, \quad V_{b1} = E_{b1} - Z_1 \cdot I_{b1} = 0, \quad V_{b2} = Z_2 \cdot I_{b1} = 0$$

$$V_{c0} = -Z_0 \cdot I_{c0} = 0, \quad V_{c1} = E_{c1} - Z_1 \cdot I_{c1} = 0, \quad V_{c2} = Z_2 \cdot I_{c1} = 0$$

Usando expressões análogas para V_b e V_c e partindo de $V_b - V_c = I_b \cdot Z_f$, chegamos a:

$$V_b = V_{b0} + V_{b1} + V_{b2}$$

$$V_c = V_{c0} + V_{c1} + V_{c2}$$

$$I_b = I_{b0} + I_{b1} + I_{b2}$$

$$V_{b0} = 0, V_{c0} = 0, I_{b0} = 0$$

$$I_{a1} = \frac{E_{a1}}{Z_f + Z_1 + Z_2}, \quad I_{a2} = -I_{a1}, \quad I_{a0} = 0$$

A corrente de falta será:

$$I_f = I_b = I_{b0} + I_{b1} + I_{b2} = a^2 \cdot I_{a1} + a \cdot I_{a2}$$

$$I_f = a^2 \cdot I_{a1} - a \cdot I_{a1} = (a^2 - a) I_{a1}$$

$$(a^2 - a) = -j\sqrt{3}$$

$$I_f = -j \frac{\sqrt{3} \cdot E_{a1}}{Z_1 + Z_2 + Z_f}$$

Círculo equivalente: o circuito de sequência 0 (zero) não é utilizado (não haverá circulação de corrente de neutro no gerador)

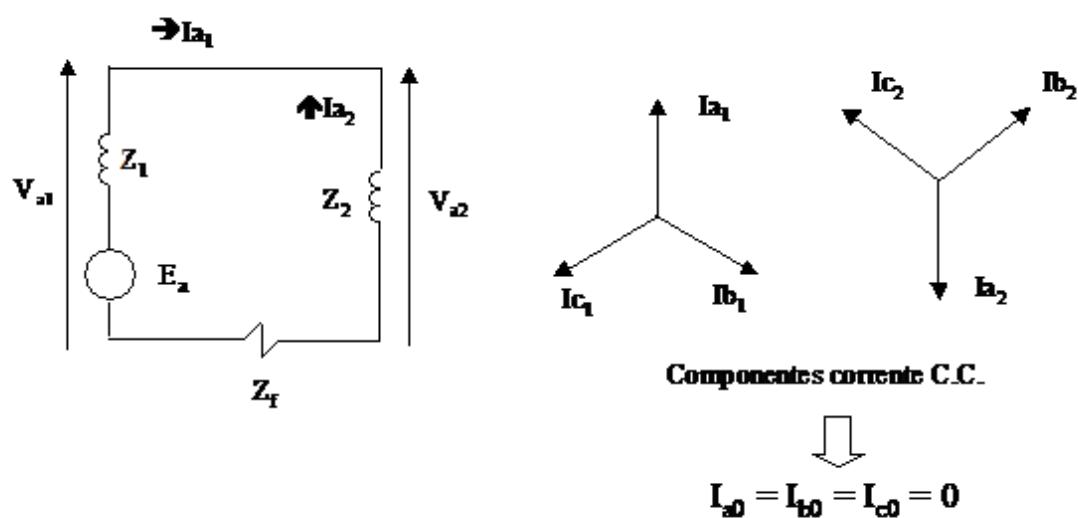


Figura B5 – Representação das sequências positivas, negativas e zero